

Department of Physics
School of Science
The University of Tokyo

Annual Report

2014

平成26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

ISSN 0910-0709

Department of Physics
School of Science
The University of Tokyo

Annual Report

2014

平成26年度 年次研究報告



東京大学 大学院 理学系研究科・理学部
物理学教室

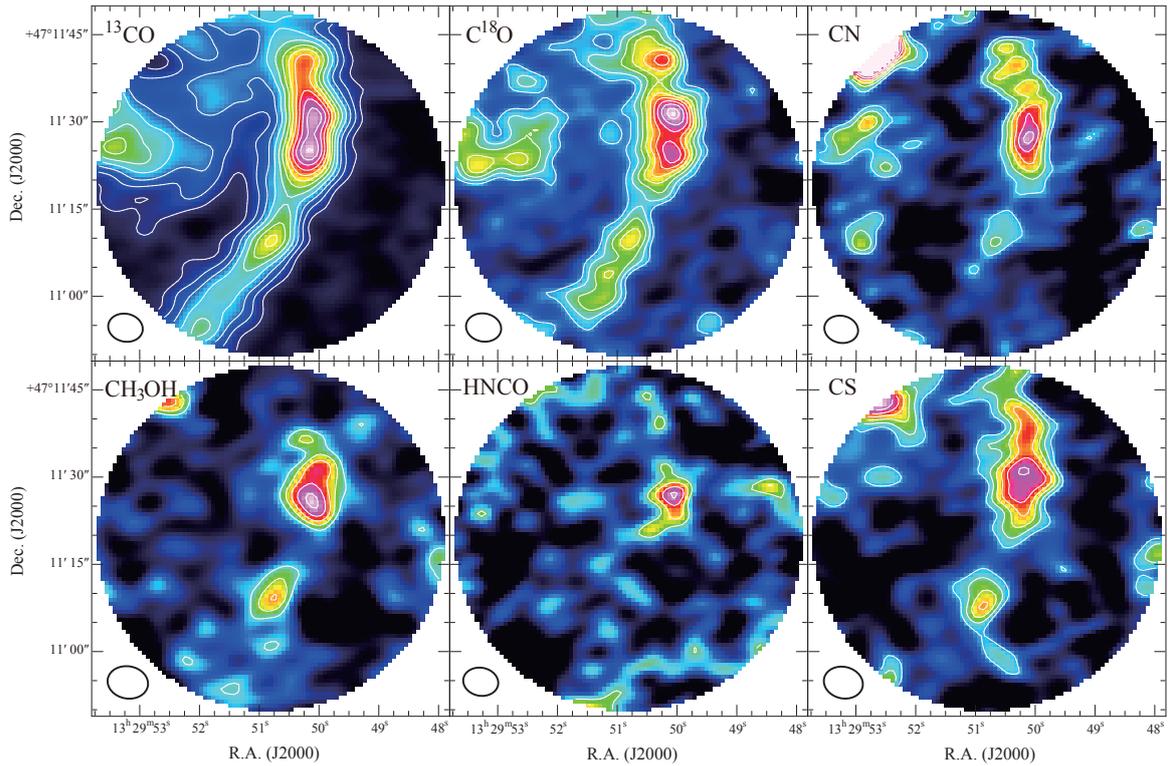


図 1: 近傍の円盤銀河 M51 の渦状腕に対して、CARMA 干渉計を用いたイメージング観測を実施した。観測から、 ^{13}CO 、 C^{18}O 、 CN 、 CS 、 CH_3OH 、 HNCO の分布を明らかにすることに成功した。それぞれの分子の分布が異なるが、星形成領域で存在量が顕著に増加する分子は見られず、このスケールの化学組成は星形成活動よりもガスダイナミクスなどの影響を強く反映していると考えられる。(山本研究室)

The high-resolution images of the 3 mm lines of CS , CH_3OH , HNCO , CN , C^{18}O , and ^{13}CO have been obtained with the CARMA interferometer toward the spiral arm of the nearby galaxy M51. Distributions are found to be different from molecule to molecule regardless of local star formation activities. Hence, the distributions probably reflect galactic-scale physical processes occurring in the spiral arm. (Yamamoto Group)

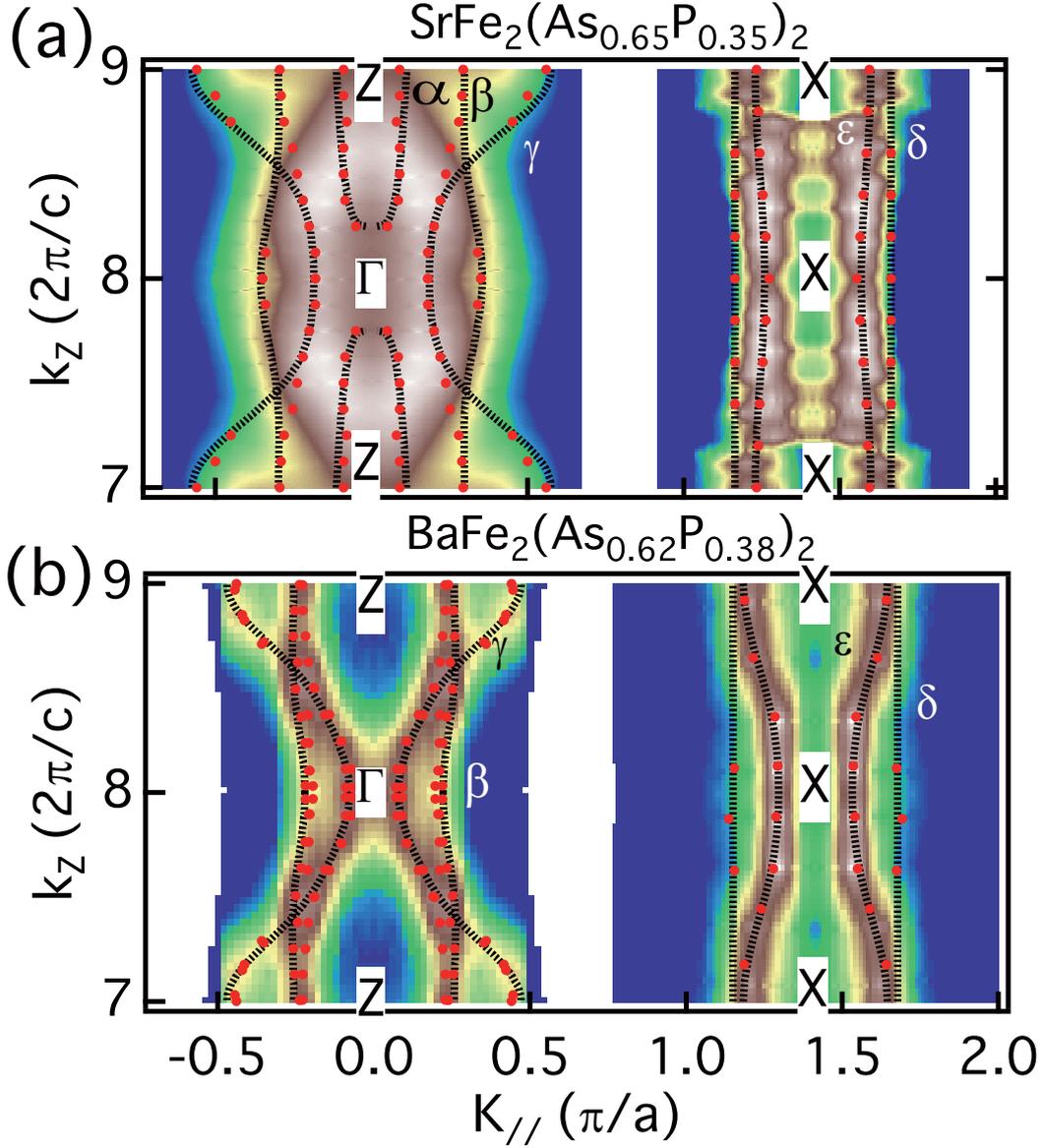


図 2: 角度分解光電子分光 (ARPES) によって観測した鉄系高温超伝導体のフェルミ面の断面。試料は(a) $\text{SrFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, (b) $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ 。 (a)、(b) それぞれの左側には運動量空間の原点を中心として広がるホール型フェルミ面が、右側には運動量空間のブリルアン域境界を中心として広がる電子型フェルミ面が示されている。横軸は層状結晶構造の面内方向運動量 k_{\parallel} , 縦軸はそれと垂直な方向の運動量 k_z を表す。 $\text{SrFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の方がより強い k_z 依存性を示しており、より強い層間の結合を反映している。フェルミ面全面に開いた超伝導ギャップの観測は、さらにエネルギー分解能を上げて行う。(藤森研究室)

Fermi surfaces of the ion-based high-temperature superconductors studied by angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES): (a) $\text{SrFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, (b) $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$. Each panel shows the hole-like Fermi surfaces centered at the origin of momentum space (left), and the electron-like Fermi surfaces centered at the Brillouin-zone boundary of momentum space (right). The horizontal axis k_{\parallel} is momentum parallel to the two-dimensional plane of the layered crystal structure, and the vertical axis k_z is momentum perpendicular to it. $\text{SrFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ shows a stronger modulation along the k_z direction, indicating stronger coupling between the planes. The superconducting gap which opens on the entire Fermi surfaces is measured with higher energy resolution. (Fujimori group)

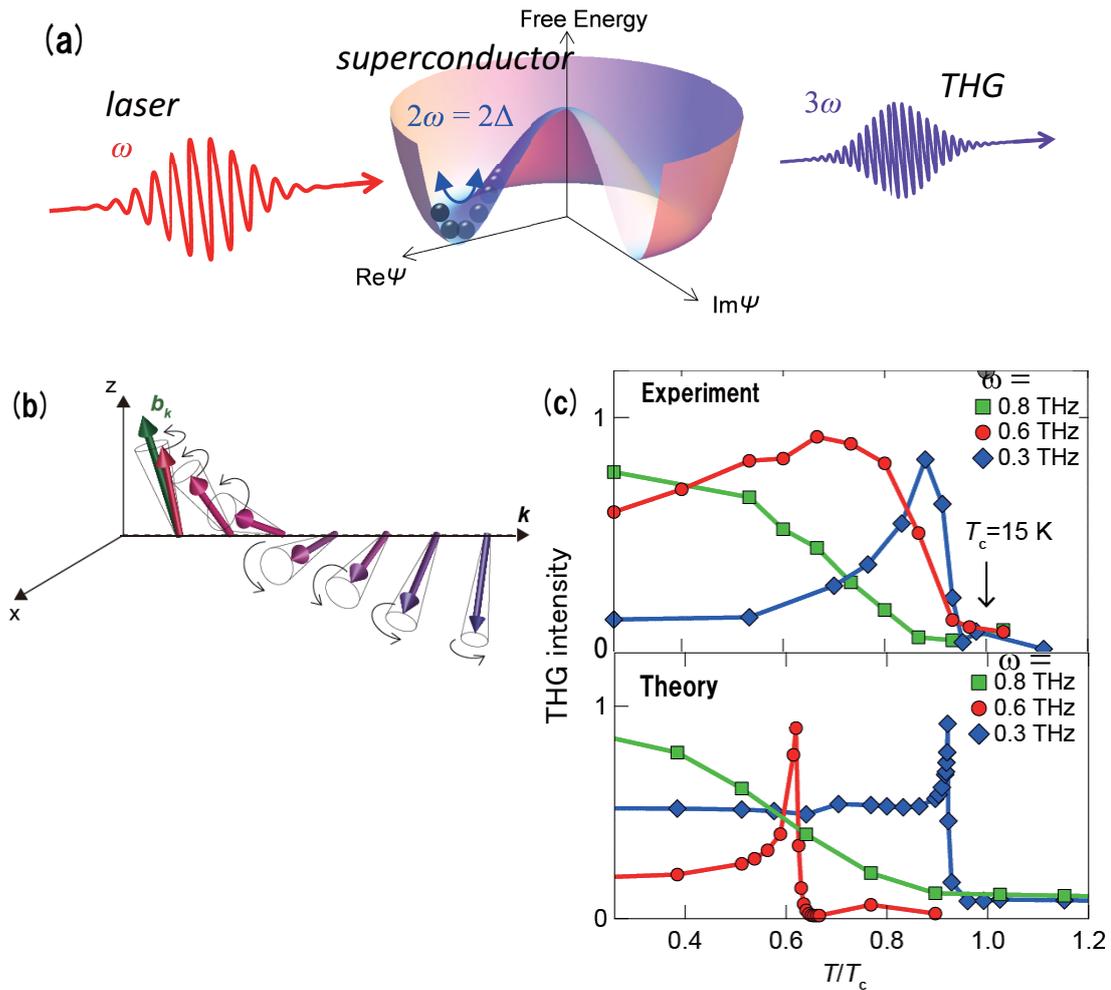


図 3: 超伝導体におけるヒッグス・モードの新奇な共鳴: (a) レーザー光 (周波数 ω) を超伝導体に照射すると、超伝導秩序パラメーター ψ の振幅の集団 (“ヒッグス”) モード (青矢印) が励起される。光子エネルギーの二倍 (2ω) が超伝導ギャップ 2Δ に一致すると、ヒッグス・モードはレーザー電場と共鳴的に結合し、強力な三次高調波 (周波数 3ω) という非線形光学効果を発現する。(b) 光励起されたヒッグス (振幅) モードは、超伝導体を記述するためにアンダーソンにより 1958 年に導入された擬スピンの集団歳差運動と見なせる。(c) 三次高調波の実験および理論結果を、超伝導転移温度 T_C で規格化された温度依存性として、様々な入射光子エネルギーに対して示す。(島野研・青木研の共同研究)

A novel resonance with Higgs mode in a superconductor: (a) When a laser beam of frequency ω is irradiated on a superconductor, a collective “Higgs” oscillation (blue arrow in the wine-bottle profile of the broken-symmetry free energy) in the amplitude of the superconducting order parameter ψ is excited. When twice the photon energy (2ω) coincides with the superconducting gap 2Δ , the Higgs mode resonantly couples with the radiation field and gives rise to an efficient third-harmonic generation (THG) with frequency 3ω as an emergent nonlinear optical response in the superconductor. (b) The light-induced Higgs (collective amplitude) mode can be viewed as a collective precession of the pseudospins, which were introduced by P.W. Anderson in 1958 to describe superconductors. (c) Experimental and theoretical results for the THG intensity against temperature normalized by the superconducting transition temperature T_C for various values of the incident photon energy. (Collaboration of Shimano group and Aoki group).

序

平成 27 年度 (2014 年 4 月-2015 年 3 月) 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、教員の異動についてですが、桂法称准教授 (物性理論: 学習院大学より)、湯本潤司教授 (フォトンサイエンス: NEL アメリカより)、Kathrin Wimmer 講師 (原子核実験: 中央ミシガン大学より)、北川健太郎講師 (物性実験: 高知大学より) が着任、また、助教として、山本新氏 (福嶋研)、諏訪秀磨氏 (藤堂研)、高山あかり氏 (長谷川研)、道村唯太氏 (安東研)、芝田悟朗氏 (藤森研)、西岡辰磨氏 (立川研)、明石遼介氏 (常行研)、秋山了太氏 (長谷川研)、森田悠介氏 (五神研) が着任されました。また、牧島一夫先生が本年度定年を迎えられました。他に転出として、岡崎浩三助教 (藤森研) が物性研特任准教授に、平原徹助教 (長谷川研) および竹内一将助教 (佐野研) が東工大准教授に、坂井南美助教 (山本研) が理研准主任研究員に、辻直人特任助教 (青木研) が理研研究員として転出されました。本年度も教室関係者の活発な研究・教育活動の結果、多くの方が受賞されています。佐藤勝彦名誉教授が文化功労賞を受章されました。また、牧島一夫教授が日本学士院賞を、立川裕二准教授が Herman-Weyl 賞と西宮湯川記念賞を、桂准教授、辻直人助教 (青木研)、松永隆佑助教 (島野研)、小西邦昭助教 (フォトンサイエンス)、高山あかり助教 (長谷川研) が第 9 回日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。また伊藤創祐君、杉浦祥君、白崎正人君、川口喬吾君が平成 26 年度理学系研究科研究奨励賞 (博士課程) を、石垣真史君、内田悠介君、中川桂君、村下湧音君が研究奨励賞 (修士課程) を、榎本雄太郎君、真野智之君、山田昌彦君が平成 26 年度理学部学修奨励賞を受賞しました。教室では若手のサポートの強化に努めています。GCOE プログラム「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」などの制度は平成 24 年度で終了しましたが、博士課程研究遂行協力制度、物理学専攻独自の博士課程リサーチアシスタント制度などにより学生への支援を行っています。また平成 23 年度から開始されたリーディング大学院「Advanced Leading Graduate Course for Photon Science (ALPS)」は、博士コース一貫教育、広く社会へのキャリアパスをめざした制度であり、今年 5 年目を迎えます。また、平成 24 年度からは「統合物質科学リーダー養成プログラム (MERIT)」、「数物フロンティアリーディング大学院 (FMSP)」のリーディング大学院も開始され、物理学専攻もこれらに参加しています。物理教室では、これからも大学や学科・専攻のあり方について真剣に考え、世界に発信できる物理学教室として、基礎研究の面白さや重要性をアピールして行きたいと思っています。今後とも、先輩の先生方、関係各位の皆様のご支援のほど、よろしくお願い申し上げます。

この年次研究報告は、立川裕二准教授、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。

2015 年 5 月 1 日
物理学専攻専攻長・教室主任
佐野 雅己

目次

I	研究室別 2014 年度 研究活動報告	1
1	原子核・素粒子理論	3
1.1	原子核理論 (大塚・福嶋) 研究室	3
1.2	素粒子論研究室 (諸井・浜口・松尾・立川)	11
1.2.1	現象論	11
1.2.2	弦理論、場の理論全般	13
2	原子核・素粒子実験	18
2.1	原子核実験グループ 【早野・櫻井・Wimmer】	18
2.1.1	反物質の研究 (早野研究室)	18
2.1.2	π 中間子原子の逆運動学による分光 (早野研究室)	19
2.1.3	η' 中間子原子核の研究 (早野研究室)	19
2.1.4	二重魔法数核 ^{78}Ni 近傍の核構造研究 (櫻井研究室)	19
2.1.5	逆転の島領域の核構造研究 (櫻井研究室)	19
2.1.6	中性子過剰核におけるクラスター状態の研究 (櫻井研究室)	20
2.1.7	陽子ドリップライン核における欠損質量分光 (櫻井研究室)	20
2.1.8	粒子識別能向上の為の全運動エネルギー検出器の開発 (櫻井研究室)	20
2.1.9	直接反応によるエキゾチック核の核分光 (Wimmer 研究室)	21
2.2	駒宮研究室	26
2.2.1	電子・陽電子リニアコライダー ILC 計画	26
2.2.2	LHC 実験	28
2.2.3	小規模実験	28
2.3	蓑輪 研究室	31
2.3.1	Sumico, Tokyo Axion Helioscope	31
2.3.2	原子炉ニュートリノモニター	32
2.3.3	Hidden photon ダークマター探索	33
2.4	相原・横山研究室	34
2.4.1	(スーパー) B ファクトリー実験	35
2.4.2	HSC 暗黒エネルギー研究	36
2.4.3	T2K 長基線ニュートリノ振動実験	37
2.4.4	陽子崩壊の探索	38
2.4.5	次世代大型水チェレンコフ検出器・ハイパーカミオカンデ	38
2.5	浅井研究室	42
2.5.1	LHC・ATLAS 実験での研究	42
2.5.2	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	43
3	物性理論	51
3.1	青木研究室	51
3.1.1	超伝導	51
3.1.2	トポロジカル系	52

3.1.3	非平衡	52
3.1.4	その他	54
3.2	宮下研究室	57
3.2.1	量子ダイナミクス	57
3.2.2	協力現象の統計力学	58
3.2.3	局所格子構造のちがう双安定系での協力現象の研究	58
3.2.4	確率過程	59
3.2.5	統計力学の基礎的研究	59
3.3	小形研究室	61
3.3.1	高温超伝導の理論	62
3.3.2	ディラック電子系	62
3.3.3	有機導体に関する理論	63
3.3.4	トポロジカル物質の理論	64
3.3.5	重い電子系および多軌道電子系理論	64
3.3.6	磁性体およびスピン軌道相互作用	65
3.4	常行研究室	68
3.4.1	シミュレーション手法の開発	68
3.4.2	シミュレーション手法の応用	70
3.5	藤堂研究室	75
3.5.1	強相関多体系における新奇な状態の探索と相転移・臨界現象	75
3.5.2	強相関多体系に対する新たな計算手法の開発	76
3.5.3	次世代並列シミュレーションのためのオープンソース・ソフトウェアの開発	77
3.6	桂研究室	79
3.6.1	強相関電子系	79
3.6.2	可解模型	79
4	物性実験	82
4.1	藤森研究室	82
4.1.1	高温超伝導	82
4.1.2	スピントロニクス, 界面	83
4.2	長谷川研究室	88
4.2.1	表面電子・スピン輸送	89
4.2.2	表面ナノ構造	90
4.2.3	新しい装置・手法の開発	90
4.3	福山研究室	94
4.3.1	2次元の量子凝縮相研究	94
4.3.2	グラフェンの電子物性研究	96
4.4	岡本 研究室	99
4.4.1	劈開表面に形成された2次元電子系	99
4.4.2	金属超薄膜の超伝導	101
4.4.3	磁性金属超薄膜の電気伝導	102
4.5	島野研究室	103
4.5.1	半導体高密度電子正孔系	103
4.5.2	光による超伝導状態制御	104
4.5.3	グラフェンにおける相対論的電気磁気光学	106
4.6	高木・北川研究室	108
4.6.1	イリジウム複合酸化物におけるスピン軌道相互作用に誘起された新奇電子相の開拓	109
4.6.2	エキゾチック半金属の探索	109
4.6.3	薄膜超格子構造を用いた新奇電子相の開拓	110
5	一般物理理論	114

5.1	宇宙理論研究室 (須藤・吉田)	114
5.1.1	観測的宇宙論	114
5.1.2	系外惑星	118
5.1.3	星形成	119
5.2	村尾研究室	126
5.2.1	量子計算における因果性・並列性・非局所性の解析	126
5.2.2	分散型量子計算	127
5.2.3	多体エンタングルメント理論	128
5.2.4	量子アルゴリズムおよび量子シミュレーション	129
5.2.5	連続変数を用いた量子暗号	129
5.3	上田研究室	132
5.3.1	冷却原子気体	132
5.3.2	量子論・統計力学と情報理論の融合	133
6	一般物理実験	137
6.1	牧島研究室+中澤研究室	137
6.1.1	はじめに	137
6.1.2	科学衛星の運用と稼働状況	137
6.1.3	強磁場中性子星の研究	137
6.1.4	質量降着する弱磁場中性子星	138
6.1.5	超新星残骸の研究	139
6.1.6	質量降着するブラックホール	140
6.1.7	銀河団の研究	141
6.1.8	雷雲ガンマ線の研究	142
6.1.9	ASTRO-H衛星計画	142
6.1.10	将来計画	143
6.2	高瀬研究室	149
6.2.1	TST-2実験の概要	149
6.2.2	高周波プラズマ立ち上げ実験	149
6.2.3	OHプラズマ実験	151
6.2.4	計測器開発	151
6.2.5	共同研究	152
6.3	佐野研究室	157
6.3.1	巨視的非平衡系の物理	157
6.3.2	小さな非平衡系の物理	158
6.3.3	アクティブマターの物理	159
6.3.4	生命現象の物理	160
6.4	山本研究室	164
6.4.1	はじめに	164
6.4.2	星形成の観測研究	164
6.4.3	系外銀河の分子組成	167
6.4.4	テラヘルツ帯観測技術の開拓	167
6.5	酒井広文 研究室	170
6.5.1	レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展	170
6.5.2	配列した分子中から発生する高次高調波の楕円率依存性	172
6.5.3	硫化カルボニル分子のトンネルイオン化における配向依存性	173
6.5.4	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	173
6.5.5	配列した分子中から発生する第三高調波の偏光特性の時間発展の評価	174
6.5.6	その他	174
6.6	五神研究室	175

6.6.1	物質系の巨視的量子現象の探索	176
6.6.2	非自明な光学現象の探索とその応用	177
6.6.3	新規コヒーレント光源開発と新しい分光手法開拓	178
6.7	安東研究室	182
6.7.1	大型重力波検出器 KAGRA	182
6.7.2	宇宙空間レーザー干渉計	183
6.7.3	ねじれ型重力波検出器 TOBA	183
6.7.4	中間質量ブラックホール連星の探査	183
6.7.5	低温光共振器を用いた超高安定化レーザー光源	184
6.7.6	相対論・量子光学精密実験	184
7	生物物理	188
7.1	能瀬研究室	188
7.1.1	神経回路の活動ダイナミクス	188
7.1.2	運動出力ダイナミクスの回路機構	190
7.1.3	運動神経回路を構成する神経細胞の同定	191
7.2	樋口研究室	193
7.2.1	ヒト細胞質ダイニンのパワーストローク測定	193
7.2.2	ミオシン集合体の力・変位測定およびシミュレーション解析	193
7.2.3	ミオシン集合体内の1分子の運動のイメージング	194
7.2.4	PAR-1のエンドサイトーシス過程の3次元イメージング	194
7.2.5	非侵襲がん細胞の観察	194
7.2.6	がん幹細胞の紫外線耐久性	194
8	技術部門	197
8.1	実験装置試作室	197
8.1.1	利用状況	197
8.1.2	工作実習	197
8.2	技術室	197
8.2.1	安全衛生	197
8.2.2	IT 関連業務	197
8.2.3	学生実験	198
8.2.4	研究支援	198
8.2.5	全学技術研修	198
8.2.6	各種委員会	198
II	Summary of group activities in 2014	201
1	Theoretical Nuclear Physics Group	203
2	Theoretical Particle and High Energy Physics Group	204
3	Hayano Group	206
4	Sakurai Group	208
5	Wimmer Group	209
6	Komamiya group	209
7	Minowa-Group	210
8	Aihara & Yokoyama Group	211
9	Asai group	212
10	Aoki Group	213
11	Miyashita Group	214
12	Ogata Group	215
13	Tsuneyuki Group	216

14	Todo Group	217
15	Katsura Group	218
16	Fujimori Group	219
17	Hasegawa Group	219
18	Fukuyama Group	220
19	Okamoto Group	222
20	Shimano Group	222
21	Takagi-Kitagawa Group	223
22	Theoretical Astrophysics Group	224
23	Murao Group	226
24	Ueda Group	227
25	Makishima Group & Nakazawa Group	228
26	Takase Group	229
27	Sano Group	230
28	Yamamoto Group	231
29	Sakai (Hirofumi) Group	232
30	Gonokami Group	233
31	Ando Group	234
32	Nose Group	235
33	Higuchi Group	236

III 2014年度 物理学教室全般に関する報告 239

1	学部講義概要	241
1.1	2年生 冬学期	241
1.1.1	電磁気学 I : 早野 龍五	241
1.1.2	解析力学/量子力学 I : 吉田 直紀, 村尾 美緒	242
1.1.3	物理実験学 : 福山 寛, 山本 智	242
1.1.4	物理数学 I : 常行 真司	242
1.1.5	物理数学 II : 立川 裕二	243
1.2	3年生 夏学期	243
1.2.1	電磁気学 II : 島野 亮	243
1.2.2	量子力学 II : 浜口 幸一	243
1.2.3	現代実験物理学 I : (前半) 溝川 貴司, (後半) 長谷川 修司	244
1.2.4	流体力学 : 江尻 晶	244
1.2.5	統計力学 I : 佐野 雅己	245
1.3	3年生 冬学期	245
1.3.1	物理数学 III: 上田 正仁	245
1.3.2	量子力学 III : 福嶋 健二	245
1.3.3	固体物理学 I : 岡本 徹	245
1.3.4	現代実験物理学 II : 安東 正樹, 中澤 知洋	246
1.3.5	電磁気学 III : 櫻井 博儀	246
1.3.6	生物物理学 : 樋口 秀男, 能瀬 聡直	247
1.3.7	統計力学 II : 小形 正男	247
1.4	4年生 夏学期	247
1.4.1	場の量子論 I : 松尾 泰	247
1.4.2	サブアトム物理学 : 駒宮 幸男	248
1.4.3	一般相対論 : 須藤 靖	248
1.4.4	宇宙物理学 : 牧島 一夫	249
1.4.5	プラズマ物理学 : 高瀬 雄一	249

1.4.6	固体物理学 II : 高木 英典	249
1.4.7	量子光学 : 酒井 広文	250
1.4.8	生物物理学特論 : 豊島 近, 新井 宗仁, 樋口 秀男	250
1.4.9	統計力学特論 : 宮下 精二	251
1.5	4年生 冬学期	251
1.5.1	化学物理学 : 藤森 淳	251
1.5.2	素粒子物理学: 横山 将志	251
1.5.3	場の量子論 II : 諸井 健夫	251
1.5.4	原子核物理学 : 大塚孝治	251
1.5.5	固体物理学 III : 青木 秀夫	252
1.5.6	電子回路論 : 勝本 信吾	252
1.5.7	現代物理学入門: 浅井 祥仁, 藤堂 眞治	252
1.5.8	先端物理数学 : 大栗 博司	253
2	各賞受賞者紹介	254
2.1	佐藤勝彦 名誉教授	254
2.2	牧島一夫 教授	254
2.3	立川裕二 准教授	254
2.4	桂法称准教授	255
2.5	辻直人助教 (青木研)	255
2.6	松永隆佑助教 (島野研)	255
2.7	小西邦昭助教 (理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構)	255
2.8	高山あかり助教 (長谷川研)	256
2.9	加藤康作氏 (酒井広文研、現 大阪大学)	256
2.10	一ノ倉聖氏 (長谷川研)	256
2.11	平成 26 年度 理学部・理学系研究科奨励賞	257
3	人事異動	258
4	役務分担	259
5	教室談話会	260
6	物理学教室コロキウム	262
7	金曜ランチトーク	264

I

研究室別 2014年度 研究活動報告

1 原子核・素粒子理論

1.1 原子核理論(大塚・福嶋)研究室

原子核物理学の理論研究では、原子核やハドロンに関係した広範囲の理論的研究を行っている。その活動は主に二つに分けられる。一つは多数の核子から成る量子多体系としての原子核の構造とそれを支配する動力学についての研究であり、一般に「原子核構造」と呼ばれている分野である。二つ目は、ハドロンの多体系の構造や運動を、量子色力学に基づいて研究する分野で、「ハドロン物理学」と呼ばれる。

「原子核構造」は大塚孝治教授、阿部喬助教、博士研究員と大学院学生らによって、「ハドロン物理学」は福嶋健二准教授、山本新助教、博士研究員と大学院生らによって世界的にも先端を行く研究が活発に行われた。ここではそれらの活動と成果の概要を述べる。

原子核構造

原子核構造と言われる分野には色々な問題が含まれるが、我々の研究室では

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

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

安定核とは、我々の身のまわりの物質を構成している原子核で、陽子の数と中性子の数はほぼ等しいか、中性子の方が少し多い程度である。名前のとおり、無限に長いか、十分に長い寿命を持っている。一方、これから話題にするエキゾチック核とは、陽子数と中性子数がアンバランスな、安定核から見れば特異(エキゾチック)なものである。アンバランスのために寿命が短く、不安定核と呼ばれることもある。短い寿命のために、実験の対象にするには人工的に作らなければならない。そこで稀少なものでもあり、英語では Rare Isotope (RI; 稀少アイソトープ)とも呼ばれる。エキゾチック核は、陽子数と中性子数の比のアンバランスのために、様々な特異な量子

的性質を示すことが分かってきた。つまり、未知の性質や現象に満ち溢れたフロンティアでもある。その例として、魔法数が増えられる。原子の場合と同じように原子核でも(陽子或は中性子の数としての)魔法数があり、構造上決定的な役割を果たす。魔法数は1949年のメイヤー・イェンゼンの論文以来、安定核では2, 8, 20, 50, 82, 126 という決まった数であった。しかし、不安定核の殻構造(一粒子軌道エネルギーのパターン)は陽子や中性子の数によって変わり(殻進化と言う)、不安定核での魔法数は安定核のそれとは異なることが最近判明しつつある。その原因は核力のスピン・アイソスピン依存性、特にテンソル力のそれによるものが大きい、ということも2005年頃から分かってきた。これは我々の研究室から発信された予言であり、その影響する範囲の広さとインパクトの大きさから世界の原子核研究に明確な指針を与えてきた。それを受けて、2010年1月に Phys. Rev. Lett. に掲載された論文は特に重要な2%に入る論文として Viewpoint 紹介論文に選ばれた。この研究成果は今後の核構造論研究の方向性を左右し、進める原動力となり、世界各地でそれに関する実験が多く行われている。最近の特筆できる成果としては、以上のメカニズムに基づき我々が予言した魔法数34がカルシウム54の原子核で実現していることが、理研の重イオン加速器RIBFでの実験で見つかった事が挙げられ、それは2013年に雑誌 Nature に論文発表された。

核子の間には2体力だけでなく、3体力も働く。テンソル力に加えて、3体力が不安定核の殻構造、魔法数、ドリフライン(存在限界)に特徴的な効果を及ぼすことをやはり我々のグループが見つけた。藤田-宮沢3体力は50年前からその存在が知られている。バリオンの一つであるデルタ粒子に核子が転換されるプロセスに起因するものである。この3体力が多体系に及ぼす効果はほとんど研究されて来なかった。我々は、その力の効果の中に、強いモノポール斥力があることを発見した。その定量的な評価は伝統的な π 中間子-デルタ粒子結合からもできるし、有効場の理論などの核力の最近の研究によっても調べられ、似た結果を出す。計算の詳細にはよらずに、極めて特徴的な効果を生むことが示せるので、不安定核の構造の(中性子数などの変化の関数としての)進化に新しいパラダイムを提供するものとして注目されつつある。このように、核力の果たす役割の重要性が改めて認識され直している。[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]

我々が1994年頃からオリジナルな理論手法として提唱・発展させてきたモンテカルロ殻模型を中心にした研究も展開している。この方法は原子核に於ける量子多体系の解法における大きなブレークスルーとなり、不安定核攻略の重要な武器である。この手法により、多数の一粒子軌道からなるヒルベルト空間に多数の粒子を入れて相互作用させながら運動させる事が可能になった。殻構造がどんどん変わっていく不安定核では特に重要になっており、世界の10箇所以上のグループと、それぞれの研究対象である原子核に関して理論計算を受け持って共同研究をしている。多くの新しい知見が得られており、中性子数が18や19の原子核でも、不安定核であれば $N=20$ の魔法数構造が普遍的に壊れていることを示した。これは旧来

の平均ポテンシャル描像や Warburton らの「Island of Inversion」模型では理解できないもので、重要なものである。さらに、通常の考えでは二重閉殻原子核のはずの ^{42}Si がオブレートに大きく変形していることなども示した。最近の大きな成果としては、テンソル力による殻進化が一つの原子核の中でも起こることを示したことである。これは第2種殻進化 (Type II shell evolution) と呼ばれ、形の共存現象などに大きな影響を与える。[7, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40]

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

従来型の直接対角化による殻模型計算において、計算機技術上、及び、並列計算アルゴリズム上のブレークスルーがあり、ここ数年、計算可能な最大次元数が 10 億程度に止まっていたのが、一気に 1000 億にまで拡大した。それにより、質量数 100 近辺の原子核の構造解明が進みつつある。従来型の計算は計算時間が次元の指数関数で増大するので、ここで述べたブレークスルーの効用は計算限界が質量数で 20 程度先に延びることになり、その範囲内ではモンテカルロ殻模型よりも有用である。限界の先はモンテカルロ殻模型を使うことになる。一方、従来型の計算方法でも、二重ベータ崩壊核行列要素など新たな物理量の計算により、特に実験データの解析を共同で行った研究もある。[5, 41]

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

原子核物理学の研究ではないが、原子核物理学研究者が持つ知識や経験を生かして、福島第一原子力発電所事故による環境放射線汚染の系統的な調査を事故直後から組織してきた。その報告を行っている。[8]

軽い核でのモンテカルロ殻模型による第一原理計算

近年の計算機性能の向上と核子多体系における数値計算手法の飛躍的發展により、現実的核力を用いた核子多体系における第一原理計算が実行可能となった。しかしながら、閉殻芯を仮定しない殻模型などに代表される第一原理手法による大規模数値計算は、現在のスーパーコンピュータをもってしても、その適用領域は軽い核の領域か閉殻近傍に限られる。そこで、従来の閉殻芯を仮定する殻模型計算において、より重い核へと適用領域を広げることに成功したモンテカルロ殻模型を第一原理手法のひとつである閉殻芯を仮定しない殻模型へと応用する試みを行っている。今年度は、これまでと同様に p 殻核領域の原子核を主に対象として、さらに計算規模を広げた計算を京コンピュータなどで行った。相互作用は、これまで使ってきた現象論的に構築された JISP16 という 2 体核力だけでなく、カイラル有効場の理論に基づいて構築された核力やその有効核力を用いた。さらに、3 体核力を 2 体有効核力に近似して取り入れた計算にも着手した。物理量については、主に基底状態のエネルギーを系統的に解析し、その模型空間無限大への外挿などを試みた。これらの成果に関しては、国内外での会議で口頭発表を行った。[19, 42, 43, 44, 45, 46, 55] 今後、3 体核力や連続状態との結合をモンテカルロ殻模型に導入し、京コンピュータなどを用いてさらに重い原子核や中性子過剰核などのエキゾチック原子核へと適用できれば、この閉殻芯を仮定しないモンテカルロ殻模型は現実的核力に基づいた原子核における多体構造の系統的理解へ向け有力な手法のひとつになりうると期待される。

Nuclear structure with 3N forces

Nuclear structure calculations of the quadrupole electric and magnetic moments of the ground states of odd-mass calcium isotopes have been performed. Nuclear forces predicted by chiral effective field theory, including state-of-the-art two- and three-nucleon forces, were used. Theoretical predictions have been compared to very recent measurements performed at ISOLDE (CERN, Switzerland), and theory and experiment come in very good agreement. These results, including the theory-experiment comparison, have been presented at an international workshops in Japan and Canada [47, 48]. A research article has been accepted for publication in the journal *Physical Review C* [11].

モンテカルロ殻模型による中重核構造の研究

殻模型計算により不安定核の性質を理論的に予言し、その起源を解明するために、陽子数 $Z = 28$ 近傍の中重核を主な対象として研究を行った。安定核から不安定核まで幅広い領域の核種を統一的に扱うためには広い模型空間を用いる必要があるが、ハミルトニアン行列の Lanczos 法による対角化という従来

の殻模型計算の手法では、計算資源の面から広い模型空間における計算は困難である。本研究では、モンテカルロ殻模型法と最先端のスーパーコンピュータを用いることで、従来よりも広い模型空間での大規模殻模型計算を可能にした。具体的には、 pf 殻に $g_{9/2}$, $d_{5/2}$ 軌道を加えた $pf g_{9/2} d_{5/2}$ 模型空間における有効相互作用を改良し、この模型空間と有効相互作用を用いて計算を行った。

特に Ni, Cu 同位体に重点を置いて計算を行い、励起状態のエネルギーなどの物理量について実験をよく再現する結果が得られた。モンテカルロ殻模型法ではスレーター行列式で表される基底の線形結合として各固有状態の波動関数を表すので、個々の基底の変形度を調べることで各状態の原子核形状の解析を行うことが可能である。この手法を用いることで、陽子数が魔法数 28、中性子数が準魔法数 40 である ^{68}Ni 、および陽子数が 28、中性子数が 42 である ^{70}Ni において球形、オブレート変形(みかん型)、プロレート変形(レモン型)の3つの形状に対応する状態が近いエネルギーに現れる変形共存現象が生じていることや、Ni 同位体での中性子数の変化に伴う形状の変化について理論的に予言した。陽子数や中性子数の変化によって異なる核種で原子核の殻構造が変化すること(殻進化)が知られてきているが、陽子数や中性子数が同じである同一の核種においても、核子の配位が変化することによって異なる状態で原子核の殻構造が変化し得るという第二種殻進化 (type II shell evolution) を考えることで、この変形共存現象は説明される。また、 $^{70,72,74,76}\text{Ni}$ の 8^+ アイソマー状態の有無や、中性子過剰な Cu 同位体の奇核の基底状態のスピンの変化と磁気双極子モーメントについて実験をよく再現する結果が得られた。

これらの成果を博士論文 [18] としてまとめ、国内外の会議 [20, 21, 22, 23, 24, 25, 50, 51, 52] で発表した。また、計算結果に基づいて様々な実験グループと共同研究を行い、今年度は ^{68}Ni に関する論文 [7] が出版され、 ^{70}Ni に関する論文 [12] が受理された。

Extended Krenciglowa-Kuo 法と Q-box

原子核多体問題ではヒルベルト空間の次元が非常に大きくなるためハミルトニアンを直接対角化するのは不可能な場合がほとんどである。そのため取り扱可能なモデル空間内で系を記述する有効相互作用の概念が導入される。特に殻模型のアプローチを使った原子核構造計算では、有効相互作用は重要な役割を果たしている。本研究では微視的な有効ハミルトニアンの構築法である Extended Krenciglowa-Kuo (EKK) 法に焦点を当てた。Q-box を代数的に扱う事で、高次の項まで取り込む事が出来る。この点を考慮し、モデル計算で EKK 法の収束性について調べた。[14, 26, 27, 28, 53]

ユニタリ模型演算子法による中重核の計算

原子核の構造を核子間に働く核力に基づいて理解することは原子核物理の基本的な目標の1つである。近年の計算機の進歩や量子多体問題の計算手法の発展に伴い、この目標に向けた研究が盛んに行われている。我々が用いるユニタリ模型演算子法 (UMOA) は核子数が数十程度の中重核に適用可能な第一原理的な計算手法の1つである。これまでに、 ^4He 、 ^{16}O 、 ^{40}Ca 、 ^{56}Ni について基底状態エネルギーと荷電半径の数値計算を実行し、これらの原子核の基底状態エネルギーと密度の関係について議論を行ってきた。当該年度はこれらの成果を国内外で発表し、[29, 30, 31] 論文や会議抄録にまとめた。[13, 15] しかし、計算結果が人為的に調節可能なパラメータである調和振動基底の振動数について依存性をもってしまう問題を残している。初期のハミルトニアンはこのパラメータを含んでいないので、原理的には、最終的な結果もまたパラメータに依存しないはずである。最近、UMOA と良く似た計算手法である結合クラスター法において2体相関に加えて、1体相関を考慮することでこの問題が解決可能であることが示唆された。これにならって、UMOA の理論的枠組みに1体相関演算子を導入し、実際に数値計算を行うことで、このパラメータ依存性を無視できるほどに低減できることを示した。[32, 54]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] P. Doornenbal et al., “Rotational level structure of sodium isotopes inside the “island of inversion””, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2014**, 053D01 (2014).
- [2] N. Kobayashi et al., “Observation of a p-Wave One-Neutron Halo Configuration in ^{37}Mg ”, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 242501 (2014).
- [3] A. Sanetullaev et al., “Neutron spectroscopic factors of ^{53}Ni hole-states from (p, d) transfer reactions”, *Phys. Lett. B* **736**, 137 (2014).
- [4] H. Watanabe et al., “Monopole-Driven Shell Evolution below the Doubly Magic Nucleus ^{132}Sn Explored with the Long-Lived Isomer in ^{126}Pd ”, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 042502 (2014).
- [5] C. Yuan, C. Qi, F. Xu, T. Suzuki, and T. Otsuka, “Mirror energy difference and the structure of loosely bound proton-rich nuclei”, *Phys. Rev. C* **89**, 044327 (2014).
- [6] T. Nakamura et al., “Deformation-Driven p -Wave Halos at the Drip Line: ^{31}Ne ”, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 142501 (2014).
- [7] F. Flavigny et al., “Characterization of the low-lying 0^+ and 2^+ states in ^{68}Ni via beta decay of the low-spin ^{68}Co isomer”, *Phys. Rev. C* **91**, 034301 (2015).
- [8] K. Saito et al., “Detailed deposition density maps constructed by large-scale soil sampling for gamma-ray emitting radioactive nuclides from the

- Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident”, *J. Environ. Radioact.* **139**, 308 (2015).
- [9] T. Togashi, N. Shimizu, Y. Utsuno, T. Otsuka, and M. Honma, “Large-scale shell-model calculations for unnatural-parity high-spin states in neutron-rich Cr and Fe isotopes”, *Phys. Rev. C* **91**, 024320 (2015).
- [10] Y. Utsuno, N. Shimizu, T. Otsuka, T. Yoshida, and Y. Tsunoda, “Nature of Isomerism in Exotic Sulfur Isotopes”, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 032501 (2015).
- [11] R. F. Garcia Ruiz et al., “Ground-State Electromagnetic Moments of Calcium Isotopes”, *Phys. Rev. C*, in press.
- [12] C. J. Chiara et al., “Identification of deformed intruder states in semi-magic ^{70}Ni ”, *Phys. Rev. C* **91**, 044309 (2015).
- [13] T. Miyagi, T. Abe, R. Okamoto, and T. Otsuka, “Ground-state energies and charge radii of ^4He , ^{16}O , ^{40}Ca , and ^{56}Ni in the unitary-model-operator approach”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2015**, 041D01 (2015).
- (会議抄録)
- [14] G. Shimizu, K. Takayanagi and T. Otsuka, “Extended Krenciglowa-Kuo method and perturbation expansion of Q-box”, *JPS Conf. Proc. Volume 6* (2015).
- [15] T. Miyagi, T. Abe, R. Okamoto, and T. Otsuka, “Many-body calculations for medium-mass nuclei by the unitary-transformation method”, *JPS Conf. Proc. Volume 6* (2015).
- (国内雑誌)
- [16] 大塚孝治, 「テンソル力とエキゾチック核の構造進化」, *原子核研究*, 59 巻, 86-100 ページ, 2014 年.
- [17] 大塚孝治, 「 ^{54}Ca で発見した新しい魔法数」, *Isotope News*, No.720, 4 月号, 2014 年.
- (学位論文)
- [18] 角田佑介: “Structure of medium-mass nuclei studied by Monte Carlo Shell-Model calculations”, 博士論文
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [19] T. Abe, P. Maris, T. Otsuka, N. Shimizu, Y. Utsuno and J. P. Vary, “Current status of the no-core Monte Carlo shell model”, 4th joint meeting of the Nuclear Physics Divisions of APS and JPS, Hawaii 2014, Hilton Waikoloa Village, Hawaii, USA, October 7-11, 2014.
- [20] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, and Y. Utsuno, “Study of nuclei around $Z = 28$ by large-scale shell model calculations”, The 2nd Conference on “Advances in Radioactive Isotope Science” (ARIS2014), University of Tokyo, Tokyo, Japan, June 1-6, 2014.
- [21] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, and Y. Utsuno, “Monte Carlo shell model calculations for nuclei around 68Ni ”, ICNT workshop “Physics of exotic nuclei: Theoretical advances and challenges”, RIKEN, Wako, Japan, June 9-13, 2014.
- [22] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, and Y. Utsuno, “Large-scale shell model calculations for structure of nuclei around $Z = 28$ ”, The 13th CNS International Summer School, RIKEN, Wako, Japan, August 21-27, 2014.
- [23] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, and Y. Utsuno, “Large-scale shell model calculations for structure of Ni and Cu isotopes”, Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan (HAWAII 2014), Hilton Waikoloa Village, Hawaii, USA, October 7-11, 2014.
- [24] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, and Y. Utsuno, “Large-scale shell model calculations for structure of nuclei around $Z = 28$ ”, The International Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2014 (ISPUN14), Ho Chi Minh City, Vietnam, November 3-8, 2014.
- [25] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, and Y. Utsuno, “Large-scale shell model calculations for structure of nuclei around $Z = 28$ ”, CMSI International Workshop on New Frontier of Numerical Methods for Many-Body Correlations - Methodologies and Algorithms for Fermion Many-Body Problems, University of Tokyo, Tokyo, Japan, February 18-21, 2015.
- [26] G. Shimizu, K. Takayanagi and T. Otsuka, “Study of the Extended Krenciglowa-Kuo method and the Bloch-Horowitz equation with the perturbed Q-box”, *Advances in Radioactive Isotopes Science 2014*, Tokyo, Japan, June 1-6, 2014.
- [27] G. Shimizu, K. Takayanagi and T. Otsuka, “Perturbation expansion of the Q-box in the Bloch-Horowitz (BH) equation”, The 13th CNS International Summer School, Wako, Japan, August 21-27, 2014.
- [28] G. Shimizu, K. Takayanagi and T. Otsuka, “Can we perturbatively expand the Q-box in the Bloch-Horowitz Hamiltonian?”, The 4th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of The American Physical Society and The Physical Society of Japan, Hawaii, USA, October 7-11, 2014.
- [29] T. Miyagi, T. Abe, R. Okamoto, and T. Otsuka, “Many-body calculations for medium-mass

- nuclei by the unitary transformation method”, *Advances in Radioactive Isotopes Science* 2014, Tokyo, Japan, June 1-6, 2014 (poster).
- [30] T. Miyagi, T. Abe, R. Okamoto, and T. Otsuka, “Saturation property of ^4He , ^{16}O , ^{40}Ca , and ^{56}Ni in the unitary-model-operator approach”, The 13th CNS International Summer School, Wako, Japan, August 21-27, 2014.
- [31] T. Miyagi, T. Abe, R. Okamoto, and T. Otsuka, “Ground-state energies and charge radii of medium-mass nuclei in the unitary-model-operator approach”, The 4th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan, Hawaii, USA, October 7-11, 2014.
- [32] T. Miyagi, T. Abe, R. Okamoto, and T. Otsuka, “Introduction of one-body correlation operator to unitary-model-operator approach”, International Workshop on New Frontier of Numerical Methods for Many-Body Correlations - Methodologies and Algorithms for Fermion Many-Body Problems, Tokyo, Japan, February 18-21, 2015 (poster).
- 招待講演
- [33] T. Otsuka, “Dual Fermi liquid, critical point and ^{68}Ni ”, Workshop on “The structure of ^{68}Ni : current knowledge and open questions”, Leuven, Belgium, April 23-24, 2014.
- [34] T. Otsuka, “Shape evolution, shape coexistence and shell evolution in exotic nuclei”, 11th INT. SPRING SEMINAR ON NUCLEAR PHYSICS, Ischia, Italy, May 12-16, 2014.
- [35] T. Otsuka, “Shell model and nuclear shapes”, French-US Theory Institute for Physics with Exotic Nuclei (FUSTIPEN) Topical Meeting, GANIL, France, July 19-20, 2014.
- [36] T. Otsuka, “Shapes of exotic nuclei and quantum liquid picture”, Fourth Workshop of the European Gamma and Ancillary Detectors Network, GSI, Germany, July 23-25, 2014.
- [37] T. Otsuka, “Shapes of exotic nuclei and shell evolution”, Fifteenth International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics (CGS15), Dresden, Germany, August 25-29, 2014.
- [38] T. Otsuka, “Dual quantum liquids and shell evolutions in exotic nuclei”, INTERNATIONAL SCHOOL OF NUCLEAR PHYSICS 36th Course, Erice, Italy, September 16-24, 2014.
- [39] T. Otsuka, “What can we learn from large-scale MCSM calculations?”, “Advances and perspectives in computational nuclear physics” workshop, Waikoloa, USA, October 5-7, 2014.
- [40] T. Otsuka, “Dual quantum liquids and shell evolution in exotic nuclei”, International Symposium on Physics of Unstable Nuclei, Ho Chiming, Vietnam, November 2-8, 2014.
- [41] T. Otsuka, “Two-neutrino Double Beta Decay from ^{48}Ca calculated with sd and pf shells”, EMMI Rapid Reaction Task Force on matrix elements of neutrinoless double beta decay, Darmstadt, Germany, November 10-21, 2014.
- [42] T. Abe, “Monte Carlo shell model for no-core calculations”, ICNT workshop “Physics of exotic nuclei: Theoretical advances and challenges”, RIKEN Wako Campus, Japan, June 9-13, 2014.
- [43] T. Abe, “No-core Monte Carlo shell model in light nuclei”, International Workshop on Nuclear Theory in the Supercomputing Era (NTSE2014), Pacific National University, Khabarovsk, Russia, June 23-27, 2014.
- [44] T. Abe, “Nuclear structure from no-core Monte Carlo shell model”, Advances and perspectives in computational nuclear physics, Hilton Waikoloa Village, Hawaii, USA, October 5-7, 2014.
- [45] T. Abe, “Towards ab-initio nuclear structure by Monte Carlo shell model”, The International Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2014, IS-PUN14, Conference Hall, New World Saigon Hotel, Ho Chi Minh City, Vietnam, November 6-9, 2014.
- [46] T. Abe, “Progress in the no-core Monte Carlo shell model in light nuclei”, TRIUMF Workshop on Progress in Ab Initio Techniques in Nuclear Physics, TRIUMF, Vancouver, Canada, February 17-20, 2015.
- [47] J. Menéndez, “Shell model calculations with three-nucleon forces”, Progress in nuclear shell-model calculations in CNS-RIKEN collaboration workshop, RIKEN, Wako (Japan), November 26-28, 2014.
- [48] J. Menéndez, “Nuclear structure studies with chiral EFT and many body perturbation theory”, Progress in Ab-initio Techniques in Nuclear Physics workshop, TRIUMF, Vancouver (Canada), February 14-18, 2015.
- [49] J. Menéndez, “WIMP scattering off xenon: nuclear structure insights”, Effective Theories for Dark Matter searches workshop, Mainz Institute for Theoretical Physics (Germany), March 16-27, 2015.
- [50] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, and Y. Utsuno, “Monte Carlo shell model calculations for nuclei around ^{68}Ni ”, Workshop “The structure of ^{68}Ni : current knowledge and open questions”, KU Leuven, Leuven, Belgium, April 23-24, 2014.
- [51] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, and Y. Utsuno, “Large-scale shell model calculations for structure of nuclei around $Z = 28$ ”, Workshop on “Progress in nuclear shell-model calculations in CNS-RIKEN collaboration”, RIKEN, Wako, Japan, November 26-28, 2014.

(国内会議)

一般講演

- [52] 角田佑介, 大塚孝治, 清水則孝, 本間道雄, 宇都野穰, 「大規模殻模型計算による $Z = 28$ 近傍の核構造の研究」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学早稲田キャンパス, 2015 年 3 月 21-24 日.
- [53] 清水元気, 大塚孝治, 高柳和雄, 「Extended Krenciglowa-Kuo 法と Q-box の次数」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学早稲田キャンパス, 2014 年 3 月 21-24 日.
- [54] 宮城宇志, 阿部喬, 岡本良治, 大塚孝治, 「ユニタリ模型演算子法への一体相関演算子の導入」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学早稲田キャンパス, 2015 年 3 月 21-24 日.

招待講演

- [55] 阿部喬, 「軽い核の構造におけるモンテカルロ殻模型による第一原理計算の現状」, RCNP 研究会「QCD を基礎とする核子多体系物理の理解」, 大阪大学 RCNP, 2014 年 12 月 19-20 日.

理論ハドロン物理

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

確率過程量子化法の実時間シミュレーション

実時間の量子シミュレーション法についての基礎研究として、確率過程量子化法の数値計算を低次元系について遂行した。その結果、非物理的な固定点の存在を発見し、回避法として位相空間に制限をかける処方箋を提唱した。結果は厳密な解とよく合うことが確かめられた。[3, 28]

曲がった時空でのカイラル凝縮

QCD 真空ではクォークの凝縮すなわちカイラル凝縮が質量の起源となっていることが知られている。曲がった時空中でのカイラル凝縮の振る舞いについて調べ、カイラル対称性を破らないフェルミオン質量ギャップを生成する新しい物理的機構を発見した。この新規現象を我々は「カイラルギャップ効果」と命名した。また曲がった時空中のカイラル凝縮に磁場をかけると、平坦な時空では存在していなかった赤外特異性が現れ、カイラル凝縮が大きな変更を受けけることを発見した。これを我々は「幾何学的に誘起される磁気触媒効果」と命名した。[4, 31]

曲がった時空での格子 QCD

強い外部電磁場と同じように、強い外部重力場も QCD の性質に大きな変更を与える。このため、ブラックホール近傍や膨張系、回転系では、平坦な時空では見られない未知の QCD 現象が起こる可能性が秘められている。特に、QCD の非摂動性に起因した現象は理論的に興味深い対象である。このような非摂動的現象を解析するため、通常は平坦な時空で定式化される格子 QCD を曲がった時空の場合に適用し、曲がった時空での格子 QCD を定式化した。さらに、定式化した方法を用いて、膨張時空の場合の数値シミュレーションを行った。[7]

核物質有効模型による粒子数揺らぎの研究

重イオン衝突実験での観測量である粒子数揺らぎは、高密度 QCD 物性を解明するために重要な物理量である。しかし、QCD の高密度かつ非摂動領域における解析が困難であるため、実験データに対する理解はまだ不十分である。一方で、非摂動 QCD の現れである原子核に関しては豊富な実験データが得られ、飽和密度付近の性質は平均場模型によってよく表現できることが知られている。我々はこの核物質有効模型を、重イオン衝突実験における粒子数揺らぎに関して適用し解析を行った。その結果、実験データの振舞の一部が上記の模型で記述される核子間相互作用によって説明可能であることが分かった。[5, 20, 21, 24, 37]

QCD θ 真空構造のクォーク質量依存性

近年、相対論的重イオン衝突実験における QCD のトポロジカルな性質が注目されていることで、その根底にある QCD θ 真空構造の理解が求められている。 θ 真空に関して注目すべきは $\theta = \pi$ において 1 次相転移が存在することである。既にカイラル極限とクエンチ極限の近傍ではこの 1 次相転移の存在が示されているが、その一方でそれぞれがクォーク(中間子)の動力学とグルーオンの動力学という異なる起源によってそれらが引き起こされており、統一的な解釈はなされていない。そこで QCD 真空を真空角とクォーク質量の関数として明らかにすることを試みた。本研究ではカイラル模型である Di-Vecchia-Veneziano 模型がクエンチ極限におけるトポロジカルな性質をも再現できる可能性に着目し、この 1 つの枠組み内で任意のクォーク質量に対する θ 真空エネルギーを評価した。その結果 $\theta = \pi$ における 1 次相転移も含めてカイラル極限からクエンチ極限まで連続的な真空構造が得られ、この模型の新たな有効性が確認された。[16, 22, 46]

Canonical approach による有限密度格子 QCD シミュレーション

Canonical approach をもちいて 2-flavor Wilson fermion における有限密度 QCD の数値シミュレーションを行い、圧力、粒子数、感受率の密度依存性を議論した。有限密度格子 QCD には「符号問題」が存在するため、通常では低密度領域でのみその物理予言性が期待できるが、canonical approach はその問題を回避する 1 つの手段である。本研究結果は先行研究と無矛盾であり、先行研究よりも高密度領域での熱力学量の計算にも成功した。[25, 27, 39]

Particle production under external fields

We engaged on the problem of how do flavor degrees of freedom emerge at the quark-gluon plasma formed at heavy ion collisions. As a first step fermion production under a background electromagnetic field is considered, numerically. The right-handed massless sector is considered where due to symmetry the CP-odd domain can be addressed by means of particle and antiparticles. A step background electromagnetic field is considered although the final project involves a more appropriate gauge configuration for the HIC physics. As several consistency checks Schwinger pair production under a external electric field was reproduced and chiral invariance resulting CME current was observed once a magnetic field was taken into account. The current goal is aimed at simulating this net particle production under external non-abelian electromagnetic fields expecting interesting new results.

< 報文 >

(原著論文)

- [1] K. Fukushima, “Spectral representation of the particle production out of equilibrium - Schwinger mechanism in pulsed electric fields”, *New J. Phys.* **16**, 073031 (2014).
- [2] K. Fukushima and T. Hayata, “Schwinger mechanism with stochastic quantization”, *Phys. Lett. B* **735**, 371 (2014).
- [3] R. Anzaki, K. Fukushima, Y. Hidaka and T. Oka, “Restricted phase-space approximation in real-time stochastic quantization”, *Annals of Phys.* **353**, 107 (2015).
- [4] A. Flachi and K. Fukushima, “Chiral Mass-Gap in Curved Space”, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 091102 (2014).
- [5] K. Fukushima, “Hadron resonance gas and mean-field nuclear matter for baryon number fluctuations”, *Phys.Rev.C* (in press).
- [6] A. Flachi, K. Fukushima and V. Vitagliano, “Geometrically induced magnetic catalysis and critical dimensions”, *Phys.Rev.Lett.* (in press).

- [7] A. Yamamoto, “Lattice QCD in curved spacetimes”, *Phys. Rev. D* **90**, 054510 (2014).
- [8] T. Kanazawa and A. Yamamoto, “Asymptotically free lattice gauge theory in five dimensions”, *Phys. Rev. D* **91**, 074508 (2015).
- [9] T. Hayata and A. Yamamoto, “Inhomogeneous Polyakov loop induced by inhomogeneous chiral condensates”, *Phys. Lett. B*, in press (2015).
- [10] S. Benic, D. Horvatic, D. Kekez and D. Klabucar, “A $U_A(1)$ symmetry restoration scenario supported by the generalized Witten-Veneziano relation and its analytic solution”, *Phys. Lett. B* **738**, 113 (2014).
- [11] N. Yasutake, R. Lastowiecki, S. Benic, D. Blaschke, T. Maruyama and T. Tatsumi, “Finite-size effects at the hadron-quark transition and heavy hybrid stars”, *Phys. Rev. C* **89**, 065803 (2014).
- [12] S. Benic, “Heavy hybrid stars from multi-quark interactions”, *Eur. Phys. J.* **A50** 111, (2014).
- [13] B. Radovic and S. Benic, “Electroweak breaking and Dark Matter from the common scale”, *Phys. Lett. B* **732**, 91 (2014).
- [14] S. Benic, D. Horvatic and J. Klaric, “Recovering the chiral critical end-point via delocalization of quark interactions”, *Phys. Rev. D* **89**, 054025 (2014).
- [15] S. Benic, D. Blaschke, G. A. Contrera and D. Horvatic, “Medium induced Lorentz symmetry breaking effects in nonlocal PNJL models”, *Phys. Rev.D* **89**, 016007 (2014).
- [16] K. Mameda, “QCD θ -vacua from the chiral limit to the quenched limit”, *Nucl. Phys B* **889**, 712 (2014).

(会議抄録)

- [17] K. Fukushima, “Baryonic matter and beyond”, *Nucl. Phys. A* **931**, 257 (2014).
- [18] D. E. A. Castillo, S. Benic, D. Blaschke, R. Lastowiecki, “Crossover transition to quark matter in heavy hybrid stars”, *Acta Phys. Polon. Supp.* **7** No.1, 203 (2014).

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [19] P. Morales, “Effect of the topological axial current on holographic QCD at finite density and magnetic field”, Heavy ion collisions under extreme conditions, Trento, Italy April 15, 2014
- [20] T. Sasaki, “Thermal interpretation of the proton number fluctuations in the beam-energy scan at RHIC/STAR”, Extreme QCD 2014, Stony Brook, USA, June 20, 2014.

- [21] T. Sasaki, “Thermal interpretation of the proton number fluctuations in the beam-energy scan at RHIC/STAR”, The 5th Asian Triangle Heavy Ion Conference 2014 (ATHIC 2014), Osaka, Japan, August 6, 2014.
- [22] K. Mameda, “QCD θ -vacua from the chiral limit to the quenched limit”, The 5th Asian Triangle Heavy Ion Conference 2014 (ATHIC 2014), Osaka, Japan, August 7, 2014.
- [23] S. Benic, “Multiquark interactions and heavy hybrid stars”, Compact Stars in the QCD phase diagram IV, Prerow, Germany, September 27, 2014.
- [24] T. Sasaki, “Thermal interpretation of the proton number fluctuations in the beam-energy scan at RHIC/STAR”, 4th Joint Meeting of the APS and JPS (HAWAII 2014), Hawaii, USA October 9, 2014
- [25] R. Fukuda, “Canonical approach to the finite density lattice QCD with winding number expansion (I) Lee-Yang Zeros”, 4th Joint Meeting of the APS and JPS (HAWAII 2014), Hawaii, USA, October 11, 2014
- [26] P. Morales, “Effect of topological current to spatial modulation in holographic QCD at finite density”, Intersections between QCD and Condensed Matter, Schladming, Austria, March 5, 2015.
- [27] R. Fukuda, “Canonical approach to finite density lattice QCD”, Hadrons and Hadron Interactions in QCD 2015, Kyoto, Japan, March 12, 2015.
- 招待講演
- [28] K. Fukushima, “Real-time Stochastic Quantization – Problem and Simulations –”, The Approach to Equilibrium in Strongly Interacting Matter, Brookhaven National Laboratory, USA, April 4, 2014.
- [29] K. Fukushima, “Baryonic matter and beyond”, Quark Matter 2014, Darmstadt, Germany, May 24, 2014.
- [30] K. Fukushima, “QCD Phase Structure - A Theoretical Overview”, The 5th Asian Triangle Heavy Ion Conference 2014 (ATHIC 2014), Osaka, Japan, August 5, 2014.
- [31] K. Fukushima, “Chiral Gap Effect in Curved Space”, Confinement and Hadron Spectrum 2014, St. Petersburg, Russia, September 8, 2014.
- [32] K. Fukushima, “Study of the QGP Initial State and Its Evolution to QGP”, 4th Joint Meeting of the APS and JPS, Hawaii, USA, October 8, 2014.
- [33] K. Fukushima, “Magnetic Catalysis vs Chiral Gap Effect”, Workshop on Strong Magnetic Field, Beijing, China, October 17, 2014.
- [34] K. Fukushima, “Particle Production and Current from a Topological Domain”, Ab initio approaches in many-body QCD confront heavy-ion experiments, Heidelberg, Germany, December 16, 2014.
- [35] K. Fukushima, “Quark Production and Anomalous Current in Strong Fields”, Hadrons and Hadron Interactions in QCD 2015, Kyoto, Japan, March 10, 2015.
- [36] A. Yamamoto, “Magnetism and Rotation on the Lattice”, High Energy Strong Interactions: A School for Young Asian Scientists, Central China Normal University, Wuhan, China, September 22-26, 2014.
- (国内会議)
- 一般講演
- [37] 佐々木崇宏, 「Thermal interpretation of the proton number fluctuations in the beam-energy scan at RHIC/STAR」, TQFT 2014, 理化学研究所, 2014年9月3日.
- [38] 豆田和也, 「Relativistic field theory in rotating frames」, 日本物理学会第70回年次大会, 早稲田大学, 2015年3月22日.
- [39] 福田龍太郎, 「Study of finite density QCD based on Canonical approach」, 日本物理学会第70回年次大会, 早稲田大学, 2015年3月24日.
- 招待講演
- [40] 福嶋健二, 「Hadron Physics in QCD Phase Transition」, 新ハドロンシンポジウム, 名古屋大学, 2014年4月18日.
- [41] 福嶋健二, 「Quark-Gluon Plasma におけるカイラル磁気効果」, カイラル対称性と基礎物理, 放送大学, 2014年4月26日.
- [42] 福嶋健二, 「磁場と密度と量子異常果」, J-PARC 重イオン会議, 高エネルギー加速器研究機構, 2014年11月27日.
- [43] 福嶋健二, 「QCD と乱流」, 乱流と QCD・重力, 大阪大学, 2015年1月7日.
- [44] 福嶋健二, 「QCD 相図概観・Chiral Magnetic Effect に関する話」, 重イオン・チュートリアル研究会, 理化学研究所, 2015年3月25-27日.
- (セミナー)
- [45] 佐々木崇宏, 「格子計算および中性子星観測と無矛盾なクォーク-ハドロン相転移の研究」東京大学駒場キャンパス, 2014年5月7日.
- [46] 豆田和也, “QCD θ -vacua from the chiral limit to the quenched limit”, 理化学研究所, 2014年6月9日.
- [47] P. Morales, “Spontaneous symmetry breaking and particle production in curved spaces”, 理化学研究所, 2014年7月14日.
- [48] 佐々木崇宏, “Studying the QCD phase diagram with PNJL type effective model”, 理化学研究所, 2014年7月28日.
- [49] S. Benic, “A self-consistent bag model”, 東京大学本郷キャンパス, 2014年12月5日.

1.2 素粒子論研究室 (諸井・浜口・松尾・立川)

素粒子論研究室では、物質の基本構成要素とその間に働く相互作用の解明を目指して研究を続けている。基礎的な弦理論や超対称性を持つ場の理論のさまざまな理論的な可能性の追求と同時に、高エネルギー物理や宇宙線物理に関する実験的な検証あるいは宇宙物理的な応用が研究されている。

2014年度は西岡が助教として着任した。

1.2.1 現象論

SUSY 現象論

ヒッグス粒子と光子の間の有効結合定数は超対称性粒子の影響を他の結合定数と比べて受けやすく、さらに将来十分な精度で測定可能となるため、この物理量の精密測定から超対称性粒子の痕跡を探れる可能性がある。遠藤、北原、吉永は、将来実験におけるヒッグス粒子と光子の間の有効結合定数の測定によって、超対称模型におけるスタウをどこまで間接的に探れるのかを調べた [8]。この研究に関して北原 [53] により研究発表が行われた。

最小超対称性模型は μ 問題と呼ばれる階層性問題に似た不自然さを抱えているが、ゲージ重項超場を新たに加えることでこの問題を回避することができる。石川、北原、瀧本は、ゲージ重項超場を加えた超対称性模型における暗黒物質の現象論を調べた。超対称性の破れのスケールが高い場合、暗黒物質候補であるシングリーノの質量が大きな輻射補正を受けられることを指摘した。この寄与を考慮に入れると、シングリーノがヒッグス粒子に対消滅することで暗黒物質の残存量を自然に説明出来ることを示した [9]。またこの模型にベクターライク粒子を加え、新たな離散対称性を課す事で、宇宙の物質と反物質の非対称性を説明できることを示した [10]。このシナリオは、超対称性の破れのスケールにおいて物質と反物質の非対称性を作るという点に於いて、従来考えられていた電弱バリオジェネシスとは質的に異なる。この研究に関して石川 [59] と北原 [54, 85, 86, 87, 102, 103]、瀧本 [66] により研究発表が行われた。北原は、これらの研究の結果を博士論文にまとめた [47]。

浜口は、伊部 (宇宙線研)、柳田、横崎 (カブリ IPMU) らと共に、超対称性理論においてグラビティーノが暗黒物質となるゲージ伝達模型を再考察し、ヒッグス粒子の質量 126GeV と CP 保存を要求した minimal な模型では、広いパラメータ領域で長寿命荷電粒子スタウが 1TeV 以下に存在し、将来の LHC 実験で検証出来ることを示した [4]。

コライダー現象論

遠藤は山本 (グラナダ大) と LHC 実験における暗黒物質探索に関する研究を行った。通常の解析では

低エネルギー有効理論が用いられているが、その適用限界に反している場合があることを示した [3]。

遠藤と高江洲は、Higgs Portal 模型に対する現在及び将来の LHC 実験での制限について、Higgs と結合する新粒子が Higgs 質量の半分より重い場合について考察した [27]。この研究に関して、高江洲は新学術領域研究会「テラスケール 2014 先端加速器 LHC が切り拓くテラスケールの素粒子物理学」にて招待講演を行った [107]。

遠藤、濱口、石川、Stoll は、vector-like top 粒子の LHC 現象論の研究を行った。vector-like top が top, Higgs に崩壊し、full hadronic な終状態となる場合を考えた。top-tagger, Higgs-tagger を使用し、massive pair hypothesis を用いたアルゴリズムを考えることで、質量の再構成をする手法を考案した [25]。また、石川 [92] と Stoll [60, 61, 62] により一般講演が行われた。

Stoll は jet clustering の研究を行った。固定した radius のアルゴリズムと違い、jet mass に基づいた terminating veto を用いた。得られた結果は mass-drop tagger に近いが、活用できる parameter space が広がるため、識別力が改善される可能性があることを示した [26]。

Stoll と Spannosky (ダラム大学) は、highly boosted resonance (top, W, Z) の LHC や FCC-hh での tagging の研究を行った。high- p_{\perp} を持つ resonance が崩壊すると、decay products 間の距離が狭くて jets を分別できなくなる。detector の charged tracks も利用すると、その場合でも tagging ができ、重い粒子を発見することができることを示した。Stoll [63] により一般講演が行われた。

異常磁気モーメント

三嶋は電子の異常磁気モーメントに対する非摂動的 QED の効果を、摂動的寄与との重複関係が明らかかな表式で計算した [55],[88],[89]。

宇宙線

江間、神野、諸井は、IceCube で観測された高エネルギーニュートリノが過去において崩壊した親粒子を起源に持つ可能性を指摘し、現在において期待されるスペクトルを、伝搬中の散乱で生じる 2 次的ニュートリノを無視する近似の下で計算した [5]。このシナリオは、暗黒物質が現在崩壊しつつあるというシナリオに比べ、親粒子の質量及び寿命の許容範囲が広いという点で素粒子論的動機付けが大きい。さらに、江間、神野、諸井は、親粒子の過去における崩壊で生じた高エネルギーニュートリノが伝搬する際の散乱の効果を調べ、現在の高エネルギーニュートリノ観測、宇宙背景放射の歪み、及びビッグバン元素合成から親粒子の存在量に制限を付けるとともに、将来観測における探索可能領域を算出した。同時に、上記 3 人は、このシナリオが伝搬中の散乱に起因する 2 次的ニュートリノの効果も取り入れた上

で IceCube における観測と両立可能であることを示した [7]。江間は、上記の内容を含め、長寿命粒子が存在する場合の宇宙論的制限について修士論文を執筆した [46]。

近年、XMM-Newton による X 線観測において、銀河団からの 3.5keV X 線の超過成分が報告された。これを受けて、中山は高橋 (東北大)、柳田 (IPMU) とともに、この超過成分を暗黒物質の崩壊によって説明する素粒子模型を提案した [13, 14, 15]。

重力波

神野、諸井は、高橋 (佐賀大学) とともに、宇宙背景放射で許容される量の原始重力波がある場合に、重力波の大きさ、スペクトル指数及びランニングが将来観測においてどの程度の精度で決定できるかを尤度比検定の手法を用いて解析した。同時に、インフレーション後に起きた再加熱の温度がこれらのパラメータとどの程度区別して決定されるかを、同じく尤度比検定の手法で解析した [6]。

中山、黒柳 (東京理科大)、横山 (東大 RESCEU) は将来の重力波観測衛星 DECIGO による、現実的な観測のセットアップにおける宇宙の再加熱温度の決定精度を見積もった [24]。

スカラー場のダイナミクス

カーバトン模型は宇宙の原始密度揺らぎを説明する有力な模型の一つである。向田、中山、瀧本は有限温度中でのカーバトン場の崩壊・散逸過程を詳細に解析し、さらにその密度揺らぎの非ガウス性への影響を調べた [11]。また、2次+4次ポテンシャルの単純なカーバトン模型において、密度揺らぎの非ガウス性を通常の場合に比べて遥かに抑制できることを示した [12]。

Peccei-Quinn 機構は QCD における強い CP 問題を解決する有力な機構である。諸井、向田、中山、瀧本は Peccei-Quinn 対称性がインフレーションの後に破れる場合の Peccei-Quinn 場のダイナミクスを詳細に調べ、熱浴との相互作用を考慮することでアクシオン暗黒輻射の過剰生成問題を回避できることを示した [23]。

向田と瀧本は、スカラー場の空間的に局在した凝縮である I-Ball と Q-Ball の間の関係について研究した。非相対論的な状況では実スカラー場理論においても近似的 U(1) 対称性が現れることに着目し、I-Ball が Q-ball と同様に理解できることを示した [28]。この研究に関して瀧本により研究発表が行われた [65]。

バリオン数生成

中山は檜垣 (KEK)、齋川 (東工大)、高橋 (佐賀大)、山口 (東工大) とともに、R パリティの破れた

超対称模型においてアフレック・ダイン模型と呼ばれるバリオン数生成機構が働くことを示した [22]。

インフレーション模型 inflation models

最近、BICEP2 実験により宇宙背景放射の B モード偏光が観測され、高エネルギースケールインフレーションの有力な証拠であると期待された。これを受けて、中山、高橋 (東北大) は標準模型ヒッグス場をインフラトン場と同一化する模型を構築した [16]。向田、中山は Z_2 対称性を持ったスカラー場をインフラトン場と同一し、さらにインフラトン自身が現在の暗黒物質にもなる模型を提案した [17]。

中山、高橋 (東北大)、柳田 (IPMU) は超重力理論における多項式カオティックインフレーション模型を構築し [20, 21]、またグラビティーノ過剰生成問題を避ける方法を提案した [18]。中山は村山 (IPMU)、高橋 (東北大)、柳田 (IPMU) とともに、超対称模型の右巻きスカラーニュートリノをインフラトンと同一化する模型を構築した [19]。

2014 年 3 月に発表された BICEP2 実験グループによる CMB の B モード偏光の検出結果に基づき、宇宙初期の重力波由来の可能性が考えられた。現在では前景放射の影響が無視できないことが分かっているが、これはケイオティック・インフレーションやラージフィールド・インフレーションと呼ばれる種類のインフレーション模型を示唆していた。濱口、諸井、寺田は、超対称スタロビンスキー (Starobinsky) 模型においてスタロビンスキー・インフレーションを起こす方向とは異なる場の方向に着目すると、スカラーポテンシャルが二次関数になっており、一見ケイオティック・インフレーションに適しているように見えることに気づいた。スタロビンスキー模型は小さな強度の重力波しか出さないため、これが本当であれば興味深い。しかし、よく調べてみると、これらの場の方向は強く相互作用をしており、結局のところ多くの初期条件はスタロビンスキー・インフレーションに帰着するという結論に達した。[29, 94]

一般に、超重力理論においてインフレーションに適した平らなポテンシャルを構成する為には工夫が必要である。よく用いられる手法は、インフラトンのケーラーポテンシャルにシフト対称性を課し、インフラトンとは別に期待値が 0 の場を導入するものである。寺田は、首都大の Ketov 氏と共に、この付加的な場を導入しない方法を発見した。[30, 31, 95, 67, 68, 69, 70, 96, 108] 付加的な場を導入しない代わりに、インフラトンのケーラーポテンシャルに付加的な項 (4 次の項) を導入する。この項はインフラトンのポテンシャルが場の値の大きな領域で負になる事を防ぐと共に、インフラトンのスカラー超対称パートナー場を安定化する。これは非常にシンプルな発見だが、多くの新たな模型群を構成できる枠組みであり、非常に重要である。基本的に微調整を必要としない方法であるが [30]、微調整を許すならば近似的に任意の半正定値のスカラーポテンシャルを超重力理論に埋め込む事が可能である。[31] 応用として、最小超対称標準模型においてヒッグスインフ

レーションを起こす事も可能である。[70] これらの研究成果は寺田の博士論文としてまとめられた。[49]

寺田は、ビッグバン宇宙国際研究センターの渡辺氏、横山氏、早稲田大学の山田氏と共に、超対称スタロビンスキー模型におけるインフレーション後の宇宙の再加熱過程を調べた。[32] スタロビンスキー模型は重力の作用を拡張する修正重力理論の一種であり、その超対称化したものは超重力理論の作用の拡張によって得られる。はじめに（超）重力と物質との結合を最小に仮定し、（超）重力部分を標準的な形になるように変形（場の再定義等）すると、（超）重力と物質との非最小な結合が得られる。これを元にして、インフラトンの各種粒子への崩壊率を計算した。特に、ゲージ場への崩壊では量子効果が重要なモードであることも発見した。再加熱温度は超対称性の無い場合と殆ど変わらないが、グラヴィティノーや最も軽い超対称性粒子の生成によって理論のパラメーターが制限されることを示した。

1.2.2 弦理論、場の理論全般

M5 ブレーンの定式化

松尾は Pei-Ming Ho と共同研究を行い M 理論に含まれる M5 ブレーンの定式化について考察した。とくに前年度までの研究で得られた M5 ブレーン上で定義される自己双対 2 形式場のラグランジアンに超対称性を導入した。非可換ゲージ対称性を持つ 2 形式場の系に超対称性が導入されるのは本研究が最初である。また、その作用から導かれる運動方程式を解くことにより M5 ブレーンと M2 ブレーンや M wave と呼ばれるソリトニックな励起を表す超対称性を持った古典解をいくつか導いた。また、より一般的な非可換 2 形式場の理論に超対称性を導入することにも成功した。[34]

双対性の証明と可解系との関連

松尾は Chaiho Rim, Hong Zhang らと共同で M5 ブレーンから導かれる双対性を表す具体的な例である 2D/4D 双対性 (Alday-Gaiotto-Tachikawa 仮説) の厳密な証明を幾つか与えた。とくに、 $N=2$ 超対称ゲージ理論にいくつかの基本 multiplet が結合する系に対する双対性を Gaiotto 状態と呼ばれるベクトルの具体的な構成を使って証明した。[33, 109] この時 Degenerate Double Affine Hecke 代数と呼ばれる非線形対称性を用いた。また、朱と松尾は低次元の Calogero-Sutherland 模型との対応関係を明らかにし、Calogero 系を合成することにより得られる新たな可解模型を導いた。[110]

また、仲村、岡澤、松尾は上記の双対性を $SU(N)$ 以外の群に対しても証明するため B, C, D 型のゲージ群に対して Nekrasov 分配関数の具体的な計算を実行した。この計算は多変数の留数積分に帰着するが、ある種の recursion formula を導くことにより具体的な表式を得た。[35, 71]

繰り込み群

川野、中口、西岡は、繰り込み群で単調減少する量として次元の偶奇に応じて別々に提案されていた共形異常の係数 a と球面の自由エネルギー F を次元に関し補完する量として予想されていた \hat{F} に対し、ホログラフィーの重力側では確かに繰り込み群で単調減少することを示した [37]。

場の理論とエンタングルメントエントロピー

西岡は京都大の浜とカブリ理論物理学研究所の宇賀神とともに、5 次元超対称場の理論のエンタングルメントエントロピーおよび超対称版 Rényi エントロピーを定義し、その性質を調べた。[36] またこれに関する講演を行った。[81]

中口、西岡は、アニュラス領域のエンタングルメントエントロピーを無質量および有質量の 3 次元理論において空間離散化の方法およびホログラフィーの方法で数値的に計算し、有質量の場合の既存の公式に対して、質量に関して指数的に減衰する補正項を発見した [38, 97]。

大森、立川は場の理論における部分領域の間のエンタングルメントレニーエントロピーの定義について 1+1 次元共形場理論を使って議論し、紫外正則化を境界条件の導入によって行える事、およびエンタングルメントレニーエントロピーの特定の極限における半普遍的振る舞いを発見した。[39]

4 次元の超対称ゲージ理論

立川は [40] において、 $\mathcal{N}=1$ 超対称純粋ヤン・ミルズ理論を T^3 にコンパクト化した際の真空の個数を、ゲージ群が単連結でない場合に、赤外極限および紫外極限において計算し、一致することを示した。

5 次元の超対称ヤン・ミルズ理論

川野は、去年度までの研究を推し進めて、6 次元 $\mathcal{N} = (2, 0)$ 超重力理論を 5 次元に落としたものを使って、5 次元 Super Yang-Mills 理論の 3 次元球と 2 次元リーマン面へツイストを伴うコンパクト化した理論について調べた。丸い 3 次元球の場合にも、破れていない超対称性の数を変えるようなツイストの方法があり、 $\mathcal{N} = 1$ ツイストに相当するコンパクト化については、去年までの研究で明らかになっていたが、新たに、 $\mathcal{N} = 2$ ツイストに相当するコンパクト化について調べた。また、3 次元球が squash された球面上のコンパクト化で $\mathcal{N} = 1$ ツイストの場合は去年度研究済みであったが、この場合の $\mathcal{N} = 2$ ツイストへの拡張を行った。さらに、ellipsoid 球面上へコンパクト化した場合についても理解が進み、さらに研究を進めている。

立川は、マドリード大の林、高等研究所の米倉とともに、5 次元の線形筋理論が強結合極限において

対称性を拡大して $SU(N)^3$ の高い対称性をもつ 5 次元 T_N 理論というものになることを [38] で示した。また、5 次元超対称ゲージ理論がその強結合極限において、5 次元のフレーバ対称性の拡大もしくは 6 次元理論の S^1 コンパクト化としての Kaluza-Klein 対称性をどのように発現するか、インスタントン演算子の立場から一般的な考察を行った [40]。

6 次元超共形場理論

大森、清水、立川は 6 次元 $\mathcal{N} = (1, 0)$ 超共形場理論の一例である例外型弦理論に対して、その M 理論への埋め込みとアノマリ流入の手法を用いて、アノマリ多項式を完全な形で決定した。[43] また、大森、清水、立川はプリンストン高等研の米倉とともに、一般の 6 次元超共形場理論に対してアノマリ多項式を場の理論的に決定する方法を考案し、多くの例に適用した。[44] 立川は同内容に関し、国際会議で講演を行った。[82]

清水は上記の 6 次元超共形場理論のアノマリ多項式に関する研究、および 6 次元超共形場理論を T^2 でコンパクト化して得られる 4 次元 $\mathcal{N} = 2$ 理論の中心電荷と 6 次元のアノマリ多項式の関係についての研究を修士論文にまとめた。[50]

超対称場の理論全般

立川は超対称場の理論に関する講演 [83, 84, 45] をベルギーおよびアメリカの研究会で、また集中講義 [112, 113, 114] を大阪大学、京都大学基礎物理学研究所、およびイタリアのトリエステの ICTP の春の学校でおこなった。また、昨年度に行った集中講義の内容を教科書として出版した [51]。

<受賞>

- [1] 立川裕二、Hermann Weyl Prize, International Colloquium on Group Theoretical Methods in Physics, July 17, 2014.
- [2] 立川裕二、西宮湯川記念賞、西宮市、2014 年 10 月 31 日

<報文>

(原著論文)

- [3] M. Endo and Y. Yamamoto, “Unitarity Bounds on Dark Matter Effective Interactions at LHC,” JHEP **1406**, 126 (2014) [arXiv:1403.6610 [hep-ph]].
- [4] K. Hamaguchi, M. Ibe, T. T. Yanagida and N. Yokozaki, “Testing the Minimal Direct Gauge Mediation at the LHC,” Phys. Rev. D **90** (2014) 1, 015027 [arXiv:1403.1398 [hep-ph]].
- [5] Y. Ema, R. Jinno and T. Moroi, “Cosmic-Ray Neutrinos from the Decay of Long-Lived Particle and the Recent IceCube Result,” Phys. Lett. B **733**, 120 (2014) [arXiv:1312.3501 [hep-ph]].

- [6] R. Jinno, T. Moroi and T. Takahashi, “Studying Inflation with Future Space-Based Gravitational Wave Detectors,” JCAP **1412**, no. 12, 006 (2014) [arXiv:1406.1666 [astro-ph.CO]].
- [7] Y. Ema, R. Jinno and T. Moroi, “Cosmological Implications of High-Energy Neutrino Emission from the Decay of Long-Lived Particle,” JHEP **1410**, 150 (2014) [arXiv:1408.1745 [hep-ph]].
- [8] M. Endo, T. Kitahara and T. Yoshinaga, “Future Prospects for Stau in Higgs Coupling to Diphoton,” JHEP **1404**, 139 (2014) [arXiv:1401.3748 [hep-ph]].
- [9] K. Ishikawa, T. Kitahara and M. Takimoto, “Singlino Resonant Dark Matter and 125 GeV Higgs Boson in High-Scale Supersymmetry,” Phys. Rev. Lett. **113**, no. 13, 131801 (2014) [arXiv:1405.7371 [hep-ph]].
- [10] K. Ishikawa, T. Kitahara and M. Takimoto, “Towards a Scale Free Electroweak Baryogenesis,” Phys. Rev. D **91**, no. 5, 055004 (2015) [arXiv:1410.5432 [hep-ph]].
- [11] K. Mukaida, K. Nakayama and M. Takimoto, “Curvaton Dynamics Revisited,” JCAP **1406**, 013 (2014) [arXiv:1401.5821 [hep-ph]].
- [12] K. Mukaida, K. Nakayama and M. Takimoto, “Suppressed Non-Gaussianity in the Curvaton Model,” Phys. Rev. D **89**, no. 12, 123515 (2014) [arXiv:1402.1856 [astro-ph.CO]].
- [13] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “The 3.5 keV X-ray line signal from decaying moduli with low cutoff scale,” Phys. Lett. B **735**, 338 (2014) [arXiv:1403.1733 [hep-ph]].
- [14] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “Anomaly-free flavor models for Nambu-Goldstone bosons and the 3.5keV X-ray line signal,” Phys. Lett. B **734**, 178 (2014) [arXiv:1403.7390 [hep-ph]].
- [15] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “Extra light fermions in E_6 -inspired models and the 3.5 keV X-ray line signal,” Phys. Lett. B **737**, 311 (2014) [arXiv:1405.4670 [hep-ph]].
- [16] K. Nakayama and F. Takahashi, “Higgs Chaotic Inflation and the Primordial B-mode Polarization Discovered by BICEP2,” Phys. Lett. B **734**, 96 (2014) [arXiv:1403.4132 [hep-ph]].
- [17] K. Mukaida and K. Nakayama, “Dark Matter Chaotic Inflation in Light of BICEP2,” JCAP **1408**, 062 (2014) [arXiv:1404.1880 [hep-ph]].
- [18] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “Gravitino Problem in Supergravity Chaotic Inflation and SUSY Breaking Scale after BICEP2,” Phys. Lett. B **734**, 358 (2014) [arXiv:1404.2472 [hep-ph]].
- [19] H. Murayama, K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “Sneutrino Chaotic Inflation and Landscape,” Phys. Lett. B **738**, 196 (2014) [arXiv:1404.3857 [hep-ph]].

- [20] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “Kinetic Term Anarchy for Polynomial Chaotic Inflation,” *JHEP* **1409**, 014 (2014) [arXiv:1406.4265 [hep-ph]].
- [21] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “Polynomial Chaotic Inflation in Supergravity Revisited,” *Phys. Lett. B* **737**, 151 (2014) [arXiv:1407.7082 [hep-ph]].
- [22] T. Higaki, K. Nakayama, K. Saikawa, T. Takahashi and M. Yamaguchi, “Affleck-Dine baryogenesis with R-parity violation,” *Phys. Rev. D* **90**, no. 4, 045001 (2014) [arXiv:1404.5796 [hep-ph]].
- [23] T. Moroi, K. Mukaida, K. Nakayama and M. Takimoto, “Axion Models with High Scale Inflation,” *JHEP* **1411**, 151 (2014) [arXiv:1407.7465 [hep-ph]].
- [24] S. Kuroyanagi, K. Nakayama and J. Yokoyama, “Prospects of determination of reheating temperature after inflation by DECIGO,” *PTEP* **2015**, no. 1, 013E02 (2015) [arXiv:1410.6618 [astro-ph.CO]].
- [25] M. Endo, K. Hamaguchi, K. Ishikawa and M. Stoll, “Reconstruction of Vector-like Top Partner from Fully Hadronic Final States,” *Phys. Rev. D* **90** (2014) 5, 055027 [arXiv:1405.2677 [hep-ph]].
- [26] M. Stoll, “Vetoed jet clustering: The mass-jump algorithm,” *JHEP*04(2015)111 [arXiv:1410.4637 [hep-ph]].
- [27] M. Endo and Y. Takaesu, “Heavy WIMP through Higgs portal at the LHC,” *Phys. Lett. B* **743**, 228 (2015) [arXiv:1407.6882 [hep-ph]].
- [28] K. Mukaida and M. Takimoto, “Correspondence of I- and Q-balls as Non-relativistic Condensates,” *JCAP* **1408**, 051 (2014) [arXiv:1405.3233 [hep-ph]].
- [29] K. Hamaguchi, T. Moroi and T. Terada, “Complexified Starobinsky Inflation in Supergravity in the Light of Recent BICEP2 Result,” *Phys. Lett. B* **733** (2014) 305 [arXiv:1403.7521 [hep-ph]].
- [30] S. V. Ketov and T. Terada, “Inflation in Supergravity with a Single Chiral Superfield,” *Phys. Lett. B* **736** (2014) 272 [arXiv:1406.0252 [hep-th]].
- [31] S. V. Ketov and T. Terada, “Generic Scalar Potentials for Inflation in Supergravity with a Single Chiral Superfield,” *JHEP* **1412** (2014) 062 [arXiv:1408.6524 [hep-th]].
- [32] T. Terada, Y. Watanabe, Y. Yamada and J. Yokoyama, “Reheating processes after Starobinsky inflation in old-minimal supergravity,” *JHEP* **1502** (2015) 105 [arXiv:1411.6746 [hep-ph]].
- [33] Y. Matsuo, C. Rim and H. Zhang, “Construction of Gaiotto states with fundamental multiplets through Degenerate DAHA,” *JHEP* **1409**, 028 (2014) [arXiv:1405.3141 [hep-th]].
- [34] P. M. Ho and Y. Matsuo, “Aspects of Effective Theory for Multiple M5-Branes Compactified On Circle,” *JHEP* **1412**, 154 (2014) [arXiv:1409.4060 [hep-th]].
- [35] S. Nakamura, F. Okazawa and Y. Matsuo, “Recursive method for the Nekrasov partition function for classical Lie groups,” *PTEP*, no. 3, 033B01 (2015) [arXiv:1411.4222 [hep-th]].
- [36] N. Hama, T. Nishioka and T. Ugajin, “Supersymmetric Rényi Entropy in Five Dimensions,” *JHEP* **1412** (2014) 048 [arXiv:1410.2206 [hep-th]].
- [37] T. Kawano, Y. Nakaguchi and T. Nishioka, “Holographic Interpolation between a and F ,” *JHEP* **1412**, 161 (2014) [arXiv:1410.5973 [hep-th]].
- [38] Y. Nakaguchi and T. Nishioka, “Entanglement Entropy of Annulus in Three Dimensions,” *JHEP* **1504**, 072 (2015) [arXiv:1501.01293 [hep-th]].
- [39] K. Ohmori and Y. Tachikawa, “Physics at the entangling surface,” *Journal of Statistical Physics*, in press. arXiv:1406.4167 [hep-th].
- [40] Y. Tachikawa, “Magnetic discrete gauge field in the confining vacua and the supersymmetric index,” *JHEP* **1503** (2015) 035 [arXiv:1412.2830 [hep-th]].
- [41] H. Hayashi, Y. Tachikawa and K. Yonekura, “Mass-deformed T_N as a linear quiver,” *JHEP* **1502** (2015) 089 [arXiv:1410.6868 [hep-th]].
- [42] Y. Tachikawa, “Instanton operators and symmetry enhancement in 5d supersymmetric gauge theories,” *PTEP* **2015** 4, 043B06 [arXiv:1501.01031 [hep-th]].
- [43] K. Ohmori, H. Shimizu and Y. Tachikawa, “Anomaly polynomial of E-string theories,” *JHEP* **1408**, 002 (2014) [arXiv:1404.3887 [hep-th]].
- [44] K. Ohmori, H. Shimizu, Y. Tachikawa and K. Yonekura, “Anomaly polynomial of general 6d SCFTs,” *PTEP* **2014**, no. 10, 103B07 (2014) [arXiv:1408.5572 [hep-th]].
- (会議抄録)
- [45] Y. Tachikawa, “Comments on supersymmetric quantum field theories,” *J. Phys. Conf. Ser.* **597** (2015) 1, 012005.
- (国内雑誌)
- (学位論文)
- [46] 修士論文: Yohei Ema, “High-Energy Cosmic Rays from the Decay of Long-Lived Particle”
- [47] 博士論文: T. Kitahara, “Aspects of High-Scale Supersymmetry in a Singlet-Extended Model”
- [48] 博士論文: K. Mukaida, “Dynamics of Scalar Condensation in the Early Universe”
- [49] 博士論文: 寺田隆広, “Inflation in Supergravity with a Single Superfield”
- [50] 修士論文: H. Shimizu, “On anomalies of 6d superconformal field theories.”

(著書)

- [51] Y. Tachikawa, “N=2 supersymmetric dynamics for pedestrians,” *Lect. Notes Phys.* **890** 2014, Springer Verlag, [arXiv:1312.2684 [hep-th]]

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [52] K. Hamaguchi, “SUSY Dark Matter (after Higgs discovery),” *Dark Matter: Astrophysical probes, Laboratory test, Theory aspects (Dark MALT)*, February 2-27, 2015, Munich Institute for Astro- and Particle Physics (MIAPP), Munich, Germany.
- [53] T. Kitahara, “Future Prospects for Stau in Higgs Coupling to Di-photon,” *SUSY2014*, the University of Manchester, England, July 21-26, 2014.
- [54] T. Kitahara, “Singlino Resonant Dark Matter in High-Scale mSUSY,” *The annual Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology 2014*, KEK, October 21-24, 2014.
- [55] 三嶋剛, “Nonperturbative Effect on the Electron Magnetic Moment,” *Summer Institute 2014*, 山梨, 2014年8月23日.
- [56] “High-Energy Neutrino Emission from the Decay of Long-Lived Particle and Its Implication to IceCube Results,” *CosPA 2014* (December 8 – 12, 2014), Auckland, New Zealand.
- [57] K. Mukaida, “Dynamics of Peccei-Quinn Scalar Revisited,” *Strong and ElectroWeak Matter 14*, 17 July 2014, EPFL Lausanne.
- [58] K. Nakayama, “Axion Cosmology with High Scale Inflation” *COSPA2014*, University of Auckland, Auckland, New Zealand (2014/12/09).
- [59] 石川 和哉, “Singlino Resonant Dark Matter,” *ILC 夏の合宿 2014*, 鳥取, 2014年7月.
- [60] M. Stoll, “Poster Session: Reconstructing the vector-like top partner from fully hadronic events,” *April Meeting 2014 of the American Physical Society*, Savannah (GA) / USA, April 2014.
- [61] M. Stoll, “Kinematic reconstruction of vector-like tops from fully hadronic final states,” *ICHEP 2014*, Valencia / Spain, July 2014.
- [62] M. Stoll, “Vector-Like Top Quarks at the LHC,” *Graduiererkolleg KIT*, Karlsruhe / Germany, July 2014.
- [63] M. Stoll, “High-pT top tagging,” *KEK Theory Center Seminar*, KEK, December 2014.
- [64] 高江洲義太郎, “LHC constraints on the heavy Higgs-portal DM models,” *Summer Institute 2014*, 富士吉田, 8月21 - 28日, 2014
- [65] 瀧本真裕, “Correspondence of I- and Q-balls as Non-relativistic Condensates”、*SEWM14*、スイス、2014年8月
- [66] 瀧本真裕 “Scale Free Electroweak Baryogenesis” *KEK-PH2014*、つくば、2014年10月
- [67] 寺田隆広, “Single Superfield Inflation”, *DESY Theory Workshop 2014: Particle Cosmology after Planck*.
- [68] 寺田隆広, “Inflation in supergravity: a minimal and powerful approach”, *KEK-PH 2014*.
- [69] 寺田隆広, “Inflation in supergravity with a single superfield”, *KEK Theory Workshop 2015*.
- [70] 寺田隆広, “Toward Higgs inflation in the MSSM”, *The 2nd Toyama International Workshop on “Higgs as a Probe of New Physics 2015” (HPNP2015)*, 富山大学.
- [71] Satoshi Nakamura, Futoshi Okazawa, Yutaka Matsuo, “Instanton Counting for Classical Groups”, *YITP Workshop “Strings and Fields”*, Yukawa Institute for Theoretical Physics, July 22-26, 2014.
- [72] Kantaro Ohmori, “Physics at the entangling surface,” *Poster Session, Strings 2014*, Princeton University, June 2014
- 招待講演
- [73] M. Endo, “Muon g-2 in BSM models,” *Flavors of New Physics*, 2015年3月10日, 高エネルギー研究所 東海キャンパス, 茨城.
- [74] K. Hamaguchi, “Supersymmetry after Higgs discovery,” *Higgs Modes in Condensed Matter and Quantum Gases*, June 23-25, 2014, YITP, Kyoto.
- [75] K. Hamaguchi, “Higgs and Beyond the Standard Model,” *The Second Asia-Europe-Pacific School of High-Energy Physics (AEPSHEP)*, November 4-17, 2014, Puri, India.
- [76] T. Moroi, “Studying Early Universe with Inflationary Gravitational Waves,” *Capri 2014: 5th Workshop on Theory, Phenomenology, and Experiments in Flavor Physics* (May 25 – 27, 2014), AnaCapri, Italy.
- [77] “Cosmic-Ray Neutrinos from the Decay of Long-Lived Particle and Implications to IceCube Results,” *IBS-MultiDark Joint Focus Program: WIMPs and Axions* (October 10 – 21, 2014), Daejeon, Korea.
- [78] K. Nakayama, “Dynamics of oscillating scalar field in the early Universe” *KEK Theory Workshop 2015*, KEK (2015/01/28)
- [79] K. Nakayama, “Inflationary gravitational waves as a probe of the early universe” *B-mode Cosmology*, KEK, Japan (2015/02/21).
- [80] T. Nishioka, “What does entanglement entropy measure?,” *Japan-Hungary Joint Research Project Workshop on Integrable system in gauge/gravity duality*, Kyoto University (2014/9/23)
- [81] T. Nishioka, “Supersymmetric Rényi Entropy,” *Joint Winter conference on Particle Physics, String and Cosmology*, Korea (2015/1/29)

- [82] Yuji Tachikawa, “On 6d SCFTs,” International Symposium Ahrenschoop, On the Theory of Elementary Particles, “Recent Developments in String and Field Theory,” Aug. 26 2014
- [83] Y. Tachikawa, “Recent Advances in SUSY,” Strings 2014, Princeton, USA, June 26, 2014
- [84] Y. Tachikawa, “Comments on supersymmetric quantum field theories,” International Colloquium on Group Theoretical Methods in Physics, Ghent, Belgium, July 17, 2014
- (国内会議)
- 一般講演
- [85] 北原鉄平, “高スケール超対称性におけるシングリーノ暗黒物質,” 素粒子物理学の進展 2014, 京都大学基礎物理学研究所, 2014 年 7 月.
- [86] 北原鉄平, “高スケール超対称性におけるシングリーノ暗黒物質と 125GeV のヒッグス粒子,” 日本物理学会 2014 年秋季大会, 佐賀大学, 2014 年 9 月.
- [87] 北原鉄平, “Towards a Scale Free Electroweak Baryogenesis in the mSUSY,” 第 70 回日本物理学会年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月.
- [88] 三嶋剛, “電子の磁気モーメントにおける QED の非摂動的効果,” 日本物理学会秋季大会, 佐賀大学, 2014 年 9 月 20 日.
- [89] 三嶋剛, “電子の磁気モーメントにおける非摂動的 QED の効果,” 基研研究会 素粒子物理学の進展 2014, 京都大学, 2014 年 7 月 30 日.
- [90] K. Mukaida, “Bottom-up Thermalization during/after Reheating and Dark Matter Production,” 基研研究会 素粒子物理学の進展 2014, 2014 年 7 月, 基礎物理学研究所.
- [91] 中山和則, “Suppressed Non-Gaussianity in the Curvaton Model” 日本物理学会 2014 年秋季大会, 佐賀大学 (2014/09/19).
- [92] 石川 和哉, “Reconstruction of Vector-like Top Partner from Fully Hadronic Final States,” 基研研究会 PPP2014, 京都大学, 2014 年 7 月.
- [93] 高江洲義太郎, “T2KK および T2KO 実験での質量階層性、CP 位相測定の可能性,” 日本物理学会, 佐賀大学, 9 月 18 - 21 日, 2014
- [94] 寺田隆広, “Complexified Starobinsky inflation in supergravity,” 日本物理学会秋季大会.
- [95] 寺田隆広, “Single Superfield Inflation,” 日本物理学会秋季大会 (追加講演).
- [96] 寺田隆広, “単一の超場によるインフレーションの更なる考察,” 日本物理学会第 70 回年次大会.
- [97] 中口悠輝, “3次元場の理論におけるアニュラスのエンタングルメントエントロピー,” 日本物理学会 第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月 22 日
- [98] 清水浩之, “E 型弦理論のアノマリー,” 日本物理学会 2014 年秋季大会, 佐賀大学, 2014 年 9 月 18 日
- [99] 清水浩之, “6d conformal matter の 4次元へのコンパクト化について,” 日本物理学会 2015 年々次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月 24 日
- 招待講演
- [100] M. Endo, “Overview of new physics theories,” ATLAS-Belle II 研究会, 2014 年 11 月 25 日, 東京大学.
- [101] 濱口幸一, “もしも Dark Matter の兆候が見えたら・・・ SUSY の場合,” 第 2 回 松江現象論研究会, 2014 年 11 月 28 日, 島根県民会館.
- [102] 北原鉄平, “Singlino Resonant Dark Matter and 125 GeV Higgs Boson in High-Scale Supersymmetry,” 新学術領域研究会 テラスケール 2014, 大阪大学, 2014 年 11 月.
- [103] 北原鉄平, “Singlino 暗黒物質の現象論,” 新物理の実証策を考える会, OIST, 2015 年 3 月.
- [104] 北原鉄平, “Bethe-Salpeter 方程式で探る Diquark 束縛状態 ~ladder 近似を超えて~, ” 新物理の実証策を考える会, OIST, 2015 年 3 月.
- [105] 中山和則, “素粒子論的宇宙論” 暗黒研究会, 東京大学 (2014/04/19).
- [106] 高江洲義太郎, “Determination of mass hierarchy with medium baseline reactor neutrino experiments”, 第三回 次世代の加速器ニュートリノ実験ワークショップ, 京都, 6 月 22 - 23 日, 2014
- [107] 高江洲義太郎, “LHC limits on the Higgs-portal WIMPs”, 新学術領域研究会「テラスケール 2014 先端加速器 LHC が切り拓くテラスケールの素粒子物理学」, 大阪大学, 11 月 27 - 29 日, 2014
- [108] 寺田隆広, “The Third Way to the Inflationary Universe in Supergravity”, 沖縄科学技術大学院大学
- [109] 松尾 泰, “An integrable lattice hierarchy associated with N=2 gauge theories”, 第 6 回静岡素粒子集中セミナー, 2014 年 12 月 4 6 日 (静岡市産学交流センター)
- [110] 松尾 泰, “W 代数と可解格子模型-Maulick-Okounkov のアプローチとその発展”, ミニワークショップ「数学・物理における可積分性の諸相」(Aspects of Integrability in Mathematics and Physics), 2015 年 3 月 9 日~11 日, 大阪市立大学
- (セミナー)
- [111] 松尾 泰 集中講義 “M 理論と双対性” (東北大学) 2014 年 12 月 10 日~12 日
- [112] 立川裕二 集中講義 “いろいろな次元の超対称場の理論” (大阪大学) 2014 年 10 月 20 日~22 日
- [113] 立川裕二 集中講義 “いろいろな次元の超対称場の理論” (京都大学基礎物理学研究所) 2015 年 2 月 10 日~13 日
- [114] Yuji Tachikawa, “S-dualities in 4d N=2 supersymmetric theories”, ICTP, Trieste, Italy, March 27 - 31, 2015.

2 原子核・素粒子実験

2.1 原子核実験グループ

【早野・櫻井・Wimmer】

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

早野研究室では、原子核のまわりに電子以外の負電荷の粒子が回っている奇妙な原子(エキゾチック原子)の分光実験を進めている。CERN の反陽子減速器にて反陽子ヘリウム原子と反水素原子を、J-PARC 及びイタリアの DAΦNE 加速器にて K 中間子原子・原子核を、ドイツの GSI においては η' 原子核を、理研の RIBF において π 中間子原子を研究し、陽子の質量起源、粒子・反粒子の対称性、物理定数の決定など、物理学の基本的な課題に取り組んでいる。

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

Wimmer 研究室では、直接反応によって原子核を構成する核子の一粒軌道の波動関数を求めることで、エキゾチック原子核の性質を研究している。実験は、アメリカ超電導サイクロトロン研究所 (NSCL)、カナダ国立素粒子原子核研究所 (TRIUMF)、理化学研究所の重イオン加速器研究施設 RI ビームファクトリー (RIBF) で行っている。

2.1.1 反物質の研究(早野研究室)

早野研究室は、世界唯一の超低速反陽子源である CERN 研究所の反陽子減速器施設において ASACUSA (Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons) という研究グループを率い、反物質研究を行っている。その主要な目的は、反陽子ヘリウム原子や反水素原子の分光により、物質と反物質の CPT 対称性を高精度で検証することである。

反陽子ヘリウム原子のレーザー分光

準安定反陽子ヘリウム(化学記号 $\bar{p}\text{He}^+$)は、ヘリウム原子核のまわりを基底状態の電子と、高い主量子数 $n \sim 38$ と軌道角運動量子数 $l \sim n+1 \sim 38$ を持つ反陽子がまわる三体系のリドベルグ原子である。この原子の遷移エネルギーをレーザー分光で精密に測ることによって、反陽子と電子の質量比 $M_{\bar{p}}/m_e$ を求めて、陽子のものと等価か検証する事ができる。遷移ごとに粒子の質量の影響や様々な量子電磁力学的効果、ヘリウム原子核が有限の大きさをもつことによる影響の度合いが異なるため、多くの遷移で精密分光実験を行うことが重要である。2014年度、早野研究室とマックスプランク量子光学研究所らの実験グループは遷移波長 723.9 nm および 364.4 nm をもつ二種類の反陽子の一光子遷移を励起する実験を行った。実験グループではこれまでに行われた 13 種類の一光子遷移の精密分光実験のデータと併せて解析を進行中であり、原子の遷移周波数を 2.5×10^{-9} 程度の実験精度で求めることができる見込みである。全ての精密分光実験データに基づく結果をロシア JINR 研究所の V.I. Korobov らによる三体系量子電磁力学(QED)計算と比較することで $M_{\bar{p}}/m_e$ の値を世界最高精度で求め、2015年度中に成果を報告する予定である。

超低速反陽子の原子核吸収断面積測定

反陽子は原子核に強く吸収され、原子核表面付近の核子と対消滅する。この吸収断面積は反陽子と原子核との相互作用を調べるため様々な運動量領域で測定されてきた。我々は特に、反陽子の運動量が 100 MeV/c 以下という過去の実験に比べて低い運動量領域での実験を行っている。2012年には 16 MeV/c という、これまでの実験でもっとも低い運動量の反陽子を用いた実験を行った。炭素、白金、パラジウム標的に 5.3 MeV/c の反陽子を入射し、原子核中で消滅した際に放出されるパイ中間子を検出する事で、その運動量領域において初めて反陽子の消滅イベントを確認した。

我々は現在、100 MeV/c の反陽子を用いた実験を計画している。この領域では反陽子とアイソスピン対称性を持つ、反中性子の吸収断面積がいくつかの原子核中において、これまでの実験、理論から予想される値よりも大きくなる事が報告されている。反陽子と反中性子のデータを系統的に比べることでこの振る舞い、強い相互作用の仕組みをより深く理解できると期待されているが、反中性子のデータに比べ反陽子のデータが少ないのが現状である。そこで比較対象となる反中性子のデータが存在する炭素、アルミ標的を用いた反陽子の吸収断面積測定実験を計画している。

実験は CERN の反陽子減速器を用いて行う予定であり、2014年度は実験の計画書を作成し実験審議会に提出した。反陽子の標的中の消滅イベントは時間的に特定されるが、その際に標的に散乱された反陽子が標的チェンバーに当たったイベントや、ビームライン上流からのバックグラウンドを考慮する必

2. 原子核・素粒子実験

要があった。そこでそれらのバックグラウンドをモンテカルロシミュレーションを行い評価し、使用するチェンバーの種類、ビームラインの設定の実験セットアップを決定し実験が十分可能である事を示した。提出した計画書は審議会で受理され、2015年に実験を行う事となった。

2.1.2 π 中間子原子の逆運動学による分光 (早野研究室)

中性子過剰な原子核の π 中間子原子は、中性子- π 中間子間の斥力によって π 中間子が原子核の外側に押し出されるため、より低い密度での強い相互作用の研究を可能にする。安定核の π 中間子原子実験で得られる知見を拡張するため、不安定核に束縛された π 中間子原子の分光実験を計画している。実験では重水素ガスを用いたアクティブターゲット及びシリコン検出器のセットアップによって ($d, {}^3\text{He}$) 反応の逆運動学のミッシングマス分光を行う予定である。

2014年度はアクティブターゲット検出器のプロトタイプの D_2 ガス MWDC (Multi Wire Drift Chamber) を作成し、性能評価を行った。作成した MWDC は 1 辺 6 mm の蜂の巣状のワイヤー構造をしており、合計で 10 面のワイヤーの層からなっている。性能評価の第一段階として、 D_2 ガスの代わりに H_2 ガスを用いた。MWDC の内部に α 線源およびシリコン検出器を設置し、位置分解能やゲインなどについて評価を行った。位置分解能に関してはワイヤーごとに 100–300 μm と実験を行うためには十分な性能が得られた。一方で、ゲインのワイヤーセルの位置への依存性が大きく、位置に依っては一部のセルの放電の影響で十分なゲインを得ることができなかった。今後はワイヤーセルごとに供給する電圧を変えるなどの放電対策を行い、ゲインの向上を目指す予定である。

2.1.3 η' 中間子原子核の研究 (早野研究室)

η' 中間子は $958 \text{ MeV}/c^2$ という特異に大きな質量を持つ。これは、 $U_A(1)$ 量子異常の効果によると理解されており、その寄与の大きさはカイラル対称性の自発的破れと関係していることが指摘されている。原子核密度中では、カイラル対称性が部分的に回復するため η' 中間子の質量が減少すると予想され、その場合、実効的には η' 中間子と原子核に引力が働き、原子核と η' 中間子の束縛状態 (η' 中間子原子核) が存在する可能性がある。

我々は 2014 年度にドイツの GSI 研究所において、 η' 中間子原子核を探索する分光実験を実施した。 η' 中間子原子核を生成するために、加速器から供給される 2.5 GeV の陽子 (p) ビームを炭素標的に入射し、 ${}^{12}\text{C}(p, d)$ 反応によって出てくる重陽子 (d) の運動量をスペクトロメータによって精密に測定した。重陽子の運動量から、生成物のエネルギーを、運動学的

な計算により求めることができる。この実験で取得したデータの解析を現在進めている。

2.1.4 二重魔法数核 ${}^{78}\text{Ni}$ 近傍の核構造研究 (櫻井研究室)

原子核を構成する陽子・中性子がともに閉殻となる魔法数 $2 \cdot 50$ を持つ ${}^{78}\text{Ni}$ は、現在知られている最も中性子過剰な二重魔法数核である。この中性子過剰な ${}^{78}\text{Ni}$ は生成確率が非常に小さく、これまでは核分光による詳細な核構造研究は困難であった。我々は、RIBF で得られる高強度不安定核を用いた様々な分光測定を通じて、中性子過剰核における魔法数の構造研究を進めている。

まず、我々は 2012 年から 2013 年に EURICA 国際共同研究プロジェクトの一環として、 ${}^{78}\text{Ni}$ 近傍核の β 崩壊分光研究を進めてきた。 β 崩壊はその機構がよく知られているため、崩壊の始状態・終状態を知るための優れた手法である。また、中性子過剰な不安定核は一定時間後には必ず β^- 崩壊によって娘核、孫核へと変化し安定核に至るため、 β 崩壊を用いた核分光は、すべての不安定核研究に適応できる汎用性をもち、かつ二次反応を用いた核分光法に比べ、きわめて効率のよい実験手段である。EURICA プロジェクトにおける β 崩壊の半減期測定により、5 個の新たな測定値を含む 10 以上の核種において、従来の 2–20 倍と非常に高精度の半減期測定に成功した。この結果により、非常に中性子過剰な ${}^{78}\text{Ni}$ においてもその二重魔法数的な性質が保存していることが示唆された。

さらに、 ${}^{78}\text{Ni}$ の二重閉核構造の直接的な実験的証拠を得るため、2014 年 5 月に SEASTAR 国際共同研究プロジェクトの一環で、 ${}^{78}\text{Ni}$ の陽子ノックアウト反応による励起準位探査実験を行った。陽子・中性子が偶数で、かつ魔法数を持つ原子核はその第一励起準位エネルギーが他の原子核に比べて高くなることが知られており、励起準位のエネルギー決定によりその魔法数的性質の実験的な確証を得ることができる。本実験では非常に生成率の低い ${}^{78}\text{Ni}$ の励起準位を効率的に生成しつつもビーム重心系での γ 線エネルギーに精度よく再構成するため、厚い液体水素標的に反跳陽子の軌跡を測定する TPC を組み合わせ、ノックアウト反応が起きた反応点を再構成する MINOS 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て測定を行った。現在我々は TPC による反応点再構成の解析を行っている段階であるが、反応点再構成を行わない段階においても第一励起準位の候補となりうるピークを観測した。

2.1.5 逆転の島領域の核構造研究 (櫻井研究室)

$Z = 10\text{--}12$, $N = 20\text{--}22$ 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エネルギーの低い一粒子軌道から順番に隙間なく詰まる配位ではなく、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軌道を占有する配位として解釈されている。これまで励起状態にあると考えられてきた中性子配位が基底状態となるため、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 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 年に理化学研究所の 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 γ 線核分光による励起準位構造を調べる実験を行った。

中性子ドリップライン近傍に位置し「逆転の島」に属する ^{31}Ne やさらに重い ^{37}Mg は大きな変形を持つ核であり、また同時に一つの中性子が芯の周りに広く分布する「ハロー構造」を持っていることが示唆されてきた。我々はハローを構成する中性子を、核力とクーロン力という異なる感度を持つ力で分離し、その分離反応断面積と分離破砕片の運動量分布の測定から「変形ハロー核」の微視的状态を捉えることに成功した。研究の結果、中性子の魔法数 28 の破れによる強い変形により pf 軌道が強く混合し、一つの中性子が核から広くはみ出した p 軌道を占めることでハロー構造を形成することを明らかにした。

「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・理論の両面から近年議論されている。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ガンマ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 の励起準位の構造と性質を実験的に推定した。現在反応生成物の運動量分布の導出による価中性子の軌道角運動量を求める解析が進行中である。

2.1.6 中性子過剰核におけるクラスター状態の研究 (櫻井研究室)

原子核を構成する陽子と中性子の幾つかがまとまって一つの構成要素となり、核全体がそ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 粒子がゆるく束縛したクラスター構造が存在し(ホイール状態)、 α 粒子3つが合成して炭素より重い原子核を生成する元素合成過程において重要な役割を果たすことが知られている。中性子過剰核では、余剰中性子によりクラスターの構成要素の幾何学的構造が変化し多様な形を持つことが予想されている。 ^{16}C は ^{12}C に4つの余剰中性子が加わった系であり、クラスターの構成要素である三つの α 粒子が三角形や直鎖状をとるクラスター励起準位を持つとされる。我々は、この中性子過剰な ^{16}C においてクラスター状態の探索実験を行った。 ^{16}C の

励起には、先行研究によってクラスター準位を励起するのに有用であることが知られている α 非弾性反応を採用した。一般的にクラスター準位エネルギーは中性子や α といった構成クラスターの放出のしきい値より高いため、クラスター状態にある ^{16}C は主に粒子崩壊する。そこで全ての崩壊片の四元運動量を測定することで励起準位を再構成する不変質量法によって励起準位探索をおこなった。

実験は、2013年4月に理化学研究所 RIBF で行った。超伝導 RI ビーム分離生成装置 (BigRIPS) から供給される核子あたり 200 MeV の ^{16}C 二次ビームを液体 ^4He 標的に入射し、全ての崩壊片の四元運動量を SAMURAI スペクトロメータにより測定した。現在、様々な崩壊チャンネルのうち $^{16}\text{C}^* \rightarrow ^{12}\text{Be} + ^4\text{He}$ 崩壊チャンネルを解析中であり、クラスター準位の候補となりうる励起準位のピークを同定した。

2.1.7 陽子ドリップライン核における欠損質量分光 (櫻井研究室)

核図表において一陽子・中性子の束縛エネルギーの符号が変わる境界線をドリップラインと呼び、陽子・中性子ドリップラインの外側の原子核は必ず陽子・中性子崩壊する。しかし、陽子過剰核では陽子が正の電荷を持つため、クーロン障壁の効果によりドリップラインより外の原子核でも、基底準位および低励起準位が比較的長い寿命を持つことが知られている。陽子が6個に対して中性子が2つしかない ^8C 原子核は、陽子ドリップラインの外側に存在する陽子非束縛な陽子過剰核である。先行研究により、 ^8C 核の質量および崩壊様式は既知であるが、励起状態のエネルギーおよびスピンパリティは未知である。我々は、中性子移行反応を用いた欠損質量核分光法を適用することで、非束縛核である ^8C 核の励起準位探索を可能とした。

実験は、2013年11月に理研仁科センターの RI ビーム生成装置 (RIPS) を用いて行った。RIPS により生成・分離された陽子過剰核 ^{10}C 核を水素気体標的に入射し、二核子移行反応 (p, t) によって ^8C 核を生成した。反応の反跳核である三重水素原子核を標的後方に配置した Dubna telescope によって検出し、欠損質量核分光法により ^8C 励起エネルギースペクトルを導出した。この結果 ^8C の基底準位を同定し、また反跳粒子の角度分布から反応の移行角運動量を導出することに成功した。また、他の炭素同位体に比べて比較的低い 1.5 から 5 MeV の励起エネルギー範囲に、第一 2^+ 励起準位があることを示唆する移行角運動量 $L = 2$ の強度を観測した。

2.1.8 粒子識別能向上の為に全運動エネルギー検出器の開発 (櫻井研究室)

RIBF における不安定核ビームは、通常の実験では運動エネルギーが十分高くほとんどの原子核はすべての電子がはぎ取られた状態で反応が起きる。しか

し一般に運動エネルギーが小さくなるにつれ、原子核はビームライン上に設置された検出器などの物質から電子を取り込み、水素様状態やヘリウム様状態などの電荷状態に変化することが知られている。比較的低エネルギーでの実験を行う際に生じるこれらの電荷状態を正しく粒子識別を行うためには、二次標の後で標準的に用いられる粒子識別装置 ZeroDegree における TOF- $B\rho\text{-}\Delta E$ 法だけでは不十分になることがある。この問題を解決するため、我々は新たにビームラインの終端部で全運動エネルギーを測定する検出器の開発を行っている。RIBF における高レート実験でも確実に動作し、放射線障害を受けにくく、またエネルギー分解能が良い $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーターを用いたテスト実験を 2014 年 4 月、10 月、2015 年 3 月に行った。ZeroDegree での粒子識別と組み合わせることで電荷状態を分別できることを確認した。実験ごとにシンチレーション光の読み出し法の改善を加えており、今後も継続して研究開発を行う。

2.1.9 直接反応によるエキゾチック核の核分光 (Wimmer 研究室)

これまでの研究で、エキゾチック原子核の構造は、既によく調べられている安定核のものとは大きく異なることが徐々に知られてきた。我々は、直接反応を用いた中性子過剰核の核分光を進めている。直接反応は、原子核の一粒子状態を知るとも良い手法であり、その波動関数を知ることが出来る。この手法により、我々は変形共存や新魔法数出現のメカニズムの研究を進めている。

$N = 28$ 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がある。たとえば、 ^{44}S 核では低励起エネルギーに 3 つの 0^+ 準位が存在し、それぞれ球形、プロレート変形 (ラグビーボール型)、オブレート変形 (ディスク型) をしていることが予想されている。それぞれの変形の波動関数を知るためには、一粒子準位構造の測定が有効である。2015 年度には、アメリカ国立超電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予定している。この研究では、 ^{44}S の基底準位における $f_{7/2}$ 軌道と $p_{3/2}$ 軌道の混合率を測定し、3 つの変形の共存と混合率を求める。

$N = 60$ における変形遷移現象

$N = 60$ 同中性子帯のストロンチウム (Sr)、ジルコニウム (Zr)、モリブデン (Mo) における変形遷移現象は、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研究するために

は、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、2013 年と 2014 年の夏に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に成功した。この研究をさらに進めるため、現在三重水素標的を用いた二核子移行反応の実験研究を計画している。二核子移行反応は、特に 0^+ 励起準位を選択的に励起することができ、変形遷移現象の性質を理解する鍵となる。この反応を用いた初めの実験として、 $t(^{94}\text{Sr}, p)^{96}\text{Sr}$ 反応測定が近いうちに実施される。

魔法数 $N = 32$

最近、中性子過剰核においては中性子数 32 が魔法数的な性質を持つことが発見された。我々は、この魔法数の性質を中性子数 32 を持つ ^{52}Ca において調べる二つの相補的な実験を計画している。まずは、その集団運動の性質をクーロン励起による遷移強度測定によっておこなう。基底準位の一粒子軌道の占有率は一中性子、一陽子ノックアウト反応から導出する。これらの相補的な測定により ^{52}Ca が持つ魔法数的な性質をより詳細に研究することができる。また、最新の殻模型計算との比較により、この二重魔法数核の微視的構造を明らかにすることができる。このインビームガンマ線分光法を用いた実験計画は、2014 年の RIBF の実験審議委員会によって承認された。

<報文>

(原著論文)

- [1] PHENIX collaboration: Transverse-energy distributions at midrapidity in $p + p$, $d + \text{Au}$, and $\text{Au} + \text{Au}$ collisions at $\sqrt{s(NN)} = 62.4 - 200$ GeV and implications for particle-production models, *Phys. Rev. C* 89, 044905 (2014)
- [2] Bazzi, M *et al*: L-series X-ray yields of kaonic He-3 and He-4 atoms in gaseous targets, *Euro. Phys. Journal A* 50, 91 (2014)
- [3] Hayano, RS *et al*: Comprehensive whole-body counter surveys of Miharu-town school children for three consecutive years after the Fukushima NPP accident, *Proc. Japan Academy ser.B* 90, 211 (2014)
- [4] PHENIX collaboration: Azimuthal-Angle Dependence of Charged-Pion-Interferometry Measurements with Respect to Second- and Third-Order Event Planes in $\text{Au} + \text{Au}$ Collisions at $\sqrt{s(NN)} = 200$ GeV, *Phys. Rev. Lett.* 112, 222301 (2014)
- [5] Tsubokura, M *et al*: Reduction of High Levels of Internal Radio-Contamination by Dietary Intervention in Residents of Areas Affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Plant Disaster: A Case Series, *PLOS ONE* 9, e100302 (2014)
- [6] PHENIX collaboration: Cold-Nuclear-Matter Effects on Heavy-Quark Production at Forward

- and Backward Rapidity in d + Au Collisions at $\sqrt{s(NN)} = 200\text{GeV}$, Phys. Rev. Lett. 112, 252301 (2014)
- [7] PHENIX collaboration: Measurement of transverse-single-spin asymmetries for midrapidity and forward-rapidity production of hadrons in polarized p + p collisions at $\sqrt{s} = 200$ and 62.4 GeV, Phys. Rev. D90, 012006 (2014)
- [8] PHENIX collaboration: Inclusive double-helicity asymmetries in neutral-pion and eta-meson production in $\bar{p} + \bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV, Phys. Rev. D90, 012007 (2014)
- [9] Hayano, RS *et al.*: BABYSCAN: a whole body counter for small children in Fukushima, J. Radiological Protection 34, 645-653 (2014)
- [10] PHENIX collaboration: System-size dependence of open-heavy-flavor production in nucleus-nucleus collisions at $\sqrt{s(NN)} = 200$ GeV, Phys. Rev. C90, 034903 (2014)
- [11] PHENIX collaboration: Centrality categorization $R_{p(d)+A}$ in high-energy collisions, Phys. Rev. C90, 034902 (2014)
- [12] PHENIX collaboration: Low-mass vector-meson production at forward rapidity in p + p collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV, Phys. Rev. D90, 052002 (2014)
- [13] Ivanov, AN *et al.*: beta-decay rates of bare Ag-108(47+) and H-like Ag-108(46+) ions, Phys. Rev. C90, 034620 (2014)
- [14] PHENIX collaboration: Cross section and transverse single-spin asymmetry of eta mesons in $p \uparrow + p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV at forward rapidity, Phys. Rev. D90, 072008 (2014)
- [15] PHENIX collaboration: Measurement of K_S^0 and K^{*0} in p + p, d + Au, and Cu + Cu collisions at $\sqrt{s(NN)} = 200$ GeV, Phys. Rev. C90, 054905 (2014)
- [16] Hayano, RS *et al.*: Whole-body counter survey results 4 months after the Fukushima Dai-ichi NPP accident in Minamisoma City, Fukushima, J. Radiological Protection 34, 787-799 (2014)
- [17] PHENIX collaboration: Nuclear matter effects on J/Ψ production in asymmetric Cu + Au collisions at $\sqrt{s(NN)} = 200$ GeV, Phys. Rev. C90, 064908 (2014)
- [18] Nomura, S *et al.*: Comparison between Direct Measurements and Modeled Estimates of External Radiation Exposure among School Children 18 to 30 Months after the Fukushima Nuclear Accident in Japan, Environmental Science & Technology 49, 1009-1016 (2015)
- [19] PHENIX collaboration: Cross section for b(b)overbar production via dielectrons in d + Au collisions at $\sqrt{s(NN)} = 200$ GeV, Phys. Rev. C91, 014907 (2015)
- [20] PHENIX collaboration: Charged-pion cross sections and double-helicity asymmetries in polarized p + p collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV, Phys. Rev. D91, 032001 (2015)
- [21] PHENIX collaboration: Measurement of $\Upsilon(1S + 2S + 3S)$ production in p + p and Au + Au collisions at $\sqrt{s(NN)} = 200$ GeV, Phys. Rev. C91, 024913 (2015)
- [22] Hayano, RS *et al.*: Whole-body counter surveys of Miharu-town school children for four consecutive years after the Fukushima NPP accident, Proc. Japan Academy, ser. B 91, 92-98 (2015)
- [23] Hayano, RS: Engaging with local stakeholders: some lessons from Fukushima for recovery, Annals of the ICRP 0146645315572291 (2015)
- [24] Z. Y. Xu *et al.*: “ β -Decay Half-Lives of $^{76,77}\text{Co}$, $^{79,80}\text{Ni}$ and ^{81}Cu : Experimental Indication of a Doubly Magic ^{78}Ni ”, Phys. Rev. Lett. **133**, 032505 (2014).
- [25] H. Watanabe *et al.*: “Monopole-Driven Shell Evolution below the Doubly Magic Nucleus ^{132}Sn Explored with the Long-Lived Isomer in ^{126}Pd ”, Phys. Rev. Lett. **133**, 042502 (2014).
- [26] H. Wang *et al.*: “Structure of ^{136}Sn and the $Z = 50$ magicity”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 023D02 (2014).
- [27] T. Tshoo *et al.*: “Neutron occupancy of the $0d_{5/2}$ orbital and the $N = 16$ shell closure in ^{24}O ”, Phys. Lett. **B739**, 19 (2014).
- [28] M. Takechi *et al.*: “Evidence of halo structure in ^{37}Mg observed via reaction cross sections and intruder orbitals beyond the island of inversion”, Phys. Rev. C **90**, 061305 (2014).
- [29] J. Taprogge *et al.*: “Identification of a millisecond isomeric state in $^{129}\text{Cd}_{81}$ via the detection of internal conversion and Compton electrons”, Phys. Lett. **B738**, 223 (2014).
- [30] J. Taprogge *et al.*: “ $1p_{3/2}$ Proton-Hole State in ^{132}Sn and the Shell Structure Along $N = 82$ ”, Phys. Rev. Lett. **112**, 132501 (2014).
- [31] G. S. Simpson *et al.*: “Yrast 6^+ Seniority Isomers of $^{136,138}\text{Sn}$ ”, Phys. Rev. Lett. **113**, 132502 (2014).
- [32] Y. Satou *et al.*: “One-neutron knockout reaction of ^{17}C on a hydrogen target at 70 MeV/nucleon”, Phys. Lett. **B728**, 462 (2014).
- [33] Z. Patel *et al.*: “Isomer Decay Spectroscopy of ^{164}Sm and ^{166}Gd : Midshell Collectivity Around $N = 100$ ”, Phys. Rev. Lett. **113**, 262502 (2014).
- [34] T. Nakamura *et al.*: “Deformation-Driven p -Wave Halos at the Drip Line: ^{31}Ne ”, Phys. Rev. Lett. **112**, 142501 (2014).
- [35] S. Michimasa *et al.*: “Quadrupole collectivity in island-of-inversion nuclei $^{28,30}\text{Ne}$ and $^{34,36}\text{Mg}$ ”, Phys. Rev. C **89**, 054307 (2014).

- [36] N. Kobayashi et al.: “Observation of a p -Wave One-Neutron Halo Configuration in ^{37}Mg ”, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 242501 (2014).
- [37] P. Doornenbal et al.: “Intermediate-energy Coulomb excitation of ^{104}Sn : Moderate $E2$ strength decrease approaching ^{100}Sn ”, *Phys. Rev. C* **90**, 061302 (2014).
- [38] P. Doornenbal et al.: “Rotational level structure of sodium isotopes inside the island of inversion”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2014, 053D01 (2014).
- [39] H. L. Crawford et al.: “Shell and shape evolution at $N = 28$: The ^{40}Mg ground state”, *Phys. Rev. C* **89**, 041303 (2014).
- [40] S. Calinescu et al.: “Study of the Neutron-rich Isotope ^{46}Ar Through Intermediate Energy Coulomb Excitation”, *Acta Phys. Pol.* **B45**, 199 (2014).
- [41] Y. G. Ma et al.: “Different mechanism of two-proton emission from proton-rich nuclei ^{23}Al and ^{22}Mg ”, *Phys. Lett.* **B743**, 306 (2015).
- [42] A. Corsi et al.: “Neutron-driven collectivity in light tin isotopes: Proton inelastic scattering from ^{104}Sn ”, *Phys. Lett.* **B743**, 451 (2015).
- [43] T. Marchi et al.: “Quadrupole Transition Strength in the ^{74}Ni Nucleus and Core Polarization Effects in the Neutron-Rich Ni Isotopes”, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 182501 (2014).
- [44] K. Wimmer et al.: “Elastic breakup cross sections of well-bound nucleons”, *Phys. Rev. C* **90**, 064615 (2014).
- [45] K. Wimmer et al.: “IsoTagger: Identification of isomeric nuclear states produced in fragmentation reactions with radioactive beams”, *Nucl. Instr. Meth. A* **769**, 65 (2015).
- [46] R. Orlandi et al., “Single-neutron orbits near ^{78}Ni : first spectroscopic study of the $N = 49$ isotone ^{79}Zn ”, *Phys. Lett. B* **740**, 298 (2015).
- [47] Z. Meisel et al.: “Mass Measurements Demonstrate a Strong $N = 28$ Shell Gap in Argon”, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 022501 (2015).
- [48] A. J. Nichols et al., “Spectroscopy and lifetime measurements in ^{66}Ge , ^{69}Se and ^{63}Ga using fragmentation reactions”, *Phys. Rev. C* **91**, 014319 (2015).
- [49] F. Flavigny et al., “Characterization of the low-lying 0^+ and 2^+ states in ^{68}Ni via β decay of the low-spin ^{68}Co isomer”, *Phys. Rev. C* **91**, 034310 (2015).
- (会議抄録)
- [50] Fujioka, H *et al.*: Search for η' (958)-nucleus bound states by (p, d) reaction at GSI and FAIR, *ACTA PHYSICA POLONICA B46*, 127-132 (2015)
- [51] Zmeskal, J *et al.*: Measurement of the strong interaction induced shift and width of the $1s$ state of kaonic deuterium at J-PARC, *ACTA PHYSICA POLONICA B46*, 101-112 (2015)
- [52] M. Matsushita et al.: “In-beam γ -ray spectroscopy of $^{38,40,42}\text{Si}$ ”, INPC2013 (IUPAP), EPJ web of Conf. **v.66**, p.02070 (2014).
- [53] A. Jungclaus et al.: “Isomer and beta decay spectroscopy in the ^{132}Sn region with EURICA”, INPC2013 (IUPAP), EPJ web of Conf. **v.66**, p.02040 (2014).
- (学位論文)
- [54] 轟孔一: “A First Attempt to Measure In-flight Antiproton-nucleus Annihilation Cross-sections at 16 MeV/ c ”, 早野研博士論文, 2014.
- [55] 渡辺珠以: “Detector development for pionic atom spectroscopy in inverse kinematics”, 早野研修士論文, 2014.
- [56] 棚山悟至: “一中性子ノックアウト反応による ^{35}Mg のインビーム γ 線核分光”, 櫻井研修士論文, 2014.
- [57] 宮崎卓也: “Study of nuclear structure in the carbon isotopes beyond the proton drip-line via missing mass spectroscopy”, 櫻井研修士論文, 2014.
- (著書)
- [58] 「知ろうとすること。」早野龍五・糸井重里 (新潮文庫)
- <学術講演>
- (国際会議)
- ポスターセッション
- [59] K. Todoroki: “Beam Diagnostics for Measurements of In-flight Annihilation Cross Sections of Antiprotons at 130 keV”, *Advanced in Radioactive Isotope Science(Tokyo)*, 3rd June 2014
- [60] Y. K. Tanaka et al. : “Analysis of η' mesic nucleus spectroscopy with 2.5 GeV proton beam at GSI”, *International Conference on Exotic Atoms and Related Topics (EXA2014)*, Wien (Austria), Sep. 16, 2014.
- [61] K. Matsui: “Development of a ^3He Detector Array for Measurement of Beta-delayed Neutron Emission Probability”, 2nd ARIS Conference, Tokyo (Japan), June 3, 2014.
- [62] R. Taniuchi: “Shape Dependence of Energy Resolutions of $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ Scintillators”, 2nd ARIS Conference, Tokyo (Japan), June 5, 2014.
- [63] S. Momiyama: “Level Structure of ^{35}Mg Following One-neutron Knockout”, 2nd ARIS Conference, Tokyo (Japan), June 5, 2014.
- [64] T. Saito and Y. Wada: “Study of temperature dependence of a LaBr_3 crystal for high-energy-resolution γ -ray detection”, 4th APS/JPS Joint Meeting 2014, Waikoloa, Hawaii (USA), Oct. 8, 2014.
- 一般講演

- [65] Y. K. Tanaka et al. : “Eta’ mesic nucleus spectroscopy with (p,d) reaction at GSI” , Particles and Nuclei International Conference 2014, Hamburg (Germany), Aug. 25, 2014.
- [66] Y. K. Tanaka et al. : “Search for eta’ mesic nuclei with (p,d) reaction at GSI” , Hadrons and Hadron Interactions in QCD2015, Mar. 5, 2015.
- [67] M. Niikura: “Shell-evolution towards ^{78}Ni ”, 3rd EURICA workshop, Wako (Japan), Apr. 10, 2014.
- [68] N. Kobayashi: “Spectroscopy of Neutron Halo States in the Region of Island of Inversion via Neutron Removal Reactions”, 2nd ARIS Conference, Tokyo (Japan), June 2, 2014.
- [69] M. Niikura: “Study on neutron-rich Zn isotopes via β - γ spectroscopy”, 2nd ARIS Conference, Tokyo (Japan), June 6, 2014.
- [70] H. Sakurai: “Nuclear Transmutation Programs at SAMURAI”, SAMURAI International Collaboration Workshop, Sendai (Japan), Sep. 9, 2014.
- [71] M. Niikura: “Neutron monopole drift towards ^{78}Ni ”, 3rd SUNFLOWER Workshop, Tokyo (Japan), Sep. 15, 2014.
- [72] S. Momiyama: “In-beam gamma-ray spectroscopy of knockout reaction from nuclei around the island of inversion”, 3rd SUNFLOWER Workshop, Tokyo (Japan), Sep. 15, 2014.
- [73] R. Taniuchi: “Status report of the SEASTAR experiment: DALI calibration for ^{78}Ni excited states”, 3rd SUNFLOWER Workshop, Tokyo (Japan), Sep. 15, 2014.
- [74] M. Niikura: “Structure of neutron-rich Zn isotopes”, 4th APS/JPS Joint Meeting 2014, Waikoloa, Hawaii (USA), Oct. 8, 2014.
- [75] S. Momiyama: “In-beam gamma-ray spectroscopy of one-neutron knockout channel from ^{36}Mg ”, 4th APS/JPS Joint Meeting 2014, Waikoloa, Hawaii (USA), Oct. 8, 2014.
- [76] K. Wimmer: “Single-particle structure of neutron-rich $N = 40$ isotopes: A new Island of Inversion”, 4th APS/JPS Joint Meeting 2014, Waikoloa, Hawaii (USA), Oct. 8, 2014.
- 招待講演
- [77] Hayano, RS: Physics of ASACUSA - the spectroscopy of antiprotonic helium, Questioning Fundamental Physical Principles, May 6-9, 2014 CERN
- [78] Hayano, RS: Systematic studies of deeply-bound pionic atoms at the RIKEN RIBF facility, MESON 2014 (29 May 2014 - 3 June 2014) Krakow Poland
- [79] Hayano, RS: BABYSCAN - unnecessary yet necessary, ICRP 9th dialogue seminar, Aug 31, 2014, Date city Japan
- [80] Hayano, RS: Unnecessary but necessary - An experience of commitment to Fukushima-, 3rd International Expert Symposium in Fukushima, 8-9 Sep 2014, Fukushima Japan
- [81] Hayano, RS: Fukushima Accident, II Symposium on applied nuclear physics and innovative technologies, September 24 2014, Krakow Poland.
- [82] Hayano, RS: BABYSCAN - a whole body counter for small children in Fukushima, II Symposium on applied nuclear physics and innovative technologies, Sep 25, 2014 , Krakow Poland
- [83] Hayano, RS: Unnecessary but necessary - An experience of commitment to Fukushima-, IRSN-ANCCLI Seminar on Post-Accident, Oct 16, 2014, Paris, France
- [84] Hayano, RS: Strangeness physics at FAIR in conjunction with the J-PARC program, International Conference on Science and Technology for FAIR in Europe 2014, 13-17 October 2014, Worms, Germany.
- [85] Hayano, RS: CPT tests with antihydrogen and antiprotonic helium atoms, Trapped Charged Particles (TCP) School at RIKEN (28-29 November 2014)
- [86] Hayano, RS: How to Introduce Up-to-date Radiation Protection Information to Citizens?, 7th Asian regional conference on the evolution of the system of Radiation Protection, Jan 9-10, Tokyo Japan
- [87] Hayano, RS: Internet use and disasters - lessons from the Fukushima Dai-ichi accident?, APRICOT-APAN 2015, 24-Feb-6 March, 2015 Fukuoka, Japan
- [88] Hayano, RS: Fukushima Accident - a personal recollection of an “antimatter” physicist, Hope Step Japan! 8 March 2015 event at Lloyd Hotel & Cultural Embassy, Amsterdam
- [89] Hayano, RS: How to Introduce Up-to-date Radiation Protection Information to Citizens?, Seminar on lessons learned from the FUKUSHIMA DAI-ICHI accident, Putrajaya International Convention Centre, 19 MARCH 2015, Putrajaya Malaysia
- [90] Hayano, RS: Measurement - For Individuals and Families -, SAFecast Conference, March 22, 2015, Tokyo
- [91] Hayano, RS: The current situation in Fukushima, Les Recontres Internationales de la radioprotection, Mar 23-25, 2015, Cadarache, France
- [92] H. Sakurai, “Status of RIBF and Strategy of Operation”, SAMURAI International Collaboration Workshop, Sendai, Japan, Sep. 8, 2014
- [93] H. Sakurai: “Emergence of Exotic Phenomena in Unstable Nuclei — how to observe them”, International School of Nuclear Physics in Erice, Sicily (Italy), Sep. 23, 2014.

- [94] H. Sakurai: “Physics of Exotic Nuclei at RIBF”, 4th APS/JPS Joint Meeting 2014, Waikoloa, Hawaii (USA), Oct. 8, 2014.
- [95] N. Kobayashi: “Using particle-gamma coincidences to study nuclear reactions and structure with fast radioactive ion beams”, 4th APS/JPS Joint Meeting 2014, Waikoloa, Hawaii (USA), Oct. 8, 2014.
- [96] H. Sakurai: “Physics Programs at RIBF”, International Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2014, Ho Chi Minh City (Vietnam), Nov. 3, 2014.
- [97] K. Wimmer: “Shape coexistence studies using one- and two-nucleon transfer reactions”, Workshop on “Progress in nuclear shell-model calculations in CNS-RIKEN collaboration”, RIKEN, Wako (Japan), Nov. 27, 2014.
- (国内会議)
- 一般講演
- [98] Tanaka, Y: Search for η' mesic nuclei with (p,d) reaction at GSI, 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, October 7-11, 2014, Hawaii
- [99] 田中良樹: “Report from Spectroscopy Experiment of η' Mesic Nuclei at GSI”, 滞在型研究会@JPARC 原子核媒質中のハト α ロン研究 II, KEK 東海キャン八再入, 2014年10月25日
- [100] 西隆博: “Recent news from deeply bound pionic atom spectroscopy in RIBF”, 滞在型研究会@JPARC 原子核媒質中のハト α ロン研究 II, KEK 東海キャン八再入, 2014年10月25日
- [101] 田中良樹: “GSIで α の(p,d)反応による η' 中間子原子核分光”, ELPH研究会C009(光生成反応によるハト α ロン間相互作用の研究の進展, 東北大学, 2014年11月5日
- [102] 山田裕之, 反陽子ヘリウム原子の高励起状態のレーザー分光実験 (日本物理学会第70回年次大会)
- [103] 田中良樹, (p,d)反応の分光による η' 中間子原子核の探索 (日本物理学会第70回年次大会)
- [104] 渡辺珠以, 逆運動学によるパイ中間子原子分光のための重水素ガスドリフトチェンバーの開発 (日本物理学会第70回年次大会)
- [105] 櫻井博儀: “長寿命核分裂廃棄物の核変換データとその戦略”, 原子力システム成果報告会, 東京, 2015年1月.
- [106] 舩山悟至: 『一中性子ノックアウト反応による ^{35}Mg のインビーム核分光』, 日本物理学会第70回年次大会, 早稲田大学, 2015年3月21日.
- [107] 谷内稔: 『 ^{78}Ni のインビームガンマ線核分光』, 日本物理学会第70回年次大会, 早稲田大学, 2015年3月21日.
- [108] K. Wimmer: “Spectroscopy in a new Island of Inversion”, 日本物理学会第70回年次大会, 早稲田大学, 2015年3月21日.
- [109] 小山俊平: 『 ^{16}C クラスター準位探索実験』, 日本物理学会第70回年次大会, 早稲田大学, 2015年3月22日.
- [110] 宮崎卓也: 『欠損質量核分光による陽子ドリップライン炭素原子核の構造研究』, 日本物理学会第70回年次大会, 早稲田大学, 2015年3月22日.
- 招待講演
- [111] Hayano, RS, CPT tests with antihydrogen and antiprotonic helium atoms, 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, October 7-11, 2014, Hawaii
- [112] 早野龍五, 光と反粒子を使って対称性を探る (日本物理学会第70回年次大会)
- [113] H. Sakurai: “Current Status and Future of RIBF My Very Personal Perspectives”, RIBF Theory Forum Workshop, Wako (Japan), Aug., 2014.
- (セミナー)
- [114] 早野龍五, 不要だが必須の装置 - BABYSCAN から見える福島は今, 2014/4/25 桜美林大学
- [115] 早野龍五, 福高生を CERN に, 2014/5/12 県立福島高等学校
- [116] 早野龍五, BABYSCAN から見える福島は今, 2014/5/17, デモクラ TV, 東京
- [117] 早野龍五, 不要だが必須の装置 - BABYSCAN から見える福島は今, 2014/5/24 岩瀬公立病院, 須賀川市
- [118] 早野龍五, 水兵さんに始まり宇宙の誕生に至る一時間の冒険, 2014/7/5 日本商工会議所荒川支部主催中学生向け講演, 東京大学
- [119] 早野龍五, 反物質, 2014/8/10 3331 熱中教室 アーツ千代田 3331, 東京
- [120] 早野龍五, 特別授業「相対論」, 2014/9/4 福島県立福島高校
- [121] Hayano, RS: A story of BABYSCAN, SjCOOP (Science journalism COOPeration) Asia Tokyo Meeting 2014, Sep 10, 2014, Minamisoma, Japan
- [122] 早野龍五, - 不要だが必須の装置 - BABYSCAN から見える福島は今, 2014/9/11 国立国会図書館, 東京
- [123] 早野龍五, 「天使と悪魔」から BABYSCAN へ - 反物質研究者か α 福島で α 学んだ α トランス・サイエンス -, 2014/10/10 日本技術士会 企業内技術士シンポジウム (東京)
- [124] Hayano, RS: Experience with Social Networks, IRSN Seminar: What Lessons for the IRSN Experts?, Oct 17, 2014, IRSN, France
- [125] 早野龍五, Technical Details of BABYSCAN, 2014/11/15 放射線計測勉強会, いわき市
- [126] Hayano, RS: Fukushima Accident - a personal recollection of an “antimatter” physicist, Feb 9, 2015 Giessen Physikalisches Kolloquium (ドイツギーゼン大学)

- [127] 早野龍五, 福島の内被ばく, 2015/2/12 食品中の放射性物質に対する取組について～子どもの食事への不安を考える～いわき市
- [128] 早野龍五, 放射線のグラフづくりから高校生の引率まで, 2015/2/21 活きる場所のつくりかた (毎日ホール)
- [129] 早野龍五, BABYSCAN から見える福島の今, 2015/3/17 財務省
- [130] N. Kobayashi: “Spectroscopy of the Island of Inversion Nuclei via Nuclear and Coulomb Breakup Reactions”, NSCL Nuclear Physics Seminars, Michigan State University (USA), Nov. 17, 2014.
- [131] K. Wimmer: “Modifications of the Nuclear Shell Structure: Spectroscopy in Islands of Inversion”, Nuclear Physics Seminar, the University of Tokyo, Tokyo (Japan), Oct. 15, 2014.
- [132] K. Wimmer: “Tracking the Evolution of Nuclear Shell Structure”, Physics Seminar, the University of Tokyo, Tokyo (Japan), Nov. 21, 2014.
- [133] K. Wimmer: “In-beam gamma-ray spectroscopy with GREY at the NSCL”, CNS and RIBF Nuclear Physics Seminar, RIKEN, Wako (Japan), Dec. 1, 2014.
- [134] 櫻井博儀: “科学するところ — 対象、思索、実行 —”, 不動岡高校, 加須市, 2014年6月.
- [135] 櫻井博儀: “経験、知識、知恵 — 実生活から研究活動までの三つのキーワード —”, 大宮高校, さいたま市, 2014年11月.

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。発見されたヒッグス粒子の質量は約 125 GeV と軽く、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、新粒子の探索と同時に精密実験によってヒッグス粒子の詳細を研究し物理の原理に高めていくことになる。



図 2.2.1: 電子・陽電子衝突のリニアコライダー、ILC

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」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いる。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なう為に、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、2014年には我々の実験によって大きなブレイクスルーがあり、束縛量子状態の証拠である超冷中性子の鉛直分布の凹凸が明確に観測でき、それらを量子力学で説明することができた。

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。10年前から ICFA (International Committee for Future Accelerators) では、各国でバラバラに行なってきた加速器開発を統合し、超電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の初期に行なう物理学が明確になり、12月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、駒宮はその議長を務める。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」が答申を出し、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初めて徐々に加速器を足してゆき、エネルギーを段階的に増強して、トップクォーク、暗黒物質を担う粒子、ヒッグス粒子の自己結合と順次研究していくという段階的実施案についての合意の文書を発表した。更に、2013年9月には日本学術会議が「国際リニアコライダー計画に関する所見」を発表し、2014年度には ILC の名前がついた準備予算が執行され、政府は我が国での建設を真剣に検討している。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、国内外の研究者と共に努力を重ねている。

ATF2 レーザー干渉型電子ビームサイズモニタの開発研究

KEKにある加速器試験施設 ATF2 では、ILC のための最終収束系の実証試験が行われている。本研究室では、ATF2 の仮想衝突点において垂直方向に 37 nm に収束した極小の電子ビームサイズを測定するためのビームサイズモニタとして、新竹モニタを開発している。

新竹モニタは、レーザー干渉縞で電子ビームをスキャンし、この際に発生するコンプトン散乱光をガンマ線検出器を用いて測定する。干渉縞上で磁場強度の山の位置に電子ビームが衝突するとコンプトン信号量は大きくなり、谷の位置では小さくなる。このコンプトン信号量の変調の大きさは電子ビームサイズによって変化するため、この測定によって電子ビームサイズを算出することができる。この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 70 nm が測定された。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などである。

新竹モニタはレーザー干渉を用いる革新的な手法

により、100 nm 以下の垂直方向電子ビームサイズを測れる唯一の手段として ATF2 の目標達成と ILC の実現にとって不可欠である。精密測定したビームサイズを加速器にフィードバックすることによりビームチューニングと収束手法の研究に常時安定に貢献している。2012年末に世界最小の電子ビームサイズ 70 nm を測定し、2013年3月には 65 nm、2014年4月に 63 nm、2014年6月には世界記録である 44 nm の測定を達成した。さらに、レーザーと電子ビームとの間の相対的な位置のジッターの評価と、様々なレーザー由来の系統誤差要因の詳細分析を行い、測定値に不確定性の考慮や補正を加えることで、極小ビームサイズを精密に評価する手法を確立した。

1つの電子ビームトレインに2つのバンチを含む2バンチビーム運転において、2つ目のバンチのビームサイズ測定を行うことを計画している。このために、現在使用しているガンマ線検出器より時間応答の早い、チェレンコフ検出器を用いたガンマ線検出器の開発研究を行っている。

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。これまで、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、近年では、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きている。そのアルゴリズムの性能は、電磁カロリメータでのクラスタの分離能で大きく左右される。そのために、測定器に高い細密度を要請する。

本研究室では、5 mm 四方のピクセルを持つ高密度シリコン 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 [10]。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 [14][27][29][32]。2014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。また、損傷の程度は、バンドギャップエネルギーが実効的な減少で表現され得ることを確認した。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の耐性試験も行った [36]。2015年度には、追加の試験と導電性エポキシ接着剤の最適化試験を行う予定である。

電磁カロリメータのハードウェア開発の一方で、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 [5][9]。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、

ヒッグス粒子の 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

CERN の誇る世界最大の陽子・陽子衝突加速器 LHC は、2012 年にヒッグス粒子を発見し、エネルギーを 13TeV に上げるための 2 年間の休止期間にはいった。130 GeV 以下のヒッグス粒子の発見によって、超対称性が有利となったが、まだその兆候は見えていない。13TeV の運転に期待したい。国際的な超大規模実験である ATLAS に、十分に訓練を積んだ博士課程の大学院生を送り込み、他国の研究者や学生と切磋琢磨させることで、真に国際的な実力を持った研究者を育てている。国際競争は特に厳しいが、素粒子物理国際研究センターの有能な研究者と協力して様々な成果を上げてきた。

LHC での超対称性探索は現在岐路に立っている。125GeV というヒッグス質量、ダークマター残存密度の観測結果、2012 年までの運転 (Run1) でおよそ 1TeV まで兆候がなかったことを受けて、Higgs の階層性解消のためこれまで軽いと考えられていたスカラートップをはじめとするクォークの超対称性パートナーが非常に重い可能性が高まってきた。重点はこれらからの制約が弱い超対称性ゲージ粒子 (ゲージノ) の探索にシフトしつつある。LHC は 2015 年から前人未達の重心系エネルギー 13-14TeV 運転 (Run2) が開始し、3 年間で $100 fb^{-1}$ という大統計量を溜める予定であるが、重心系エネルギー増加による恩恵の大きいグルイーノ、断面積が小さいため統計量が必要な電弱ゲージノの探索は Run2 での猛攻が特に期待されている。本研究室では ATLAS 実験にてこれらの探索のための研究に携わり、2014 年度は Run2 に向けた解析の準備研究を行った。

グルイーノ探索

Run2 では重心系エネルギーの増加により生成断面積が 4-10 倍、また重いグルイーノにも感度を持つようになるのが大きな特徴である。本研究室では特にグルイーノの早期発見をターゲットとした解析の感度改善に取り組んだ。具体的にはまず、これまで使われてきたジェットの横運動量や消失運動量に加えて、事象の角度情報を取り込んだ新しい変数 "aplanarity" を導入し背景事象とのよりよい分離を可能にした [25]。また発見のためには精度の良い背景事象推定が必須である。これまでのグルイーノ探索では、モンテカルロシミュレーションを用いた背景事象推定法が用いられていたが、対象とする探索領域が標準模型過程が今まで実験で観測されたことのない未知の領域であるため、モデリングの不定性が必然的に大きくなる。そこで本研究室では他の領域で観測されたデータを、aplanarity の分布を用いて探索領域に外挿す

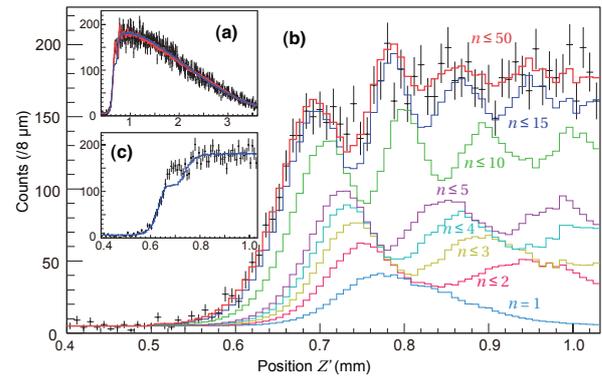


図 2.2.2: 地球重力に束縛された超冷中性子の存在確率分布。十字の測定点は、量子効果を取り入れた計算 (ヒストグラム) で良く再現されている。(a) 全体の分布の比較。(b) 分布の立ち上がり部分の比較。(c) 量子効果の無い場合の計算から得られる分布の比較。図は、G. Ichikawa (2014) より。

る新たな方法を開発し、背景事象推定の系統誤差を大幅に縮小することに成功した [33]。

電弱ゲージノ探索

ハドロニック背景事象を抑えるため終状態に 3 つのレプトンを持つチャージノ・ニュートラリーノ対生成事象に焦点を絞って、Run2 に向けた準備研究を行っている。最大の難題は信号事象と背景事象との分離であり、特に WZ 生成事象は終状態が同じでかつ運動量が酷似しているため、消失運動量などの変数を各々単体で用いた従来式のカットベースの解析では感度が非常に悪い。そこで本研究室では行列要素をベースとした尤度関数を構成し、複数の変数の間の相関も含めた同時に扱う手法を開発した [26][34]。電弱相互作用なので行列要素が理論から精度よく第一原理的に計算できること、また通常の機械学習ベースの多変量解析と違ってトレーニングを必要とせず、それに由来する不確実性がないことなどが強みである。まだ試験的な段階であるが、既に 20-50% の感度改善が確認されており、今後 Run2 の最初の結果に向けて最終調整を行っていく予定である。

2.2.3 小規模実験

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 $0.7 \mu\text{m}$ 以下の位置精度で捉えることに成功した。(図 2.2.2; G. Ichikawa, S. Komamiya, Y. Kamiya *et al.*, PRL 112, 071101 (2014), [2])

分布は $5 \mu\text{m}$ 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 $3 \mu\text{m}$ 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 [13][28]。

また、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。実験は、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た。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、その整合性を評価する。

結果は、16 から 160 mrad. の散乱角領域において、1%程度の統計精度で既知の散乱角分布に一致し、これまでフランスのグループが決めていた制限を最大一桁程、更新することに成功した。(図 2.2.3) 論文は Physical Review Letters に受理され、2015 年 4 月に出版される。(Y. Kamiya, K. Itagaki, M. Tani, G. N. Kim, and S. Komamiya, PRL 114, 161101 (2015))

更に、より長い到達距離を持った力を探索対象として、中性子レンズを用いた実験構成の最適化と、同位体キセノンを用いることによる系統誤差の抑制について見直しを進めている。これらにより、もう一桁～二桁の感度改善が期待される [35]。

<受賞>

[1] 山口洋平： 第 9 回日本物理学会若手奨励賞 (日本物理学会、2015 年 3 月)

<報文>

(原著論文)

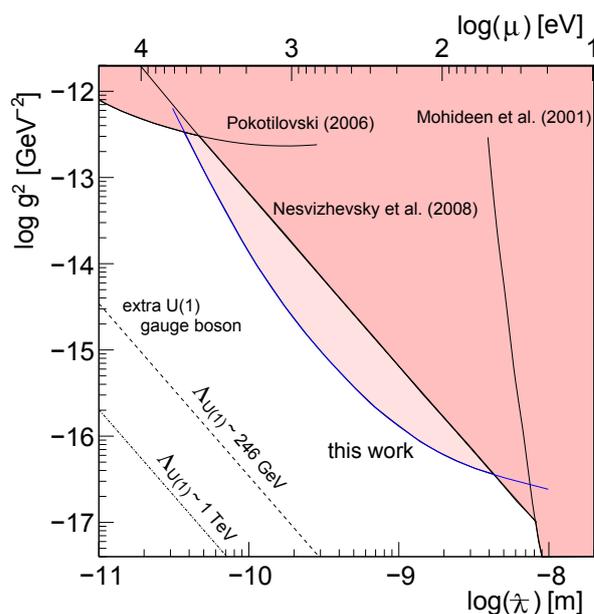


図 2.2.3: 更新した重力に準ずる新しい相互作用への制限。横軸を新しい力の到達距離または媒介粒子の質量とし、縦軸を結合の強さとした。0.04 から 4 nm の到達距離において、これまでの制限を最大で一桁ほど改善することに成功した。図は、Y. Kamiya (2015) より。

- [2] Y. Kamiya, G. Ichikawa, and S. Komamiya, "Precision Measurement of the position-Space Wave Functions of Gravitationally Bound Ultracold Neutrons", *Advances in High Energy Physics Volume 2014*, 859241 (2014).
- [3] ATLAS Collaboration, "Measurement of the Higgs boson mass from the $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ channels with the ATLAS detector at the LHC", *Phys. Rev. D.* 90, 052004 (2014).
- [4] ATLAS Collaboration, "Measurements of fiducial and differential cross sections for Higgs boson production in the diphoton decay channel at $\sqrt{s} = 8$ TeV with ATLAS", *JHEP09(2014)112*.
- [5] CALICE collaboration, "Performance of the first prototype of the CALICE scintillator strip electromagnetic calorimeter", *NIM A* **763** (2014), 278
- [6] ATLAS Collaboration, "Electron and photon energy calibration with the ATLAS detector using LHC Run 1 data", *Eur. Phys. J. C* (2014) 74: 3071.
- [7] ATLAS Collaboration, "Measurement of Higgs boson production in the diphoton decay channel in pp collisions at center-of-mass energies of 7 and 8 TeV with the ATLAS detector", *Phys. Rev. D.* 90, 112015 (2014).
- [8] ATLAS Collaboration, "Search for $H \rightarrow \gamma\gamma$ produced in association with top quarks and constraints on the Yukawa coupling between the top quark and the Higgs boson using data taken at 7 TeV and 8 TeV with the ATLAS detector", *Physics Letters B* 740 (2015) 222-242.
- [9] Katsushige Kotera, Daniel Jeans, Akiya Miyamoto, and Tohru Takeshita "A novel strip energy splitting algorithm for the fine granular readout of a scintillator strip electromagnetic calorimeter", in press, *NIM A* doi:10.1016/j.nima.2015.04.001.
- [10] M. S. Amjad, M. Anduze, J.-E. Augstin *et al.*, "Beam test performance of the SKIROC2 ASIC", *Nucl. Instrum. Methods A* **778**, 78-84 (2015).
- (会議抄録)
- [11] J. Yan, Y. Kamiya, S. Komamiya *et al.*, "Measurement of Nanometer Electron Beam Sizes Using Laser Interference by Sintake Monitor", *Proceedings of Science*, 127 (2014).
- (学位論文)
- [12] ヤン ジャクリン, "Precise Measurement of Nanometer Scale Electron Beam Size Measurement Using Laser Interference by Shintake Monitor", 博士論文 (東京大学大学院理学系研究科) 2015年3月
- [13] 荻野真由子, 「重力場による超冷中性子の量子状態測定のためのピクセル検出器の最適化」, 修士論文 (東京大学大学院理学系研究科) 2015年3月
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [14] C. Kozakai: Sensor measurements: status and plans, ILD ECAL meeting, The University of Tokyo, Japan, 10 September 2014
- [15] J. Yan: "ATF2 IP Beam Size Measurement Systematics", International Workshop on Linear Collider, 6 October 2014, Belgrade, Serbia
- [16] Y.Kano: "IPBSM stabilization and sensitivity to 20nm beam size", CLIC Workshop 2015, 28 January 2015, CERN, Switzerland
- [17] Y.Kano: "IP-BSM - Two bunch operation", 18th ATF2 Project Meeting, 24 February 2015, LAPP, France
- 招待講演
- [18] Sachio Komamiya, "Report from Linear Collider Board", American Linear Colliders Workshop, 14 May 2014, Fermi National Lab. Batavia, IL USA
- [19] Sachio Komamiya, "Linear Collider Board (LCB) Report", International Workshop on Linear Collider, 6 October 2014, Belgrade, Serbia
- [20] Sachio Komamiya, "Report from Linear Collider Board", Meeting of Financial Agencies for Large Colliders, 30 October 2014, IHEP Beijing, China
- [21] Sachio Komamiya, "Particle Physics beyond the Standard Model and the ILC Project", XXI DAE-BRNS High Energy Physics Symposium, 11 December 2014, Guwahati Assam, India
- [22] Sachio Komamiya, "Project Advisory Committee for the Linear Collider Collaboration", International Committee for Future Accelerators / Linear Collider Board, 26 February 2015, Jefferson Lab. Richmond VA, USA
- (国内会議)
- 一般講演
- [23] ジャクリン ヤン、駒宮幸男、神谷好郎、照沼信浩、田内利明、久保浄、奥木敏行、浦川順治: 「レーザー干渉型新竹モニターによる nm 電子ビームサイズ測定の性能評価」、日本物理学会 秋季大会、2014年9月18日 - 9月21日、佐賀大学
- [24] ジャクリン ヤン、Daniel Jeans、田辺友彦、Junping Tian、末原大幹: 「重心系エネルギー 350 GeV における ILC での Higgs Recoil Mass Study」、日本物理学会 秋季大会、2014年9月18日 - 9月21日、佐賀大学
- [25] 南雄人、金谷奈央子、浅井祥仁: 「LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるグルイノ探索」、日本物理学会 (秋)、2014年9月18日 - 21日、佐賀大学
- [26] 陳 詩遠、山本真平、金谷奈央子、山中隆志、南雄人、浅井祥仁、駒宮幸男、小林富雄「LHC-ATLAS 実験 Run-2 における電弱ゲージノ生成事象探索」、日本物理学会 2014年 秋季大会 佐賀大学 2014年9月18日 - 21日。

- [27] 小坂井千紘、神谷好郎、Daniel Jeans、駒宮幸男、陳詩遠：「ILDのためのシリコン検出器の性能測定と放射線耐性の評価」日本物理学会 秋季大会、2014年9月18日 - 9月21日、佐賀大学
- [28] 荻野真由子、駒宮幸男、神谷好郎、市川豪、山村和也：「超冷中性子を用いた重力場による量子状態観測実験と中性子用ピクセル検出器の最適化」日本物理学会 秋季大会、2014年9月18日 - 9月21日、佐賀大学
- [29] 小坂井千紘、Daniel Jeans、神谷好郎、駒宮幸男：「ILDのためのシリコン電磁カロリメーターのシミュレーション研究」、ILC夏の合宿、鳥取、2014年7月
- [30] ジャクリン ヤン：「Higgs Recoil Mass Study at 350 GeV」、ILC夏の合宿、鳥取、2014年7月
- [31] ジャクリン ヤン：「レーザー干渉型新竹モニターを用いたナノメートル電子ビームサイズ測定」、ILC夏の合宿、鳥取、2014年7月
- [32] C. Kozakai, H. Nakanishi, D. Jeans, Y. Kamiya, S. Komamiya: "Si-sensor measurement status" 特別推進会議、KEK、2014年12月
- [33] 南雄人、金谷奈央子、山中隆志、浅井祥仁：「LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるグルイノ事象の探索」、日本物理学会（春）、2015年3月21日 - 24日、早稲田大学
- [34] 陳詩遠、山本真平、山中隆志、浅井祥仁「LHC ATLAS 実験 Run2 における電弱ゲージノ生成事象探索」日本物理学会 第70回年次大会 早稲田大学 2015年3月22日
- [35] 笹山悦宏、板垣景大、神谷好郎、駒宮幸男、Guinyun Kim, Kyungsook Kim：「低速中性子散乱を用いた未知短距離力の探索実験」日本物理学会 第70回年次大会、2015年3月21日 - 3月24日、早稲田大学
- [36] 小坂井千紘、中西均、神谷好郎、Daniel Jeans、駒宮幸男：「LD-ECALのためのシリコン検出器の基礎特性の評価と中性子照射による損傷の効果」日本物理学会 第70回年次大会、2015年3月21日 - 3月24日、早稲田大学
- [37] 加納勇也、駒宮幸男、神谷好郎、照沼信浩、田内利明、奥木敏行：「ATF2におけるレーザー干渉型電子ビームサイズモニターによる測定の現状と課題」日本物理学会 第70回年次大会、2015年3月21日 - 3月24日、早稲田大学
- [38] ジャクリンヤン、駒宮幸男、神谷好郎、照沼信浩、田内利明、久保浄、奥木敏行、浦川順治：「レーザー干渉型新竹モニターによる極小電子ビームサイズ測定の精密測定」日本物理学会 第70回年次大会、2015年3月21日 - 3月24日、早稲田大学
- [42] 「ILCでの物理の概要」、駒宮幸男 ILC夏の合宿（2014年7月19日）関金温泉、鳥取
- [43] 「ILCが目指すもの テラスケールからプランクスケールへ」、駒宮幸男 日本物理学会 2014年秋季大会（2014年9月19日）佐賀大学、佐賀
- [44] 「宇宙の理解と素粒子物理学の発展」、駒宮幸男 三井住友 PreEMP（2014年10月23日）東京大学、東京
- [45] 「国際リニアコライダー ILCと素粒子物理学の発展」、駒宮幸男 加速器科学研究会（2014年11月7日）キャピタル東急、東京
- [46] 「エネルギーフロンティアでの ILCの重要性」、駒宮幸男 先端加速器科学技術推進協議会（2014年12月3日）アルカディア市ヶ谷、東京
- [47] 「ILCの科学的・社会的意義と現実に向けた取り組み」、駒宮幸男 第11回未来エネルギーシンポジウム（2015年3月2日）早稲田大学理工学部、東京（セミナー）
- [48] 「ILC計画の展望」、駒宮幸男 ILCセミナー（2014年5月21日）名古屋大学、愛知
- [49] 「ヒッグス粒子の発見と素粒子物理学の発展」、駒宮幸男 東京大学オープンキャンパス、（2014年8月7日）東京大学、東京
- [50] 「ヒッグス粒子の発見と素粒子物理学の発展」、駒宮幸男 サマーチャレンジ、（2014年8月18日）高エネルギー加速器研究機構、茨木
- [51] 「国際リニアコライダー 物理と計画」、駒宮幸男 大阪大学 ILCセミナー、（2014年9月1日）大阪大学、大阪
- [52] 「ILCの物理と計画の状況」、駒宮幸男 理化学研究所 仁科センター月例コロキウム、（2014年11月10日）理化学研究所仁科ホール、埼玉
- [53] 「国際リニアコライダー ILC計画と素粒子物理学の発展」、駒宮幸男 日本大学理工学部素粒子論研究室セミナー（2014年11月12日）日本大学、東京

招待講演

- [39] 「ILC計画推進の国際体制」、駒宮幸男 日本学術会議 学術フォーラム（2014年6月23日）東京
- [40] 「国際リニアコライダーの概要」、駒宮幸男 文部科学省 素粒子原子核物理作業部会（2014年6月24日）東京
- [41] 「ILCの社会的役割」、駒宮幸男 東北経済連合会（2014年6月26日）盛岡、岩手

2.3 蓑輪 研究室

蓑輪研究室では、「宇宙」・「非加速器」・「低エネルギー」という切り口で、大型加速器を使わずに新しい工夫により素粒子物理学を実験的に研究している。

2.3.1 Sumico, Tokyo Axion Helioscope

太陽由来のアクシオンを捉えるために、中心磁場 4 T、長さ 2.3 m の超伝導コイルと PIN フォトダイオード X 線検出器を備え、仰角 $\pm 28^\circ$ 、方位角はほぼ全域において天体を追尾することのできる東京アクシオンヘリオスコープ (Tokyo Axion Helioscope、愛称 Sumico) は、探索結果の最初の論文を 1998 年に出版した。類似の実験装置である、CERN の CAST

実験の7年前であった。その後改良を加えながら探索を続けてきたが、その歴史的使命を終えて2015年3月に実験室から退いた。長年にわたり最先端で働いてくれた Sumico に心から感謝する。

2.3.2 原子炉ニュートリノモニター

原子炉モニタリングに応用するための小型反電子ニュートリノ検出器 PANDA (Plastic Anti-Neutrino Detector Array) を開発している。運転中の原子炉からは、透過力の強い反電子ニュートリノが核分裂反応に伴って大量に放出されている。この反電子ニュートリノのフラックスを原子炉建屋の外から測定することで、原子炉の運転状況や燃料組成の変化を監視することができる。ニュートリノ検出技術に応用した原子炉モニタリングは、国際原子力機関 (IAEA) によって実施されている査察に代わる、非侵襲的で負担の少ない画期的な保障措置の手法となることが期待されている。

原子炉から放出された反電子ニュートリノは、有機シンチレータ中の陽子と逆 β 崩壊を起こし陽電子と中性子を生成する。これら2つの粒子を遅延同時計測で検出することで、ニュートリノのフラックスを測定できる。我々のグループが開発している PANDA は、液体シンチレータと比べてより安全性の高いプラスチックシンチレータをターゲットとして使用しており、セグメント化した構造を採用することで効率的なバックグラウンド事象の排除を可能にしている。またトラックやコンテナに積載した状態での測定が可能であるため、原子炉建屋の外からのモニタリングに適している。

2008年から現在までに第1~3次プロトタイプとして lesserPANDA、PANDA36、PANDA64 を開発してきた。2011-2012年には PANDA36 を大飯発電所に設置し、原子炉建屋の外から原子炉運転中と停止中のニュートリノフラックスの差を約 2σ で検出することに世界で初めて成功した。現在は PANDA64 の開発を終え、最終型の検出器 PANDA100 の開発をおこなっている。

PANDA36 を大飯発電所に設置していた冬季の2か月間に、予想していなかった数分間にわたるカウントレートの上昇が3バースト見つかった。これらのバーストは、エネルギースペクトルが10-15MeVの高エネルギーまで伸びていることや気象庁の提供する雷情報との一致などから、雷雲に由来する長時間持続性のガンマ線バーストであることがわかった。長時間持続性の雷雲由来バーストは山岳地帯での観測例が多いが、冬季の日本海沿岸は雷雲が低い高度に発生するため海面レベルで雷雲バーストを観測することができる世界でも珍しい地域である。

雷雲内に存在する電場の強さが $\sim 300\text{kV/m}$ 以上になると、空気中の電子は電場による加速が大気分子との衝突による減速を上回って加速され、相対論的逃走電子が発生する。電子が相対論的速度に達する過程でさらに新しい逃走電子が次々に生成するため、逃走電子数は雷雲電場中で 10^5 倍程度まで増倍するという相対論的逃走電子雪崩 (RREA) モデルが提唱

されている。RREA モデルに基づく逃走電子の増倍とそれに伴う制動放射 γ 線が、これまで山岳地帯や日本海沿岸で検出されてきた長時間持続性バーストを十分に説明できるかどうかや、バーストが長時間持続するメカニズムはまだわかっていない。

大飯発電所で PANDA36 が観測したバーストの解析から、 γ 線の到来方向がほぼ天頂方向からでありバースト持続中に変化しないこと、電場加速後の逃走電子を単色と仮定してシミュレーションをおこなうと16MeVの逃走電子を高度400-1000mから発射した場合に観測スペクトルをよく再現することがわかった (図 2.3.1)。また、単色の逃走電子に35MeVまでの高エネルギー成分を加えてシミュレーションをおこなうことで、さらによく測定スペクトルを再現できた。空気中の窒素分子との光核反応によって生成した中性子と思われるイベントも1つのバーストと同時に検出されている。

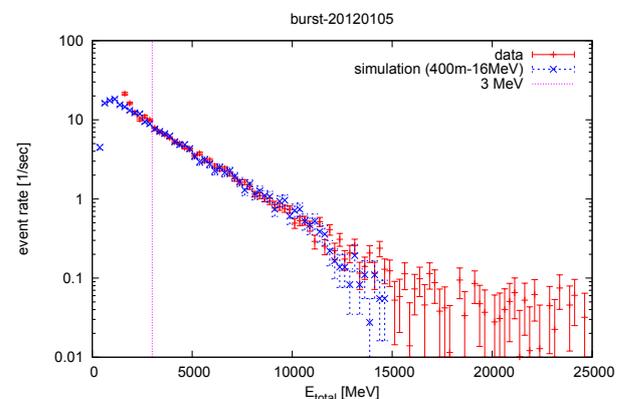


図 2.3.1: 大飯発電所で観測されたバーストのエネルギースペクトルとそれを再現するシミュレーション結果

PANDA36 による日本海沿岸での雷雲由来バーストの観測を踏まえ、第3次プロトタイプ PANDA64 による山岳地帯での観測を計画した。観測は2014年7月から9月に東大宇宙線研究所乗鞍観測所で実施し、PANDA64 はトラックに積載した状態で観測所の屋外に設置して測定をおこなった。全測定期間のデータ解析をおこなった結果、12回の雷雲由来長時間持続性バーストが観測され、そのエネルギースペクトルは最大規模のバーストで25MeV程度まで伸びていた。気象庁提供の雷情報との関連を調べたところ、12回のバースト全てが「雷可能性あり」を示すレベル1以上の状態で観測されていた。また全測定期間中に8回あった「雷あり」を示すレベル2以上の前後では、すべてバーストが観測された。このような雷情報との強い相関は PANDA36 による日本海沿岸でのバースト観測では見られなかった。

乗鞍で観測したバーストについて、大飯発電所での測定時と同様に単色の逃走電子を仮定したシミュレーションをおこなうと、40-80MeVの電子を400-1000mの高度から発射した場合に測定スペクトルを

よく再現した。この結果から、逃走電子のエネルギーは山岳地帯である乗鞍観測所のほうが日本海沿岸の大飯発電所よりも高く、一方で、大気中での逃走電子フラックスは大飯のほうが乗鞍より小さいという結果が得られた。

検出器周囲に設置した電場計と光検出器のデータも解析したところ、雷光と同時に電場の強さが急激に変化するケースが観測され、またすべてのバーストのピーク付近では電場計の値が -10kV/m 以下の負の値となっていた。バーストの終わり方として緩やかなものと急激なもの2通りが観測され、それぞれ電場との関連から前者は雷雲の通過による終結、後者は放電と同期した終結であることが示唆された(図 2.3.2)。PANDA64で観測したバーストについて、現在さらなる解析をおこなっている。

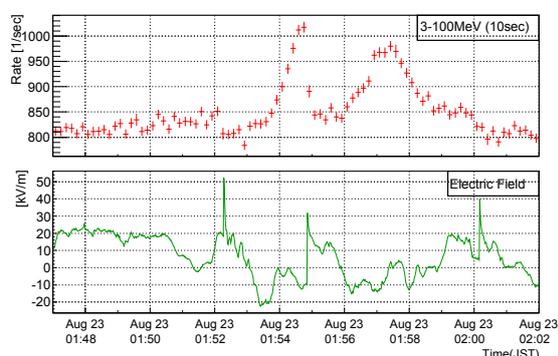


図 2.3.2: 10 秒ごとのカウントレートと電場の強さの時間変化。電場の急上昇（放電）と同時に発生した急なバースト終結と、電場の急激な変化を伴わない緩やかなバースト終結が連続して観測された。

2.3.3 Hidden photon ダークマター探索

概要

様々な天文学的観測の結果から、宇宙の物質成分の大半は、我々がよく知る通常の物質ではない何か、暗黒物質＝ダークマターによって占められていることが明らかになった。このダークマターの正体を突き止めることは、現在の宇宙・素粒子物理学にとって最も重要な課題の一つとなっている。その中でも、ダークマターを直接実験室中の物質と反応させてその信号を得る直接探索実験はその証拠を掴み性質を調べる上で必須である。

近年、国内外の多数のグループにより直接探索実験が行われている。そのほとんどはダークマター粒子として質量が $\sim \text{GeV}$ 以上のような重い Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) を想定し、その原子核反跳を捉える実験である。その他には axion ダークマター探索実験 ADMX が存在する程度で、

WIMP 以外のダークマター候補についての探索は十分に行われているとは言いがたい現状がある。

その中で、我々は hidden photon と呼ばれる新たな $U(1)$ 対称性に対応する ゲージボソン \tilde{X}_μ を持つモデルについて、それがダークマターとなりうることに目をつけ、実験的探索を行っている。そのラグランジアンは、

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}\tilde{X}_{\mu\nu}\tilde{X}^{\mu\nu} - \frac{\chi}{2}F_{\mu\nu}\tilde{X}^{\mu\nu} + \frac{m_{\gamma'}^2}{2}\tilde{X}_\mu\tilde{X}^\mu + J^\mu A_\mu$$

と、通常の光子との間に mixing parameter χ で記述される小さな混合が存在し、また質量 $m_{\gamma'}$ を持つ。このようなモデルは、標準理論を拡張する多くの模型において出現することが知られている。標準理論の電磁場との結合が存在するため、それを介して hidden photon を探索することができるが、 χ は非常に小さいことが想定されるため、何らかの方法でその信号を増幅する必要がある。これまでに axion ダークマターの探索を行ってきた ADMX では resonant cavity を用いて信号を増幅していたが、新たに dish antenna を用いる手法が提案された。我々の研究室ではこの dish antenna による手法で hidden photon ダークマターの探索を行っている。

光学領域

Hidden photon の質量が $\sim \text{eV}$ の光学領域では、光を反射する球面鏡と光検出器を用いて探索を行うことができる。我々は 2014 年度、直径 50cm の鏡とフォトンカウンティングが可能な低ノイズの光電子増倍管を用いて、質量が光学領域にある hidden photon CDM の探索実験を行ったその結果、現在のセットアップで到達可能な感度では hidden photon CDM の証拠は見つからなかった。これを用いて、質量 $3.1 \pm 1.2\text{eV}$ における mixing parameter について、 $\chi < 6 \times 10^{-12}$ という制限を得た。今後は光検出器を CCD などに換装して量子効率を上げることにより、より高感度な探索を行う計画がある。

電波領域

光学領域の他に、 $m_{\gamma'} \sim 50\mu\text{eV}$ 付近の電波領域での探索も行っている。2014 年度は、直径 2.2 m の市販されているパラボラアンテナを用いて、BS 放送で使われている Ku バンドについて実験を行った。その結果、hidden photon 由来の信号は見つからなかったが、そのことを利用して $m_{\gamma'} \simeq 50\mu\text{eV}$ 近傍に $\chi < 2 \times 10^{-12}$ という制限を得た。現在のセットアップでは極めて限られた質量領域しか探索できていないが、より広範囲の周波数を取ることで受信機を取り付ければ、その範囲の分だけ広い質量領域を探ることができる。そのため、現在どのような可能性があるか検討を行っている。

これらの測定によって得られた χ への制限を、図 2.3.3 に示す。いずれも、これまでに初めて探索された領域である。

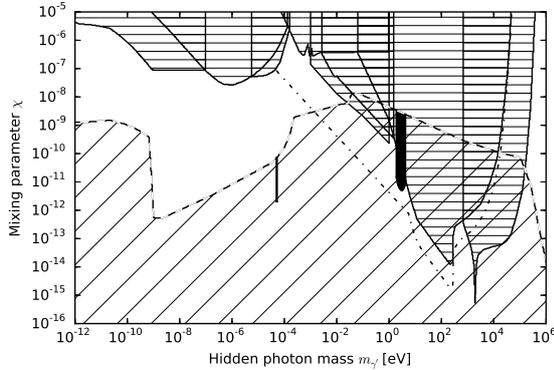


図 2.3.3: 今年度の探索によって得られた mixing angle χ に対する制限。横軸は hidden photon の質量 $m_{\gamma'}$ 、縦軸は mixing angle χ 。ダークマターがすべて hidden photon CDM で構成されていると仮定したとき、 $50\mu\text{eV}$ 付近と $\sim\text{eV}$ の黒く塗りつぶされた部分が、今回の探索により否定された。横線部分は、これまで実験や天体に関する考察などから否定された領域で、斜線部分は hidden photon CDM としてまだ否定されていない領域。

<報文>

(原著論文)

- [1] S. Oguri, Y. Kuroda, Y. Kato, R. Nakata, Y. Inoue, C. Ito, M. Minowa: Reactor antineutrino monitoring with a plastic scintillator array as a new safeguards method, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 757 (2014) 33 – 39., arXiv:1404.7309 [physics.ins-det].
- [2] J. Suzuki, T. Horie, Y. Inoue, M. Minowa: Experimental Search for Hidden Photon CDM in the eV mass range with a Dish Antenna, arXiv:1504.00118 [hep-ex].
- [3] Kenichi KARATSU, *et al.*: Development of Microwave Kinetic Inductance Detector for Cosmological Observations, IEICE Transactions on Electronics 98.3 (2015): 207 – 218.

(学位論文)

- [4] 富田望: 小型反電子ニュートリノ検出器におけるバックグラウンド事象、平成 26 年 3 月修士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻。
- [5] 黒田康浩: Observation of gamma ray storms at the earth's surface related to the thunderclouds and a study of their properties, 平成 27 年 3 月博士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻。

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [6] Y. Kato: Reactor monitoring using a segmented antineutrino detector (PANDA), Neutrino 2014, Boston University, Boston, United States, 2–7 June 2014.
- [7] N. Tomita: Study for response of superconducting detectors on the rotating system towards GroundBIRD experiment, 15th Workshop on Submillimeter-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, Ise-Shima, Mie, Japan, 15 December 2014.

(国内会議)

一般講演

- [8] 井上慶純: Hidden photon dark matter, RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics, 長野県松本市あさま温泉錦の湯地本屋、2014 年 7 月 31 日。
- [9] 富田望: GroundBIRD 高速回転ステージ上での MKID の応答性評価、日本物理学会 2014 年秋季大会、佐賀大学 2014 年 9 月 18 日。
- [10] 堀江友樹: Hidden photon ダークマター探索 (1)、日本物理学会 2014 年秋季大会、佐賀大学 2014 年 9 月 18 日。
- [11] 鈴木惇也: Hidden photon ダークマター探索 (2)、日本物理学会 2014 年秋季大会、佐賀大学 2014 年 9 月 18 日。
- [12] 富田望: CMB 偏光観測実験「GroundBIRD」の検出器応答評価、第 21 回素粒子物理国際センターシンポジウム、長野県白馬村 2015 年 2 月 11 日。
- [13] 鈴木惇也: Hidden photon ダークマター探索 (1)、日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学 2015 年 3 月 21 日。
- [14] 堀江友樹: Hidden photon ダークマター探索 (2)、日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学 2015 年 3 月 21 日。
- [15] 加藤陽: 原子炉モニタリング用ニュートリノ検出器を用いた雷雲と同期する放射線バーストの観測、日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学 2015 年 3 月 24 日。

2.4 相原・横山研究室

当研究室では、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の B ファクトリー加速器を使った実験 (Belle 実験) およびその高度化 (Belle II 実験)、ハワイ・マウナケア山頂にある国立天文台・すばる望遠鏡に搭載した超広視野 CCD カメラ (Hyper Suprime-Cam) によるダークエネルギーの研究、岐阜県飛騨市のスーパーカミオカンデ検出器でのニュートリノおよび核子崩壊

の研究, 茨城県東海村の J-PARC 加速器とスーパーカミオカンデ検出器を使った長基線ニュートリノ振動実験 (T2K 実験), 次世代大型水チェレンコフ検出器 (ハイパーカミオカンデ) の準備研究, さらに, それら将来の研究計画に向けた新型光検出器 (HPD・MPPC) の開発, 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。

2.4.1 (スーパー) B ファクトリー実験

Belle 実験

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

荷電レプトンの異常磁気能率 (スピン $1/2$ の点電荷粒子の Dirac 磁気能率からのずれ) の精密測定は, 標準理論の厳密な検証となる。また, 新物理の異常磁気能率への寄与は, 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。われわれは KEK B ファクトリー加速器で得られた大量のタウ・反タウ対を使ってタウレプトンの異常磁気能率をこれまでの 10 倍の精度で測定する。KEK B ファクトリーにおけるタウレプトンの輻射レプトン崩壊 (radiative leptonic decay; $\tau \rightarrow \mu\nu\nu\gamma$ と $\tau \rightarrow e\nu\nu\gamma$) を用いてタウレプトンの静的な (on mass-shell) 性質である異常磁気能率 $F_2(0) = a_\tau$ を 10^{-3} の精度で測定し, かつ, フレーバーに強く依存する新物理の可能性について制限を与える。副産物として, 輻射レプトン崩壊の分岐比の精密測定から, $\tau\nu W$ 結合の非標準理論モデルについても制限を与えることができる。さらに, タウレプトンのレプトン崩壊のパラメータである Michel パラメータを従来の 10 倍の精度で (例えば ρ パラメータを 10^{-3} の精度で) 決定する。これによって, 荷電カレントの非標準理論モデル (例えば右巻きカレント) に対してもきわめて厳密な制限を与えることができる。

標準模型では, B 中間子系での CP 対称性の破れの大きさはユニタリティ三角形と呼ばれる複素平面上の三角形の三つの内角 (ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3) をパラメータとして表すことができる。このうち, ϕ_3 と呼ばれるパラメータについては $B^- \rightarrow DK^-$ 崩壊の観測から理論的不定性が非常に小さい測定が可能である。しかし, この崩壊の分岐比が小さいために, 現時点では三

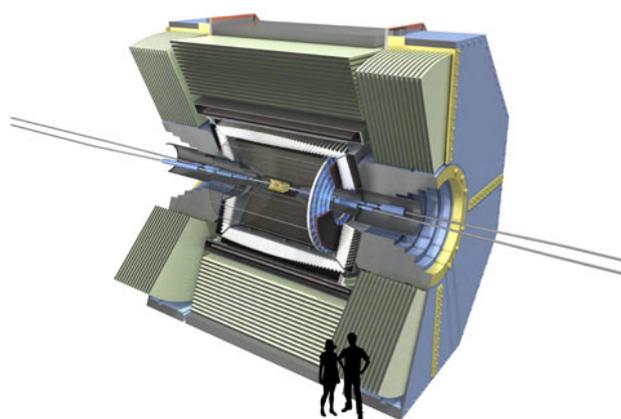


図 2.4.1: Belle II (ベルツー) 測定装置の完成予想図

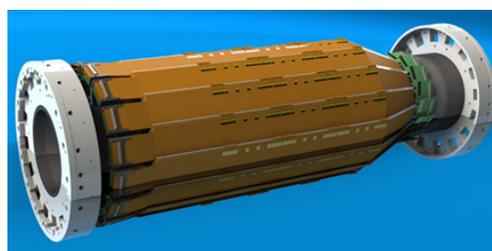


図 2.4.2: 本研究室で製作中の, Belle II SVD 測定器の完成予想図

つの角度の中で測定精度が最も悪く, 代替の測定法がいくつか提案されている。 ϕ_3 の測定は, 今後 Belle II 実験でさらに大量のデータを集めたとき, 新物理探索に重要な役割を果たすことが期待されている。本研究室では, Belle 実験のデータ解析から $B^- \rightarrow DK^-$ 事象に加えて $B^- \rightarrow D^*K^-$ 事象を使うことで更なる測定精度向上ができることを示した。今後, Belle 実験の全データを用い ϕ_3 の測定を更新するとともに, Belle II 実験での精密測定の可能性を研究する。

Belle II 実験

小林・益川両博士のノーベル賞受賞の決め手になるなど多大な成功を収めた Belle 実験のアップグレードとして, SuperKEKB 加速器と Belle II 測定器の建設が進行中である。SuperKEKB は, KEKB の 40 倍のルミノシティ ($8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 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 2.4.1) 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。



図 2.4.3: 本研究室を中心に製作した、Belle II SVD ラダーの一部読出し可能なプロトタイプモックアップ

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

最外層の 6 層目ラダーは最新設備をもつ東京大学国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) 内に製造される。本研究室は、Kavli IPMU 内の実験室創設時から SVD 検出器のラダーモジュールの量産に向けた量産研究開発を主導してきた。本研究室で開発された 6 層目ラダーの組立手法はそれぞれ 3, 4, 5 層目ラダーを製造するオーストラリア Melbourne 大、インド TIFR、オーストラリア HEPHY の研究機関にも適用されている。6 層目ラダーの量産は、本研究室を中心に、Kavli IPMU、KEK、東北大学、新潟大、東京理科大、韓国の慶北大、ソウル大との共同開発で進めている。本年度は量産前の総仕上げとして、一部信号の読出しが可能なプロトタイプモックアップラダーの製造を行った (図 2.4.2)。このラダーの製造にあたり、これまでに手法を確立した機械的品質検査に加えて、電気的品質検査のラダー組立手法への実装を行った [46]) ことで、組み立て中の各ステップで早期に不良箇所を特定し、修理することが可能になり、センサーストリップ数の歩留まり向上が期待できる。

本研究室では、電子や γ を含む終状態のエネルギー測定で重要な役割を担う ECL (電磁カロリメータ) 検

出器に関しても、SuperKEKB における高輝度・高バックグラウンド環境に対応するための新しい読み出しエレクトロニクスの開発試験、および現在用いている CsI(Tl) 結晶よりも時定数の短い pure CsI 結晶などのシンチレータの試験を行っている。本年度は、Belle II に向けた ECL の新しい読み出しモジュールの量産、CsI(Tl) 結晶への接続、試験運転の全てが完了し、宇宙線イベントの検出に成功、トリガーや DAQ システムとの結合準備を開始した。

Belle II 実験での ECL 検出器のアップグレードオプションとして、使用する結晶を CsI(Tl) から pure CsI に取り換えることで更なる性能向上を目指す案がある。本研究室では様々な pure CsI 結晶サンプルや波長変換材を組み合わせて発光量や検出効率を測定し、さらに後段の Avalanche Photodiode 検出器 (APD) に接続される増幅回路の改良を含め、総合的な性能向上に取り組んでいる。これらの開発により、エネルギーに換算した雑音の大きさを 420 keV に抑えることに成功し、アップグレードのための要求を満たす性能を達成することができた。

2.4.2 HSC 暗黒エネルギー研究

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

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

2014 年度は本格的な HSC の観測に先立ち、暗黒物質の性質の検証を目的とした、銀河団の重力レンズ効果を用いた新たな手法を開発した。銀河団は宇宙最大の自己重力天体であり、背景銀河像への重力レンズ効果の信号が最大であり、暗黒物質の性質を調べるには最善の天体である。HSC の先代である SC 主焦点カメラのデータに新手法を適用し、X 線光度で最も明るい、最大質量級の 50 個の銀河団について、重力レンズ解析を行った。その結果、冷たい暗黒物質を仮定した宇宙構造形成の標準模型が予言する「銀河団の質量プロファイルの普遍性」を有意 (約 6σ) に検出することに世界で初めて成功した。つまり、銀河団の質量の大小に関わらず、暗黒物質の分布の特徴が相似的であることを観測的に確認できた。この新手法を、今後 HSC の観測で得られる、さらに多数の銀河団サンプルに適用することで、銀河団ス

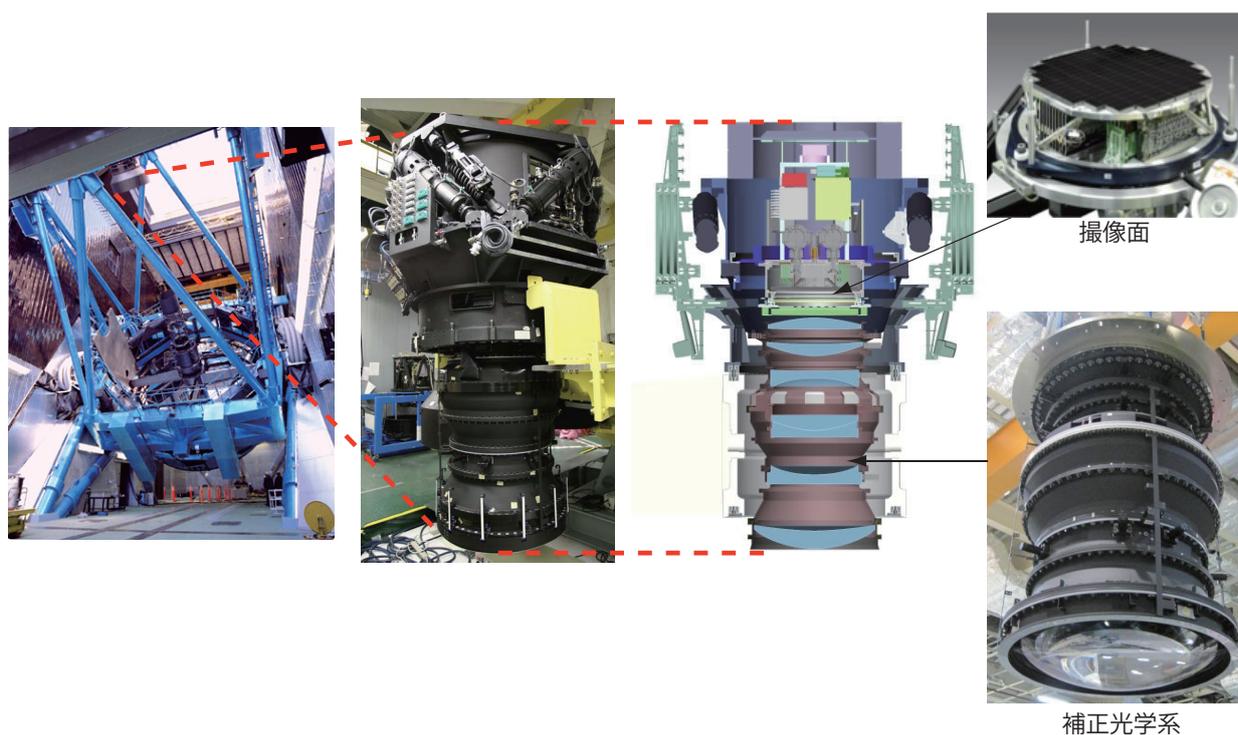


図 2.4.4: 完成した Hyper Suprime-Cam の概観。

ケールでの暗黒物質の性質をより詳細に探ることができると考えている。

HSC の開発は 2012 年 8 月に完了し、2014 年 3 月より、いよいよ大規模サーベイ観測を開始した。HSC の概観を図 2.4.4 に示す。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。試験観測中に撮像したアンドロメダ銀河の画像を図 2.4.5 に示す。今後は、これまで当研究室が開発してきた銀河の形状測定アルゴリズムなどを用い重力レンズ効果の解析を進め、サーベイの最初の段階で得られるデータから暗黒物質の正体に迫る物理結果を出していきたい。

2.4.3 T2K 長基線ニュートリノ振動実験

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

ニュートリノ振動の精密測定

2013 年までに収集したすべてのデータを用いて、これまで別々に解析していたミューニュートリノ候補事象と電子ニュートリノ候補事象を合わせて解析することで、より精度の高い測定を行った。特に、T2K 実験以前には測られていなかった、ニュートリノの CP 対称性の破れのパラメータ δ_{CP} に対し、原子炉ニュートリノ実験からの θ_{13} に対する制限を用い、3 世代の標準的なニュートリノ混合行列を仮定したとき、正質量階層 (負質量階層) の場合 90% 信頼度で $0.15\pi < \delta_{CP} < 0.83\pi$ ($-0.08\pi < \delta_{CP} < 1.09\pi$) の領域を排除した。この結果は、ニュートリノ振動で CP 対称性が大きく破れている可能性を示唆しており、今後のニュートリノ研究の指針となる成果である。

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

反ニュートリノビームでの実験

T2K 実験では、2014 年 6 月から反ニュートリノビームを用いた測定を開始した。ニュートリノの振動確率と、反ニュートリノの振動確率を比較することで、ニュートリノの CP 対称性の破れを直接的に検証する。ただし、T2K 実験のエネルギーでの反ニュート

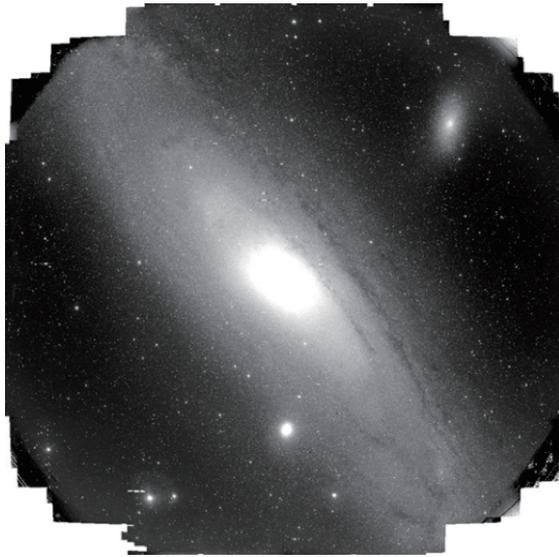


図 2.4.5: 試験観測で得られたアンドロメダ銀河 M31 の画像。拡大すると、230 万光年かなたの M31 の星々が一個々々分離して見分けられる。

リノと物質の反応断面積はニュートリノに比べ $1/3-1/4$ 程度であるため、反ニュートリノモードの実験にはより多くのデータが必要となる。我々のグループでは本年度、反ニュートリノビームの安定的な生成、およびビームの品質の継続的な監視法の確立を行った。今後はニュートリノビームと反ニュートリノビームのデータを合わせてニュートリノ振動の解析を行い、ニュートリノの CP 対称性の破れの探索など、ニュートリノの性質をさらに深く理解することでその先にあるより基礎的な物理の解明を目指す。

水標的でのニュートリノ反応断面積測定実験の提案

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

我々は、水とプラスチックの反応断面積の比を 3% の精度で測定し、T2K 実験の系統誤差を削減することを目標にした新実験の検討を 2013 年から開始し、前置検出器ホール地下 2 階のスペースに、水と炭化水素の 2 種類の標的を持ち、かつ大角度まで高いアク

セプタンスを持った新しい検出器を設置し、ニュートリノビームによる測定を行う計画を立案した。この実験を 2014 年 5 月に J-PARC でのテスト実験 (T59: 実験名 WAGASCI) として提案し、採択された。本年度は、モンテカルロシミュレーションによる検出器の設計・最適化を完了し、また検出器要素であるシンチレータ・光検出器 (MPPC) の開発を行った。新規に開発した薄型シンチレータと改良型 MPPC の組み合わせにより十分な性能が得られることをビームテストで確認し、現在、実物大のプロトタイプを作成しようとしている。

2.4.4 陽子崩壊の探索

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

我々の研究室では、スーパーカミオカンデのデータを用い、陽子崩壊を世界最高の感度で探索しようとしている。すべての光電子増倍管の情報を使う、新しい再構成ソフトウェアを開発することで、既存の解析よりも感度を向上させ、発見を目指す。新しい再構成アルゴリズムの性能を引き出すためには、光電子増倍管のゲインや水の透過率などの検出器の動作状況の時間変動を考慮する必要があり、現在、それらを宇宙線などの較正用データで評価・較正する作業を行っている。

2.4.5 次世代大型水チェレンコフ検出器・ハイパーカミオカンデ

レプトンセクターで CP 非対称性の測定をするための最も現実的で有望な方法は、電子ニュートリノ発現事象の頻度をニュートリノと反ニュートリノと比較することであるが、非対称性の詳細な研究のためには T2K 実験の数十倍の統計が必要となる。当研究室では、このような次世代の実験を行うための装置として、現行のスーパーカミオカンデの約 20 倍の大きさを持つニュートリノ検出器、「ハイパーカミオカンデ」検出器(図 2.4.6)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、100 万トンの総質量をもつ水チェレンコフ検出器で、ニュートリノの CP 非対称性測定だけでなく、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。



図 2.4.6: ハイパーカミオカンデ検出器の概念図。

我々の研究室では、2009年から宇宙線研、京都大学、名古屋大学などの国内関係者に呼びかけてワーキンググループを結成し研究を推進するとともに、ハイパーカミオカンデでの最も重要なテーマのひとつである、J-PARC 加速器からのニュートリノビームを使った長基線実験での CP 対称性の破れに対する感度を研究してきた。

本年度は、長基線ニュートリノ実験の提案書をまとめ、2014年5月に J-PARC Program Advisory Committee に将来の実験 P58 として提案を行った。また、2015年1月には、12カ国から約250名が参加する国際共同実験グループが発足し、世界各国で実現に向けた研究を協力して進めている。本研究室では、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。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] P. Vanhoefer *et al.* [Belle Collaboration], “Study of $B^0 \rightarrow \rho^0 \rho^0$ decays, implications for the CKM angle ϕ_2 and search for other B^0 decay modes with a four-pion final state,” *Phys. Rev. D* **89**, no. 7, 072008 (2014) [Addendum-ibid. *D* **89**, no. 11, 119903 (2014)].
- [2] S. Ryu *et al.* [Belle Collaboration], “Measurements of Branching Fractions of τ Lepton Decays with one or more K_S^0 ,” *Phys. Rev. D* **89**, no. 7, 072009 (2014).
- [3] T. Iwashita *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of branching fractions for $B \rightarrow J/\psi \eta K$ decays and search for a narrow resonance in the $J/\psi \eta$ final state,” *PTEP* **2014**, no. 4, 043C01 (2014).
- [4] C. P. Shen *et al.* [Belle Collaboration], “Updated cross section measurement of $e^+e^- \rightarrow K^+K^-J/\psi$ and $K_S^0K_S^0J/\psi$ via initial state radiation at Belle,” *Phys. Rev. D* **89**, no. 7, 072015 (2014).
- [5] S. H. Lee *et al.* [Belle Collaboration], “Measurements of the masses and widths of the $\Sigma_c(2455)^{0/++}$ and $\Sigma_c(2520)^{0/++}$ baryons,” *Phys. Rev. D* **89**, no. 9, 091102 (2014).
- [6] N. K. Nisar *et al.* [Belle Collaboration], “Search for CP violation in $D^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ decays,” *Phys. Rev. Lett.* **112**, 211601 (2014).
- [7] T. Peng *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of $D^0 - \bar{D}^0$ mixing and search for indirect CP violation using $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ decays,” *Phys. Rev. D* **89**, no. 9, 091103 (2014).
- [8] V. Chobanova *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of branching fractions and CP violation parameters in $B \rightarrow \omega K$ decays with first evidence of CP violation in $B^0 \rightarrow \omega K_S^0$,” *Phys. Rev. D* **90**, no. 1, 012002 (2014).
- [9] A. Zupanc *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the Branching Fraction $\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+)$,” *Phys. Rev. Lett.* **113**, no. 4, 042002 (2014).
- [10] X. H. He *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \chi_{bJ}$ and Search for $X_b \rightarrow \omega \Upsilon(1S)$ at $\sqrt{s} = 10.867$ GeV,” *Phys. Rev. Lett.* **113**, no. 14, 142001 (2014).
- [11] S. Sato *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of the decay $B^0 \rightarrow \eta' K^*(892)^0$,” *Phys. Rev. D* **90**, no. 7, 072009 (2014).
- [12] L. Santelj *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of Time-Dependent CP Violation in $B^0 \rightarrow \eta' K^0$ Decays,” *JHEP* **1410**, 165 (2014).
- [13] K. Chilikin *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of a new charged charmoniumlike state in $\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K^- \pi^+$ decays,” *Phys. Rev. D* **90**, no. 11, 112009 (2014).
- [14] S. D. Yang *et al.* [Belle Collaboration], “Evidence of $Upsilon(1S) \rightarrow J/\Psi + \chi_{c1}$ and search for double-charmonium production in $\Upsilon(1S)$ and $\Upsilon(2S)$ decays,” *Phys. Rev. D* **90**, no. 11, 112008 (2014).
- [15] D. Dutta *et al.* [Belle Collaboration], “Search for $B_s^0 \rightarrow \gamma \gamma$ and a measurement of the branching fraction for $B_s^0 \rightarrow \phi \gamma$,” *Phys. Rev. D* **91**, no. 1, 011101 (2015).
- [16] J. Wiechczynski *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of $B^0 \rightarrow D_s^- K_S^0 \pi^+$ and $B^+ \rightarrow D_s^- K^+ K^+$ branching fractions,” *Phys. Rev. D* **91**, no. 3, 032008 (2015).
- [17] A. Bala *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of $X(3872)$ in $B \rightarrow X(3872) K \pi$ decays,” *Phys. Rev. D* **91**, no. 5, 051101 (2015).
- [18] T. Saito *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the $\bar{B} \rightarrow X_s \gamma$ Branching Fraction with a Sum of Exclusive Decays,” *Phys. Rev. D* **91**, no. 5, 052004 (2015).
- [19] K. H. Kang, K. Hara, T. Higuchi, H. J. Hyun, H. B. Jeon, C. W. Joo, D. H. Kah and H. J. Kim *et al.*, “Study of gluing and wire bonding for the Belle II Silicon Vertex Detector,” *Nucl. Instrum. Meth. A* **763**, 255 (2014).

- [20] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Precise Measurement of the Neutrino Mixing Parameter θ_{23} from Muon Neutrino Disappearance in an Off-Axis Beam,” *Phys. Rev. Lett.* **112**, no. 18, 181801 (2014).
- [21] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Measurement of the intrinsic electron neutrino component in the T2K neutrino beam with the ND280 detector,” *Phys. Rev. D* **89**, no. 9, 092003 (2014).
- [22] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Measurement of the inclusive ν_μ charged current cross section on iron and hydrocarbon in the T2K on-axis neutrino beam,” *Phys. Rev. D* **90**, no. 5, 052010 (2014).
- [23] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Measurement of the neutrino-oxygen neutral-current interaction cross section by observing nuclear deexcitation γ rays,” *Phys. Rev. D* **90**, no. 7, 072012 (2014).
- [24] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Measurement of the Inclusive Electron Neutrino Charged Current Cross Section on Carbon with the T2K Near Detector,” *Phys. Rev. Lett.* **113**, no. 24, 241803 (2014).
- [25] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Search for short baseline ν_e disappearance with the T2K near detector,” *Phys. Rev. D* **91**, no. 5, 051102 (2015).
- [26] M. Litos *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Search for Dinucleon Decay into Kaons in Super-Kamiokande,” *Phys. Rev. Lett.* **112**, no. 13, 131803 (2014).
- [27] H. Zhang *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Supernova Relic Neutrino Search with Neutron Tagging at Super-Kamiokande-IV,” *Astropart. Phys.* **60**, 41 (2014).
- [28] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Search for Nucleon Decay via $n \rightarrow \bar{\nu}\pi^0$ and $p \rightarrow \bar{\nu}\pi^+$ in Super-Kamiokande,” *Phys. Rev. Lett.* **113**, no. 12, 121802 (2014).
- [29] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Search for proton decay via $p \rightarrow \nu K^+$ using 260 kiloton-year data of Super-Kamiokande,” *Phys. Rev. D* **90**, no. 7, 072005 (2014).
- [30] V. Takhistov *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Search for Trilepton Nucleon Decay via $p \rightarrow e^+\nu\nu$ and $p \rightarrow \mu^+\nu\nu$ in the Super-Kamiokande Experiment,” *Phys. Rev. Lett.* **113**, no. 10, 101801 (2014).
- [31] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Test of Lorentz invariance with atmospheric neutrinos,” *Phys. Rev. D* **91**, no. 5, 052003 (2015).
- [32] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Limits on sterile neutrino mixing using atmospheric neutrinos in Super-Kamiokande,” *Phys. Rev. D* **91**, 052019 (2015).
- [33] A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration], “Azimuthal-angle dependence of charged-pion-interferometry measurements with respect to second- and third-order event planes in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV,” *Phys. Rev. Lett.* **112** (2014) 22, 222301.
- [34] A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration], “Cold-Nuclear-Matter Effects on Heavy-Quark Production at Forward and Backward Rapidity in d+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV,” *Phys. Rev. Lett.* **112** (2014) 25, 252301.
- [35] A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration], “Measurement of transverse-single-spin asymmetries for midrapidity and forward-rapidity production of hadrons in polarized p+p collisions at $\sqrt{s} = 200$ and 62.4 GeV,” *Phys. Rev. D* **90** (2014) 1, 012006.
- [36] A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration], “Centrality categorization for $R_{p(d)+A}$ in high-energy collisions,” *Phys. Rev. C* **90** (2014) 3, 034902.
- [37] A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration], “Cross section and transverse single-spin asymmetry of η mesons in $p^\uparrow + p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV at forward rapidity,” *Phys. Rev. D* **90** (2014) 7, 072008.
- [38] A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration], “Measurement of K_S^0 and K^{*0} in $p + p$, $d + Au$, and $Cu + Cu$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV,” *Phys. Rev. C* **90** (2014) 5, 054905.
- [39] A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration], “Cross section for $b\bar{b}$ production via dielectrons in d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV,” *Phys. Rev. C* **91** (2015) 1, 014907.
- [40] A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration], “Measurement of $\Upsilon(1S + 2S + 3S)$ production in $p + p$ and Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV,” *Phys. Rev. C* **91** (2015) 2, 024913.
- [41] A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration], “Search for dark photons from neutral meson decays in $p+p$ and $d + Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV,” *Phys. Rev. C* **91** (2015) 3, 031901.
- [42] R. R. Akhmetshin *et al.* [CMD-3 Collaboration], “Search for the process $e^+e^- \rightarrow \eta'(958)$ with the CMD-3 detector,” *Phys. Lett. B* **740**, 273 (2015).
- [43] R. Ellis *et al.* [PFS Team Collaboration], “Extragalactic science, cosmology, and Galactic archaeology with the Subaru Prime Focus Spectrograph,” *Publ. Astron. Soc. Jap.* **66**, no. 1, R1 (2014).
- (会議抄録)
- [44] Y. Suda, “Performance evaluation of the large-aperture Hybrid Photo-Detector,” *Nucl. Instrum. Meth. A* **766**, 185 (2014).
- [45] Y. Onuki *et al.* [Belle II Collaboration], “The silicon strip vertex detector of the Belle II experiment,” *Nucl. Instrum. Meth. A* **765**, 99 (2014).
- (学位論文)
- [46] 佐々木 淳弥, 修士論文: “Development of Electrical Quality Assurance for Silicon Vertex Detector in Belle II experiment” (2015年2月)

- [47] 古賀 太一郎, 修士論文: “Research and development of a new neutrino detector for precise measurement of neutrino-nucleus cross sections” (2015 年 2 月)
- <学術講演>
- (国際会議)
- ポスター発表
- [48] Taichiro Koga, “Detector design and R&D for Water/CH Neutrino Cross Section Measurement,” XXVI Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2014), Boston, USA, June 2–7, 2014.
- [49] Nobuhiro Shimizu, “Study of Michel parameters in radiative leptonic decays of tau at Belle,” The 13th International Workshop on Tau Lepton Physics, Aachen, Germany, Sep. 15–19, 2014.
- 一般講演
- [50] Denis Epifanov, “Tau lifetime and decays,” The 13th International Workshop on Tau Lepton Physics, Marseille, France, May 25–30, 2014.
- [51] Yoshiyuki Onuki, “ $B \rightarrow DK$ Dalitz plot analyses for ϕ_3 at Belle,” 37th International Conference On High Energy Physics, Valencia, Spain, July 2–9, 2014.
- [52] Taichiro Koga, “Water/CH Neutrino Cross Section Measurement at J-PARC,” J-PARC Symposium 2014, Tsukuba, Japan, July 22–16 2014.
- [53] Yusuke Suda, “Performance evaluation of new photodetectors for Hyper-Kamiokande,” International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014, Amsterdam, The Netherlands, June 2–6, 2014.
- [54] Denis Epifanov, “Study of Michel parameters in leptonic tau decays at Belle,” The 13th International Workshop on Tau Lepton Physics, Aachen, Germany, Sep. 15–19, 2014.
- [55] Denis Epifanov, “Tau Michel parameters at Belle II,” KEK Flavor Factory Workshop (KEK-FF2014FALL), KEK, Tsukuba, Japan, 28–31 October 2014.
- 招待講演
- [56] Masashi Yokoyama, “The Hyper-Kamiokande Project,” Japan Geoscience Union Meeting 2014, Yokohama, Apr 28 – May 2, 2014.
- [57] Masashi Yokoyama, “The future Japanese neutrino program,” Strategy Workshop on AstroParticle in Switzerland 2014, Cartigny, Switzerland, 11–13 June 2014.
- [58] Hiroaki Aihara, “HEPAP P5 Report,” 5th open meeting for the Hyper-Kamiokande Project, University of British Columbia, July 20, 2014
- [59] Masashi Yokoyama, “Future Plans in Japan,” 14th International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN14), APC Paris, France, Nov 4–6, 2014.
- [60] Masashi Yokoyama, “T2K and J-PARC neutrino experiments,” XVI International Workshop on Neutrino Telescopes, Venice, Italy, Mar 2–6, 2015.
- (国内会議)
- 一般講演
- [61] 竹馬匠泰, 「ニュートリノ振動高精度測定のための H₂O/CH ニュートリノ反応断面積比測定」, 高エネルギー物理 春の学校 2014, 滋賀県大津市, 2014 年 5 月 29–31 日
- [62] 細見郁直, 「パイ中間子原子の研究にむけたシリコン検出器の分解能評価」, 同上
- [63] 須田祐介, 「新型 50cm 径光検出器の開発と試験」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 佐賀大学, 2014 年 9 月 18–21 日
- [64] 古賀太一郎, 「T2K 実験ニュートリノビームを用いた水とプラスチックにおけるニュートリノ荷電カレント反応断面積比測定のための新検出器 WAGASCI の設計」, 同上
- [65] 佐々木淳弥, 「Belle II 実験で用いるシリコンストリップ崩壊点検出器プロトタイプラダーの電気的読み出し試験について」, 同上
- [66] 清水信宏, 「Belle 実験における, radiative leptonic decay を用いた, タウ粒子のミシェルパラメータの測定」, 同上
- [67] 相原博昭 “物理学分野の科学・夢ロードマップ,” 日本学術会議, 2014 年 9 月 26 日
- [68] 須田祐介, “New event reconstruction algorithm for Super-Kamiokande,” 新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2014, 山梨県富士吉田市, 2014 年 12 月 21–23 日
- [69] 横山将志, 「ハイパーカミオカンデの物理」, ニュートリノ現象論ワークショップ, 島根大学, 2015 年 1 月 10–11 日
- [70] 細見郁直, 「新ニュートリノ検出器 WAGASCI のための新型 MPPC の性能評価」, 第 21 回素粒子物理国際研究センターシンポジウム, 白馬, 2015 年 2 月 8–11 日
- [71] 竹馬匠泰, 「新ニュートリノ検出器 WAGASCI のための薄型プラスチックシンチレータの陽電子ビームを用いた性能評価」, 同上
- [72] Yifan Jin, ”Research of pure CsI crystal readout by APD for ECL endcap of Belle II,” 同上
- [73] 須田祐介, 「スーパーカミオカンデ実験における新しい事象再構成アルゴリズムを用いた陽子崩壊探索感度向上の研究」, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月 21–24 日
- [74] 古賀太一郎, 「新ニュートリノ検出器 WAGASCI: J-PARC ニュートリノビームを用いた水とプラスチックにおけるニュートリノ反応断面積比測定実験」, 同上

[75] 竹馬匠泰, 「新ニュートリノ検出器 WAGASCI のための薄型プラスチックシンチレータの陽電子ビームを用いた性能評価」, 同上

[76] 細見郁直, 「新ニュートリノ検出器 WAGASCI のための新型 MPPC の性能評価」, 同上

(セミナー)

[77] Hiroaki Aihara, “Beauty of Symmetry and Symmetry Breaking,” Seminar at Okinawa Institute of Science and Technology (OIST), December 12, 2014

[78] 横山将志, 「ハイパーカミオカンデ」, 基礎物理学談話会「ニュートリノ振動実験の成果と展望 — Super-K, T2K から Hyper-K へ—」東京工業大学, 2014 年 12 月 19 日

(その他)

[79] Hiroaki Aihara, “Joint SNU-UTokyo Endeavor to Unveil the Profound Secrets of Nature,” Symposium during SNU visits to UTokyo, April 14, 2014

[80] Hiroaki Aihara, “SNU-UTokyo strategic partnership, To form a joint Asian hub for fundamental science and its application,” Seminar during visit to Seoul National University, July 13, 2014

2.5 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。

2.5.1 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 2.5.1) は、2012 年 LHC 加速器は重心系エネルギー 8TeV で運転された。本研究室は、ヒッグス粒子の発見と超対称性粒子の探索に大きな成果をあげた。LHC は、2015 年よりエネルギーを約 2 倍の 13 から 14TeV に増強して超対称性粒子などの標準理論を超える新しい素粒子発見をめざす。

ヒッグス粒子発見と性質を探る: 湯川結合の確認

ヒッグス粒子は素粒子の質量の起源であり、本研究室も参加する LHC・ATLAS 実験及び CMS 実験で 2012 年に発見された。この発見をうけて、2013

図 2.5.1: LHC 加速器

年のノーベル物理学賞が受賞された。我々のグループは、 $H \rightarrow \gamma\gamma, \tau\tau$ 及び WW の 3 つのモードに絞って研究を行い、発見やスピンの同定などに主要な成果をあげてきた。

2014 年は、発見されたヒッグス粒子の性質をしらべた。結合の強さは、現在のところ標準理論のヒッグス粒子と矛盾はなく、質量に関しては、図 2.5.2 に示す様に、 125.09 ± 0.24 GeV と 0.2% の精度で確定した。

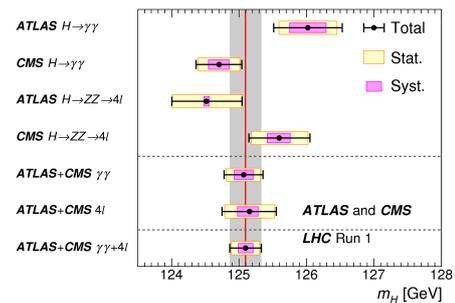


図 2.5.2: ヒッグス粒子の質量測定

2014 年度は、 $H \rightarrow \tau\tau$ の明確な信号 ($> 4\sigma$) を初めてとらえ、フェルミオンとの湯川結合の存在も確認した。図 2.5.3 に $H \rightarrow \tau\tau$ モードの探索結果を示す。このチャンネルは、 ν がタウの崩壊から放出される。しかし、観測されたタウからの粒子とニュートリノとの方向は近いため、近似的にニュートリノの運動量を再構成でき不変質量をもとめることができる。ヒッグス粒子とフェルミ粒子の結合 (湯川結合) は、additional に加えたものであり、自明ではない。その湯川結合が観測されたことで、フェルミ粒子の質量の起源もヒッグス場であることが分かった。

超対称性粒子探索

超対称性は、力の統一を実現する上で鍵となる性質であり、LHC での発見が大いに期待されている。ヒッグス粒子の質量 125GeV をうけて、naturalness などを一部緩和しなおして超対称性粒子発見可能な

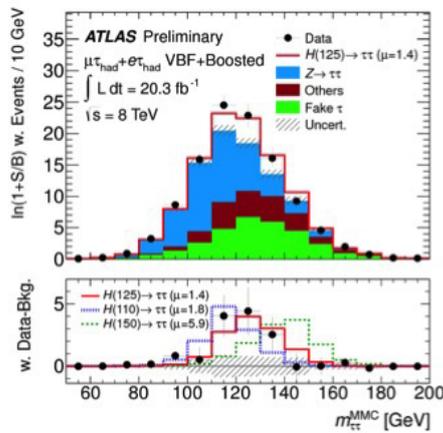


図 2.5.3: ヒッグス粒子が $\tau\tau$ に崩壊した時の再構成した不変質量分布; 図中色付きヒストグラムはバックグラウンド、無色のヒストグラムはヒッグス粒子から期待される信号を示す

探索モードの再考を行い、以下の3つのモードに絞って、2015年度の実験での発見感度を高めた。

1. グルイーノの対生成から生成する4ジェット事象
2. 電弱ゲージノの対生成から生成する3つのレプトン
3. 電弱ゲージノが Wino だったときの異常な飛跡

重要な3つの探索モードに focus し、事象の立体的な情報を用いて、これまでの発見感度を25%から50%高める事ができた。

2.5.2 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。

ポジトロニウムの超微細構造の測定

電子と陽電子の束縛系であるポジトロニウム (Ps) の基底状態は、スピン状態に応じてオルソポジトロニウム (o-Ps, スピン = 1) とパラポジトロニウム

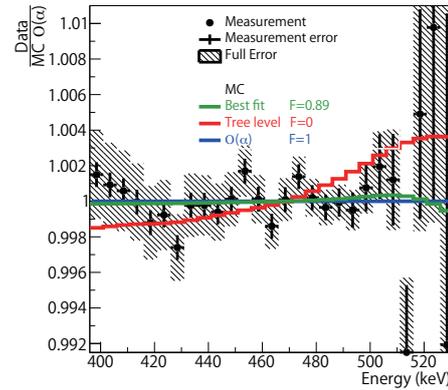


図 2.5.4: 測定スペクトルと MC スペクトルのフィット結果。結果は $F=1$ ($O(\alpha)$) を支持し、 $F=0$ (最低次) を排除する。

(p-Ps, スピン = 0) の二つが存在する。両者のエネルギー準位はスピン相互作用によって 0.84 meV (203 GHz) だけ異なり、Ps の超微細構造 (HyperFine Structure, HFS) と呼ばれる。

Ps HFS の値は束縛系 QED を検証する上で重要であり、過去に多くのグループによって測定されているが、理論計算値とずれがある。本研究室では、「Ps に 203 GHz のミリ波を直接照射して遷移を起こす方法」と、「Ps のゼーマン分裂幅を、時間発展まで考慮して精密測定する方法」の2種類の方法で測定した。その結果、過去の測定値よりも理論計算値に近い値となった。その解析結果について [4] と [5] で報告した。

オルソポジトロニウム崩壊スペクトルの測定

o-Ps は通常3本のガンマ線に崩壊し、そのガンマ線のエネルギースペクトルは 511 keV を頂点としたほぼ三角形となる。このスペクトルを束縛系 QED の $O(\alpha)$ の精度で検証した。ピックアップ崩壊などのバックグラウンド事象を実測データをもとに除去し、検出器の実測ベースでモンテカルロシミュレーション (MC) と比較する事で、 $400 \sim 530 \text{ keV}$ のエネルギー範囲で $O(\alpha)$ の補正に対して無矛盾、最低次のスペクトルに対しては $92\% \text{ C.L.}$ で排除する事ができた (図 2.5.4)。これにより、世界で初めて o-Ps スペクトルの $O(\alpha)$ 補正を検証できた。

また、得られたスペクトルで単色のピークを探す事で、 $o\text{-Ps} \rightarrow \gamma + X \rightarrow 3\gamma$ の崩壊を起こし得る中性粒子 X の探索も行った。ピークが見付からなかった事から、 X に対して厳しい制限をつけた。これらの結果は、国際会議で発表 [[130]] し、現在、論文に取りまとめているところである。

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

ポジトロニウム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 の質量が約 1 MeV と非常に軽いいため、10 K 程度の比較的高い温度で BEC を起こすと予想される。もし Ps BEC が実現できた場合、重力の研究や物質と反物質の対称性の研究、ガンマ線レーザーなどの多くの応用が期待できる。ただし、ポジトロニウムの寿命が 100 ns 程度しか無いため、短期間に冷却と高密度化を行う必要があり、この困難さからいまだに実現されていない。本研究室では、ポジトロニウムをレーザー冷却することを検討し、必要なレーザーのスペックを求めた。また、冷却ポジトロニウムの温度をドップラー広がり法で測定するための装置を検討した。

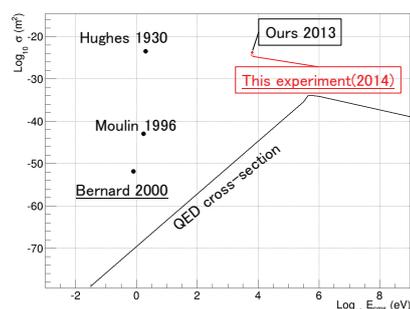


図 2.5.5: 得られた断面積の上限と既存の上限、理論予想値

SACLA とパルス磁石を用いたアクシオン探索

世界最高輝度 X 線自由レーザーである SACLA を光源とし、X 線 → 弱結合未知粒子 → X 線の変換を行う “Light Shining through a Wall” (LSW) と呼ばれる手法で、アクシオンなどの弱結合未知粒子を探索している。X 線と未知粒子の変換は強磁場の印加により行うが、この印加磁場の強度が探索感度を決める。本研究室の実験では、S/N の観点と装置の取り扱いやすさの観点から、SACLA に同期したパルス磁石を使用して強磁場を発生させる。今年度は 14 T まで励磁可能なパルス磁石を製作した。その磁石とプロトタイプの電源を用いて SPring-8 のビームライン、BL19LXU で予備測定を行い、位置決めなどの手順を確立して本測定への足掛かりとした。今後、電源を増強して SACLA での本測定に入る。

SACLA を用いた光子・光子散乱の測定

量子電磁力学 (QED) では、古典電磁気学と異なり、光子と光子が相互作用し、散乱することが予言されている。QED の究極の検証であるこの光子・光子散乱を SACLA のパルス X 線を用いて行った。シリコンのラウエ散乱を利用した X 線光学系を組む事で、1 本の X 線を分岐し衝突させた。6.5 × 10⁵ パルスの衝突で散乱光が観測されなかった事から、重心系エネルギー 6.5 keV において、3.0 × 10⁻²⁵ m² (95% C.L.) の制限を得た (図 2.5.5)。SACLA の性能があまり良くなかったため、期待した感度には届かなかったが、昨年度われわれの実験によって得られた制限を更新する事ができた。また、JAXA/ISAS の高橋研究室で開発された DSSD 検出器を使用する事で、バックグラウンドの理解を深める事ができた。

高フィネス共振器とパルス磁石を用いた真空複屈折の探索

QED で予言されている強場下の物理として、真空の複屈折が挙げられる。真空に強い磁場を掛けると、仮想電子対の分極を通して屈折率が異方性を持ち、光の偏光状態が変化すると予想される。先述のパルス磁石と赤外レーザーを用いて真空複屈折を探索する事を計画しているが、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。この共振器を五神研究室と共同で開発した。その結果、1 m の長さの共振器で ~140,000 のフィネスが得られ、レーザーにフィードバックをかける事で 100 秒程度の安定共振が得られた。

<受賞>

- [1] 第 36 回 (2014 年) 応用物理学会論文賞, 浅井祥仁, “ヒッグス粒子発見とその意味”.
- [2] 第 9 回 (2015 年) 日本物理学会若手奨励賞, 宮崎彬, “Direct Measurement of the Hyperfine Structure Interval of Positronium Using High Power Millimeter Wave Technology”.

<報文>

(原著論文)

- [3] T. Inada, T. Yamaji, S. Adachi, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, K. Tamasaku, Y. Inubushi, K. Sawada, M. Yabashi, and T. Ishikawa, “Search for Photon-Photon Elastic Scattering in the X-ray Region”, Phys. Lett. B 732, 356 (2014).
- [4] A. Ishida, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, M. Yoshida, K. Tanaka, A. Yamamoto, “New precision measurement of hyperfine splitting of positronium”, Phys. Lett. B 734, 338 (2014).

- [5] A. Miyazaki, T. Yamazaki, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, Y. Tatematsu, I. Ogawa and T. Idehara, "First millimeter-wave spectroscopy of ground-state positronium", *Prog. Theor. Exp. Phys.* 011C01 (2e015).
- [6] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the parity violating asymmetry parameter α_b and the helicity amplitudes for the decay $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda^0$ with the ATLAS detector", *PhysRevD*.89.092009
- [7] The ATLAS Collaboration, "Electron reconstruction and identification efficiency measurements with the ATLAS detector using the 2011 LHC proton-proton collision data", *Eur. Phys. J. C* (2014) 74:2941
- [8] The ATLAS Collaboration, "Search for supersymmetry at $\sqrt{s} = 8$ TeV in final states with jets and two same-sign leptons or three leptons with the ATLAS detector", *JHEP06(2014)035*
- [9] The ATLAS Collaboration, "Muon Reconstruction Efficiency and Momentum Resolution of the ATLAS Experiment in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in 2010", *Eur. Phys. J. C* (2014) 74:3034
- [10] The ATLAS Collaboration, "Measurement of χ_{c1} and χ_{c2} production with $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions at ATLAS", *JHEP07(2014)154*
- [11] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the cross section of high transverse momentum $Z \rightarrow b\bar{b}$ production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector", *Physics Letters B* 738 (2014) 25-43
- [12] The ATLAS Collaboration, "Operation and performance of the ATLAS semiconductor tracker", *JINST* 9 (2014) P08009
- [13] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the centrality and pseudorapidity dependence of the integrated elliptic flow in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector", *Eur. Phys. J. C* (2014) 74: 2982
- [14] The ATLAS Collaboration, "The monitoring and data quality assessment of the ATLAS liquid argon calorimeter", *JINST* 9 (2014) P07024
- [15] The ATLAS Collaboration, "Search for High-Mass Dilepton Resonances in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector", *Phys. Rev. D* 90, 052005 (2014)
- [16] The ATLAS Collaboration, "Search for microscopic black holes and string balls in final states with leptons and jets with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 8$ TeV", *JHEP08(2014)103*
- [17] The ATLAS Collaboration, "Search for supersymmetry in events with four or more leptons in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector", *Phys. Rev. D* 90, 052001 (2014)
- [18] The ATLAS Collaboration, "Evidence of electroweak production of WWjj In pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector", *Phys. Rev. Lett.* 113, 141803
- [19] The ATLAS Collaboration, "Light-quark and gluon jet discrimination in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", *Eur. Phys. J. C* (2014) 74: 3023
- [20] The ATLAS Collaboration, "Search for squarks and gluinos with the ATLAS detector in final states with jets and missing transverse momentum using 20.3 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collision data", *JHEP09(2014)176*
- [21] The ATLAS Collaboration, "Jet energy measurement and its systematic uncertainty in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", *Eur. Phys. J. C* (2015) 75:17
- [22] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the underlying event in jet events from 7 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector", *Eur.Phys.J. C*74 (2014) 2965
- [23] The ATLAS Collaboration, "Search for direct pair production of the top squark in all-hadronic final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector", *JHEP* 09 (2014) 015
- [24] The ATLAS Collaboration, "Measurement of inclusive jet charged particle fragmentation functions in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector", *Physics Letters B* 739 (2014) 320-342
- [25] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the Z/γ^* boson transverse momentum distribution in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", *JHEP09(2014)145*
- [26] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the Higgs boson mass from the $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ channels with the ATLAS detector at the LHC", *Phys. Rev. D* 90, 052004 (2014)
- [27] The ATLAS Collaboration, "Search for WZ resonances in the fully leptonic channel using pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector", *Phys. Lett. B* (2014) pp. 223-243
- [28] The ATLAS Collaboration, "Search for Higgs Boson Pair Production in the $\gamma\gamma b\bar{b}$ Final State using pp Collision Data at $\sqrt{s} = 8$ TeV from the ATLAS Detector", *Phys. Rev. Lett.* 114, 081802 (2015)
- [29] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the $t\bar{t}$ production cross-section using $e\mu$; events with b-tagged jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the ATLAS detector", *Eur.Phys.J. C*74 (2014) 3109
- [30] The ATLAS Collaboration, "Search for the Standard Model Higgs boson decay to $\mu+\mu-$ with the ATLAS detector", *Physics Letters B* 738 (2014) 68-86

- [31] The ATLAS Collaboration, " Comprehensive measurements of t-channel single top-quark production cross sections at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ", Phys. Rev. D. 90, 112006 (2014)
- [32] The ATLAS Collaboration, " A neural network clustering algorithm for the ATLAS silicon pixel detector ", JINST 9 (2014) P09009
- [33] The ATLAS Collaboration, " Search for the direct production of charginos, neutralinos and staus in final states with at least two hadronically decaying taus and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", JHEP10(2014)096
- [34] The ATLAS Collaboration, " Measurements of top-quark pair differential cross-sections in the 1+jets channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector ", Phys. Rev. D 90, 072004
- [35] The ATLAS Collaboration, " Search for pair-produced third-generation squarks decaying via charm quarks or in compressed supersymmetric scenarios in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", Phys. Rev. D. 90, 052008 (2014)
- [36] The ATLAS Collaboration, " Search for supersymmetry in events with large missing transverse momentum, jets, and at least one tau lepton in 20 fb⁻¹ of $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collision data with the ATLAS detector ", JHEP09(2014)103
- [37] The ATLAS Collaboration, " Search for top squark pair production in final states with one isolated lepton, jets, and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector ", JHEP11(2014)118
- [38] The ATLAS Collaboration, " Search for strong production of supersymmetric particles in final states with missing transverse momentum and at least three b-jets at $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector ", JHEP10(2014)024
- [39] The ATLAS Collaboration, " Simultaneous measurements of the top quark pair, W+W-, and Z/gamma* \rightarrow tau tau production cross sections in pp collisions with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 7$ TeV ", Phys. Rev. D 91, 052005 (2015)
- [40] The ATLAS Collaboration, " Measurement of the cross-section of high transverse momentum vector bosons reconstructed as single jets and studies of jet substructure in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ", 2014 New J. Phys. 16 113013
- [41] The ATLAS Collaboration, " Observation of an excited Bc meson state with the ATLAS detector ", Phys. Rev. Lett. 113, 212004 (2014)
- [42] The ATLAS Collaboration, " Measurement of the top-anti-top production cross-section as a function of jet multiplicity and jet transverse momentum produced in 7 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector ", JHEP01(2015)020
- [43] The ATLAS Collaboration, " Flavour tagged time dependent angular analysis of the Bs/J/ ϕ decay and extraction of Delta Gamma_s and the weak phase phi_s in ATLAS ", Phys. Rev. D. 90, 052007 (2014)
- [44] The ATLAS Collaboration, " Search for new phenomena in the dijet mass distribution in ATLAS 2012 data using pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV ", Phys. Rev. D. 91, 052007 (2015)
- [45] The ATLAS Collaboration, " Search for contact interactions and large extra dimensions in the dilepton channel using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", Eur. Phys. J. C (2014) 74:3134
- [46] The ATLAS Collaboration, " Measurement of differential production cross-sections for a Z boson in association with b-jets in 7 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector ", JHEP10(2014)141
- [47] The ATLAS Collaboration, " Measurement of the muon reconstruction performance of the ATLAS detector using 2011 and 2012 LHC proton-proton collision data ", Eur.Phys.J. C74 (2014) 3130
- [48] The ATLAS Collaboration, " Measurements of spin correlation in top-antitop quark events from proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector ", Phys. Rev. D. 90, 112016 (2014)
- [49] The ATLAS Collaboration, " Measurements of fiducial and differential cross sections for Higgs boson production in the diphoton decay channel at $\sqrt{s} = 8$ TeV with ATLAS ", JHEP09(2014)112
- [50] The ATLAS Collaboration, " Electron and photon energy calibration with the ATLAS detector using LHC Run 1 data ", Eur. Phys. J. C (2014) 74: 3071
- [51] The ATLAS Collaboration, " Measurement of the production cross-section of $\psi(2S) \rightarrow J/\psi \rightarrow \mu\mu + \mu\mu + \pi\pi$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV at ATLAS ", JHEP09(2014)079
- [52] The ATLAS Collaboration, " Measurements of jet vetoes and azimuthal decorrelations in dijet events produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector ", Eur. Phys. J. C (2014) 74:3117
- [53] The ATLAS Collaboration, " Search for Scalar Diphoton Resonances in the Mass Range 65-600 GeV with the ATLAS Detector in pp Collision Data at $\sqrt{s} = 8$ TeV ", Phys. Rev. Lett. 113, 171801

- [54] The ATLAS Collaboration, " Search for new particles in events with one lepton and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", JHEP09(2014)037
- [55] The ATLAS Collaboration, " Search for new resonances in $W\gamma$ and $Z\gamma$ Final States in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector ", PLB 738 (2014) 428-447
- [56] The ATLAS Collaboration, " Search for $W' \rightarrow tb \rightarrow qqbb$ decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", arXiv:1408.0886
- [57] The ATLAS Collaboration, " Performance of the ATLAS muon trigger in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV ", Eur. Phys. J. C (2015) 75:120
- [58] The ATLAS Collaboration, " Fiducial and differential cross sections of Higgs boson production measured in the four-lepton decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", Physics Letters B 738 (2014) 234-253
- [59] The ATLAS Collaboration, " Measurement of flow harmonics with multi-particle cumulants in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector ", Eur. Phys. J. C (2014) 74: 3157
- [60] The ATLAS Collaboration, " Measurement of the production and lepton charge asymmetry of W bosons in Pb+Pb collisions at $\sqrt{(s_{NN})} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector ", Eur. Phys. J. C (2015) 75:23
- [61] The ATLAS Collaboration, " Measurements of Higgs boson production and couplings in the four-lepton channel in pp collisions at center-of-mass energies of 7 and 8 TeV with the ATLAS detector ", Phys. Rev. D 91, 012006 (2015)
- [62] The ATLAS Collaboration, " Search for the lepton flavor violating decay $Z \rightarrow e\mu$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", Phys. Rev. D. 90, 072010 (2014)
- [63] The ATLAS Collaboration, " Measurement of the total cross section from elastic scattering in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ", Nuclear Physics, Section B (2014), pp. 486-548
- [64] The ATLAS Collaboration, " A measurement of the ratio of the production cross sections for W and Z bosons in association with jets with the ATLAS detector ", Eur. Phys. J. C (2014) 74: 3168
- [65] The ATLAS Collaboration, " Measurement of Higgs boson production in the diphoton decay channel in pp collisions at center-of-mass energies of 7 and 8 TeV with the ATLAS detector ", Phys. Rev. D. 90, 112015 (2014)
- [66] The ATLAS Collaboration, " Search for long-lived neutral particles decaying into lepton jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", JHEP11(2014)088
- [67] The ATLAS Collaboration, " Measurement of the Top Quark Mass using a Template Method in the Fully Hadronic Decay Channel from ATLAS Data at $\sqrt{s} = 7$ TeV ", arXiv:1409.0832
- [68] The ATLAS Collaboration, " Measurement of long-range pseudorapidity correlations and azimuthal harmonics in $\sqrt{(s_{NN})} = 5.02$ TeV proton-lead collisions with the ATLAS detector ", Phys. Rev. C 90, 044906
- [69] The ATLAS Collaboration, " Search for $H \rightarrow \gamma\gamma$ produced in association with top quarks and constraints on the Yukawa coupling between the top quark and the Higgs boson using data taken at 7 TeV and 8 TeV with the ATLAS detector ", Physics Letters B 740 (2015) 222-242
- [70] The ATLAS Collaboration, " Measurement of distributions sensitive to the underlying event in inclusive Z-boson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ", Eur. Phys. J. C (2014) 74:3195
- [71] The ATLAS Collaboration, " Search for pair and single production of new heavy quarks that decay to a Z boson and a third-generation quark in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", JHEP 11 (2014) 104
- [72] The ATLAS Collaboration, " Search for non-pointing photons in the diphoton and MET final state in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions using the ATLAS detector ", Phys. Rev. D. 90, 112005 (2014)
- [73] The ATLAS Collaboration, " Search for neutral Higgs bosons of the minimal supersymmetric standard model in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", JHEP11(2014)056
- [74] The ATLAS Collaboration, " Search for the $b\bar{b}$ decay of the Standard Model Higgs boson in associated (W/Z)H production with the ATLAS detector ", JHEP01(2015)069
- [75] The ATLAS Collaboration, " Search for resonant diboson production in the $\ell\ell qq$ final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", Eur. Phys. J. C (2015) 75:69
- [76] The ATLAS Collaboration, " Measurements of the W production cross sections in association with jets with the ATLAS detector ", Eur. Phys. J. C (2015) 75:82
- [77] The ATLAS Collaboration, " Search for s-channel single top-quark production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", Phys.Lett. B740 (2015) 118
- [78] The ATLAS Collaboration, " Search for $W' \rightarrow t\bar{b}$ in the lepton plus jets final state in proton-proton collisions at a centre-of-mass energy of $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", Physics Letters B 743 (2015) 235-255
- [79] The ATLAS Collaboration, " Search for dark matter in events with heavy quarks and missing

- transverse momentum in pp collisions with the ATLAS detector ", Eur. Phys. J. C (2015) 75:92
- [80] The ATLAS Collaboration, " Search for the X_b and other hidden-beauty states in the $\pi^+\pi^-\Upsilon(1S)$ channel at ATLAS ", Physics Letters B 740 (2015), pp. 199-217
- [81] The ATLAS Collaboration, " Search for invisible particles produced in association with single-top-quarks in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", Eur. Phys. J. C (2015) 75:79
- [82] The ATLAS Collaboration, " Measurement of the WW+WZ cross section and limits on anomalous triple gauge couplings using final states with one lepton, missing transverse momentum, and two jets with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 7$ TeV ", JHEP01(2015)049
- [83] The ATLAS Collaboration, " Measurement of the inclusive jet cross-section in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using 4.5 fb^{-1} of data with the ATLAS detector ", JHEP02(2015)153
- [84] The ATLAS Collaboration, " Search for new phenomena in events with a photon and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", Phys. Rev. D 91, 012008 (2015)
- [85] The ATLAS Collaboration, " Measurement of three-jet production cross-sections in pp collisions at 7 TeV centre-of-mass energy using the ATLAS detector ", arXiv:1411.1855
- [86] The ATLAS Collaboration, " Measurements of the nuclear modification factor for jets in Pb+Pb collisions at $\sqrt{NN}=2.76$ TeV with the ATLAS detector ", Phys. Rev. Lett. 114 (2015) 072302
- [87] The ATLAS Collaboration, " Search for Evidence of New Physics in Events with Three Charged Leptons at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector ", arXiv:1411.2921
- [88] The ATLAS Collaboration, " Searches for heavy long-lived charged particles with the ATLAS detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV ", JHEP01(2015)068
- [89] The ATLAS Collaboration, " Search for anomalous production of prompt like-sign lepton pairs at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector ", JHEP 03 (2015) 041
- [90] The ATLAS Collaboration, " Measurement of the transverse polarization of Λ and anti Λ hyperons produced in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector ", Phys. Rev. D. 91, 032004 (2015)
- [91] The ATLAS Collaboration, " Observation and measurement of Higgs boson decays to WW* with the ATLAS detector ", arXiv:1412.2641
- [92] The ATLAS Collaboration, " Centrality and rapidity dependence of inclusive jet production in $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV proton-lead collisions with the ATLAS detector ", arXiv:1412.4092
- [93] The ATLAS Collaboration, " Measurement of spin correlation in top-antitop quark events and search for stop quark pair production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector ", Phys. Rev. Lett. 114, 142001 (2015)
- [94] The ATLAS Collaboration, " Observation and measurements of the production of prompt and non-prompt J/ψ mesons in association with a Z boson in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", arXiv:1412.6428
- [95] The ATLAS Collaboration, " Search for charged Higgs bosons decaying via $H^\pm \rightarrow \text{tau} \pm \nu$ in fully hadronic final states using pp collision data at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", JHEP03 (2015) 088
- [96] The ATLAS Collaboration, " Identification and energy calibration of hadronically decaying tau leptons with the ATLAS experiment in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV ", arXiv:1412.7086
- [97] The ATLAS Collaboration, " Search for Scalar-Charm Pair Production in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector ", arXiv:1501.01325
- [98] The ATLAS Collaboration, " Search for Higgs and Z Boson Decays to J/ψ gamma and $\Upsilon(nS)$ gamma with the ATLAS Detector ", Phys. Rev. Lett. 114 (2015) 121801
- [99] The ATLAS Collaboration, " Search for squarks and gluinos in events with isolated leptons, jets and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", arXiv:1501.03555
- [100] The ATLAS Collaboration, " Search for pair-produced long-lived neutral particles decaying to jets in the ATLAS hadronic calorimeter in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV ", Physics Letters B 743 (2015) 15-34
- [101] The ATLAS Collaboration, " Evidence for the Higgs-boson Yukawa coupling to tau leptons with the ATLAS detector ", arXiv:1501.04943
- [102] The ATLAS Collaboration, " Search for direct production of charginos and neutralinos decaying via the 125 GeV Higgs boson in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector ", arXiv:1501.07110
- [103] The ATLAS Collaboration, " Measurement of the ttbar and lepton charge asymmetry in dilepton events in $\sqrt{s} = 7$ TeV data with the ATLAS detector ", arXiv:1501.07383
- [104] The ATLAS Collaboration, " Observation of top-quark pair production in association with a photon and measurement of the $t\bar{t}\gamma$ production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector ", arXiv:1502.00586

- [105] The ATLAS Collaboration, " Search for new phenomena in final states with an energetic jet and large missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", arXiv:1502.01518
- [106] The ATLAS Collaboration, " Search for a CP-odd Higgs boson decaying to Zh in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", Physics Letters B 744 (2015) 163-183
- [107] The ATLAS Collaboration, " Search for massive supersymmetric particles decaying to many jets using the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV ", arXiv:1502.05686
- [108] The ATLAS Collaboration, " Differential top-antitop cross-section measurements as a function of observables constructed from final-state particles using pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in the ATLAS detector ", arXiv:1502.05923
- [109] The ATLAS Collaboration, " A search for high-mass resonances decaying to $\tau^+\tau^-$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", arXiv:1502.07177
- [110] The ATLAS Collaboration, " Two-particle Bose-Einstein correlations in pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 7 TeV measured with the ATLAS detector ", arXiv:1502.07947
- [111] The ATLAS Collaboration, " Determination of the off-shell Higgs boson signal strength in the high-mass ZZ and WW final states with the ATLAS detector ", arXiv:1503.01060
- [112] The ATLAS Collaboration, " Search for supersymmetry in events containing a same-flavour opposite-sign dilepton pair, jets, and large missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector ", arXiv:1503.03290
- [113] The ATLAS Collaboration, " Evidence of $W\gamma\gamma$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV and limits on anomalous quartic gauge couplings with the ATLAS detector ", arXiv:1503.03243
- [114] The ATLAS Collaboration, " Measurement of the forward-backward asymmetry of electron and muon pair-production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector ", arXiv:1503.03709
- [115] The ATLAS Collaboration, " Determination of spin and parity of the Higgs boson in the $WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ decay channel with the ATLAS detector ", arXiv:1503.03643
- [116] The ATLAS Collaboration, " Search for a Heavy Neutral Particle Decaying to $e\mu$, $e\tau$, or $\mu\tau$ in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector ", arXiv:1503.04430
- [117] The ATLAS Collaboration, " Search for a Charged Higgs Boson Produced in the Vector-boson Fusion Mode with Decay $H^\pm \rightarrow W^\pm Z$ using pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Experiment ", arXiv:1503.04233
- [118] The ATLAS Collaboration, " Search for the Standard Model Higgs boson produced in association with top quarks and decaying into $b\bar{b}$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", arXiv:1503.05066
- [119] The ATLAS Collaboration, " Search for production of WW/WZ resonances decaying to a lepton, neutrino and jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", arXiv:1503.04677
- [120] The ATLAS Collaboration, " Measurement of the top quark mass in the $t\bar{t} \rightarrow$ lepton + jets and $t\bar{t} \rightarrow$ dilepton channels using $\sqrt{s} = 7$ TeV ATLAS data ", arXiv:1503.05427
- [121] The ATLAS Collaboration, " Search for vector-like B quarks in events with one isolated lepton, missing transverse momentum and jets at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector ", arXiv:1503.05425
- [122] The ATLAS Collaboration, " Combined Measurement of the Higgs Boson Mass in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the ATLAS and CMS Experiments ", arXiv:1503.07589
- [123] The ATLAS Collaboration, " Search for a new resonance decaying to a W or Z boson and a Higgs boson in the $\ell\ell/\ell\nu/\nu\nu + b\bar{b}$ final states with the ATLAS Detector ", arXiv:1503.08089
- [124] The ATLAS Collaboration, " Search for low-scale gravity signatures in multi-jet final states with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 8$ TeV ", arXiv:1503.08988
- (会議抄録)
- (国内雑誌)
- [125] 難波俊雄, 稲田聡明, 浅井祥仁, 高輝度放射光を用いた未知の素粒子探索実験, 日本放射光学会誌 27(2014)204-209.
- (学位論文)
- [126] 石田明, "New precise measurement of the hyperfine splitting of positronium", 博士論文 (2014).
- [127] 安達俊介, "オルソポジトロニウム崩壊ガンマ線のエネルギースペクトルにおける高次補正の初検証", 修士論文 (2015).
- [128] 山道智博, "X線自由電子レーザー (SACLA) を用いた光子光子散乱の探索", 修士論文 (2015).
- (著書)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演

- [129] S. Asai, Search for photon-photon scattering using the xFEL; Applications to the Particle physics, 6th Ringberg Meeting on Science with FELs, 2015年2月25日, 独国 Ringberg 城.

一般講演

- [130] S. Adachi, "Precise measurement of energy spectrum of orthopositronium decay", 11th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry, November 9-14, 2014, Goa, India.

(国内会議)

招待講演

- [131] 浅井祥仁, ヒッグス粒子発見とその意味、応用物理学会、2014年9月 北海道大学
- [132] 稲田聡明, 高輝度 X 線を用いた素粒子実験, 奈良先端未来開拓コロキウム 2014, 2014年10月22日, 奈良先端大学.

一般講演

日本物理学会秋季大会:佐賀大学:2012年9月

- [133] 山道智博, "SPRING-8/SACLA における光子光子散乱の探索".
- [134] 稲田聡明, "SPRING-8/SACLA におけるパルス強磁場を用いた弱結合未知粒子の探索 I".
- [135] 安達俊介, "オルソポジトロニウム崩壊ガンマ線のエネルギースペクトル精密測定".
- [136] 森永真央, "LHC-ATLAS 実験における重心系エネルギー 13/14TeV でのタウ粒子対に崩壊する新粒子探索".
- [137] 西澤佑一, "LHC-ATLAS 実験における $l\nu qq$ 終状態を用いたベクターボソン散乱過程の研究".
- [138] 齋藤真彦, "LHC-ATLAS 実験における長寿命荷電 Wino の探索".

日本物理学会:第 70 回年次大会:早稲田大学:2015年3月

- [139] 稲田聡明, "SPRING-8/SACLA におけるパルス強磁場を用いた弱結合未知粒子の探索 I".
- [140] 山道智博, "SPRING-8/SACLA における光子光子散乱の探索".
- [141] 樊星, "パルス磁石を用いた真空複屈折の探索".
- [142] 周健治, "ポジトロニウム BEC の実現に向けて".
- [143] 森永真央, "LHC-ATLAS 実験 Run2 におけるタウ粒子対に崩壊する超対称性 ヒッグス粒子の探索".
- [144] 西澤佑一, "LHC-ATLAS 実験における $l\nu qq$ 終状態を用いた高質量 WW 共鳴状態の探索".
- [145] 齋藤真彦, "LHC-ATLAS 実験における長寿命荷電 Wino の探索".
- [146] 齋藤智之, "(企画講演) ATLAS 実験 Run2 への展望".

(セミナー)

- [147] S.Asai, "Discovery of Higgs Boson and Beyond; for Non-Particle Physicists", JAXA, 2014年10月

- [148] S.Asai, "The Latest Results and Perspective of LHC. Where is the Supersymmetry?", 理化学研究所, 2015年3月

(その他)

- [149] Particle Data Group, Axions and Other Very Light Bosons (p.643), 2014.

3 物性理論

3.1 青木研究室

青木研では一貫して、**超伝導**に代表される多体効果や、**トポロジカル系**の理論を主眼に研究を行っている。これらの現象では、電子相関（電子間斥力相互作用のために生じる量子効果）によりゲージ対称性が自発的に破れたり、トポロジカル系特有な新奇現象が起きる。面白い物質構造から面白い物性物理を探る**物質設計**も目指している。さらに、強相関系やトポロジカル系において、**非平衡**で生じる顕著な物性を探ることを最近の大きな柱としている。

3.1.1 超伝導

銅酸化物高温超伝導体 — 物質依存性

鉄系など、高温超伝導のファミリーが増えているが、いまだに最高の T_C をもつのは銅酸化物であり、これを現在の視点で探索するのは意味が大きい。銅酸化物には様々な化合物があり、実験的に T_C は大きな物質依存性をもつ。特に、良くネストしたフェルミ面をもつ物質が理論的には高い T_C をもつはずなのに、実験事実は逆であるという矛盾が長年の謎となっていた。榊原、白井、黒木（阪大）、有田（東大工）と青木等は、銅酸化物を、通常考えられている $dx^2 - y^2$ 軌道に加え dz^2 軌道をあらわに考慮した **2 軌道模型**として捉えた。これにより、超伝導を有利化するには単一バンド性が強いことが重要であり、これがネスティングの効果を凌駕し、物質依存性を説明することを明らかにしてきた。本年度は、さらにこれを、1層および2層構造の多種の銅酸化物に適用し、上記の描像が成立し、多種の銅酸化物の実験的 T_C と驚くほどよく一致することを系統的に示した。[2]。このような「軌道純化」により、現存の銅酸化物以上に高い転移温度を持つ物質の設計につながる可能性も探っている。

強相関系に対する DMFT+FLEX 法の提案と Hubbard 模型への応用

銅酸化物高温超伝導体の相図で最も顕著な特徴の一つは、電子の band filling に対して T_C が上に凸 (dome 状) になることであるが、満足行く説明はあまりない。2次元斥力 Hubbard 模型における d 波超伝導に対しては、従来しばしば用いられてきた揺ら

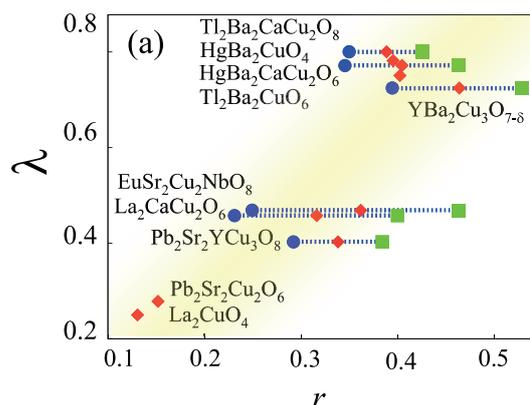


図 3.1.1: 超伝導 T_C の指標 (Eliashberg 方程式の固有値 λ) と、nesting の悪さの指標 (r) の関係を、様々な高温超伝導銅酸化物に対してプロット [2]。

ぎ交換 (FLEX) 近似は、反強磁性的スピン揺らぎに媒介されるペアリング相互作用など運動量依存の相相互作用を記述できるが、母物質の Mott 絶縁相を記述できず、 T_C ドームも記述できない。他方、Mott 絶縁相を記述できる動的平均場理論 (DMFT) を出発点としたクラスター拡張により Hubbard 模型が調べられているが、そこでは非常に小さなクラスターしか扱えない。そこで北谷、辻、青木は、DMFT の新しい拡張として DMFT と FLEX を組み合わせ、自己無撞着なループを構成することにより、局所的なダイアグラムの寄与を DMFT で、非局所的なダイアグラムを FLEX で取り込む方法を新たに提案した [31, 32, 33, 34, 48]。この手法を 2 次元 Hubbard 模型に適用した結果、 T_C のドーム構造が得られた。これは、FLEX で overestimate されていた自己エネルギーが DMFT で補正される際の filling 依存性から生じる。

電子・格子相互作用系における超固体と量子臨界点

強い電子間斥力と強い電子・格子相互作用が共存する系では多彩な量子相が実現され得る [14]。後者の電子・格子 (フォノン) 相互作用だけを考えても固体物理の基本的問題であるが、その相図の全貌は意外にもあまり明らかでなかった。村上、Werner (Fribourg 大)、辻、青木は、電子・格子相互作用をもつ最も単純なモデルの一つである Holstein 模型の秩序相 (反強磁性、電荷秩序、超伝導) の性質を、秩序まで考慮した DMFT により初めて扱った。これにより、電子が half-filling からずれた場合には、相図のかなり広い領域で超固体 (supersolid; 超伝導のような非対角長距離秩序と、電荷秩序のような対角長距離秩序が共存する状態) が現れることを見出した。[4, 26]。しかも、超固体相と超伝導相の境目は絶対零度で量子臨界点となることも見出された。興味深いことに、超固体相は、電子・格子相互作用が弱い BCS 極限と、

それが強い BEC 極限の間のクロスオーバー領域に存在する。直感的には、この領域では、多フェルミオンが同時に移動する高次プロセスが超固体発現に寄与する。

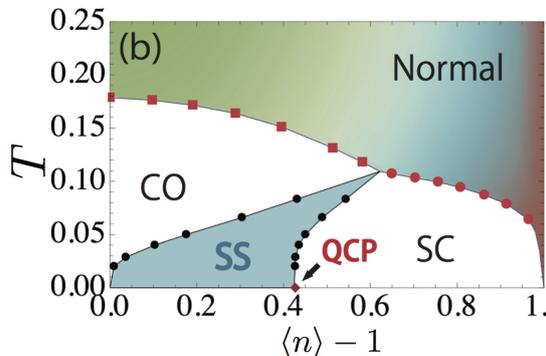


図 3.1.2: 電子・格子相互作用系における、電子 band filling n と温度 T に対する相図 [4]。記号は、SC (超伝導)、SS (超固体)、CO (電荷秩序)、QCP (量子臨界点)。

3.1.2 トポロジカル系

光学格子上の冷却原子系に対する

第一原理バンド計算とトポロジカル相

近年、強相関電子系の物理と冷却原子系 (特に光学格子) の物理が啓発し合い発展している。前者に対しては電子状態計算法は確立しているが、冷却原子系に対する第一原理計算法の構築が望まれる。北村等は、この観点から、前者が長距離クーロン相互作用系に対するものであったのに対し、原子間短距離相互作用に対する定式化を、特にスピン構造について制限の無い場合に拡張し、これを様々な格子構造に適用した。[8, 35, 36, 37, 38] これにより、checkerboard 格子等、**トポロジカル Mott 絶縁体** (電子相関のために自発的にトポロジカルになる相) を発生させるためにはどのような条件が必要であるかを、第一原理的に同定し、これに要するレーザーの当て方を与えた。

グラフェンの量子ホール効果とカイラル対称性

グラフェンの蜂の巣格子は massless Dirac 粒子のバンド分散 (Dirac cone) をもつために興味深い [15, 16]。Massless Dirac 粒子特有なこととして、磁場中では丁度ディラック点に $N = 0$ ランダウ準位が存在し、これがグラフェン量子ホール効果の特徴となる。河原林 (東邦大)、初貝 (筑波大)、青木等は、不規則性を入れたときにも、不規則性が**カイラル対称性**を尊重すれば、この準位はデルタ関数的にシャープ

であり、この性質は**トポロジカルに保護**されていることを示してきた。本年度は、この解析を、さらに一般的な、ディラック・コーンが傾いており、かつ質量をもつ (ギャップがある) 場合に拡張した。その結果、問題のランダウ準位は質量項のために分裂するにもかかわらず、デルタ関数的なままでいることが、数値的および解析的に示された [6, 50]。物理的には、質量項はカイラル対称性を崩すが、 $N = 0$ ランダウ準位の部分空間内では波動関数はカイラル演算子の固有状態であり続け、質量ゼロの場合とは或る非ユニタリ変換で結ばれている。

グラフェンにおける第二トポロジカル量子数

グラフェンは、ディラック粒子特有のトポロジカルな Chern 数 (量子ホール効果) をもつのが最大の特徴の一つである。一般に、格子構造を反映した量子ホール系を記述する TKNN 方程式には、量子ホール Chern 数以外に第二のトポロジカル量子数が現れ、その意味は Středa 等により、或る種の分極を表すことが示されていた。青木、初貝は、このトポロジカル量子数が、グラフェンにおいて特徴的に振る舞うことを見出し、分極トポロジカル量子数は Dirac cone 当たり $1/2$ (K 点と K' 点をもつ蜂の巣格子全体として 1) であることを示した [5]。

シリセンのバンド構造のトポロジカルな解析

グラフェンのシリコン版であるシリセンのバンド構造においては、 sp^2 混成軌道が支配するグラフェンと異なり、 sp^3 軌道が混じり、これがフェルミ面付近に多軌道性をもたらす。初貝、白石 (名古屋大)、青木は、3次元の sp^3 混成バンドを記述する基本的な模型である Weaire-Thorpe 模型を拡張することによりシリセンの電子構造を解析的に記述した [7, 51]。Weaire-Thorpe 模型は平坦バンドをもつが、これはシリセンでも幅の狭いバンドとして名残り、ディラック・コーンをもつバンドと共存する。この意味で、シリセンのバンド構造の全体をトポロジカルにとらえることが可能であり、実際 Takeda-Shiraishi により最初に求められた第一原理バンド構造と、バンドの幅や順序を含めて、定性的に整合する。

3.1.3 非平衡

非平衡現象は、強相関電子系やトポロジカル系において特に興味深い。本年度は以下を行った。

非平衡動的平均場、動的クラスター理論

非平衡動的平均場理論は、強相関量子多体系の非平衡ダイナミクスを解析する有力な理論手法として確立してきている。強相関系の格子モデルを 1 サイ

トの不純物問題に置き換えることでシステムサイズ無限の熱力学極限を扱うことができ、弱結合から強結合の系まで、また長時間の時間発展を計算できるのが特徴である。青木、辻は、Eckstein (Hamburg 大)、Kollar (Augsburg 大)、岡、Werner と、最近の非平衡動的平均場理論の進展をまとめたレビュー論文を出版した [9]。

非平衡動的平均場理論の限界は、空間的に非局所的な相関効果を見逃すことにある。これは格子モデルの次元が大きいときは妥当であるが、次元が下がるにつれて無視できなくなる。そこで辻、青木は、Barmettler (Genève 大)、Werner と、非局所相関を取り入れる**非平衡動的クラスター理論**を提案した [12, 41]。これにより、2次元系では波数空間で非一様に熱平衡への緩和が起こることを示した。

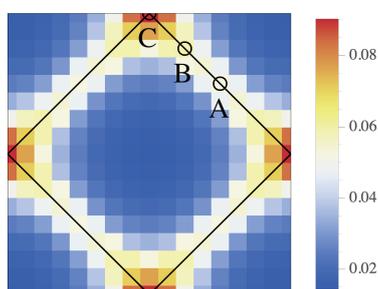


図 3.1.3: 斥力 Hubbard 模型における、運動量で分解した非平衡緩和時間。実線はフェルミ面。[12]

フロケ・トポロジカル相転移

グラフェンに円偏光を当てるとトポロジカル絶縁体状態がダイナミカルに発現することが岡、青木により示されて以来、**フロケ (Floquet) トポロジカル絶縁体**が注目を集めており、最近ではトポロジカル絶縁体の表面に存在するディラック分散や蜂の巣光学格子上の冷却原子系において観測されている。外場が十分弱い領域では有効ディラック模型を使ってよく理解されているが、外場が強い場合、および電子間相互作用がある場合にどうなるかは分かっていなかった。見上、安田、辻、北村、岡、青木は Floquet 動的平均場理論を用いて、様々な格子模型に円偏光を印加したときの電子状態を計算した [49, 52, 53]。その結果、外場の振幅を増加させていくとトポロジカル状態を特徴付ける Chern 数が変化し、トポロジカル-トポロジカル転移が起きることがわかった。この現象は、外場の周波数 Ω に関して $1/\Omega$ 展開を系統的に行うことで統一的に理解することができる。また、相互作用を導入すると Floquet トポロジカル絶縁体からモット絶縁体に転移する。これらの相転移の様子を、外場の振幅と相互作用の強さを軸にとった相図を作ることで明らかにした。

非平衡電子・格子相互作用系における電子の緩和とフォノンの緩和

電子・格子相互作用系を非平衡にして、その後の時間発展を追ったときに、電子とフォノンがそれぞれどのように緩和するかは、基本的な問題である。特に、電子に対する非平衡自己エネルギーと、フォノンに対する非平衡自己エネルギーは自己無撞着に結合しているはずであり、このフィードバックが緩和に影響すると考えられる。この観点から、村上、Werner、辻、青木は、電子・格子系の最も基本的なモデルである Holstein 模型の相互作用クエンチ後の緩和現象を非平衡動的平均場 (DMFT) を用いて解析した。その結果、電子・格子相互作用を弱結合から中間結合に増やすにつれて、フォノンの方が速く緩和する領域から、電子の方が速く緩和する領域へのクロスオーバーが見出した [3, 27, 28, 29, 30, 54, 55]。この**熱化クロスオーバー**の原因は、電子・格子結合への依存性が電子とフォノンの自己エネルギーにおいて異なることから来ており、良く用いられる 2 温度モデルは不適といえる。

超伝導体における Higgs モード共鳴

超伝導体は、秩序パラメータの振幅 (すなわち超流動密度) の集団的な振動モードである **Higgs モード** をもつ。Higgs モードは電荷、分極、磁荷などをもたず、線形応答の範囲では電磁場と結合しないため、実験による観測が困難であった。辻、青木は、非線形応答まで考慮するとヒッグスと電磁場が結合することに注目し、周波数 Ω の光を照射すると周波数 2Ω で s 波超伝導体の秩序パラメータを強制振動させられることを見出した。また、 2Ω が Higgs モードの固有周波数である 2Δ (超伝導ギャップ) と一致するときに共鳴が起こり、秩序パラメータの振動の振幅および**三次高調波**が共鳴的に発散することを示した [11, 39, 40, 57]。これらの Higgs モード共鳴の現象は、島野、松永、藤田、杉岡 (東大理) 等によるテラヘルツ光の実験により観測された [10, 22, 42]。さらに、d 波超伝導体の Higgs モードを平均場近似の範囲で理論的に調べ、アンチノードでのギャップの最大値付近に幅の広い Higgs モードの共鳴ピークが存在することを示した [23, 39, 56]。

非平衡量子スピン系

光誘起相転移は、従来は殆ど電子系に対して研究されてきた。一方、量子スピン系においては、直接スピンをレーザー照射によってコヒーレントに制御する方法については未開拓であった。高吉 (物材機構)、青木、岡は、円偏光レーザーを量子スピン系 (異方的な $S = 1$ 反強磁性 XXZ 模型) に照射すると、その磁場成分 (回転磁場) が xy 面内のときに、 z 方向に磁化が誘起される、という新現象を見出した [13]。この磁化誘起の機構は、多体 Floquet 法を量子スピン系に初めて適用することにより、基底状

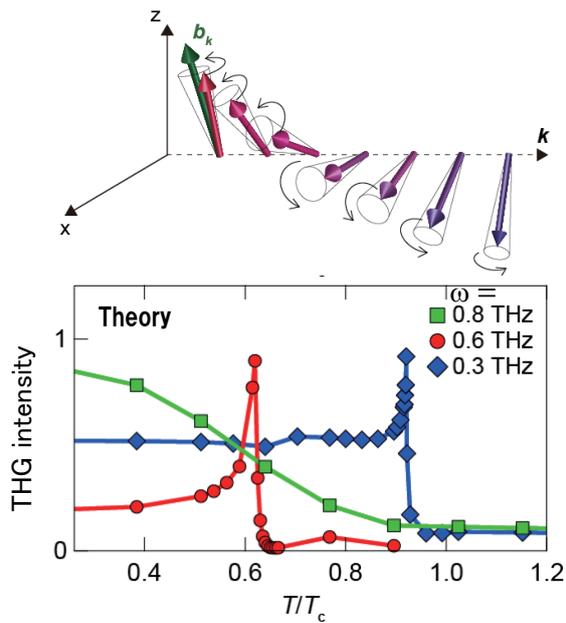


図 3.1.4: (上) 超伝導体を記述する Anderson 擬スピント、歳差運動。(下) ヒッグス共鳴により発生する三次高調波の強度を温度に対してプロット [10]。

態と磁化状態の Floquet 準位がレーザー照射によって共鳴するためであることが示された。これは、量子力学的スピン系に新たな非平衡物理の可能性を拓くと期待され、必要なレーザーは THz 領域と見積もられる。

3.1.4 その他

青木研助の辻直人氏は 2014 年度末をもって理学研究所に転出した。青木研で理論演習を行った山田昌彦氏が理学部学修奨励賞を受賞した。青木が M. S. Dresselhaus と共に編集したグラフェンの本が出版された [15]。青木は、国際会議招待講演で、超伝導 [17]、超伝導体におけるヒッグス・モード、[18, 20]、非平衡誘起トポロジカル系 [19, 21] について解説し、セミナー講演も行った [43, 44, 58, 59, 60, 62, 63, 64]。また、辻は超伝導体におけるヒッグス・モード等について講演を行った [23, 24, 25, 45, 46, 47, 61, 65, 66, 67]。

<受賞>

- [1] 辻直人、第 9 回日本物理学会若手奨励賞、日本物理学会 (2015 年 3 月)。

<報文>

(原著論文)

- [2] Hirofumi Sakakibara, Katsuhiro Suzuki, Hidetomo Usui, Satoaki Miyao, Isao Maruyama, Koichi

Kusakabe, Ryotaro Arita, Hideo Aoki, and Kazuhiko Kuroki: Orbital mixture effect on the Fermi surface- T_C correlation in the cuprate superconductors — bilayer vs single layer, *Phys. Rev. B* **89**, 224505 (2014).

- [3] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Interaction quench in the Holstein model: Thermalization crossover from electron- to phonon-dominated relaxation, *Phys. Rev. B* **91**, 045128 (2015).
- [4] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Supersolid phase accompanied by a quantum critical point in the intermediate coupling regime of the Holstein model, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 266404 (2014).
- [5] Hideo Aoki and Yasuhiro Hatsugai: Polarization as a topological quantum number in graphene, *Phys. Rev. B* **90**, 045206 (2014).
- [6] Yasuhiro Hatsugai, Tohru Kawarabayashi and Hideo Aoki: Survival of sharp $n = 0$ Landau levels in massive tilted Dirac fermions — Role of the generalized chiral operator, *Phys. Rev. B* **91**, 085112 (2015).
- [7] Y. Hatsugai, K. Shiraishi and H. Aoki: Flat bands in Weaire-Thorpe model and silicene, *New J. Phys.* **17**, 025009 (2015).
- [8] S. Kitamura, N. Tsuji and H. Aoki: An interaction-driven topological insulator in fermionic cold atoms on an optical lattice: A design with a density functional formalism, arXiv:1411.3345.
- [9] Hideo Aoki, Naoto Tsuji, Martin Eckstein, Marcus Kollar, Takashi Oka and Philipp Werner: Nonequilibrium dynamical mean-field theory and its applications, *Rev. Mod. Phys.* **86**, 779 (2014).
- [10] Ryusuke Matsunaga, Naoto Tsuji, Hiroyuki Fujita, Arata Sugioka, Kazumasa Makise, Yoshinori Uzawa, Hirotaka Terai, Zhen Wang, Hideo Aoki, and Ryo Shimano: Light-induced collective pseudospin precession resonating with Higgs mode in a superconductor, *Science* **345**, 1145 (2014).
- [11] Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Theory of Anderson pseudospin resonance with Higgs mode in a superconductor, arXiv:1404.2711.
- [12] Naoto Tsuji, Peter Barmettler, Hideo Aoki and Philipp Werner: Nonequilibrium dynamical cluster theory, *Phys. Rev. B* **90**, 075117 (2014).
- [13] Shintaro Takayoshi, Hideo Aoki and Takashi Oka: Many-body Floquet theory of laser-induced phase transition in quantum magnets, *Phys. Rev. B* **90**, 085150 (2014).

(国際会議録 (一般発表))

- [14] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji, Hideo Aoki: Dynamical mean-field analysis of ordered phases in the half-filled Holstein-Hubbard

model, *Proc. Int. Conf. Strongly Correlated Electron Systems (SCES2013)* [*JPS Conf. Proc.* **3**, 016023 (2014)].

(編著書)

- [15] Hideo Aoki and Mildred S. Dresselhaus (eds.): *Physics of Graphene* (Springer-Verlag, 2014).
- [16] Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Graphene — topological properties, chiral symmetry and their manipulation, in H. Aoki and M. S. Dresselhaus (eds.): *Physics of Graphene* (Springer-Verlag, 2014), Ch.7.

<学術発表>

(国際会議)

招待講演

- [17] Hideo Aoki: Some topics in s-wave superconductors — QCP in the BCS-BEC crossover regime, Higgs modes, (*LEMSUPER Workshop*, Osaka, Apr 2014).
- [18] Hideo Aoki: Nonequilibrium physics in electron-phonon superconductors — thermalisation crossover and Higgs mode (*LEMSUPER Workshop*, Ushimado, 8 Nov 2014).
- [19] Hideo Aoki: Photo-induced Floquet topological insulator (*Int. Workshop "Topology in the New Frontiers of Materials Science"*, Tsukuba, Apr 2014).
- [20] Hideo Aoki: Nonequilibrium superconductors and topological systems (*Cooperation in Physics Workshop: Today-LMU*, Munich, 27 Oct 2014).
- [21] Hideo Aoki: Nonequilibrium in electron and cold-atom systems — thermalisation and topological properties (*Workshop on Nonequilibrium phase transitions in diverse physical systems*, Tokyo, 9 Dec 2014).
- [22] Ryo Shimano, Ryusuke Matsunaga, Yuki Hamada, Arata Sugioka, Hiroyuki Fujita, Kazumasa Makise, Yoshinori Uzawa, Hirotaka Terai, Zhen Wang, Naoto Tsuji, and Hideo Aoki: Higgs Mode and Terahertz Nonlinear Optics in Superconductors, *19th Int. Conf. on Ultrafast Phenomena (UP2014)*, Okinawa, Jul 2014.
- [23] Naoto Tsuji: Higgs mode in conventional and unconventional superconductors, *A workshop on "Nonequilibrium phase transitions in diverse physical systems"*, Tokyo, Dec 2014.
- [24] Naoto Tsuji: Anderson pseudospin resonance with Higgs mode in superconductors, *New Horizon of Strongly Correlated Physics*, Kashiwa, Jul 2014.
- [25] Naoto Tsuji: Higgs mode and Anderson pseudospin resonance in superconductors, *Higgs modes in condensed matter and quantum gases*, Kyoto, June 2014.

一般発表 (会議録掲載以外)

- [26] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Supersolid state and quantum critical point in the intermediate-coupling regime of an electron-phonon system, *SCES2014*, Grenoble, July 2014.
- [27] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Non-equilibrium DMFT study of thermalization in an electron-phonon system *Ushimado Int. Workshop on Novel Superconducting Materials*, Okayama, Nov 2014.
- [28] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Non-equilibrium DMFT study of thermalization in an electron-phonon system, *Int. Symposium on Compuitics: Quantum Simulation and Design*, Tokyo, Dec 2014.
- [29] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Crossover in the thermalization process after an interaction quench in the Holstein model, *YKIS2014*, Kyoto, Dec 2014.
- [30] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Dynamical mean-field analysis of non-equilibrium relaxation processes in an electron-phonon coupled system, *DSCS2015*, Tokyo, Mar 2015.
- [31] M. Kitatani, N. Tsuji, and H. Aoki, DMFT+FLEX approach to unconventional superconductivity, *American Physical Society March Meeting*, San Antonio, March 2015.
- [32] M. Kitatani, N. Tsuji, and H. Aoki, DMFT+FLEX approach for the phase diagram of d-wave superconductors, *Novel Quantum States in Condensed Matter 2014*, Kyoto, Nov 2014.
- [33] M. Kitatani, N. Tsuji, and H. Aoki, DMFT+FLEX approach to unconventional superconductors, *Int. Symposium on Compuitics: Quantum Simulation and Design*, Tokyo, Dec 2014.
- [34] M. Kitatani, N. Tsuji, and H. Aoki, DMFT+FLEX approach to anisotropic pairing superconductivity, *Int. Workshop on New Frontier of Numerical Methods for Many-Body Correlations*, Tokyo, Feb 2015.
- [35] Sota Kitamura, Naoto Tsuji, and Hideo Aoki: A density functional study of an interaction-driven Chern insulator realized on optical lattice systems, *Novel Quantum States in Condensed Matter 2014 (NQS2014)*, Kyoto, Nov 2014.
- [36] Sota Kitamura, Naoto Tsuji, and Hideo Aoki: A density functional design of an interaction-driven topological insulator in cold atoms on an optical lattice, *Int. Symposium on Compuitics - Quantum Simulation and Design*, Tokyo, Dec 2014.
- [37] Sota Kitamura, Naoto Tsuji, and Hideo Aoki: A density functional design of an interaction-driven Chern insulator for an optical lattice system, *Int. Conf. on topological quantum phenomena 2014 (TQP2014)*, Kyoto, Dec 2014.

- [38] Sota Kitamura, Naoto Tsuji, and Hideo Aoki: A density-functional design of an interaction-driven Chern insulator for an optical lattice system, *American Physical Society March Meeting*, San Antonio, Mar 2015.
- [39] Naoto Tsuji: Light-induced Higgs-mode resonance in s-wave and d-wave superconductors, *Dynamics of Strongly Correlated Systems, ISSP-MPIPKS Joint Workshop*, Kashiwa, Mar 2015.
- [40] Naoto Tsuji: Light-induced Anderson pseudospin resonance with Higgs mode in superconductors, *Nonequilibrium phenomena in novel quantum states (YKIS 2014)*, Kyoto, Dec 2014.
- [41] Naoto Tsuji: Nonequilibrium dynamical cluster approximation: non-local correlation and real-time dynamics, *Int. Symposium on Computics: Quantum simulation and design*, Tokyo, Dec 2014.
- [42] Ryusuke Matsunaga, Naoto Tsuji, Hiroyuki Fujita, Arata Sugioka, Hideo Aoki, and Ryo Shimano: Collective pseudospin precession in a superconductor NbN driven by sub-gap THz electric fields, *Low Energy Electrodynamics in Solids (LEES2014)*, Loire Valley, France, June 2014.
- (国内会議)
- 招待講演
- [43] 青木秀夫: 超伝導 — 理論的展望 (CMRC 研究会「超伝導研究の新展開」, KEK, 18 Nov 2014)。
- [44] 青木秀夫: 非平衡強相関係に対する量子シミュレーション (ImPACT プロジェクト「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」研究会、東京、2015年3月)。
- [45] 辻直人: 強相関電子系の非平衡相転移の理論的研究 (日本物理学会領域5若手奨励賞受賞講演、東京、2015年3月)。
- [46] 辻直人: 超伝導体における「ヒッグス粒子」(第3回統計物理学懇談会、東京、2015年3月)。
- [47] 辻直人: 超伝導体における「ヒッグス粒子」の理論 (CMRC 研究会「超伝導研究の新展開 (鉄系・銅酸化物系+非平衡系)」, 筑波、2014年11月)。
- 一般発表
- [48] 北谷基治、辻直人、青木秀夫: QMC ソルバーを用いた DMFT+FLEX 法による超伝導相図 (日本物理学会、愛知、2014年9月)。
- [49] 北村想太、辻直人、青木秀夫: 光学格子上の冷却原子系に対する密度汎関数法とトポロジカルモット絶縁相の設計 (日本物理学会、愛知、2014年9月)。
- [50] 河原林透、初貝安弘、青木秀夫: 傾いたディラック電子系における $n=0$ ランダウ準位の異常性と staggered ポテンシャル (日本物理学会、愛知、2014年9月)。
- [51] 初貝安弘、白石賢二、青木秀夫: 拡張した Weaire-Thorpe 模型による silicene バンド構造解析—平坦バンドとディラックコーン (日本物理学会、東京、2015年3月)。
- [52] 青木秀夫: トポロジカル系における多体効果 — Floquet トポロジカル絶縁体, トポロジカル超伝導 (「トポロジカル相におけるバルク・エッジ対の普遍性: 固体物理から冷却原子まで」ワークショップ、筑波、2014年5月)。
- [53] 青木秀夫: 非平衡トポロジカル系 (「トポロジカル相におけるバルク・エッジ対の普遍性: 固体物理から冷却原子まで」ワークショップ、筑波、2015年2月)。
- [54] 村上雄太、Philipp Werner、辻直人、青木秀夫: 非平衡動的平均場によるホルスタイン・モデルの解析—フォノンの非平衡緩和現象への役割 (日本物理学会、愛知、2014年9月)。
- [55] 村上雄太、Philipp Werner、辻直人、青木秀夫: 電子・格子系における非平衡超伝導の動的平均場理論による解析 (日本物理学会、東京、2015年3月)。
- [56] 辻直人、青木秀夫: d波超伝導体におけるヒッグスモード: 平均場理論からのアプローチ (日本物理学会、東京、2015年3月)。
- [57] 辻直人、青木秀夫: 超伝導体におけるヒッグスモード共鳴の理論 (日本物理学会、愛知、2014年9月)。
- (セミナー (国外))
- [58] Hideo Aoki: Nonequilibrium — photo-induced topological insulator, Higgs mode in superconductors (Paul-Scherrer-Intitut, Villigen, 10 July 2014).
- [59] Hideo Aoki: Transition-metal vs carbon-based superconductors — a theoretical outlook (Paul-Scherrer-Intitut, Villigen, 11 July 2014).
- [60] Hideo Aoki: Transition-metal and carbon-based superconductors — their comparison and a Higgs amplitude mode (University of Fribourg, 17 July 2014).
- [61] Naoto Tsuji: Anderson pseudospin resonance with Higgs mode in superconductors (University of Fribourg, May 2014).
- [62] Hideo Aoki: Novel phenomena in nonequilibrium — photo-induced topological insulator and Higgs mode in superconductors (Heidelberg University, 30 Oct 2014).
- [63] Hideo Aoki: Nonequilibrium superconductors — thermalisation crossover and Higgs mode (Hamburg University, 3 Nov 2014).
- (セミナー (国内))
- [64] 青木秀夫: 超伝導 — 理論からの perspective (「超伝導コロキウム」, 25 Sept 2014).
- [65] Naoto Tsuji: Terahertz laser-induced Higgs-mode resonance in superconductors (物質材料研究機構セミナー、筑波、2015年1月)。
- [66] 辻直人: 超伝導体におけるヒッグスモードと擬スピン共鳴 (新潟大学物性理論コロキウム、新潟、2014年8月)。
- [67] 辻直人: 非平衡強相関係・超伝導理論の最近の進展 (光 FORUM 平成 26 年度第 2 回セミナー、東京、2014年6月)。

3.2 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。特に、26年度の研究概要は以下の通りである。

量子ダイナミクス現象について、周期外場のもとでの量子系の定常状態の研究を行った。特定のモデル (Friedrichs model) について、速く振動する外場に駆動された量子系は中間的な時間スケールで準定常状態に緩和することが示された。また、小さな注目系と熱浴から成る量子開放系で、フロケ演算子に関するカノニカル分布が定常状態として実現する条件を明らかにした。その他に、容易軸型異方性のある磁性体が磁場掃引のもとで示す磁化の運動について、古典、量子対応について研究を進めた。また、電子スピン共鳴のスペクトルに関して新しい数値解析法の開発を行った。実時間量子ダイナミクス現象という観点から、広く関連の分野の第一線の研究交流を目的とした第67回(26年度)藤原セミナー「Real-time dynamics of physical phenomena and manipulation by external fields (物理現象の実時間発展と外場による時間操作) 苦小牧(9/24-9/27)」を主催した。

相転移、協力現象に関する研究として、これまで、構成要素の構造変化による実効的長距離相互作用が相転移の性質に重要な影響を与えることを提案してきたが、形状依存性や構成要素間の短距離相互作用などについて研究を進めた。また、遍歴電子系での強磁性機構に関して、長岡強磁性を拡張し、電子ドーピングをモデル化した機構を考案し、その量子相転移について研究を進めた。さらに、スモールワールド性をもつネットワーク上での相転移やそれに関する動的性質についても明らかにした。元素戦略プロジェクトとして磁石の保持力機構についての研究を進め、空間的な不均一性がある場合の LLG 方程式の理論を構築し、その動的性質についても明らかにした。

確率過程に関する研究として、Dunkl 演算子を用いたクーロン相互作用系での多次元ブラウン運動の一般化の数学的定式化についても研究を進め、特に、粒子間相互作用が大きい場合の分布が満たすスケールンダや、定常状態への移行過程について intertwining operator による定式化を行い、いくつかのモデルに関して一般的な性質を明らかにした。

さらに、統計力学の基礎として、熱平衡状態がどのように実現されるかに関する問題や、量子力学の基礎性質に関する問題も重要なテーマとして研究を進めた。

3.2.1 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、応答は重要なテーマであり、26年度は以下のテーマについて研究を進めた。

磁場掃引のもとでの磁化の運動

一軸的異方性を持つスピン系が磁場掃引のもとで示す動的相転移として、古典スピン系では Stoner-Wohlfarth 現象が知られている。この現象は磁石の保磁力の機構として重要なものであるが、系の大きさが小さくなる場合、どのように量子効果が現れるかについて研究を進めた。量子系では、スピン状態が古典状態の場合のように矢印で表せない特有な量子状態をとることが明らかになった。この現象が大きな S でどのように現れるかについて調べ、古典系での軌道の不安定現象と量子系での非断熱遷移の関係についても研究を進めた。その結果、 S が十分大きい場合、古典的な Stoner-Wohlfarth 点までは、準位交差におけるギャップが S ともともに小さくなり、非断熱に準安定状態に留まるのに対し、Stoner-Wohlfarth 点以降で、ギャップがスピノーダル点の特異性をもって現れることを発見した。また、Wohlfarth 点以降では、磁化の大きさ自身が振動する新しい量子現象を発見し、その機構を明らかにした。[24, 44]

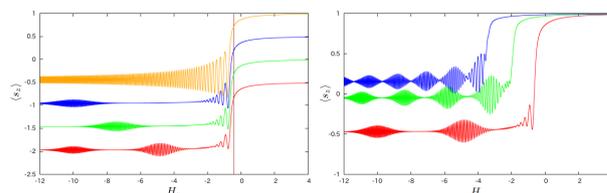


図 3.2.1: 大きな磁場掃引のもとで見せる量子振動現象のパラメータ依存性 (左) スピンの大きさ: 上から $S = \infty, 40, 30, 20$, (右) 異方性: 上から $D = 3, 2, 1$

駆動された量子開放系の定常状態

外から加えられた外場によって駆動される系が散逸環境のもとでどのような定常状態を持つかという問題について研究を進めている。定常状態の性質は一般に熱浴の性質に依存するが、ある条件下では、定常状態が熱浴のミクロな詳細に依らず、駆動下の Floquet 演算子の固有値に関するカノニカル分布で記述されることを明らかにした。[1]

速い外場で駆動された量子系での準定常状態

外場で駆動された量子系は、外場からエネルギーを吸収し、最終的には非常に温度の高い(場合によっては無限大温度の)状態に行き着くと考えられている。ところが、外場が速く振動するとき有効な手法であるマグナス展開法によれば、周期外場の効果を静的な有効ハミルトニアンとして書き表すことができ、有効ハミルトニアンエネルギーが保存することで量子系の温度は無限に増大することはないという結果が出てくる。マグナス展開法は駆動された量子多体系の解析によく用いられているが、ほとんどの場合展開は収束しないため、マグナス展開を用いる理論的妥当性は明らかではなかった。そこで、

Friedrichs モデルという単純なモデルを用いて、ダイナミクスの長時間の振る舞いを調べた。マグナス展開によれば、時間周期外場のもとでも束縛状態が存在する。ところが、このモデルの時間発展の問題を解析したところ、そのような束縛状態は存在しないことがわかった。そのかわり、複素エネルギー固有値で特徴付けられる長寿命の共鳴状態が存在し、この共鳴状態がマグナス展開の予言する束縛状態に対応することが明らかになった。この研究によって、マグナス展開が収束しないときには、マグナス展開の低次での切断は無限時間後の状態を正確に予言することはできないが、その途中に現れる準定常状態を正しく記述することがわかった。[2]

量子応答

ESR などのスペクトルは、久保公式によって与えられる。ミクロなハミルトニアンが詳しくわかっている V_{15} において実験と理論との詳しい対応を調べ、異方性の効果などを明らかにした。[3] また、反強磁性かごめ格子状での ESR についても調べた [4]。しかし、具体的な数値的評価のためには系のハミルトニアンの固有値固有関数が必要となり、大きな系では難しくなる [41]。その場合、系の時間相関関数の量子力学的時間発展を求め、その Fourier 変換からスペクトルを求める方法が知られている。我々は、Winer-Khinchin の関係を用いて、時間相関関数ではなく、変動する物理量自身の量子力学的時間発展からスペクトルを求める方法を開発した。そこでは、熱平衡状態に関する平均の代わりに、いわゆる大きな系における typicality が用いられるが、Winer-Khinchin 法においては、ゆらぎの特徴として、大きな系において値自身ではなく観測値の分布が収束することなどを明らかにした。[40] また、化学反応における電荷の移動に関する解析も行った。[5]

量子開放系におけるマルコフ性

熱浴と弱く結合した小さな量子系のことを量子開放系とよび、熱平衡状態への緩和過程やデコヒーレンスを研究するのにしばしば用いられる。系と熱浴の間の相互作用は無限に弱い、その影響が現れる程度に無限に長い時間スケールで注目系の時間発展を考える (van Hove 極限) と、量子マスター方程式と呼ばれるマルコフ型の方程式が導出される。

しかし実際には van Hove 極限は近似であり、実際にはそこからのずれがある。そのずれの効果による非マルコフ効果の主要項を計算した。それによると、注目系と熱浴の間に「自然な相関」と呼ばれる特別な相関があれば、van Hove 極限からずれがあるにもかかわらず、注目系の時間発展はマルコフ型の量子マスター方程式で記述されることがわかった。また、注目系の状態によっては自然な相関が存在しないものがあり、そのような状態からの時間発展を考える場合には非マルコフ効果が必ず現れることがわかった。この非マルコフ効果を取り入れることで、量子マスター方程式を数値計算で解いたときにしばしば「負の密度行列」という非物理的な結果が得られる問

題を回避することができる。自然な相関が存在しない十分条件を導き、非マルコフ性が重要になる注目系の状態を明らかにした。[6]

3.2.2 協力現象の統計力学

Network 上での相転移

Network の構成に関して、多くの研究がなされて来ており、ノード間の結合の入れ方のルールによって、small-world 性、scale-free 性など、多くの興味深い特徴が明らかになっている。我々は、一次元リングに short-cut パスを加えて作られた small-world 性を示す Network のノード上に強磁性的に相互作用するイジングスピンを置きその相転移と特徴を調べた。先行研究により、それらの系は平均場近似と同様な臨界現象を示すいわゆる平均場普遍性を示すことが知られている。この平均場普遍性は全てのスピン間に相互作用があるいわゆる無限レンジモデルで知られている。無限レンジモデルでは、動的にも平均場近似と同様に、熱力学的極限でも準安定性が存在し、スピノーダル転移を示す。それに対し、今回のモデルは低温でも準安定性は示さないことを発見した。その場合に、短距離秩序のイジングモデルの場合の Avrami 曲線に相当する十分大きな系が示す普遍的な緩和曲線についても明らかにした。[14]

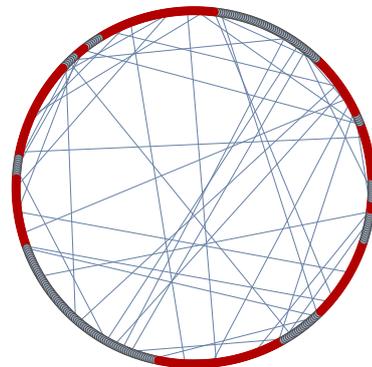


図 3.2.2: 一次元リングに short-cut パスを加えて作られた small-world 性を示す Network

3.2.3 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נקロスオーバー物質、電荷移動物質、ヤン・テラー系、マルテンサイト系など、格子の局所的な構造に双安定性がある系はイジングモデルでモデル化されるが、双安定な 2 つの状態のエネルギー差や縮重度の違いによって様々な興味深い協力現象を示す。これらの系は、双安定状態間のスイッチを磁場、

光、圧力、温度などのパラメータによって制御でき、機能材料として注目されている。[7] これまで、主に、ミクロに均一な転移が起こる強磁性模型、副格子が存在する反強磁性模型を調べてきたが、今年度は、相互作用間に競合がある模型を調べた。まず、ANNNI 模型に関して、対応する実験物質である錯体 $[\text{FeH}_2\text{L}^{2-\text{Me}}](\text{ClO}_4)_2$ で観測されているゆらぎの特徴や、準安定性の特徴についてモデル化した。[26] また、これらの物質では双安定な2つの状態の局所構造の違いを反映した弾性相互作用の重要性を指摘してきた。その効果による状態反転の系の形状依存性について詳しく調べた。[8] また、反強磁性体三角格子の模型において、中間相から低温相への転移の特異性が弾性相互作用によって変更を受けることを発見した。[25, 45]

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。これらの系では、従来の統計力学の対象とは異なり、焼結と呼ばれる微小結晶への分割が本質的であることが知られている。そのような系の有限温度での核形成や磁壁ピンギなどの機構を明らかにするため、有限温度での磁化の運動を取り扱うことのできる確率的 LLG(Landau-Lifshitz-Gilbert) 方程式の定式化を行い、これまで知られていた基底状態の相図が有限温度でどのように変わるかについて明らかにした。[9, 30, 31, 32]

遍歴電子系における新強磁性体のモデル

遍歴電子系における強磁性体のモデルである長岡強磁性の機構を拡張し、ホールドーブ機構をもつモデルを構築し有限の電子密度領域で遍歴強磁性が発生するモデルに関する研究を進めている。ランチョス法による大規模対角化法、有限サイト密度行列繰り込み群の方法(DMRG)を用いて、磁性出現のあり方を詳しく調べ、電子間のスピン相関や、ドーブ機構の粒子浴と見なされる部分と系とのエンタングルメントエントロピーなども明らかにした。[10]

3.2.4 確率過程

拡散方程式の熱カーネルを Dunkl 演算子と呼ばれる微分差分演算子に拡張したものは Dunkl 過程と呼ばれ、クーロン相互作用系での多粒子ブラウン運動になることが知られている。特別な場合として、ランダム行列の特別な場合として知られている Dyson's Brownian motion 模型や Wishart-Laguerre 固有値過程などが含まれる。この Dunkl 過程は粒子間の相互作用の強さを占めずパラメータ β が重要な役割をする。このパラメータが大きくなるき、定常状態がどのように極限形に収束するか、また、一般の β に

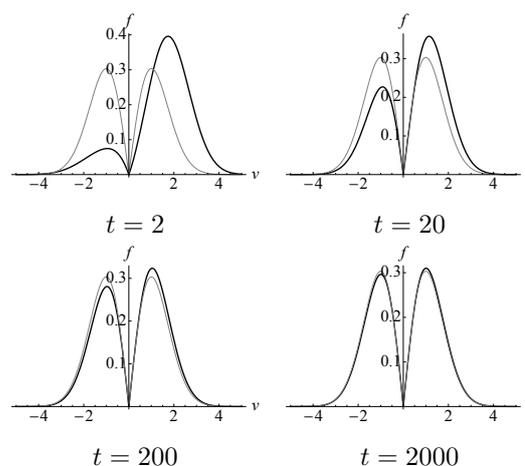


図 3.2.3: 一次元 Dunkl 過程の各時刻でのスケールされた確率分布 (太線) ($t = 0$ で $\delta(x - 2)$)、と定常状態分布 (細線)

において分布関数が時間とともにどのように極限形に収束するかを明らかにした。[11]

3.2.5 統計力学の基礎的研究

長距離相互作用系の統計力学

最近、従来の熱統計力学では詳しく吟味されてこなかった長距離相互作用系の統計力学について調べている。長距離相互作用系は従来、物性の分野では人工的な模型と考えられてきたが、上で述べたように局所格子構造のちがう双安定系では、ハミルトニアンとしては短距離系であるにもかかわらず、実効的な長距離モデルと同様の振る舞いをすることがわかってきており、また冷却原子系の実験の進歩によって、冷却原子系でダイポール間相互作用による長距離相互作用系も作られている。それらの系で現れる、新しい性質、特徴に注目している。

平成 26 年度は、短距離相互作用と長距離相互作用の両方を含む系の熱力学的極限の存在と、エントロピーの変分表式を厳密に証明した。[12]

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Shirai, T. Mori, S. Miyashita, Condition for emergence of the Floquet-Gibbs state in periodically driven open systems, *Phys. Rev. E*, **91**, 030101(R) (2015).
- [2] T. Mori, Floquet resonant states and validity of the Floquet-Magnus expansion in the periodically driven Friedrichs models, *Phys. Rev. A* **91**, 020101(R) (2015).

- [3] M. Marthens, J. Tol. van, NS Dalal, S. Bertaina, B. Barbara, B. Tsukerblat, A. Muller, S. Garai, S. Miyashita, I. Chiorescu, Anisotropy of the molecular magnet V-15 spin Hamiltonian detected by high-field electron spin resonance, *Phys. Rev. B*, **89** 195439 (2014).
- [4] T. Sakai, K. Hijii, S. Okubo, H. Ohta, H. Nakano, and S. Miyashita, Possible Singlet – Triplet Transition of ESR in the Kagome-Lattice Antiferromagnet, *Applied Magnetic Resonance*, **03** (2015) [DOI 10.1007/s00723-015-0652-9]
- [5] R. Sakamoto, S. Katagiri, H. Maeda, Y. Nishimori, S. Miyashita, H. Nishihara, Electron Transport Dynamics in Redox-Molecule-Terminated Branched Oligomer Wires on Au (111), *J. Am. Chem. Soc.* **137**, 734 (2015).
- [6] T. Mori, Natural correlation between a system and a thermal reservoir, *Phys. Rev. A* **89**, 040101(R) (2014).
- [7] D. Chiruta, J. Linares, S. Miyashita, K. Boukheddaden, Role of open boundary conditions on the hysteretic behaviour of one-dimensional spin crossover nanoparticles, *J. App. Phys.* **115**, 194309 (2014).
- [8] C. Enachescu, M. Nishino, S. Miyashita, K. Boukheddaden, F. Varret, P.A. Rikvold, Shape effects on the cluster spreading process of spin-crossover compounds analyzed within an elastic model with Eden and Kawasaki dynamics, *Phys. Rev. B* **91**, 104102 (2015).
- [9] M. Nishino and S. Miyashita, Realization of the thermal equilibrium in inhomogeneous magnetic systems by the Landau-Lifshitz-Gilbert equation with stochastic noise, and its dynamical aspects, *Phys. Rev. B* **91**, 134411 (2015).
- [10] H. Onishi, S. Miyashita, Doping control of realization of an extended Nagaoka ferromagnetic state from the Mott state, *Phys. Rev. B*, **90**, 224426 (2014).
- [11] S. Andraus, M. Katori, S. Miyashita, Two limiting regimes of interacting Bessel processes, *J. Phys. A: Math. Theor.* **47** 235201, (2014).
- [12] T. Mori, Existence of shape-dependent thermodynamic limit in spin systems with short- and long-range interactions, *J. Phys. A: Math. Theor.* **48**, 145001 (2015).
- (国内雑誌)
- [13] 宮下精二:巻頭言「物理共同体」日本物理学会誌 **69** (2014) 597.
- (学位論文)
- [14] Futoshi Futami, Static and dynamical properties of magnetic order in small world networks (スモールネットワーク上での磁気秩序の静的動的性質), Master thesis, The University of Tokyo, March 2015.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [15] S. Andraus, S. Miyashita, A study of correlations in the Dyson model, Interface fluctuations and KPZ universality class - unifying mathematical, theoretical and experimental approaches, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, 2014/08/20-23.
- [16] S. Andraus, S. Miyashita, A study of correlations in the Dyson model, 67th Fujihara seminar: Real-time dynamics of Physical Phenomena and Manipulation by External Fields, Tomakomai, Hokkaido, 2014/09/23-27.
- [17] T. Shirai, T. Mori, S. Miyashita, Periodically driven steady states independent of the structures of a thermal bath, Fujihara Seminar: Real-time Dynamics of Physical Phenomena and Manipulation by External Fields Tomakomai, Japan, 2014/9/23-27.
- [18] Seiji Miyashita, Ferromagnetic states in an extended Nagaoka system, 5th Topical Meeting on Spins in Organic Semiconductors (SPINOS 2014), Egret Himeji, Hyogo, Japan, 2014/10/13-10/17.
- [19] S. Andraus, Relaxation of interacting particle systems using Dunkl operators, Spectra of Random Operators and Related Topics, Research Institute for Mathematical Sciences (RIMS), Kyoto, 2015/01/08-10.
- [20] T. Shirai, T. Mori, S. Miyashita, Novel symmetry-broken phenomenon in the driven Dicke model in the thermodynamic limit, ICSCE7 Hakone, Japan, 2014/04/21-25.
- [21] T. Mori, T. Shirai, and S. Miyashita, Nonequilibrium phase transitions in periodically driven cavity QED systems, ICAP2014 (The 24th international conference on atomic physics), Washington D.C., USA, 2014/08/03-08.
- [22] T. Mori, Natural correlation between a system and a thermal reservoir and the Markovianity of reduced dynamics, Fujihara seminar: Real-time Dynamics of Physical Phenomena and Manipulation by External Fields, Hokkaido, 2014/09/23-27.
- 招待講演
- [23] Seiji Miyashita, Control of Mott and Ferromagnetic states in an extended Nagaoka system, 10th International Workshop on Nanomagnetism and Superconductivity, Comaruga, Tarragona, Spain, 2014/6/30-7/4.
- [24] Seiji Miyashita, Collapse of metastable states in quantum systems with time dependent fields, Fujihara Seminar: Real-time Dynamics of Physical Phenomena and Manipulation by External Fields, Grand Hotel New Oji, Tomakomai, Hokkaido, Japan, 2014/9/23-9/27.

- [25] Seiji Miyashita, Phase transitions spin-crossover materials, LMU-UT Workshop, Ecole normale superieure-Paris, 2014/12/8-12/10.
- [26] Seiji Miyashita, Successive phase transitions of spin-crossover ordering due to HS-LS spatial structure due to competing of short-range interactions, [POSTM2014] International conference Phase transition and Dynamical properties of Spin Transition Materials, Sanjo Conference Hall, Hongo Campus, The University of Tokyo, 2014/11/19-11/22.
- [27] Seiji Miyashita, Effect of elastic interaction on phase transition of antiferromagnets on the triangular lattice, ENS-UT Workshop, Ecole normale superieure-Paris, 2014/12/8-12/10.
- [28] Seiji Miyashita, Phase transitions in spin dynamics under time-dependent fields. Many-body dynamics out of equilibrium International Focus Workshop, Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Dresden Germany, 2015/3/10-3/14.
- Chair and Organizer
- [29] Seiji Miyashita, The 67th Fijihara Seminar: Real-time Dynamics of Physical Phenomena and Manipulation by External Fields, Grand Hotel New Oji, Tomakomai, Hokkaido, Japan, 2014/9/23-9/27.
- (国内会議)
- 一般講演
- [30] Sasmita Muhakud, Effect of Exchange Defect and Anisotropy on Magnetization, ESICMM 京大サイトビジット (若手研究者進捗報告), 京都大学 宇治キャンパス 総合研究実験棟 講義室 2(CB-215), 2014/5/26.
- [31] 宮下精二, 核生成理論と単磁区反転機構理論の整備, 元素戦略磁性材料研究拠点 (第 6 回 磁性材料研究拠点成果報告会), 物質・材料研究機構 (研究本館 1 階 第一会議室), 2014/12/12-12/13.
- [32] 宮下精二, The effects of temperature and depole fields on coercivity, ESICMM Tsukuba Progressive Report Meeting, 2015/1/26.
- [33] 白井達彦, 森貴司, 宮下精二, 熱浴の詳細によらずに実現する周期的駆動量子系での定常状態の性質日本物理学会 2014 年秋季大会中部大学, 2014/09/07-10.
- [34] 森貴司, 注目系と熱環境の間の自然な相関とダイナミクスのマルコフ性, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014/09/07-10.
- [35] アンドラウス セルヒオ, 宮下精二, Numerical study of correlations in the Dyson model, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014/09/07-10.
- [36] 西野正理, 宮下精二, フラストレーション系における格子変形を伴う弾性相互作用の効果日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014/09/07-10.
- [37] アンドラウス セルヒオ, Two-step relaxation of scaled Dunkl processes and interacting particle systems, 東京確率論セミナー, 東京工業大学, 2015/02/02.
- [38] アンドラウス セルヒオ, 宮下精二, Relaxation laws of interacting particle systems using Dunkl operators, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015/03/21-24.
- [39] 白井達彦, 森貴司, 宮下精二, 熱浴の詳細によらずに実現する周期的駆動量子系での定常状態について第 1 回若手勉強会「非平衡統計力学の基礎理論」慶應大学, 2014/08/06-08.
- [40] 池内光希, 宮下精二, 量子スピン系における ESR の数値解析, 日本物理学会 2015 年春季大会, 早稲田大学, 2015/03/21-24.
- [41] 肘井敬吾, 坂井徹, 宮下精二, 太田仁, $S=1/2$ 三量体量子スピン鎖における動的感受率の数値的研究日本物理学会 2015 年春季大会, 早稲田大学, 2015/03/21-24.
- [42] 森貴司, 時間周期外場によって駆動された量子系の定常状態, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015/03/21-24.
- [43] 上西慧理子, 森貴司, 池田達彦, 上田正仁, 前期熱平衡化のエンタングルメントによる新しい機構の提案, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015/03/21-24.
- [44] 鳩村拓矢, Bernard Barbara, 宮下精二, 掃引磁場下での Stoner-Wohlfarth 模型における量子現象, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015/3/21-24.
- [45] 西野正理, 宮下精二, 三角格子スピנקロスオーバー系の Kosterlitz-Thouless 相における弾性相互作用の効果, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015/3/21-24.
- 招待講演
- (セミナー)
- [46] 白井達彦, 森貴司, 宮下精二, 周期的に駆動された量子開放系の定常状態の性質について第 7 回基礎物理セミナー合宿箱根太陽山荘, 2015/02/14-16.
- [47] 森貴司, 準平衡状態における相加性の破れ, 羽田野研究室セミナー, 東大生産研, 2014/05/14.
- [48] 鳩村拓矢, Metastable states in quantum systems, 栗原研セミナー, 早稲田大学, 2014/11/22.

3.3 小形研究室

小形研では、強相関電子系 (高温超伝導、重い電子)、有機物質、ディラック電子系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。

3.3.1 高温超伝導の理論

ドーピングされたモット絶縁体と強相関 d 波超伝導

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。これを理解するために、2次元正方格子上のハバードモデルを用いて金属絶縁体転移、および相関の強い場合の $d_{x^2-y^2}$ -波超伝導と反強磁性状態について詳しく調べた。具体的には電子相関を十分考慮した試行波動関数を仮定し、変分モンテカルロ法によって基底状態を調べる。その結果、高温超伝導の本質であると考えられる「ドーピングされたモット絶縁体」という概念について明確な描像を得ることができた(図 3.3.1 右図参照)。[50, 51, 53]

フラックス状態

高温超伝導体における有限温度の擬ギャップ状態は、未だに理解が難しい問題である。我々は時間反転対称性を破ったフラックス状態が擬ギャップ状態の候補ではないかという観点から詳しく検討した。これまでは、フラックス状態について単純な試行波動関数を用いて研究がなされてきたが、図 3.3.1 の doublon と holon の束縛という観点を加えて調べることによって、フラックス状態の安定性を議論した。また、新しく波動関数に適当なゲージ位相をつけることによって運動エネルギーを下げる効果があることが明らかになった。[12, 13, 31, 52]

電子ドーピング銅酸化物高温超伝導体の微視的モデル

電子ドーピング系の銅酸化物高温超伝導体とホールドーピング系を比較すると、 t' の違い以外に有効的なハバードモデルのクーロン斥力が小さいという可能性がある。このアイデアをもとに、酸素軌道を考慮したハバードモデルから微視的モデルを構築した。クーロン斥力が小さい場合、ドーピング無しでモット絶縁体とはならず、代わりに超伝導がゼロドーピングまで実現するという可能性がある。ハバードモデルに対する変分モンテカルロ計算の結果は、この可能性を支持している。[58, 79, 80]

3.3.2 ディラック電子系

単層グラファイト(グラフェン)や有機導体 α -(ET) $_2$ I $_3$ 、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、これまでになく新しい伝導現象を生み出さうと予想され、新たな電子状態として非常に興味が持たれている。これら一連の物質群は「固体中のディラック電子系」と呼ばれる。我々は興味ある物性を開拓すべく研究を行っている。

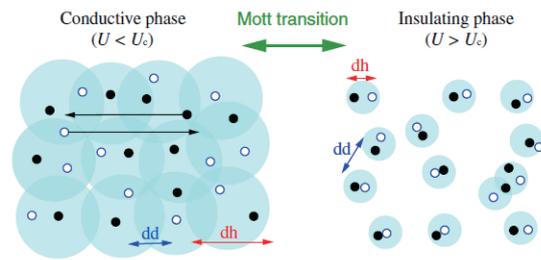


図 3.3.1: 黒丸が doublon、白丸が holon を表す。右は束縛状態を作った絶縁体状態(モット絶縁体)で、左は束縛状態が重なり合っ金属となった状態。右図の状態に動けるキャリアがドーピングされた状態が、高温超伝導の舞台であると考えられる。

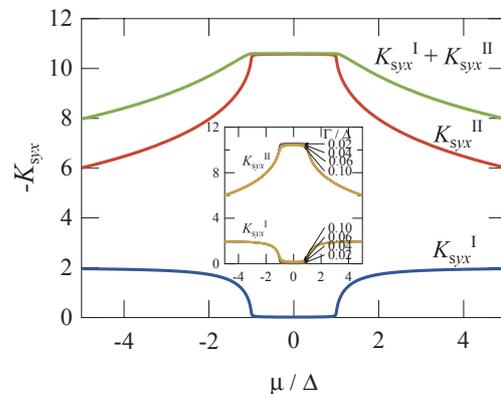


図 3.3.2: ビスマスのディラック電子によるスピンホール係数

ディラック電子のスピンホール効果

固体中ディラック電子は、顕著なスピンホール効果を生み、それが反磁性電流と同じ表式で与えられることを発見した(図 3.3.2 参照) [1, 4]。スピンホール効果とは、加えた電場に対して垂直方向にスピンの流が発生する現象であり、スピン軌道相互作用に起因する。これまでも様々な系で研究が進められてきたが、我々は非放射性元素中最大のスピン軌道相互作用を持つビスマスにおけるスピンホール効果を、現実の異方的パラメータを含めて調べた。その結果、スピンホール伝導度は絶縁体のとき最大値を取ること、絶縁体のスピンホール伝導度は軌道反磁性と物理定数のみによって厳密に関係付けられることを示した。このことは、磁場によって発生する反磁性電流と電場によって生まれるスピンホール効果が双対性(ディラック電子が持つ相対論的性質に起因している)を持っていることを強く示唆している。この結果はビスマスのみならずすべての固体中ディラック電子系に適用可能である。[1, 4, 25, 26, 27, 54, 56]

グラフェンにおける欠陥誘起の近藤効果の理論

イオン照射されたグラフェンにおいて近藤効果が観測され、注目を集めている。通常、近藤効果は金属中の磁性不純物によって引き起こされるが、この実験はグラフェン中の単純な欠陥が近藤効果を引き起こすことを示唆している。この近藤効果が、点欠陥に現れた sp^2 電子の持つ局在モーメント (図 3.3.3) とその周りに現れる π 電子由来の局在軌道との相互作用により強められることを数値くりこみ群により示した。また、磁場を印加すると軌道磁性の効果により近藤温度が劇的に減衰する可能性があることを、磁場下の強束縛近似による電子状態の計算から明らかにした。[16, 39, 55]

ディラック電子の超伝導状態におけるマイスナー効果

4×4 行列で表されるディラックハミルトニアンをもとに、ディラック電子の超伝導状態におけるマイスナー効果を調べた (図 3.3.4)。その結果、通常の k^2 分散の場合に見られる反磁性項ではなく、バンド間効果を起源とする非自明なマイスナー効果を示すことを発見した。さらに非相対論極限を考慮することで、ディラック電子のマイスナーカーネルが、非相対論極限での自由電子のマイスナーカーネルと一致することを確認した。また、自由電子のマイスナーカーネルの「常磁性項」と「反磁性項」が、ディラック電子ではそれぞれ「バンド内項」と「バンド間項」に対応することを明らかにした。[10, 19, 30, 40, 46, 78]

ディラック電子の異常ホール効果

固体中のディラック電子系に、内部磁場によるゼーマン項を加えて時間反転対称性を破ると、異常ホール効果が発生することを示した。その内因性寄与の表式を解析的に求めた。異常ホール効果とは、強磁性体などで対称性が破れた系において外部磁場なしでホール効果が発生する現象である。通常バンド分散ではこれまで様々な研究がなされていたが、我々はディラック電子系について調べた。その結果、二次元・三次元系ともにベリー曲率が生じることにより、内因性ホール伝導度が生じることを示した。これはディラック電子系でも対称性が破れると、通常

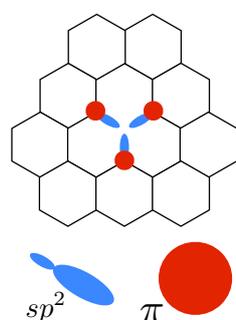


図 3.3.3: グラフェン中の点欠陥とその周りの sp^2 軌道と π 軌道

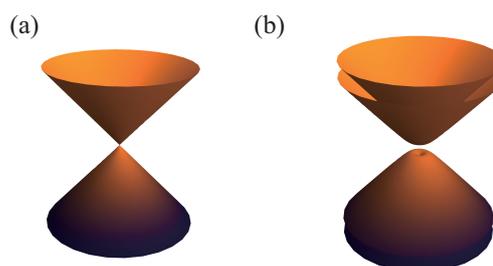


図 3.3.4: ディラック電子の (a) 常伝導状態と (b) 超伝導状態での分散関係。

のバンド分散の系と同様に異常ホール効果が発生することを示している。[21, 44]

3.3.3 有機導体に関する理論

有機導体 (分子性導体) は相関の強い電子系のモデル物質であると考えられるが、そこで起こる特異な現象や超伝導に関する研究を行なっている。

有機物におけるディラック電子の磁気抵抗

有機物におけるディラック電子の分散関係は、波数空間で傾いていると考えられている。このことを考慮して、磁場中の輸送現象を調べた [8, 60]。古典的な電子の運動は傾きのために楕円となるが、このためにランダウレベルの混成が起こって伝導度に変化することがわかった。低磁場では伝導度に異方性が出現し、これを実験的に測定することでディラックコーンの傾きが測定できることを提唱した。さらに、最近の α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の有機導体における磁気抵抗の実験との比較を行い、実験で見られている電気伝導度の極小現象が、不純物散乱を考えることによって理解できることを見出した。さらに、磁気抵抗の計算を 3 次元のディラック電子系にも拡張した [17, 37]。この場合、磁場方向の伝導度が量子極限で温度や磁場に依存しない一定値になることを見出した。また量子極限では、磁気抵抗が磁場に対して線形となるような新しいメカニズムを提唱した [65]。我々の結果は、最近見つかっている 3 次元のディラック電子系物質の異常な磁気輸送現象の理解にも役立つと考えられる。

有機ディラック電子系 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ における欠陥誘起ゼロエネルギー局在状態

近年、擬 2 次元分子性導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ (α -(ET) $_2$ I $_3$) が質量ゼロのディラック電子系として注目を集めている。この系に格子欠陥などが入ると、ディラック電子特有の状態が出現する可能性がある。そこで我々は α -(ET) $_2$ I $_3$ 中の欠陥周辺における電子状態を調べた。手法として強束縛模型の実空間における対角化を用いた。その結果、単位胞中のあるサイ

トに欠陥が存在するとき、局在状態がゼロエネルギー(ディラック点)に現れることを見出した。この局在状態を波数空間において調べ、この系に特徴的なディラックコーンの傾きを反映した異方性が現れることを明らかにした。[7]

3.3.4 トポロジカル物質の理論

トポロジカル絶縁体表面における長距離クーロン効果の研究

トポロジカル絶縁体表面のディラック電子系において、長距離クーロン力の影響を調べた。この系のハミルトニアンが実スピンのパウリ行列で表されることに注目し、ウィルソン繰り込み群の解析により g 因子の繰り込み群方程式を導出し、 g 因子が低温で増大することを示した [11, 41]。通常のディラック電子系では、低温におけるフェルミ速度の増大によってスピン帯磁率が抑制されるが、本研究の系では g 因子の繰り込み効果がフェルミ速度の繰り込み効果を上回り、スピン帯磁率が低温で増大することがわかった。

量子輸送方程式によるスピン流の定義に関する研究

通常、スピンホール係数は慣習的なスピン流演算子の期待値を計算することで得られるが、スピン流演算子の定義の曖昧さからその正当性には疑問が残る。 Sb_2Se_3 などの物質系では慣習的なスピン流が 0 になるが、量子輸送方程式から導かれるスピン拡散方程式を新たに導出し、それを調べることにより、スピン蓄積を伴うスピンホール効果が生じることを見出した。このことは通常のスピンホール効果とは異なる重要なメカニズムを与えるものである。[20, 24, 47]

トポロジカル絶縁体表面の電荷・スピン輸送ダイナミクス

トポロジカル絶縁体の表面においては、伝導電子の運動方向に対しスピンの向きが固定される金属状態が実現しており、その輸送特性が注目を集めている。表面状態は時間反転対称性を持つが、磁場の印加によって対称性が破れると、輸送特性に影響が出る。我々は磁場下における表面状態の輸送特性を調べるため、Keldysh グリーン関数法を用いて系の量子輸送方程式を導出した。その結果、表面状態のスピンの向きは固定されなくなり、端に蓄積するスピン偏極がゼロ磁場の場合よりも小さくなることを見出した。[43, 48, 70]

フラクタルと量子ホール係数の関係

2次元正方格子遍歴電子系に垂直磁場を印加すると、Hofstadter's butterfly と呼ばれるフラクタルな量子相図が現れる。このとき、整数量子ホール効果との間に興味深い関係が存在することがわかった。まず、単位格子当たりの磁束 $\phi = p/q$ の分母の偶奇に

応じて、ゼロ点近傍にディラックコーンまたは二乗分散が生じることがわかる。これらのバンドは付加的な磁束 $\Delta\phi$ によりランダウ量子化され、準位間で σ_{xy} が量子化される。格子系を考えているため、いずれのランダウ準位も分裂するが、 σ_{xy} の総和は分裂前と変わらないため、特定の条件下では具体的な計算をすることなく σ_{xy} が求められる。我々は、この条件とフラクタルの間に共通する規則が存在することを明らかにした。[22, 45]

3.3.5 重い電子系および多軌道電子系理論

f^2 電子配置における準粒子と結晶場基底の関連性

U や Pr などの局在電子数の期待値がほぼ 2 個である (f^2 電子配置) ような重い電子系化合物に関して準粒子状態を調べた。モデルとして、多軌道周期アンダーソンモデルに結晶場効果を加えたものを用い、局在軌道の 3 重占有状態までを考慮したスレーブボソン法の平均場解析を行った。その結果、 f^2 電子配置での重い準粒子状態が結晶場基底状態に強く依存することを解析的に示した。さらに、複数の f 軌道の準粒子ピークが縮退していく傾向にあり、巨大な有効質量が現れることがわかった。このことは、 f^2 電子配置での重い準粒子状態を多軌道周期アンダーソンモデルから記述することができないことを示唆している。[33, 49, 66]

ペアホッピング機構による電荷近藤効果の理論

タリウム (Tl) イオンは 1+ と 3+ の形式価数をとり、2+ の価数を飛ばすことが知られている。他の元素でも、これと同様な現象が確認されており、バレンススキッピングと呼ばれている。最近、Tl を少量ドープした PbTe において近藤効果が確認されたが、これを理解するために Tl の電荷の自由度を使った近藤効果 (電荷近藤効果) を提唱した。その結果、温度が下がるにつれて、まず原子価スキッピング状態が現われ、さらに低温では電荷近藤効果がおこり、最終的に電荷近藤-芳田一重項が形成されることが分かった。[81, 83]

空間反転対称性の破れた多軌道系のスピンホール効果

スピン軌道相互作用に由来した特異な輸送現象のひとつにスピンホール効果がある。我々は、軌道自由度と空間反転対称性の破れの両方を考慮したモデルにおけるスピンホール伝導率を調べた。その結果、空間反転対称性の破れた多軌道系のスピンホール伝導率は、不純物散乱の強さの関数として符号反転含む特異な依存性を示すことが明らかになった [9, 28, 34]。また、不純物散乱強度の軌道依存性のためにスピンホール伝導率が増大することを明らかにし、さらにバーテックス補正がスピンホール伝導率にほとんど影響しないことを示した。[74]

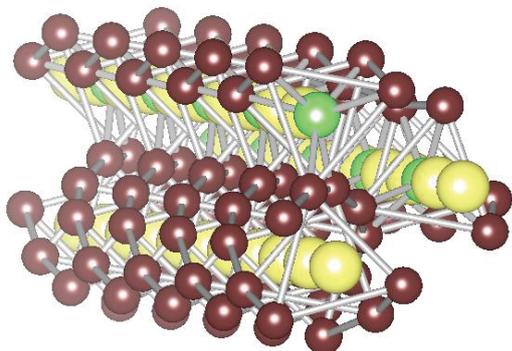


図 3.3.5: CrNb₃S₆ の結晶構造。下半分の濃い色の硫黄イオンが、らせん形に巻いている。(現実の結晶より、らせん構造を誇張して描いている。)

3.3.6 磁性体およびスピン軌道相互作用

らせん構造とスピンのカイラル磁気構造との微視的関係

カイラル磁性体はスピンがらせん状に巻いた磁性体である (図 3.3.5 参照)。このようなスピン構造は、結晶構造中のらせん構造がスピン軌道相互作用を通してスピンの転写されることによって生じる。しかし、らせん構造とカイラル磁気構造の微視的関係は十分に理解されていなかった。この関係性を解明するため、微視的モデルを出発点に電子状態解析をおこなった。その結果、スピン軌道相互作用により、らせん構造中を移動する電子の軌道間の移動積分に位相が生じることがわかった。さらに電子間のクーロン相互作用を導入すると、カイラリティを産むジャロシンスキー守谷相互作用が得られることがわかった。[32, 72, 75, 82]

量子臨界磁気ゆらぎの反対称スピン軌道相互作用に対する影響

f 電子系を含む化合物の中には、加圧によって磁気秩序が消失する臨界圧近傍で量子臨界磁気ゆらぎが発達し種々の物理量に非フェルミ液体的振る舞いが現れるものがある。しかし、量子臨界磁気ゆらぎがラシュバ相互作用のような反対称スピン軌道相互作用に与える影響についてはわかっていなかった。この影響を調べた結果、量子磁気臨界点近傍でフェルミ面が顕著に変形するとともに、スピン軌道相互作用によって分裂した二つのバンドの質量くりこみ効果が逆になることがわかった (この研究は、JPSJ 誌の Editors' choice に選ばれた)。[6]

j-j 結合描像に基づく超交換相互作用

近年、大きなスピン軌道相互作用が引き起こす新奇の現象がみられる系として、5d 電子系化合物が非常に興味を持たれている。このようにスピン軌道相互作用が大きい場合に、スピン軌道相互作用を明確に取り入れた形での超交換相互作用の導出は議論されていなかった。そこで我々は、スピン軌道相互作用作用が大きな場合の超交換相互作用を微視的に導出する方法を定式化した。その結果、量子コンパス-ハイゼンベルグ模型が得られることが分かった。[2, 73, 76]

カイラルソリトン、反強磁性体磁壁のダイナミクス

スピントロニクスへの主な研究は強磁性体であり、他の磁気構造であるカイラル磁性体や反強磁性体の研究は未発展な部分が多い。そこで特にカイラル磁性体や反強磁性体の磁壁のダイナミクスに焦点をあて、集団座標のフォーマリズムの下で解析した。その結果、(1) 不純物により局所的にジャロシンスキー守谷相互作用が緩和しても、カイラルソリトンの終端速度は変わらないこと [35]、(2) 2層構造の系について層間のスピン間相互作用がある場合、カイラルソリトン・反強磁性体磁壁、ともに易動度は増加すること [69] がわかった。(3) また、各磁気構造の駆動の際に局在モーメントから伝導スピンの与えるスピンフォースを計算した。特にカイラル磁性体の場合には、今まで取り入れられて来なかったスピンの非断熱性 (β 項) やスピン軌道相互作用を考慮したスピンフォースを求めた。

<報文>

(原著論文)

- [1] Y. Fuseya, M. Ogata, and H. Fukuyama: (invited review article) *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 012001-1-22 (2015). "Transport Phenomena and Diamagnetism of Dirac Electrons in Bismuth"
- [2] H. Matsuura and M. Ogata: *J. Phys. Soc. Jpn.* **83**, 063701-1-4 (2014). "A Poorman's Derivation of Quantum Compass-Heisenberg Interaction: Superexchange Interaction in J-J Coupling Scheme"
- [3] Y. Suzumura, I. Proskurin, and M. Ogata: *J. Phys. Soc. Jpn.* **83**, 094705-1-9 (2014). "Dynamical Conductivity of Dirac Electrons in Organic Conductors"
- [4] Y. Fuseya, M. Ogata, and H. Fukuyama: *J. Phys. Soc. Jpn.* **83**, 074702-1-11 (2014). "Spin-Hall Effect and Diamagnetism of Anisotropic Dirac Electrons in Solids"
- [5] S. C. Furuya, H. Matsuura, and M. Ogata: submitted to *Phys. Rev. Lett.* ArXiv:1503.02499. "Negative Coulomb Drag in Coupled Quantum Wires"
- [6] Y. Fujimoto, K. Miyake, and H. Matsuura: *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 043702-1-5 (2015). "Deformation of the Fermi Surface and Anomalous Mass Renormalization by Critical Spin Fluctuations through Asymmetric Spin-Orbit Interaction"

- [7] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: in preparation. “Localized State of Massless Dirac Fermions in Quasi-Two-Dimensional Organic Conductor α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ Induced by Singlet Defect”
- [8] I. Proskurin, M. Ogata, and Y. Suzumura: to appear in Phys. Rev. B. “Longitudinal conductivity of massless fermions with tilted Dirac cone in magnetic field”
- [9] T. Mizoguchi and N. Arakawa: submitted to Phys. Rev. B. “Controlling spin Hall effect by using a band anticrossing and nonmagnetic impurity scattering”
- [10] T. Mizoguchi and M. Ogata: submitted to J. Phys. Soc. Jpn. “Meissner effect of Dirac electron in superconducting state”
- [11] N. Okuma and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 034710-1-4 (2015). “Long-Range Coulomb Interaction Effects on the Surface Dirac Electron System of a Three-Dimensional Topological Insulator”
(会議抄録)
- [12] H. Yokoyama, S. Tamura, and M. Ogata: JPS Conf. Proc. **3**, 012029-1-6 (2014). “Effect of Diagonal Hopping on Staggered Flux State in Square-Lattice Hubbard Model”
- [13] H. Yokoyama, S. Tamura, T. Watanabe, K. Kobayashi, and M. Ogata: Phys. Proc. **58**, 14-17 (2014). “Stability of staggered flux state for anisotropic triangular lattice”
- [14] T. Watanabe, H. Yokoyama, and M. Ogata: JPS Conf. Proc. **3**, 013004-1-6 (2014). “Superconductivity and Non-Fermi-Liquid Metal in Carrier-Doped Triangular Hubbard Model”
- [15] H. Yokoyama, R. Sato, S. Tamura, and M. Ogata: to be published in Phys. Proc. (2015). “Effects of diagonal hopping on stability of antiferromagnetic state”
- [16] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: to appear in J. Phys. Conf. Series. “Defect-induced Kondo effect in graphene: Role of localized state of π electrons”
- [17] I. Proskurin, M. Ogata, and Y. Suzumura: to appear in J. Phys. Conf. Series. “Longitudinal conductivity of a three-dimensional Dirac electron gas in magnetic field”
- [18] Y. Suzumura, I. Proskurin, and M. Ogata: to appear in J. Phys. Conf. Series. “Reflectance of Dirac electrons in organic conductor”
- [19] T. Mizoguchi and M. Ogata: to appear in J. Phys. Conf. Series. “Meissner effect of Dirac electron in superconducting state”
- [20] N. Okuma and M. Ogata: to appear in J. Phys. Conf. Series. “Study of spin transport in Dirac systems”
- [21] S. Suetsugu, H. Matsuura, and M. Ogata: to appear in J. Phys. Conf. Series. “Anomalous Hall effect in the Dirac electron system with a split term”
- [22] N. Yoshioka, H. Matsuura, and M. Ogata: to appear in J. Phys. Conf. Series. “Distribution of Chern number by Landau level broadening in Hofstadter butterfly”
(国内雑誌)
- [23] 日本物理学会誌 **69**, 130 (2014). “秩序なし+ギャップなしのドロドロ三つ巴液体状態を求めて”
(学位論文)
- [24] 大熊信之: “Definition of Spin Current in Metals with Strong Spin-Orbit Coupling” (強いスピン軌道相互作用を持つ金属におけるスピンの定義) (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)
<学術講演>
(国際会議)
一般講演
- [25] M. Ogata, Y. Fuseya, and H. Fukuyama: 13th Bilateral German-Japanese Symposium “Interplay of Spin- and Orbital Degrees of Freedom in Strongly Correlated Electron Systems” (Ringberg, Germany, July 13–16, 2014). “Spin Hall effect and large diamagnetism in Dirac electrons in solids”
- [26] M. Ogata, Y. Fuseya, and H. Fukuyama: Cooperation in Physics Workshop: Todai-LMU (Ludwig Maximilian Univ. October 27–29, 2014). “Spin Hall effect and large diamagnetism in Dirac electrons in Bismuth”
- [27] Y. Fuseya, M. Ogata, and H. Fukuyama: International conference on strongly correlated electron systems (SCES 2014) (Grenoble, France, July 7–11 2014). “Exact relationship between spin-Hall effect and diamagnetism for Dirac electrons in various materials”
- [28] T. Mizoguchi and N. Arakawa: SCES2014 “Unique spin Hall effect due to the combination of orbital degrees of freedom and inversion-symmetry breaking”
- [29] I. Proskurin and M. Ogata: The 6th International Conference on Recent Progress in Graphene Research (Taipei, Sept. 21–25, 2014). “Thermoelectric Transport of Massless Dirac Electrons in a Magnetic Field: Application to α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ Organic Conductor”
- [30] T. Mizoguchi and M. Ogata: Novel Quantum States in Condensed Matter (Kyoto, Nov. 4–Dec. 4, 2014). “Meissner effect in superconducting Dirac electrons”
- [31] H. Yokoyama, S. Tamura, and M. Ogata: 27th International Symposium on Superconductivity (Funabori, Tokyo, Nov. 25–27, 2014). “Relation of Quasi-Fermi Surface of d-wave Superconductivity to Staggered Flux State”

- [32] H. Matsuura: International Research Symposium on Chiral Magnetism (Hiroshima, Dec. 6–8, 2014). “Theory of Chiral Magnet with Large Pitch Angle”
- [33] T. Hinokihara, A. Tsuruta, and K. Miyake: International Symposium on Chiral Magnetism. “Relation between heavy quasi particle and CEF multiplet in f^n -configuration system”
- [34] T. Mizoguchi and N. Arakawa: International Symposium on Chiral Magnetism. “Unique spin Hall effect due to the combination of orbital degrees of freedom and inversion-symmetry breaking”
- [35] H. Nakada and M. Ogata: International Symposium on Chiral Magnetism. “Pinning effect in three domain walls in ferromagnet, antiferromagnet and chiral magnet”
- [36] Y. Fuseya: International Workshop on Dirac Electrons in Solids (Tokyo, Jan. 14–15, 2015). “Anomalous Spin Magnetic-Moment of Holes in Bismuth”
- [37] I. Proskurin, M. Ogata, and Y. Suzumura: Dirac Electrons in Solids. “Magnetoelectricity of Dirac Materials in Quantizing Magnetic Fields”
- [38] Y. Suzumura, I. Proskurin, and M. Ogata: Dirac Electrons in Solids. “Reflectance of Dirac Electrons in Organic Conductor”
- [39] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata : Dirac Electrons in Solids. “Effect of Defect on Dirac Electron Systems”
- [40] T. Mizoguchi and M. Ogata: Dirac Electrons in Solids. “Meissner effect in superconducting Dirac electrons”
- [41] N. Okuma and M. Ogata: Dirac Electrons in Solids. “ g -Factor Renormalization on Surface State of Topological Insulator”
- [42] N. Okuma and M. Ogata: Dirac Electrons in Solids. “Study of Spin Transport in Dirac Systems”
- [43] T. Shibuya and M. Ogata: Dirac Electrons in Solids. “Spin Transport Dynamics of Topological Surface States in Magnetic Field”
- [44] S. Suetsugu, H. Matsuura, and M. Ogata: Dirac Electrons in Solids. “Anomalous Hall Effect in the Dirac Electron Systems with a Split Term”
- [45] N. Yoshioka, H. Matsuura, and M. Ogata: Dirac Electrons in Solids. “Dirac cones in Hofstadter’s butterfly”
- [46] T. Mizoguchi and M. Ogata: International Workshop on Topological Electronics (Topotronics 2015) (Okinawa, March 9–11, 2015). “Meissner effect in superconducting Dirac electrons”
- [47] N. Okuma and M. Ogata: Topotronics 2015. “Study of Spin Transport in Dirac Semimetals”
- [48] T. Shibuya and M. Ogata: Topotronics 2015. “Non-equilibrium Transport Dynamics of Topological Surface States in a Zeeman Magnetic field”
- [49] T. Hinokihara, A. Tsuruta, and K. Miyake: Fudan-Tokyo-Yonsei Joint Workshop 2015 “Relation between Crystal Electric Field Effect and Heavy Fermi Liquid in f^2 -configuration System”
- 招待講演
- [50] M. Ogata and H. Yokoyama: ISSP international workshop and symposium “New Horizon of Strongly Correlated Physics” (NHSCP2014) (ISSP, June 16–July 4, 2014). “Crossover between BCS superconductor and doped Mott insulator, and possible normal states in the two-dimensional Hubbard model”
- [51] M. Ogata, H. Yokoyama, and S. Tamura: International conference on strongly correlated electron systems (SCES 2014) (Grenoble, France, July 7–11 2014). “Crossover between BCS superconductor and doped Mott insulator in the two-dimensional Hubbard model”
- [52] M. Ogata, H. Yokoyama, and S. Tamura: International Workshop “Research Frontier of Transition-metal Compounds Opened by Advanced Spectroscopies” (Sendai, Sep.30–Oct.2, 2014). “Superconductivity and flux state in the Hubbard model”
- [53] M. Ogata and H. Yokoyama: YITP Long-term Workshop “Novel Quantum States in Condensed Matter” (NQS 2014) (Kyoto, November 4–December 4, 2014). “High- T_c superconductivity from the Hubbard model”
- [54] Y. Fuseya: NQS 2014. “Anomalously large spin-magnetic moment and its transport properties of Dirac electrons in bismuth”
- [55] H. Matsuura: 1st RIKEN-Sophia Joint Symposium: Recent Progresses on the Muon-Site Estimation (Tokyo, Dec 15–16, 2014). “Effect of Defect on Dirac Electron Systems”
- [56] Y. Fuseya: American Physical Society March meeting 2015, (Mar. 5, 2015). “Spin Hall effect and Landau spectrum of Dirac electrons in bismuth”
- [57] Y. Fuseya: ISSP workshop “Topological Aspects in Correlated Electron Systems” (ISSP, March 26, 2015). “Spin Hall Effect and Large Anisotropic g -Factor of Bismuth”
- (国内会議)
- 一般講演
- [58] 小形正男、横山寿敏：日本物理学会、中部大学 2014, 9.7–9.10 (秋季大会) “電子ドープ系銅酸化物高温超伝導体の有効ハバードモデル”
- [59] 小形正男、I. Proskurin：日本物理学会、中部大学 “ α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ 系における磁場誘起電荷秩序状態”
- [60] Y. Suzumura, I. Proskurin, and M. Ogata：日本物理学会、中部大学 “In-plane conducting properties of α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ organic conductor”

- [61] 横山 寿敏、田村駿、小形正男：日本物理学会、中部大学 “d 波超伝導のバンドくりこみ効果と交替フラックス”
- [62] 五十嵐章大、小形正男：日本物理学会、中部大学 “二次元三角格子系における揺らぎとフラストレーションの研究”
- [63] 森井麗望、小形正男：日本物理学会、中部大学 “低周波数の円偏光下にあるグラフェンのホール伝導率と多軌道効果”
- [64] 大熊信之、小形正男：日本物理学会、中部大学 “トポロジカル絶縁体表面 Dirac 系における長距離 Coulomb 相関効果の研究”
- [65] I. Proskurin, M. Ogata, and Y. Suzumura：日本物理学会、早稲田大学 2015, 3.21-3.24 (年次大会) “Magnetoresistivity of three-dimensional massive Dirac Materials”
- [66] 檜原太一、鶴田篤司、三宅和正：日本物理学会、早稲田大学 “ f^2 電子配置重い準粒子状態と結晶場基底の関係性”
- [67] 溝口知成、小形正男：日本物理学会、早稲田大学 “ト有機導体のディラック電子における超伝導の平均場近似による解析”
- [68] 大熊信之、小形正男：日本物理学会、早稲田大学 “ディラック電子系におけるスピン流の量子輸送方程式による定式化”
- [69] 中田百科：日本物理学会、早稲田大学 “反強磁性体における磁壁とダイナミクス”
- [70] 澁谷泰良、小形正男：日本物理学会、早稲田大学 “トポロジカル絶縁体表面の磁場下におけるスピン輸送ダイナミクス”
- [71] 松浦弘泰、小形正男：東北大学金属材料研究所共同利用・共同研究ワークショップ「多自由度が協奏する分子システムの科学」(2014, 7.18-20) “プロトンダイナミクスの電子系への影響”
- [72] 松浦弘泰：東北大学原子分子材料科学高等研究機構、超低速ミュオン領域会議(2014, 9.23-25) “超低速ミュオンをプローブとしたカイラル磁性の研究”
- [73] 松浦弘泰：第 8 回 物性科学領域横断研究会(大阪大学、2014, 11.21-22) “ $(4d)^3$, $(5d)^3$ 遷移金属酸化物におけるスピン軌道相互作用の効果”
- [74] 溝口知成、荒川直也：第 8 回 物性科学領域横断研究会 “空間反転対称性の破れた多軌道系のスピンホール効果への非磁性不純物による自己エネルギー補正とバーテックス補正の影響”
- [75] 松浦弘泰：新学術領域研究「超低速ミュオン顕微鏡」計画研究 A03 班第 3 回班会議「表面-バルク境界領域のヘテロ電子相関」成果と展望(2014, 12.25-26) “カイラル磁性体の電子状態の理論”
- [76] 松浦弘泰：第 2 回東北大学リーディング大学院研究会プログラム「金属錯体の固体物性最前線-金属錯体と固体物性物理と生物物性の連携新領域を目指して-」(2015, 2.20-22) “ $(4d)^3$, $(5d)^3$ 遷移金属化合物におけるスピン軌道相互作用の効果”
- [77] I. Proskurin, 小形正男、鈴木順三：金研共同利用・共同研究ワークショップ「多自由度が協奏する分子システムの科学」(2014, 7.18-7.20) (東北大学金属材料研究所) “有機伝導体におけるディラック電子の輸送現象、電荷秩序”
- [78] 小形正男：第 19 回 久保記念シンポジウム「超伝導と線形応答」(学士会館、2014, 10.4) “超伝導と久保公式をめぐって”
- [79] 小形正男：CMRC 研究会「超伝導研究の新展開(鉄系・銅酸化物系+非平衡系)」(KEK つくば 4 号館、2014.11.18) “ハバードモデルにおける超伝導：電子ドープ系とホールドープ系”
- [80] 小形正男：日本物理学会、早稲田大学 2015, 3.21-3.24 (年次大会) 領域 8 シンポジウム「銅酸化物におけるノン・ドープ超伝導の可能性に迫る」 “電子ドープ系の有効モデルとしての弱相関ハバードモデル超伝導”(セミナー)
- [81] 松浦弘泰：大阪大学、北岡研究室セミナー(2014 11.20) “原子価スキッピング現象における電荷近藤効果の微視的理論”
- [82] 松浦弘泰：ロシア連邦 エカテリンブルグ ウラル連邦大、ウラル連邦大理論物理学教室セミナー(2014 8.29) “Derivation of DM Interaction in Several Cases”
- [83] 松浦弘泰：東京理科大、第二回東京理科大応用物理学セミナー(2014 6.2) “原子価スキッピング現象における電荷近藤効果の微視的理論”

3.4 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。当研究室では主にそのような計算物理学的手法を開発しながら、物性物理学の基礎研究を行っている。電子相関の強い系やナノ構造体を取り扱うための新しい第一原理電子状態計算手法の開発、緩和の遅い熱伝導現象を第一原理に基づいてシミュレーションするためのモデリング手法の開発、超高圧下など極限条件下の結晶構造探索と物性予測、固体表面・界面の構造・電子状態・化学反応機構、水素を含む固体の量子効果、強誘電体の電子物性などが主要な研究テーマである。

3.4.1 シミュレーション手法の開発

非調和フォノンと熱伝導の第一原理計算

フォノン振動数は格子比熱や熱膨張率、格子熱伝導率に代表されるフォノン物性から超伝導の発現に重要な電子格子結合定数に至るまで様々な物性に影響を及ぼす物理量であり、その重要性から第一原理に基づくフォノン計算が日常的に行われている。し

かし、密度汎関数摂動論や frozen-phonon 法などの既存の手法は調和近似を前提としているため、格子振動の非調和性が大きな強誘電体や高温域への適用には限界があることが知られていた。

この制限を乗り越えるため、本研究では格子振動の非調和性を露わに考慮したフォノン計算手法の開発を行った。本手法ではまず通常のフォノン計算に必要な 2 次の force constant (FC) に加えて 3 次と 4 次の FC をスーパーセル法で決定し、次に 4 次非調和項による振動数くりこみの効果を自己無撞着フォノン法を用いて計算する。この上でさらに 3 次非調和項からの寄与を摂動的に扱うことで、非調和フォノン振動数だけでなくフォノンの寿命も同時に見積もることが可能である。

今回開発した手法を温度 105 K 以上で安定化する立方晶 SrTiO₃ に適用した結果、実験と良い一致を示すフォノン分散を得ることに成功した。格子熱伝導率に関しても温度依存性まで含めて実験値と良く一致する結果を得た。

また上記の原子間相互作用モデルの精度を高めるため、ボルン有効電荷を用いてイオン結晶の長距離クーロン相互作用の効果を取り入れるモデリング手法を開発した。この手法を用いることで、クーロン相互作用の長距離性に起因してイオン結晶のフォノン分散に見られる LO-TO splitting と呼ばれる現象を、正しく記述できることを示した。

なお開発したプログラムの主要部分は、ALAM-ODE (Anharmonic Lattice MODEL) の名称で web 上に公開した。

分割統治に基づく大規模系の全系電子状態計算手法の開発

第一原理計算の計算コストは、系の大きさの 3 乗に比例して増加するため、大規模系の研究においては計算の効率化が不可欠となる。分割統治法とは、大規模系を小さな部分系に分割し、個々の部分系における電子状態計算を独立に行う事で、計算コストを系の大きさの 1 乗に収める手法 (オーダー N 法) であり、特に高精度かつ汎用性の高い手法として LS3DF 法等が知られている。全系の加法的物理量は部分系の結果を統合する事で得られるが、これまで全系の波動関数を各部分系の波動関数から統合する事は難しく、そのため全系のスペクトルを分割統治法から直接得ることは不可能であった。

そこで、我々は LS3DF 法の部分系軌道を組み合わせて全系ハミルトニアンを再構成し、全系スペクトルの高速計算を可能にする手法の開発を行っている。今年度は、部分系軌道の境界部分を適切に除去する事で、スペクトルの精度を向上するプロセスを付加する等の改良を行った。また、本研究のスペクトル計算手法を LS3DF 法の自己無撞着ループに組み込むことで、全系軌道と部分系軌道を整合させ、LS3DF 法自体の精度をさらに向上させる手法を新たに提案した。今後はスペクトル計算法の応用研究を行うと共に、上記新手法の完成度を高めていく事を目指している。

トランスコリレイティッド法に基づく第一原理電子状態計算手法の開発

第一原理計算の直面する重要な課題のひとつに精度の問題がある。現在、一般的に使われている密度汎関数理論 (DFT) における局所密度近似や一般化勾配近似は、幅広い物性を定量的に再現できることが知られている一方で、強相関係の記述がうまくいかない、分散力が記述できない、バンドギャップを大幅に過小評価してしまう、といった精度上の問題を複数有することが知られている。その一方で、それらをバランス良くかつ系統的に改善していく手段は必ずしも明らかではない。その観点から、DFT とは異なる理論的枠組みである、波動関数理論に基づく第一原理計算手法の開発が近年、注目を集めている。

我々が取り組んでいるトランスコリレイティッド (TC) 法もそうした波動関数理論の一種であり、電子座標の二変数関数によって記述されるジャストロウ因子によって多体ハミルトニアンを相似変換することによって、電子相関効果を取り込むことが出来る。本年度は、(1) TC 法と配置間相互作用法を組み合わせることで、励起子効果を取りこんだ光吸収スペクトルの計算が可能であること、(2) TC 法に二次のメラー・プレセット摂動論を組み合わせた場合の効果について、論文にまとめた。

トランスコリレイティッド法の波動関数を用いた拡散量子モンテカルロ法

強相関係を扱える第一原理電子状態計算手法として、トランスコリレイティッド (TC) 法と拡散量子モンテカルロ法 (DMC) を組み合わせた手法の開発を行っている。

DMC は多体波動関数を露わに扱った、高度に電子相関を取り込める電子状態計算手法であり、固体において最も信頼される手法の一つである。しかしながら電子系の計算では波動関数の節を密度汎関数法等で求めた試行波動関数のそれに固定する「節固定近似」を用いる必要があり、前もって用意した試行波動関数にその精度が依存してしまう。特に遷移金属酸化物では節の影響が大きいことが知られている。

そこで我々は DMC の試行波動関数として TC 法で最適化した波動関数を用いることで、より信頼のおける電子状態計算手法を模索した。TC 法ではジャストロー因子により電子相関を露に取り入れた上で一電子軌道の最適化を行うため、TC 法の波動関数は良い節を持つことが期待される。DMC で TC 法の波動関数を用いた結果、弱相関系においてイオン性の小さい物質では TC 波動関数はハートリー・フォック (HF) 波動関数よりも良い節を与えることが分かった。一方でイオン性が大きくなると、TC 波動関数は HF 波動関数よりも悪い節構造を与えることが分かった。この結果は TC 法の今後の発展の指針であるとともに、DMC と TC 法を組み合わせる際の障害でもあり、その理由の解明と解決が今後の課題である。

物質構造探索手法の開発

超高压下の物質や表面・界面のように、実験だけでは構造決定の困難な系の物性解明や、合成されていない新物質の理論提案に際しては、数値計算による原子構造探索が重要な役割を果たす。このような物質の(準)安定構造探索の問題は、系のポテンシャルエネルギー曲面内の極小点探索として定式化される。ポテンシャルエネルギー曲面は系の自由度と同じ次元数の多次元超曲面であるから、上に述べた問題に対して構造探索を行うためには、計算コストの問題から効率的な構造探索手法の開発が必要不可欠である。先行研究として、ポテンシャルエネルギー曲面の非調和性を行う超球面探索法を利用して効率的に構造探索のための良い指標となることが提案されており、我々はこの指標を用いて探索を行う新しい手法の開発を行っている。

2014年度には既存のコードに組み合わせる形でこの手法を用いた第一原理計算による構造探索プログラムの開発を開始し、実際に分子系及び常圧下の周期系についていくつかの探索を実行した。今後は高压下の周期系に対して適用が可能とするようにプログラムを改良し、そのような状況で実現する構造やそれに伴って発現する物性などについて議論を行うことを目指していく。

3.4.2 シミュレーション手法の応用

硫化水素高压相の高温超伝導

最近見つかった高压下硫化水素における高温超伝導について、第一原理計算に基づく解析を行った。2014年12月、硫化水素が超高压下で金属化し、これが $T_c=190\text{K}$ の超伝導を示すとの報告があった。超伝導転移温度(T_c)の最高記録は水銀系銅酸化物の発見(高压下において $T_c=160\text{K}$)以降長年頭打ちになっていたが、本報告は久しぶりの記録更新であり多くの人々の興味を引いている。しかし、高压相における原子配置を実験的に確認することは難しく、実際にどのような相が超伝導化しているのかは不明であった。そこでこれまで理論的に提案された主要な候補構造すべてについて、超伝導密度汎関数理論に基づく非経験的 T_c 計算を実施し観測結果の再現性を検討し、次の可能性を見出した：(i)従来最も有力視されていた $Im\bar{3}m$ 構造 H_3S 相だけではなく、 $R3m$ 構造 H_3S 相も実現している(ii) $Im\bar{3}m$ 相の純度を上げると、これまでの観測値よりさらに高い T_c が実現する。これらは T_c の記録が実験状況の改善によりさらに更新されることを示唆する。

YNi₂B₂Cにおける異方的超伝導ギャップの起源の探求

YNi₂B₂Cはフォノン媒介型超伝導体でありながら異方的超伝導ギャップを生じるという特徴を持つ。この異方的超伝導ギャップの起源を探ることにより、

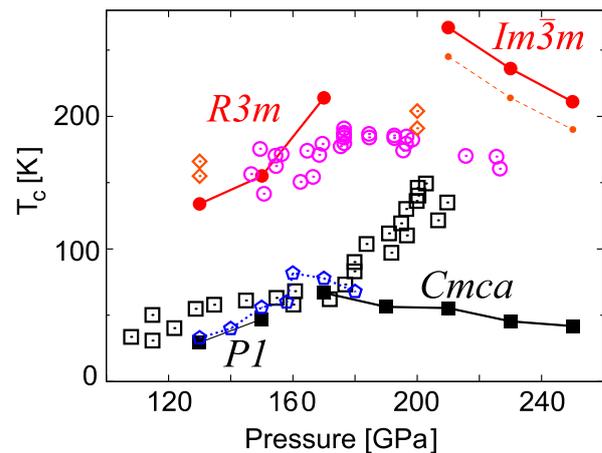


図 3.4.1: 硫化水素金属相に対する T_c 計算値。黒および赤のシンボルは各々 H_2S , H_3S を表す。塗られたシンボルは計算値、白抜き四角および丸は実験値、ダイヤモンドおよび五角形はモデル計算による過去の見積もりを表す。

特にフォノン型の超伝導体の発現機構に対してさらなる知見を得ることを目的として、超伝導密度汎関数理論(SCDFT)に基づく第一原理計算を行った。

我々は昨年度開発した高精度・低計算コストのフォノン計算法を用いてこの物質のフォノン分散および電子フォノン相互作用を求め、また断熱的局所密度近似を用いて動的遮蔽クーロン相互作用を得た。そして両者の効果を含んだSCDFTのギャップ方程式を構成し、それを解くことにより超伝導ギャップ、転移温度を計算した。計算で得られた超伝導転移温度、同位体効果係数は実験値と定量的に一致した。また、我々の計算した準粒子状態密度はトンネル透過率実験で観測されるなまされたピーク構造と関連付けられた。またさらなる解析により、このなまされたピーク構造はフェルミ面上でNi 3d軌道成分の強い領域では超伝導ギャップが回りよりも著しく小さくなるためであることが分かった。この領域では電子-フォノン結合も特異的に弱まっており、これはNi 3d軌道自身による強い遮蔽が働いているためであると考えられる。

ネオジム磁石の界面構造に関する第一原理計算

現在最強の磁石として知られるネオジム磁石は、アニーリング処理によって保磁力が向上することが知られている。この起源を解明するために高精度な構造解析が進められ、アニーリングの結果、主相であるNd₂Fe₁₄Bのc面に隣接した1-3 nm程度の厚さを持つ二粒子相(副相)はdhcp構造を有する結晶相となることが明らかとなった。また、この結晶相はほとんどFeイオンとNdイオンで構成されることも分かっていた。そこで理論的な立場から結晶相が保磁力へ与える影響を理解すべく、まずNd₂Fe₁₄B/dhcp-Nd界面の第一原理電子状態計算を行った。計算する系は2700原子程度を含む大規模系であるため、京コンピュータの下でオーダN計算を実行した。計算の

結果得られた構造を見ると (図 3.4.2), 界面近傍で $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, dhcp-Nd の両相に歪みが生じていることが分かる. 現在この歪みが電子状態へ与える影響について解析を進めている. 本研究では dhcp-Nd を副相として選んだが, 今後は dhcp 構造を有する Nd-Fe 合金の影響についても解析を予定している.

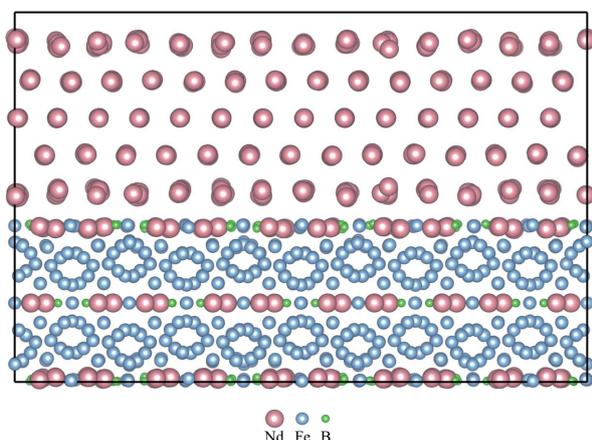


図 3.4.2: 第一原理計算の下で構造最適化された $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\text{dhcp-Nd}$ 界面モデル.

イプシロン型酸化鉄の磁性に関する第一原理解析

近年単相として合成することが可能となったイプシロン型酸化鉄は 2T を超える全金属酸化物の中で最も大きな保磁力を示す. しかし, その保磁力の起源はほとんど解明されていないのが現状である. そこで本研究では, 密度汎関数理論を用いてこの問題に取り組んだ. 計算の結果, 無欠陥のイプシロン型酸化鉄の結晶磁気異方性エネルギー (MAE) は 70 kJ/m^3 程度と小さな値が得られた. また, 有限の磁化は得られなかった. この点を克服するため, 酸素空孔の影響を調べた. 酸素空孔は特定の酸素サイトに入りやすく, さらにこの構造は有限の磁化の発現および磁気異方性エネルギー (MAE) の向上を引き起こすことも分かった. アルファ型酸化鉄などでは酸素空孔欠陥による有限磁化の発現が生じないことを考えると, この磁化発現は興味深い. 1つの非等価な Fe サイトしか持たないアルファ型酸化鉄に比して, イプシロン型酸化鉄が 4つの非等価な Fe サイトを持つことがこの磁化発現につながっていることも分かった. MAE の向上についてより詳細に理解すべく, スピン軌道相互作用に関する摂動計算を行い, 酸素空孔に近い特定の Fe イオンが上記の磁気特性向上を担っていることも明らかにした.

第一原理計算による Fe/Cu 薄膜の電子状態解析

fcc-Cu の金属基板上に Fe を堆積させると, 約 900 度以上の温度領域で安定であるはずの fcc-Fe が, 室

温以下においてもエピタキシャルに成長することが知られている. この系における Fe の構造および磁気状態は理論と実験の双方において解釈が様々であり, 未だ議論の余地がある. 本研究では第一原理計算の立場から, Fe が 1-7 層である状態の磁気構造の解明を試みた. その結果, Fe が 1-3 層の場合は強磁性, 4-7 層では反強磁性的な状態が安定であることが理解された. 実験で観測されている反強磁性状態に関しては, 最表面 2 層が強磁性的に結合しているという報告があり, 本研究においても実験を支持する結果が得られた. また, 構造最適化を考慮した計算から fcc 構造ではなくフント則により fcc 構造を c 軸に伸ばした構造が最安定であることが分かり, 実験と定性的に矛盾しない結果が得られた.

焼結磁石材料における異相界面の構造と磁性

現時点で最強とされている NdFeB 焼結磁石は, その保磁力が理論的に予想される値に比べ 20% 程度に留まっている. 近年の詳細な実験から, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 主相を取り巻く多種の副相が観測されており, 保磁力向上のために副相と主相近傍の界面構造と磁気状態が鍵を握っていると認識されている. 特に Cu が界面近傍に存在する場合は保磁力が向上するとされており, 本研究では主相間に Cu を挟み込んだ単純なモデル構造の第一原理計算を進め, 界面近傍の主相の磁気状態を解析した. この系では, 界面近傍の Fe の電子状態は大きく変調を受け磁気モーメントが増強されるが, 界面から 2Å 程度離れると電子状態はバルクと同程度に回復することを明らかにした. Nd は良く局在した 4f 電子を含むため磁気異方性に大きな役割を担っているが, 周りの電子から受けるポテンシャルによりその電子状態は変調を受ける. 界面近傍の Nd はこの Fe の電子状態の変調を受けることにより, 異方性が変化すると示唆される. 今後は多種の副相に対する界面構造を明らかにした上で, 磁気異方性解析などを含めた界面の計算を進めていく.

新奇ペロブスカイト型酸水素化物の理論予測

ペロブスカイト型酸化物は圧電体や強誘電体として広く研究されている. その化学式は ABO_3 で表されカチオン $A \cdot B$ の一部を他のカチオンで置換することで圧電性や強誘電性の制御が行われるが, $A \cdot B$ の組み合わせは電荷が中性である必要から制限される. 一方で酸素アニオンを置換する研究もなされ, 近年ではこれまで困難であったヒドリド (H^-) での置換 (酸素酸化物の合成) も可能になっている. 酸素アニオンとヒドリドでは価数が異なるため, これまでに無い $A \cdot B$ の組み合わせも実現する可能性がある.

本研究では第一原理計算によって新奇ペロブスカイト型酸水素化物の探索を行い, KTiO_2H が価電子帯上端付近に 2次元面内の電子状態を持つことを発見した 3.4.2. この物質はいくつかの合成反応で生成エネルギーが負になり, 合成可能であると考えられる. この仮想物質の自発分極は BaTiO_3 よりも大き

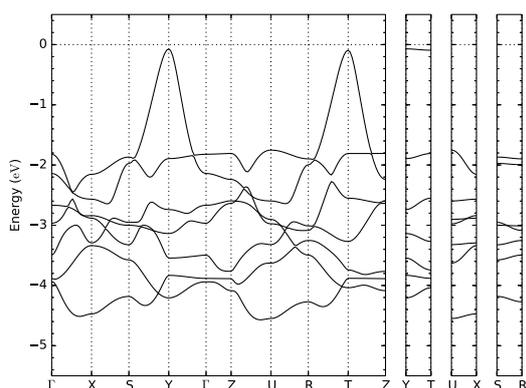


図 3.4.3: KTiO_2H のバンド構造. エネルギーは valence band maximum を基準としている. Y 点・T 点での分岐は, k_z 方向には小さいが $k_x \cdot k_y$ 方向には大きい.

く, 分極反転の際のエネルギー障壁が大きいためメモリへの応用は困難であるが, 2次元面内の電子状態を利用することで高い熱電変換性能等の有用な性質が実現される可能性がある.

遷移金属ダイカルコゲナイドのバレー励起子

明石は異動前から継続していた遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) に関する実験家との共同研究を筆頭著者としてまとめた. 遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) 単層半導体は近年, 異なるバレー状態の選択的励起が可能であることが示され, 以来バレー自由度による情報伝達 (バレートロンクス) の可能性を見据えた研究が盛んに行われている. 一方その後の進展により, 単層のみならず TMDC 数層から成る試料を作り分けることが可能になった. 従来よく調べられていたのは 2H という積層構造であるが, TMDC が 3R 積層構造を成す場合, 対称性のもたらず干渉効果によりバレー電子の層間運動が特異的に抑制されることを理論的に示した. またこの効果により, バルク 3R-TMDC 中で実現するバレー励起子が単層中に閉じ込められることを実験的に確認した. これは TMDC におけるバレーキャリアの運動が積層の作り分けによっても制御可能であることを示しており, 本結果はデバイスデザインに広く応用可能であると考えられる.

<報文>

(原著論文)

- [1] M. Ochi and S. Tsuneyuki, Optical Absorption Spectra Calculated from a First-Principles Wave Function Theory for Solids: Transcorrelated Method Combined with Configuration Interaction Singles, *J. Chem. Theory Comput.* **10**, 4098 (2014).
- [2] Z. Torbatian, T. Ozaki, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda, “Strain effects on the magnetic anisotropy

of $\text{Y}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ examined by first-principles calculations”, *Appl. Phys. Lett.* **104**, 242403 (2014).

- [3] Daisuke Hirai, Takahiro Yamamoto, and Satoshi Watanabe, Anomalous satellite inductive peaks in alternating current response of defective carbon nanotubes, *J. Appl. Phys.*, **115**, 174312 (2014).
- [4] Daisuke Hirai, Takahiro Yamamoto, and Satoshi Watanabe, Alternating current response of carbon nanotubes with randomly distributed impurities, *Appl. Phys. Lett.* **105**, 173106 (2014).
- [5] Y. Tatetsu, H. Watanabe, E. Sakai, and T. Maehira, Fermi surfaces of Eu compounds, *JPS. Conf. Proc.* **3**, 011078 (2014).
- [6] T. Tadano, Y. Gohda and S. Tsuneyuki, Impact of Rattlers on Thermal Conductivity of a Thermoelectric Clathrate: A First-Principles Study, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 095501 (2015).
- [7] M. Ochi and S. Tsuneyuki, Second-order Møller-Plesset perturbation theory for the transcorrelated Hamiltonian applied to solid-state calculations, *Chem. Phys. Lett.* **621**, 177 (2015) (selected as Editor’s Choice).
- [8] A. Nakamura, T. Takeuchi, Y. Tatetsu, T. Maehira, H. Harima, M. Hedo, T. Nakama and Y. Ōnuki, Fermi Surface Properties of Eu-Divalent and Eu-Trivalent Electronic States with the AuCu_3 -type Cubic Structure, *J. Phys.: Conf. Ser.* **592**, 012048 (2015).
- [9] R. Akashi, M. Ochi, S. Bordacs, R. Suzuki, Y. Tokura, Y. Iwasa, and R. Arita Two dimensional valley electrons and excitons in the noncentrosymmetric 3R MoS_2 , arXiv:1502.07480. (投稿中)
- [10] R. Akashi, M. Kawamura, S. Tsuneyuki, Y. Nomura, and R. Arita, Fully non-empirical study on superconductivity in compressed sulfur hydrides, arXiv:1502.00936. (投稿中)

<学位論文>

- [11] 岩崎誉志紀, First-principles theoretical study of defect induced phenomena in perovskite-type dielectric oxides (ペロブスカイト型誘電体酸化物中における欠陥誘起現象に関する第一原理からの理論的研究) (東京大学, 2014年7月, 博士(理学) (論文博士))
- [12] 河村光晶, Anisotropic superconducting gaps in $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$: A First-principles investigation ($\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ における異方的超伝導ギャップの第一原理的研究) (東京大学, 2015年3月 博士(理学))
- [13] 見澤英樹, First-principles study of interface effects on coercivity in Nd-Fe-B sintered magnets (Nd-Fe-B 焼結磁石における保磁力への界面効果に関する第一原理的研究) (東京大学, 2015年3月, 博士(理学))
- [14] 西本健郎, Development of a first-principles anharmonic lattice model with long-range interaction and its application to ferroelectrics (東京大学, 2015年3月, 修士)

- [15] 加藤洋生, Theoretical Prediction of Eigen State Symmetry and Inner Structure of Polyexcitons in Diamond (東京大学, 2015年3月, 修士)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [16] S. Tsuneyuki, Computer Experiments for Materials Science, International HPC Summer School on HPC Challenges in Computational Sciences (Budapest, June 1-6, 2014).
- [17] Y. Gohda, "First-principles theory on magnetism at interfaces", Collaborative Conference on Materials Research 2014 (CCMR2014), (Incheon, Korea, Jun. 24, 2014).
- [18] S. Tsuneyuki, Atomistic Modeling of Materials Based on First-Principles Calculation, The 10th NOBUGS conference (NOBUGS2014) (New Opportunities for Better User Group Software) (KEK, Sept. 24-26, 2014) (Plenary).
- [19] S. Tsuneyuki, Toward Accurate Calculation of Electronic and Structural Properties of Materials from First Principles, The 9th General meeting of ACCMS-VO (OIST, Okinawa, 12.20-22, 2014).
- 一般講演
- [20] Daisuke Hirai, Yoshihiro Gohda, and Shinji Tsuneyuki: First-Principles Study of Magnetic Properties of ε -Fe₂O₃, The European Conference: PHYSICS OF MAGNETISM 2014, Poznan, Poland, Jun. 23, 2014.
- [21] Y. Tatetsu, Y. Gohda, and S. Tsuneyuki: First-principles calculations of Fe/Cu(001) magnetic thin films, Physics of Magnetism 2014 (PM'14), Poznań, Poland, June 23-27, 2014.
- [22] T. Tadano and S. Tsuneyuki: First-principles calculation of finite-temperature phonons in cubic perovskite SrTiO₃, Computational Science Workshop 2014 (CSW2014), Tsukuba, Japan, Aug. 20-22, 2014.
- [23] Y. Yamamoto, M. Ochi, R. Maezono and S. Tsuneyuki: "Fixed-node diffusion Monte Carlo calculation of solids using the transcorrelated trial wave functions", Computational Science Workshop 2014, Tsukuba, Japan, August 20, 2014.
- [24] Mitsuaki Kawamura and Shinji Tsuneyuki First-principles calculations of anisotropic superconducting gaps in YNi₂B₂C, Computational Science Workshop (CSW2014), Tsukuba, Japan, Aug. 21, 2014.
- [25] Y. Gohda, Z. Torbatian, T. Ozaki, and S. Tsuneyuki, "Strain effects on the magnetic anisotropy of Y₂Fe₁₄B", E-MRS 2014 Fall Meeting, Warszawa, Poland, Sept. 16, 2014.
- [26] Daisuke Hirai, Shinji Tsuneyuki, and Yoshihiro Gohda: Analysis of Local Magnetocrystalline anisotropy of Hard Magnetic Materials, 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials Conference, Honolulu, Hawaii, Nov. 3, 2014.
- [27] Y. Tatetsu, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda: Magnetic structure analysis of fcc Fe on Cu(001) by ab initio calculations, (ISSS-7), Shimane, Japan, Nov. 2-6, 2014.
- [28] Mitsuaki Kawamura and Shinji Tsuneyuki Anisotropic superconducting gaps in YNi₂B₂C: A first-principles investigation, The 17th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (Asian-17), Seoul, Korea, Nov. 4, 2014.
- [29] Y. Gohda, Z. Torbatian, T. Ozaki, and S. Tsuneyuki, "First-principles calculations of magnetic anisotropy due to itinerant electrons", 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials Conference (MMM2014), Honolulu, USA, Nov. 6, 2014.
- [30] T. Tadano and S. Tsuneyuki: First-principles calculation of high-temperature phonon: Applications to cubic SrTiO₃, ISC-QSD 2014, Tokyo, Japan, Dec. 1-3, 2014.
- [31] Y. Gohda, Z. Torbatian, T. Ozaki, and S. Tsuneyuki, "Magnetic anisotropy induced by itinerant electrons in Y₂Fe₁₄B", International Symposium on Computics: Quantum Simulation and Design (ISC-QSD), Tokyo, Japan, Dec.1-3, 2014.
- [32] R. Akashi and R. Arita: Density functional theory for plasmon-assisted superconductivity, International Symposium on Computics: Quantum Simulation and Design (ISC-QSD), Tokyo, Japan, Dec. 1-3, 2014. (poster, P-84)
- [33] R. Akashi, M. Ochi, S. Bordacs, R. Suzuki, Y. Tokura, Y. Iwasa, and R. Arita Two dimensional valley electrons and excitons in 3R MoS₂ multilayers International Symposium on Computics: Quantum Simulation and Design (ISC-QSD), Tokyo, Japan, Dec. 1-3, 2014. (poster, P-49)
- [34] R. Akashi, S. Tsuneyuki, and R. Arita Hopping selection rule of electrons in stacked multilayers and emergent flat band dispersion International Symposium on Computics: Quantum Simulation and Design (ISC-QSD), Tokyo, Japan, Dec. 1-3, 2014. (poster, P-50)
- [35] Mitsuaki Kawamura, Yoshihiro Gohda, and Shinji Tsuneyuki Improved tetrahedron method for the Brillouin-zone integration applicable to DFPT calculations, International Symposium on Computics: Quantum Simulation and Design (ISC-QSD 2014), Tokyo, Japan, Dec. 2, 2014.
- [36] Daisuke Hirai, Shinji Tsuneyuki, and Yoshihiro Gohda: Theoretical Analysis of Magnetic Proper-

- ties of ϵ -Fe₂O₃, International Symposium on Compu-
tics: Quantum Simulation and Design, Hongo,
Tokyo, Dec. 1, 2014.
- [37] Yuki Kawashiri, Daisuke Hirai, Kenji Sasaoka, A-
hiro Tawara, and Satoshi Watanabe: Ab-initio
calculation for AC transport properties of single
molecule bridging between metallic electrodes, In-
ternational Symposium on Compu-: Quantum
Simulation and Design, Hongo, Tokyo, Dec. 1,
2014.
- [38] Y. Tatetsu, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda: Theoret-
ical analysis of Fe/Cu(001) ultrathin films by den-
sity functional theory, (ISC-QSD), Tokyo, Japan,
Dec. 1-3, 2014.
- [39] M. Ochi, Y. Yamamoto, R. Arita, and S.
Tsuneyuki: Band structures of 3d transition metal
oxides calculated with the transcorrelated method,
International Workshop on New Frontier of Numer-
ical Methods for Many-Body Correlations -
Methodologies and Algorithms for Fermion Many-
Body Problems, Tokyo, Japan, Feb. 18, 2015.
- [40] N. Sato, S. Tsuneyuki: Prediction of novel
perovskite-type oxyhydride KTi(O₂H) with two-
dimensional electronic states, American Physical
Society March Meeting 2015, San Antonio, Texas,
USA, Mar. 2-6, 2015.
- [41] Y. Gohda, Z. Torbatian, T. Ozaki, and S.
Tsuneyuki, "Magnetic anisotropy modified by
strain effects in Y₂Fe₁₄B", APS March Meeting,
San Antonio, USA, Mar. 2, 2015.
- [42] R. Akashi, M. Ochi, S. Bordacs, R. Suzuki, Y.
Tokura, Y. Iwasa, and R. Arita Two dimensional
valley electrons and excitons in the noncentrosym-
metric 3R MoS₂, APS March Meeting 2015, Texas,
USA, Mar. 2-6, 2015.
- [43] Daisuke Hirai, Shinji Tsuneyuki, and Yoshihiro
Gohda: Theoretical study of local magnetocrys-
talline anisotropy of ϵ -Fe₂O₃, APS March Meeting
2015, San Antonio, Texas, Mar. 2, 2015.
- [44] Y. Tatetsu, S. Tsuneyuki, and Y. Gohda: Theor-
etical analysis of magnetic structures in the fcc-
Fe/Cu(001) system, (APS), Texas, USA, Mar. 2-6,
2015.
- [45] T. Tadano and S. Tsuneyuki: First-principles
analysis of anharmonic nuclear motion and ther-
mal transport in thermoelectric materials, IC-
CMSE2015, Athens, Greece, Mar. 20-23, 2015.
- (国内会議)
- 招待講演
- [46] 常行真司「基礎科学の源流から物質機能とエネルギー
変換を操る奔流へ：京コンピュータとその未来」, 第
55 回真空に関する連合講演会 特別講演 (大阪府立大
学, 11.18-20, 2014).
- [47] 合田 義弘, 「磁石材料の微細構造界面特性解析と新化
合物探索」日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大
学 (東京都) 2015 年 3 月 22 日
- [48] 合田 義弘, 「磁石材料微細構造最適化に向けて -
SPRING-8 との連携」第 1 回「京」と大型実験施設と
の連携利用シンポジウム秋葉原 UDX (NEXT-1) (東
京都) 2014 年 9 月 2 日
- [49] 合田 義弘, 「磁性材料と OpenMX」第 3 回 CMSI「京」・
HPCI スパコン利用情報交換会理化学研究所 計算科
学研究機構 (兵庫県神戸市) 2014 年 7 月 1 日
- [50] 合田 義弘, 「第一原理計算による表面・界面磁性」2014
年度第 1 回界面ナノ科学研究会銀波荘 (愛知県蒲郡
市) 2014 年 4 月 11 日
- [51] 常行真司「第一原理計算による結晶構造探索の展望」,
実験と計算科学の協奏が拓く物質科学・物質開発のフ
ロントニア—超伝導とトポロジカル物質の新展開 (東
京大学, 3.14-15, 2015).
- 一般講演
- [52] 立津 慶幸, 平井大介, 見澤英樹, 常行真司, 合田義弘
: 「界面遍歴磁性体の第一原理計算」, 京大サイトビ
ジット, 京都大学 (京都府), 2014 年 5 月 26 日
- [53] 立津 慶幸, 平井大介, 見澤英樹, 尾崎泰助, 合田義弘 :
「焼結磁石材料における異相界面の構造と磁性」, 第
5 回磁性材料研究拠点成果報告会, 物質・材料研究機
構 (茨城県), 2014 年 7 月 4 日
- [54] 山本良幸, 常行真司: 「TC 法, 拡散量子モンテカル
ロ法への接続」, xTAPP Developers Meeting, 東京
大学, 2014 年 8 月 27 日.
- [55] 只野央将, 常行真司: 「SrTiO₃ におけるフォノン準
粒子とその温度依存性の第一原理計算」, 日本物理学
会 2014 年秋季大会, 中部大学 (春日井市), 2014 年
9 月 7 日.
- [56] 西本健郎, 只野央将, 合田義弘, 常行真司: 「長距離
クーロン相互作用を考慮した第一原理非調和格子モ
デルの構築とその応用」, 日本物理学会 2014 年秋季
大会, 中部大学 (春日井市), 2014 年 9 月 7 日.
- [57] 平井大介, 常行真司, 合田義弘: 「イプシロン型酸化鉄
の磁気特性の第一原理解析」, 日本物理学会 2014 年
秋季大会, 春日井 (愛知), 2014 年 9 月 7 日.
- [58] 見澤英樹, 合田義弘, 土浦宏紀, 常行真司: 「Nd₂Fe₁₄B
主相/Nd 酸化物相界面の構造と磁気異方性の解析」,
日本物理学会 2014 年秋季大会 春日井 (愛知), 2014 年 9
月 7 日.
- [59] 合田義弘, Z. Torbatian, 尾崎泰助, 常行真司: 「1 イオン
磁気異方性定数の第一原理計算手法開発と Y₂Fe₁₄B
におけるひずみ効果への応用」, 日本物理学会 2014 年
秋季大会, 中部大学春日井キャンパス, 愛知県, 2014
年 9 月 7 日.
- [60] 川尻雄基, 平井大介, 笹岡健二, 俵有央, 渡邊聡: 「金
電極間ベンゼンジチオール架橋の交流応答特性に関
する理論計算」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 春
日井 (愛知), 2014 年 9 月 7 日.

- [61] 大貫惇睦, 仲村愛, 赤嶺拓, 竹内徹也, 立津慶幸, 眞榮平孝裕, 本多史憲, 松林和幸, 上床美也, 辺土正人, 仲間隆男: 「強磁性体 EuPd_2 の純料単結晶育成とフェルミ面」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学 (愛知県), 2014 年 9 月 7 日.
- [62] 渡辺紘幸, 立津慶幸, 眞榮平孝裕: 「Eu ラーベス相構造の電子構造とフェルミ面」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学 (愛知県), 2014 年 9 月 8 日.
- [63] 吉澤香奈子, 岩崎誉志紀, 合田義弘, 常行真司: 「絶縁体中の水素が取りうる価数の理論的考察」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 春日井 (愛知), 2014 年 9 月 8 日.
- [64] 立津慶幸, 常行真司, 合田義弘: 「fct-Fe/Cu(001) の電子状態計算」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学 (愛知県), 2014 年 9 月 9 日.
- [65] 山田俊介, 合田義弘, 常行真司: 「分割統治法に基づく大規模系一電子エネルギースペクトルの第一原理計算手法」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学 (春日井市), 2014 年 9 月 10 日.
- [66] 山本良幸, 前園涼, 越智正之, 常行真司: 「トランスコリレイティッド波動関数の節を用いた拡散量子モンテカルロ法」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学 (愛知), 2014 年 9 月 10 日.
- [67] 遠藤辰哉, 只野央将, 常行真司: 「嵩上げポテンシャルエネルギー曲面を用いた非経験的物質構造探索手法の開発」日本物理学会 2014 年秋季大会, 春日井 (愛知), 2014 年 9 月 7-10 日
- [68] 加藤洋生, 常行真司: 「AMD+TC 法によるポリエキシトンの基底状態の数値計算」日本物理学会 2014 年秋季大会, 春日井 (愛知), 2014 年 9 月 10 日.
- [69] 平井大介, 常行真司, 合田義弘: 「巨大保磁力をもつイプシロン型酸化鉄の理論解析」, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌 (北海道), 2014 年 9 月 17 日.
- [70] 川尻雄基, 平井大介, 笹岡健二, 俵有央, 渡邊聡: 「単一分子架橋系の交流応答特性の NEGF-DFT 計算」, 第 75 回応用物理学会 秋季学術講演会, 札幌 (北海道), 2014 年 9 月 17 日.
- [71] 立津慶幸, 常行真司, 合田義弘: 「第一原理計算による Fe/Cu 薄膜の電子状態解析」, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学 (北海道), 2014 年 9 月 18 日.
- [72] 只野央将, 常行真司: 「非調和効果を考慮した立方晶 SrTiO_3 のフォノン分散計算」, 第 8 回物性科学領域横断研究会, 大阪大学 (豊中市), 2014 年 11 月 21-22 日.
- [73] 加藤洋生, 常行真司: 「ダイヤモンド中の励起子分子の内部構造と対称性の理論的予測」第 8 回物性科学領域横断研究会, 豊中 (大阪), 2014 年 11 月 21 日.
- [74] 遠藤辰哉, 明石遼介, 常行真司: 「嵩上げポテンシャルエネルギー曲面による物質構造探索手法の開発」第 8 回物性科学領域横断研究会, 豊中 (大阪), 2014 年 11 月 21-22 日.
- [75] 常行真司 「 TiO_2 電子状態の理論」, 酸化物と水素に関する研究会 (東京大学, 2014 年 12 月 24 日).
- [76] 見澤英樹, 合田義弘, 土浦宏紀, 常行真司: 「第一原理計算による Nd-Fe-B 焼結磁石主相/Nd 酸化物相界面の磁気異方性」, 日本金属学会 2015 年春期講演大会. 東京大学駒場 I, 2015 年 3 月 18-20 日.
- [77] 遠藤辰哉, 明石遼介, 常行真司: 「嵩上げポテンシャルエネルギー曲面を用いた物質構造探索手法の結晶系への適用」日本物理学会第 70 回年次大会, 新宿 (東京), 2015 年 3 月 21-24 日.
- [78] 山田俊介, 明石遼介, 合田義弘, 常行真司: 「大規模並列計算のための分割統治法に基づく一電子エネルギースペクトル計算手法」, 日本物理学会年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月 24 日.
- [79] 加藤洋生, 明石遼介, 常行真司: 「ダイヤモンドに於ける励起子・励起子分子の内部構造の理論的予測」日本物理学会 2015 春期大会, 早稲田 (東京), 2015 年 3 月 21 日.
- [80] 明石遼介, 常行真司, 有田亮太郎: 「多層構造における電子の軌道間ホッピング選択則と平坦バンド分散」, 日本物理学会 年次大会, 早稲田 (東京), 2015 年 3 月 21-24 日.

3.5 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などの手法を駆使し、量子スピン系やボーズハバード系など強相関多体系における新奇な状態の探索、相転移現象の解明を目指している。また、京コンピュータなど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>

3.5.1 強相関多体系における新奇な状態の探索と相転移・臨界現象

量子モンテカルロレベルスペクトロスコーピーによるスピンパイエルス系の量子相転移の解析

格子の自由度と結合した量子反強磁性体では、スピンパイエルス不安定性が生じ、自発的にスピンギャップの開いた相が現れる。格子振動、すなわちフォノンの量子性 (離散性) を考慮にいと、フォノン・

スピン結合が有限の強さにおいて、量子相転移が生じる。量子フォノン是有効的に次近接の反強磁性相互作用を生じ、そのブラストレーション効果により、このスピンパイエルズ転移は引き起こされると考えられる。我々は、量子モンテカルロ法によりエネルギーギャップを精密に測定する「高次モーメント法」を開発し、さらにレベルスペクトルスコピー法を組み合わせることで、その量子相転移の性質を明らかにした [8, 15, 16, 21, 31]。

局所 Z_N ベリー位相による量子相・量子相転移の解析

量子効果の強い低次元量子スピン系の基底状態は、古典系では対応するものがない「トポロジカル秩序変数」で特徴付けられる。我々は、量子モンテカルロ法により波動関数の重なり積分 (位相因子も含む) を計算する手法を開発し、トポロジカル秩序変数のひとつである局所 Z_2 ベリー位相の計算に応用した。さらに、 $SU(N)$ 対称性をもつ量子スピン系への一般化を行い、トポロジカルに異なる N 種類の量子相の存在を見出した [4, 32, 32]。

長距離相互作用を持つスピン系の臨界現象

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 2 次元正方格子イジング模型を、オーダー N クラスタ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、スケール補正項を打ち消すユニバーサルな手法を開発し、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 [14, 19, 24, 33]。

$SU(N)$ J - Q 模型の量子相転移

従来、連続相転移は対称性の自発的破れとして理解されてきた。しかしながら近年、異なる対称性が破れた相の間の連続量子相転移のメカニズム—脱閉じ込め臨界現象—が提案され、注目を集めている。その有力な候補と考えられている、二次元格子上の 2 体と 4 体の相互作用をもつ、 J - Q 模型の量子臨界現象を、並列化されたループアルゴリズム量子モンテカルロ法により精密に調べた。その結果、システムサイズの小さな系では、脱閉じ込め臨界現象を示唆する臨界指数が得られたが、サイズが大きくなるにつれて、指数が系統的にシフトすることを見出した。一方、有限温度相転移の臨界指数からは、絶対零度にもかかわらず一次転移へのクロスオーバーが全く見られないなど、 $SU(N)$ J - Q 模型で脱閉じ込め臨界現象のシナリオが成り立っていることを強く示唆する結果を得た [2, 12]。

3.5.2 強相関多体系に対する新たな計算手法の開発

テンソルネットワーク

テンソルネットワークは、量子多体系の波動関数を低ランクのテンソル積として表す手法である。従来の対角化法や DMRG で扱えなかったより高次元の量子スピン系、フェルミオン系の基底状態を定量的に調べることでできる手法として、近年注目が集まっている。我々は、PEPS (Projected Entangled Pair States) と角転送行列くりこみ群法を用いて $S = 1/2$ の J_1 - J_2 ハイゼンベルグモデルの解析を行った。特に、虚時間発展法による波動関数の収束の様子から物理的特性を引き出す方法を考案し、 J_1 - J_2 ハイゼンベルグモデルにおける、Néel 状態-スピンギャップ状態-collinear Néel 状態の間の基底状態相転移を議論した [7, 11, 29]。

詳細つりあいを満たさないマルコフ連鎖モンテカルロ

マルコフ連鎖モンテカルロ法においては、遷移確率を決定するのに通常「詳細つりあい条件」が用いられてきた。しかし、この条件は必要条件ではない。我々は、幾何学的に遷移確率を求める一般的な手法を開発し、詳細つりあいを満たさない遷移確率の構築法を確立した。さらに、この方法により棄却率を最小化する解が常に得られることを示し、実際に従来のメトロポリス法などと比べて、マルコフ連鎖の自己相関時間が劇的に短くなることを見出した [13, 37, 38]。

強い空間的異方性をもつ系に対するモンテカルロシミュレーション手法

強い空間的異方性をもつ系のシミュレーションでは、系のアスペクト比を適切な値に選ぶことが非常に重要である。我々は、量子モンテカルロ法と機械学習の手法を組み合わせることで、アスペクト比を自動的最適化する計算手法を開発した。二次元量子ハイゼンベルグ模型の量子相転移の解析に応用し、特殊な相互作用の空間的パターンをもつ系においては、系の実効的なアスペクト比に強いシステムサイズ依存性があらわれ、その結果、スケール補正が非常に大きくなることを明らかにした。さらに、量子臨界点における動的臨界指数 ν が 1 よりも大きな値を取る二次元ボーズハバード模型に対して本手法を適用し、この場合にも動的臨界指数が正しく見積もられることを示した。 [3, 20, 23, 26, 39]。

3.5.3 次世代並列シミュレーションのためのオープンソース・ソフトウェアの開発

並列厳密対角化パッケージの開発

計算物質科学においては、密行列や疎行列の固有値問題が様々な場面で利用される。超並列スーパーコンピュータ向けの並列固有値ソルバーも数多く開発されているが、そのインターフェースはまちまちで、コードのポータビリティにも問題が多い。我々は、並列厳密対角化パッケージ Rokko を開発し公開を行った。Rokko により大規模行列の対角化を统一的に利用することが可能となる。[9, 25, 27]。

<https://github.com/t-sakashita/rokko>

ワームアルゴリズム量子モンテカルロ法の並列化

ワームアルゴリズム量子モンテカルロ法は、対称性の低い量子スピン系、ボーズハバード模型などに有効なシミュレーション手法である。この方法では、世界線配位に「ワーム」と呼ばれる不連続点の組を挿入し、不連続点を確率的に移動させていくことにより更新を行う。我々は、ワームアルゴリズムを一般化し、分散メモリ並列コンピュータ上で領域分割並列化を行った。これにより超巨大な格子系を扱うことが可能となった [1]。

物質科学シミュレーションのポータルサイト

MateriApps の開発

日本国内においても、高性能な物質科学シミュレーションソフトウェアが数多く開発・公開されているが、その知名度は必ずしも高くない。また、ドキュメントの作成やユーザサポートにも問題が多く、普及の妨げとなっている。物質科学アプリケーションのさらなる公開・普及を目指し、物質科学シミュレーションのポータルサイト「MateriApps」の整備を行った [5, 10, 17, 18, 30, 34, 35, 36]。

<http://ma.cms-initiative.jp>

オープンソース・ソフトウェアの開発・公開

ALPS 量子格子模型のシミュレーションソフトウェア [6, 17, 34, 35]

<http://alps.comp-phys.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 クラスタアルゴリズムモンテカルロ法

<https://github.com/wistaria/cluster-mc>

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 [5, 10, 17, 18, 30, 34, 35, 36]

<http://cmsi.github.io/MateriAppsLive>

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] Akiko Masaki, Takafumi Suzuki, Kenji Harada, Syngge Todo, Naoki Kawashima, Parallelized Quantum Monte Carlo Algorithm with Nonlocal Worm Updates, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 140603 (2014).
- [2] Takafumi Susuki, Kenji Harada, Haruhiko Matsuo, Syngge Todo, Naoki Kawashima, Thermal Phase Transition of Generalized Heisenberg Models for $SU(N)$ Spins on Square and Honeycomb Lattices, *Phys. Rev. B* **91**, 094414 (2015).

(会議抄録)

- [3] Shinya Yasuda, Syngge Todo, Numerical Analysis of Quantum Phase Transitions with Dynamic Control of Anisotropy, *JPS Conf. Proc.* **1**, 012127 (2014).
- [4] Yuichi Motoyama, Syngge Todo, Path-Integral Monte Carlo for the Gauge-Fixed Berry Connection and the Local Z_2 Berry Phase, *JPS Conf. Proc.* **1**, 012130 (2014).
- [5] Yusuke Konishi, Ryo Igarashi, Shunsuke Kasamatsu, Takeo Kato, Naoki Kawashima, Tsutomu Kawatsu, Hikaru Kouta, Masashi Noda, Shoichi Sasaki, Yayoi Terada, Syngge Todo, Shigehiro Tsuchida, Kazuyoshi Yoshimi, Kanako Yoshizawa, MateriApps — a Portal Site of Materials Science Simulation, *JPS Conf. Proc.* **5**, 011007 (2015).

(国内雑誌)

- [6] 藤堂眞治, "実験技術"としての量子多体系シミュレーションソフトウェア ALPS, *日本物理学会誌* **70**, 275–282 (2015).

(学位論文)

- [7] Koichi Yanagisawa, Tensor network study of two-dimensional frustrated quantum spin model (修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [8] Hidemaro Suwa, Arnab Sen, Anders W. Sandvik, “Gap Estimation and Level Spectroscopy for Quantum Spin Systems by Monte Carlo Method,” CCP2014, August 2014, Boston.
- [9] Tatsuya Sakashita, Ryo Igarashi, Tsuyoshi Okubo, Synge Todo, “Exact diagonalization package using integrated interface for parallel eigensolvers,” Tensor Network Algorithms in Materials Science, October 2014, Kobe.
- [10] Synge Todo, “MateriApps: a Portal Site for Materials Science Simulation,” CMSI International Workshop 2014: Tensor Network Algorithms in Materials Science, October 2014, Kobe.
- [11] Koichi Yanagisawa, Hidemaro Suwa, Synge Todo, “Corner Transfer Matrix Renormalization for $S = 1/2$ J_1 - J_2 Heisenberg Model on Square Lattice,” CMSI International Workshop 2014: Tensor Network Algorithms in Materials Science, October 2014, Kobe.
- [12] Synge Todo, “K-computer study of quantum phase transitions in two-dimensional magnets,” Cooperation in Physics Workshop: UT-LMU, October 2014, Munich.
- [13] Synge Todo and Hidemaro Suwa, “Geometric Allocation Approaches in Markov Chain Monte Carlo,” Joint Workshop on Physics UT and ENS, December 2014, Paris.
- [14] Toshiaki Horita, Hidemaro Suwa, Synge Todo, “Analysis of the Ising model with Long-Range interactions by combined Binder ratio,” CMSI International Workshop on New Frontier of Numerical Methods for Many-Body Correlations, February 2015, Tokyo.
- [15] Hidemaro Suwa, Synge Todo, “Generalized Moment Method for Gap Estimation and Quantum Monte Carlo Level Spectroscopy,” APS March Meeting, March 2015, San Antonio.

招待講演

- [16] Hidemaro Suwa, “Quantum Monte Carlo Analysis with Geometric Allocation Approach for Spin-boson Systems,” Trends in Theory of Correlated Materials (TTCM2014), October 2014, Tokyo.

(国内会議)

一般講演

- [17] 吉澤香奈子、五十嵐亮、笠松秀輔、加藤岳生、川島直輝、河津励、小西優祐、佐々木翔一、土田成宏、寺田弥生、藤堂眞治、野田真史、吉見一慶, 「MateriApps: xTAPP による第一原理電子状態計算」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月, 中部大学.
- [18] 五十嵐亮、笠松秀輔、加藤岳生、川島直輝、河津励、小西優祐、佐々木翔一、土田成宏、寺田弥生、藤堂眞治、野田真史、吉見一慶、吉澤香奈子, 「MateriApps: ALPS による強相関量子多体系のシミュレーション」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月, 中部大学.
- [19] 堀田俊樹、諏訪秀磨、藤堂眞治, 「長距離相互作用イジング模型の Critical Decay Exponent」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月, 中部大学.
- [20] 安田真也、諏訪秀磨、藤堂眞治, 「ローレンツ対称でない量子相転移の動的臨界指数測定」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月, 中部大学.
- [21] 諏訪秀磨、Anders W. Sandvik, 「量子スピンの臨界点における励起速度とスケーリング次元のモンテカルロ計算」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月, 中部大学.
- [22] 諏訪秀磨、藤堂眞治, 「量子モンテカルロ法によるエンタングルメント計算とトポロジカル相の探索」, 第 1 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会, 2014 年 10 月, 東京.
- [23] 安田真也、諏訪秀磨、藤堂眞治, 「非自明な動的臨界指数を持つ系に対する有限サイズ爬スケールク爬」, 物性研スーパーコンピュータ共同利用報告会, 2014 年 11 月, 物性研究所.
- [24] 堀田俊樹、諏訪秀磨、藤堂眞治, 「長距離相互作用イジング模型の Critical Decay Exponent」, CCMS 第 4 回シンポジウム, 2014 年 11 月, 物性研究所.
- [25] Tatsuya Sakashita, Ryo Igarashi, Tsuyoshi Okubo, Synge Todo, “Exact diagonalization package using integrated interface for parallel eigensolvers,” 第 5 回 CMSI 研究会, December 2014, 東北大学.
- [26] 安田真也、諏訪秀磨、藤堂眞治, 「虚時間長制御による量子臨界系の動的臨界指数測定」, 第 5 回 CMSI 研究会, 2014 年 12 月, 東北大学.
- [27] Tatsuya Sakashita, Ryo Igarashi, Tsuyoshi Okubo, Synge Todo, 「Exact diagonalization package using integrated interface for parallel eigensolvers」, 量子多体系研究の新しい潮流, 2014 年 12 月, 京都大学.
- [28] 藤堂眞治, 「見える化に向けた CMSI のアクティビティ」, 第 3 回 TUT-CMSI 計算物質科学見える化シンポジウム, 2015 年 2 月, 東京.
- [29] 藤堂眞治, 「Tensor Network Algorithm for 2D Frustrated Magnets」, 統計物理の新展開 2015, 2015 年 3 月, 箱根.
- [30] 藤堂眞治, 「MateriApps 物質科学シミュレーションのポータルサイト」, 実験と計算科学の協奏が拓く物質科学・物質開発のフロンティア—超伝導とトポロジカル物質の新展開, 2015 年 3 月, 東京大学.
- [31] 諏訪秀磨, 「量子モンテカルロ法による励起エネルギー不偏推定」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月, 早稲田大学.

- [32] 本山裕一、藤堂眞治、「SU(N) 反強磁性ハイゼンベルグ鎖の SPT 相と相転移」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月, 早稲田大学.
- [33] 堀田俊樹、諏訪秀磨、藤堂眞治、「Combined Binder Ratio による長距離相互作用イジング模型のユニバーサリティクラスの解析」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月, 早稲田大学.

招待講演

- [34] 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」/強相関電子系・スピン系の汎用シミュレーションソフトウェア「ALPS」」, 第 1 回「京」と大型実験施設との連携利用シンポジウム, 2014 年 9 月, 東京.
- [35] 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」/強相関電子系・スピン系の汎用シミュレーションソフトウェア「ALPS」」, 物性研究所計算物質科学研究センター 第 4 回シンポジウム, 2014 年 11 月, 物性研究所.
- [36] 藤堂眞治、「CMSI における計算物質科学アプリケーションの開発・整備とその展開」, 計算科学勉強会, 2015 年 2 月, 大阪大学.
- [37] 諏訪秀磨、「Monte Carlo Algorithms beyond Detailed Balance」, Breaking and Beyond Detailed Balance Condition, 2015 年 3 月, 京都大学.

(セミナー)

- [38] 藤堂眞治、「サイコロを振って科学する」, 物理学教室コロキウム, 2014 年 6 月, 東京大学.
- [39] 藤堂眞治、「空間異方性の強い反強磁性体における相転移とユニバーサリティー」, 琉球大学談話会, 2014 年 11 月, 琉球大学.

3.6 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の手法や、場の理論的手法、数値的対角化などを組み合わせて多角的にアプローチしている。また、量子多体系や可解模型に関する数理論理学的研究も同時に行っている。

3.6.1 強相関電子系

相互作用するマヨラナフェルミオン系のトポロジカル秩序

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)]. 先行研究の多くは、マヨラナフェルミオン間に相互作用のない場合について理論的に調べているが、桂は、学習院大の高橋、Utrecht 大の Schuricht とともに、マヨラナフェルミオン間の相互作用を導入した Kitaev 模型について調べた。その結果、相図中のあるライン上で、基底状態が厳密に求まることを示した。このラインは、先行研究で数値的に調べられた相図中のトポロジカル相内にあり、求められた厳密な基底状態は、相互作用を導入した Kitaev 模型のトポロジカル相を代表していると考えられる。また、この基底状態と元の相互作用のない Kitaev 模型の基底状態とは、エネルギーギャップを閉じることなく断熱的に繋がっていることを証明した。また、縮退した二つの基底状態の間を結ぶマヨラナ演算子の具体形を求めた。これらの結果は、国際会議での招待講演をはじめ、幾つかの研究会で発表された [5, 6, 7, 11].

△ 鎖上の Hubbard 模型と RVB 状態

図 3.6.1 に示す、△ 鎖上の反強磁性 Heisenberg 模型は、再隣接のスピン一重項を敷き詰めた状態が厳密な基底状態となることが知られており、多くの研究がなされてきた。同じ格子上で Hubbard 模型を考えた場合、ホッピングやフィリングによっては、平坦バンド強磁性を示すことが知られている。桂は、この場合とはホッピングの符号が逆で、かつオンサイト斥力が無限大の場合について調べた。その結果、図 3.6.1 のように開放境界条件で、かつホールがひとつだけ存在する場合には、この系の基底状態が RVB (Resonating valence-bond) 状態 (図 3.6.1 のようなスピン一重項の配置の重ね合わせ) であることを示した。さらにこの系では、スピン一重項・三重項の配列が保存するため、全ての励起状態を求めることが可能であることを明らかにした。この結果は、純粋な一次元 Hubbard 模型での小形-斯波の結果 [M. Ogata and H. Shiba, *Phys. Rev. B* **41**, 2326 (1990)] の △ 鎖への拡張とみなすことができる。桂は、これらの結果を [9] で発表した。

3.6.2 可解模型

多成分非線形 Klein-Gordon 方程式

(1 + 1) 次元の非線形 KG (Klein-Gordon) 方程式は、sine-Gordon 模型や ϕ^4 模型の運動方程式のような、広いクラスのモデル方程式を含んでいる。1 成分スカラー場の場合には、Bogomol'nyi の方法を用いてキルク解を構成できる場合があるが、桂は 2 成分の場合にも、そのようなクラスの非線形 KG 方程式があることを示した [2]。具体例としては、sine-Gordon 模型の場合 ψ と ϕ^4 模型の場合 ϕ が $\phi \cos(\beta\psi)$ という項で非線形に結合した系などがある。またこれらの系

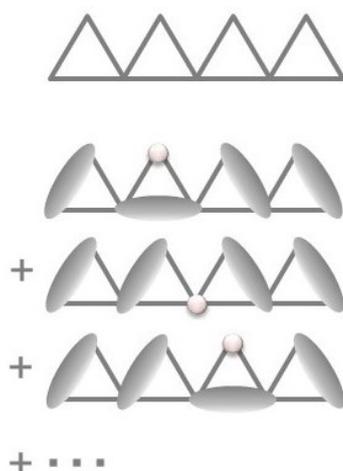


図 3.6.1: Δ 鎖とホールが 1 個の場合の基底状態の模式図。

において、図 3.6.2 に示すような二つのキंकが結合した解が安定に存在することを示した。

さらに、桂と首都大の坂本は、 N 成分の (Bogomol'nyi の方法の意味で) 可解な非線形 KG 方程式の一般的な構成法を提案し、その複合キंक解の線形安定性を示した。

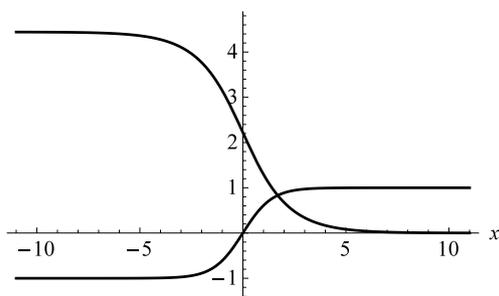


図 3.6.2: 非線形 Klein-Gordon 方程式の複合キंक解

行列積演算子と Heisenberg スピン鎖の保存量

桂は、2 次元量子系のエンタングルメント・スペクトルの研究において偶然発見した、特異な性質をもつ行列積演算子 (MPO) について、その性質を詳しく調べた。この MPO は二つのパラメータを含んでいるが、これらが特殊な値の場合には六角梯子格子上的 AKLT 模型の縮約密度行列と関係する。また、二つのパラメータの組 (x, y) が単位円周上にある場合には、この MPO は、スピン $1/2$ Heisenberg スピン鎖のハミルトニアンおよびその全ての保存量と交換するという著しい性質を持つ。この性質は、Yang-Baxter

関係式を用いて、6 頂点模型の転送行列とこの MPO が可換であることを示すことにより証明された [3]。桂は、これらの結果および可解模型に関する入門的講演を [10] で行った。

<受賞>

- [1] 桂 法称、第 9 回日本物理学会若手奨励賞「マルチフェロイクス系における磁性と強誘電性の理論的研究」、日本物理学会、2015 年 3 月 21 日

<報文>

(原著論文)

- [2] Hosho Katsura: Composite-kink solutions of coupled nonlinear wave equations, *Phys. Rev. D*, **89**, 085019 (2014).
 [3] Hosho Katsura: On integrable matrix product operators with bond dimension $D = 4$, *J. Stat. Mech.*, P01006 (2015).

(会議抄録)

- [4] Shu Tanaka, Ryo Tamura, Hosho Katsura: Entanglement Properties of a Quantum Lattice-Gas Model on Square and Triangular Ladders, *Summer Workshop on Physics, Mathematics, And All That Quantum Jazz* [Kinki University Series on Quantum Computing, Vol. 9].

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [5] Hosho Katsura: Exact ground states of an interacting Kitaev/Majorana chain, *New Horizon of Strongly Correlated Physics (NHSCP2014)*, Kashiwa, Jun. 2014.
 [6] Hosho Katsura: Topological order in interacting Kitaev/Majorana chains, *Novel Quantum States in Condensed Matter (NQS2014)*, Kyoto, Nov. 2014.

(国内会議)

一般講演

- [7] 高橋雅裕, Dirk Schuricht, 桂 法称: 相互作用するマヨラナ粒子系の基底状態とトポロジカル秩序, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月, 中部大学.
 [8] 奥西巧一, 桂 法称: sine 二乗変形と超対称量子力学, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月, 早稲田大学.
 [9] 桂 法称: ホールの運動が誘起する Δ 鎖上の RVB 状態, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月, 早稲田大学.

招待講演

- [10] 桂 法称: ロシアより I をこめて, 基研研究会: 量子多体系研究の新しい潮流, 2014 年 12 月, 京都大学.

- [11] 桂 法称: 相互作用するマヨラナフェルミオン系の基底状態とトポジカル秩序, 第3回統計物理学懇談会, 2015年3月, 慶應大学.
- [12] 桂 法称: マルチフェロイクス系における磁性と強誘電性の理論的研究, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年3月, 早稲田大学.
- (セミナー)
- [13] 桂 法称: 量子多体系の基底状態、ギャップ、励起状態, 物理学教室 コロキウム, 2014年6月, 東京大学.

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 spectroscopy: 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, 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, スピン依存伝導, 界面新奇物性, 磁気異方性等の発現機構解明をめざしている。紫外光から X 線に至る放射光源 (KEK フォトンファクトリー, SPring-8, スタンフォード放射光, 広島大放射光, 台湾放射光), レーザー光源 (物性研), 実験室光源 (本郷) を用いて実験を行っている。

4.1.1 高温超伝導

銅酸化物における高温超伝導は, その発見以来 20 年余りにわたって多くの研究が積み重ねられてきたが, 今だに機構解明に至らない世紀を超えた難問である。また, 近年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。

鉄系超伝導体のバンド構造の三次元性

鉄系超伝導体は銅酸化物と同様に原子層が交互に積み重なった層状結晶構造を持つが, 銅酸化物では電子が理想的な二次元系として振る舞うのに対して, 鉄系超伝導体は三次元性が無視できない。これまでは超伝導の舞台である Fe-As 面を構成する Fe 面と As 面の距離が三次元性を支配するとされてきたが, 我々は隣り合う Fe-As 面を隔てる原子の半径を変える次元性制御に注目し, 超伝導体 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の全ての Ba を Sr に置き替えた超伝導体 $\text{SrFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の電子構造を ARPES で調べた。Ba→Sr 置換によって母体 ($x = 0$) の反強磁性ネール温度が約 50 K も上昇する一方で, 超伝導転移温度 T_c はほとんど変化しない。ARPES で調べた複数のフェルミ面うちの一つが, Ba→Sr 置換により二次元面に垂直な方向の運

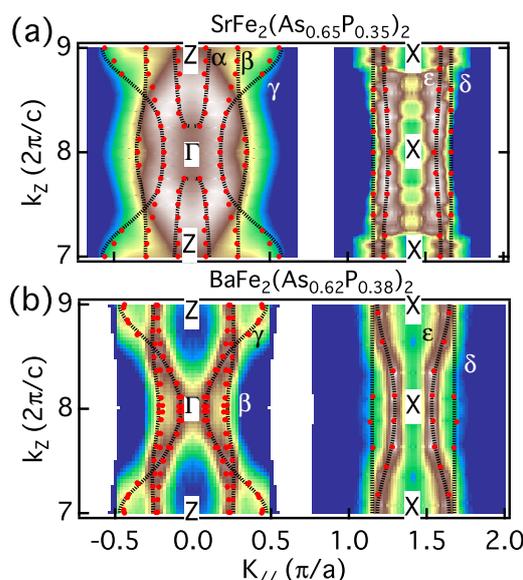


図 4.1.1: ARPES で観測した鉄系高温超伝導体 (a) $\text{SrFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, (b) $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ のフェルミ面の断面。それぞれ, 左にブリルアン域中心のホールフェルミ面, 右にブリルアン域境界の電子フェルミ面を示す。横軸が Fe-As 面内方向の運動量 k_{\parallel} , 縦軸が Fe-As 面に垂直方向の運動量 k_z を表す。 $\text{SrFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の方がより強い k_z 依存性を示しており, より強い三次元性を表している [6]。

動量依存性が強くなり, フェルミ面のネスティングが弱まった。このことから, 反強磁性にはネスティングよりも原子内・原子間 (層内および層間) の交換相互作用が重要であると結論された。また, Ba→Sr 置換で T_c があまり変化しないことから, 二次元的なフェルミ面のみが超伝導をもたらしていると結論した [6]。

鉄系非従来型超伝導体の超伝導ギャップ

鉄系超伝導体 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ は, 超伝導状態における種々の熱力学的測定から, 超伝導ギャップにノードを持ついわゆる非従来型超伝導体と考えられている。しかし, ノードの位置に関しては, ブリルアン域の中心近くのホール型フェルミ面にあるのか, ブリルアン域境界近くの電子型フェルミ面にあるのかの論争があり, 異なった主張がなされてきた。我々は T_c が最大値をとる組成付近の $x = 0.3$ 試料の高分解能 ARPES 測定を行い, ホール型フェルミ面に空いた超伝導ギャップにはノードがなく, 電子型フェルミ面に空いた超伝導ギャップに強い異方性があることを見出した [15]。この異方性が予想されてきたループ型ノードによるものかどうかは, 今後さらに実験的に詰める予定である。

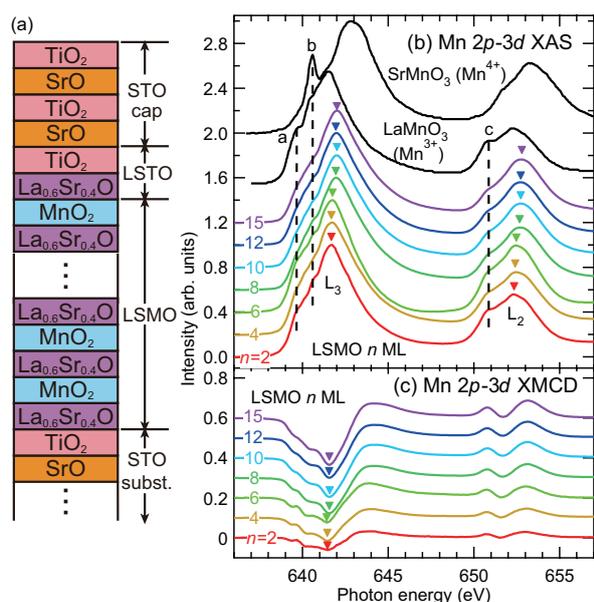


図 4.1.2: SrTiO₃ (STO) 基板上に成長した La_{1-x}Sr_xMnO₃ (LSMO) 薄膜の電子状態と磁性の膜厚依存性。(a) 薄膜試料の構造。(b) Mn 2p 内殻 X 線吸収 (XAS) スペクトル。ピーク・エネルギーのシフトが Mn の価数変化を表している。(c) 同内殻 X 線磁気円二色性 (XMCD) スペクトル。ピーク強度が磁化の大きさを示している。[7]。

4.1.2 スピントロニクス, 界面

金属-絶縁体転移, 巨大磁気抵抗, スピン・電荷・軌道秩序など多彩な物性を示す遷移金属酸化物, 半導体に磁性原子をドーピングした強磁性半導体は, 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, 界面効果, 基板圧力効果を光電子分光および X 線磁気円二色性 (XMCD) 測定により調べている。とくに, 元素選択的・局所的な磁性プローブである XMCD 測定を, 磁場方向, 偏光方向を自由に換えられるベクトル型超伝導マグネット装置を用いて行っている。

酸化物強磁性体の膜厚化による強磁性の消失

金属的な電気伝導性を示す遷移金属酸化物を原子レベルで薄くしていくと, 数原子層 (ML) の臨界膜厚以下で絶縁体に転移することが多く報告されている。室温以上のキュリー温度 T_C を持つ酸化物強磁性体 La_{1-x}Sr_xMnO₃ (LSMO, $x = 0.4$) は, 6~8ML 以下で絶縁体になるとともに強磁性も消失する。我々は, 様々な膜厚の LSMO 試料を磁場の関数として Mn $L_{2,3}$ 吸収端 XAS および XMCD を測定し, 強磁性から常磁性への転移が膜厚の関数として徐々に

起こることを見出し, 転移の途中では強磁性相と常磁性相が不均一に共存していると結論した。また, 転移に伴い Mn の価数が 3.4 価から 3 価奇りに減少し, 強磁性を媒介するホールの減少も, 強磁性と電気伝導の消失の原因の一つとなっていることが推測された [7]。臨界膜厚付近での電子状態の不均一性が面に垂直な方向で起こっているのか, 面内方向で起こっているのかは, 今後軟 X 線共鳴散乱を用いた実験で明らかにしていく予定である。

鉄系超伝導体と同じ結晶構造を持つ制御性の高い強磁性半導体

Ga_{1-x}Mn_xAs に代表される強磁性半導体は, Ga³⁺ イオンを Mn²⁺ イオンで置換することによって局在スピンとホールキャリアが同時に導入されるため, 局在スピン濃度とキャリア濃度を独立に制御することはできず, 置換できる濃度も数%に限られていた。最近合成された Ba_{1-x}K_x(Zn_{1-y}Mn_y)₂As₂ は, Zn²⁺ → Mn²⁺ 置換による局在スピンの導入と Ba²⁺ → K⁺ 置換によるキャリアの導入が独立に行うことが可能で, 数 10% の濃度までの導入も可能である。我々は, Ba_{1-x}K_x(Zn_{1-y}Mn_y)₂As₂ の基本的な電子構造を調べるために, Mn $L_{2,3}$ 吸収端で XAS, XMCD, 共鳴光電子分光測定を行った。得られた電子構造は Ga_{1-x}Mn_xAs に似ており, 共通の強磁性発現機構 (キャリア誘起強磁性) をもつことが示唆された [17]。

<受賞>

- [1] 堀尾眞史: International School "Multi-Condensates Superconductivity", (Erice, Italy, July 20-24, 2014) 最優秀ポスター発表賞。

<報文>

(原著論文)

- [2] E. Sakai, K. Yoshimatsu, M. Tamamitsu, K. Horiba, A. Fujimori, M. Oshima, and H. Kumigashira: Bandwidth-controlled metal-insulator transition in epitaxial PrNiO₃ ultrathin films induced by dimensional crossover, Appl. Phys. Lett. **104**, 171609-1-4 (2014).
- [3] M. Kobayashi, I. Muneta, Y. Takeda, Y. Harada, A. Fujimori, J. Krempasky, T. Schmitt, S. Ohya, M. Tanaka, M. Oshima, and V. N. Strocov: Unveiling the impurity band inducing ferromagnetism in the magnetic semiconductor (Ga,Mn)As, Phys. Rev. B **89**, 205204-1-8 (2014); arXiv:1302.0063.
- [4] D. Ootsuki, T. Toriyama, M. Kobayashi, S. Pyon, K. Kudo, M. Nohara, T. Sugimoto, T. Yoshida, M. Horio, A. Fujimori, M. Arita, H. Anzai, H. Namatame, M. Taniguchi, N. L. Saini, T. Konishi, Y. Ohta, T. Mizokawa: Important role of Te 5p spin-orbit interaction on the multi-band electronic structure of triangular lattice superconductor Ir_{1-x}Pt_xTe₂, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 033704-1-4 (2014); arXiv:1311.1199.

- [5] S. Ideta, T. Yoshida, M. Nakajima, W. Malaeb, H. Kito, H. Eisaki, A. Iyo, Y. Tomioka, T. Ito, K. Kihou, C. H. Lee, Y. Kotani, K. Ono, S. K. Mo, Z. Hussain, Z.-X. Shen, H. Harima, S. Uchida, and A. Fujimori: Electronic structure of BaNi_2P_2 observed by angle-resolved photoemission spectroscopy, *Phys. Rev. B* **89**, 195138–1-5 (2014); arXiv:1401.7897.
- [6] H. Suzuki, T. Kobayashi, S. Miyasaka, T. Yoshida, K. Okazaki, L. C. C. Ambolode II, S. Ideta, M. Yi, M. Hashimoto, D. H. Lu, Z.-X. Shen, K. Ono, H. Kumigashira, S. Tajima, and A. Fujimori: Strongly three-dimensional electronic structure and Fermi Surfaces of $\text{SrFe}_2(\text{As}_{0.65}\text{P}_{0.35})_2$: Comparison with $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, *Phys. Rev. B* **89**, 184513–1-6 (2014); arXiv:1312.4687.
- [7] G. Shibata, K. Yoshimatsu, E. Sakai, V. R. Singh, V. K. Verma, K. Ishigami, T. Harano, T. Kadono, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Sawa, H. Kumigashira, M. Oshima, T. Koide, and A. Fujimori: Thickness-dependent ferromagnetic metal to paramagnetic insulator transition in $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ thin film studied by x-ray magnetic circular dichroism, *Phys. Rev. B* **89**, 235123–1-5 (2014); arXiv:1311.0520
- [8] M. Bendele, A. Barinov, B. Joseph, D. Innocenti, A. Iadecola, A. Bianconi, H. Takeya, Y. Mizuguchi, Y. Takano, T. Noji, T. Hatakeda, Y. Koike, M. Horio, A. Fujimori, D. Ootsuki, T. Mizokawa, and N. L. Saini: Spectromicroscopy of electronic phase separation in $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ superconductor, *Sci. Rep.* **4**, 5592–1-5 (2014).
- [9] M. Kobayashi, L. D. Anh, P. N. Hai, Y. Takeda, S. Sakamoto, T. Kadono, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, Y. Harada, M. Oshima, M. Tanaka, and A. Fujimori: Spin and orbital magnetic moments of Fe in the n-type ferromagnetic semiconductor $(\text{In,Fe})\text{As}$, *Appl. Phys. Lett.* **105**, 032403–1-4 (2014).
- [10] Y. Takahashi, T. Kadono, V. R. Singh, V. K. Verma, K. Ishigami, G. Shibata, T. Harano, A. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saito, H. Yamagami, S. Yamamoto, and M. Takano: Orbital magnetic moment and coercivity of SiO_2 -coated FePt nanoparticles studied by x-ray magnetic circular dichroism, *Phys. Rev. B* **90**, 024423–1-5 (2014); arXiv:1310.8370.
- [11] K. Takubo, R. Comin, D. Ootsuki, T. Mizokawa, H. Wadati, Y. Takahashi, G. Shibata, A. Fujimori, R. Sutarto, F. He, S. Pyon, K. Kudo, M. Nohara, G. Levy, I. S. Elfimov, G. A. Sawatzky, and A. Damascelli: Bond-order and the role of ligand states in stripe-modulated IrTe_2 , *Phys. Rev. B* **90**, 081104(R)–1-5 (2014); arXiv:1405.7766.
- [12] Y. Takahashi, V. K. Verma, G. Shibata, T. Harano, K. Ishigami, K. Yoshimatsu, T. Kadono, A. Fujimori, A. Tanaka, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D. J. Huang, C. T. Chen, B. Pal, and D. D. Sarma: Observation of magnetically hard grain boundaries in double-perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$, *Europhys. Lett.* **108**, 27003 (2014); arXiv:1305.4497.
- [13] C. L. Chen, C. L. Dong, G. Chern, K. Kumar, H. J. Lin, C. T. Chen, C. L. Chang, and A. Fujimori: Direct spectroscopic identification of the magnetic structure of the interface of $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{Fe}_3\text{O}_4$ superlattices, *J. Alloys Compd.* **614**, 177-181 (2014).
- [14] H. Wadati, J. Mravlje, K. Yoshimatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, T. Sugiyama, E. Ikenaga, A. Fujimori, A. Georges, A. Radetnac, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, and Y. Tokura: Photoemission and DMFT study of electronic correlations in SrMoO_3 : Effects of Hund's rule coupling and possible plasmonic sideband, *Phys. Rev. B* **90**, 205131–1-8 (2014); arXiv:1308.4475.
- [15] T. Yoshida, S. Ideta, T. Shimojima, W. Malaeb, H. Suzuki, I. Nishi, A. Fujimori, S. Shin, Y. Nakashima, H. Anzai, M. Arita, A. Ino, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Ono, S. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima, Y. Matsuda, M. Nakajima, S. Uchida, Y. Tomioka, T. Ito, K. Kihou, C.H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, H. Ikeda, and R. Arita: Anisotropy of the superconducting gap in the iron-based superconductor $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, *Sci. Rep.* **4**, 7292–1-6 (2014); arXiv:1301.4818
- [16] L. Liu, T. Mikami, M. Takahashi, S. Ishida, T. Kakeshita, K. Okazaki, A. Fujimori, and S. Uchida: Reversed anisotropy of the in-plane resistivity in the antiferromagnetic phase of iron tellurides, *Phys. Rev. B* **91**, 134502–1-6 (2015); arXiv:1501.00774.
- [17] H. Suzuki, K. Zhao, G. Shibata, Y. Takahashi, S. Sakamoto, K. Yoshimatsu, B. J. Chen, H. Kumigashira, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D. J. Huang, C. T. Chen, Bo Gu, S. Maekawa, Y. J. Uemura, C. Q. Jin, and A. Fujimori: Photoemission and x-ray absorption studies of the isostructural to Fe-based superconductors diluted magnetic semiconductor $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x(\text{Zn}_{1-y}\text{Mn}_y)_2\text{As}_2$, *Phys. Rev. B* **91**, 140401(R)–1-5 (2015) (Editor's Suggestion); arXiv:1410.2409.
- [18] Y. Krockenberger, M. Horio, H. Irie, A. Fujimori, and H. Yamamoto: As-grown superconducting Pr_2CuO_4 under thermodynamic constraints, *Appl. Phys. Express*, in press.
- (会議抄録)
- [19] T. Koide, K. Mamiya, D. Asakura, Y. Osafune, A. Fujimori, Y. Suzuki, T. Katayama, and S. Yuasa: Gigantic transverse x-ray magnetic circular dichroism in ultrathin Co in $\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}(001)$, in *Proceedings of the 1st Conference on Light and Particle Beams in Materials Science 2013 (LPBMS 2013)*; *J. Phys.: Conf. Ser.* **502**, 012002–1-4 (2014).

- [20] T. Koide, T. Sekine, H. Miyauchi, H. Manaka, D. Asakura, A. Fujimori, K.-I. Kobayashi, Y. Tomioka, T. Kimura, and Y. Tokura: Microscopic origin of ferrimagnetism of a double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$: An x-ray magnetic circular dichroism study, *ibid*; J. Phys.: Conf. Ser. **502**, 012003–1–4 (2014).
- [21] T. Okane, Y. Takeda, K. Yano, A. Fujimori, H. Yamagami, K. Nishimura, Y. Isikawa, K. Sato: X-ray magnetic circular dichroism study of $\text{Ce}_{0.5}\text{Gd}_{0.5}\text{Ni}$, in *Proceeding of International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2013)*; JPS Conf. Proc. **3**, 011028–1–6 (2014).
- [22] S-i. Fujimori, I. Kawasaki, A. Yasui, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagami, Y. Haga, E. Yamamoto, and Y. Onuki: Angle resolved photoelectron spectroscopy study of heavy Fermion superconductor UPd_2Al_3 , *ibid*; JPS Conf. Proc. **3**, 011072–1–5 (2014).
- (綜説, 解説, その他)
- [23] 堀尾眞史: PF 修士論文紹介コーナー: 電子ドープ型銅酸化物超伝導体 $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ の角度分解光電子分光による研究, PF ニュース Vol. 32, No. 2, p. 31 (2014).
- (編著書)
- [24] 鎌倉望, 藤森淳: 金属中の水素の電子状態, 水素エネルギー協会編「水素の事典」4.2 節 (朝倉書店, 2014年) p. 57.
- [25] 藤原毅夫, 藤森淳, 勝藤拓郎監修: 物質材料テキストシリーズ (内田老鶴圃, 2014年).
- (学位論文)
- [26] 坂本祥哉: X-ray magnetic circular dichroism study of the n -type ferromagnetic semiconductor $(\text{In,Fe})\text{As:Be}$ (修士論文)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [27] A. Fujimori: Static to dynamical antiferromagnetic correlations in electron-doped cuprates studied by ARPES, *4th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2014)* (Antalya, Turkey, April 27-May 2, 2014).
- [28] A. Fujimori: Static to dynamical antiferromagnetic correlation in electron-doped cuprate superconductors studied by ARPES, *13th International Conference on Modern Materials and Technologies (CIMTEC 2014)*, (Montecatini, Italy, June 15-20, 2014).
- [29] A. Fujimori: Nature of magnetism and superconductivity in the three-dimensional electronic structures of Fe pnictides, *International School "Multi-Condensates Superconductivity"*, (Erice, Italy, July 20-24, 2014).
- [30] A. Fujimori: ARPES studies of Fe pnictides in the antiferromagnetic-orthorhombic phase and the superconducting phase, *Research Frontier of Transition-metal Compounds Opened by Advanced Spectroscopies*, (Institute for Materials Research, Tohoku University, September 30-October 2, 2014).
- [31] A. Fujimori: ARPES studies of Fe pnictides: Nature of the antiferromagnetic-orthorhombic phase and the superconducting gap, *Novel Superconductors and Synchrotron Radiation (SCSR2014)*, (Trieste, December 10-11, 2014).
- [32] A. Fujimori, M. Horio, T. Adachi and Y. Koike: Suppressed antiferromagnetic correlation and extended superconducting phase in electron-doped cuprates, *6th IACS-APCTP Joint Conference on Novel Oxide Materials and Low Dimensional Systems* (Seoul National University, December 18-20, 2014).
- [33] G. Shibata: Magnetic anisotropy in manganese thin films probed by angle-dependent XMCD, *Fudan-Todai-Yonsei Joint Workshop 2015* (Yonsei University, January 31, 2015).
- [34] A. Fujimori: Soft x-ray spectroscopies of ferromagnetic semiconductors: from prototypical to novel materials *15-th Taiwan-Korea-Japan Workshop on Strongly Correlated Electron Systems* (National Chiao Tung University, Taiwan, March 27-28, 2015).
- 一般講演
- [35] M. Horio, K. Okazaki, T. Katagiri, H. Suzuki, J. Xu, K. Ishigami, Y. Takahashi, G. Shibata, S. Sakamoto, K. Ono, H. Kumigashira, K. Horiba, M. Kobayashi, E. Sakai, T. Koide, T. Sasagawa, and A. Fujimori: ARPES and core-level spectroscopies of the coexistence of ferromagnetism and superconductivity in $\text{Sr}_2\text{VFeAsO}_{3-\delta}$, *International School "Multi-Condensates Superconductivity"*, (Erice, Italy, July 20-24, 2014).
- [36] R. Kawabe, H. Yamamoto, H. Hojo, M. Azuma, A. Fujimori, G. Shibata, and K. Mibu: Fabrication of multiferroic $\text{BiFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ thin films by pulse laser deposition, *8th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC8)*, (Yokohama, June 25-27, 2014)
- [37] S-i. Fujimori, M. Kobata, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagami, Y. Haga, E. Yamamoto, and Y. Onuki: Electronic structure of UGa_3 studied by angle-resolved photoelectron spectroscopy, *International Conference on Strongly Correlated Electron Systems*, (Grenoble, July 7-11, 2014).

- [38] H. Suzuki, T. Kobayashi, S. Miyasaka, T. Yoshida, K. Okazaki, K. Okazaki, M. Horio, L. C. C. Amalode II, S. Ideta, M. Yi, M. Hashimoto, D. H. Lu, Z.-X. Shen, K. Ono, H. Kumigashira, S. Tajima, and A. Fujimori: Angle-resolved photoemission spectroscopy of the isovalent-substituted Fe-based superconductor $\text{SrFe}_2(\text{As}_{0.65}\text{P}_{0.35})_2$, *School on UV and X-ray Spectroscopies of Correlated Electron Systems (SUCCESS-2014)*, (Les Houches, France, September 1-12, 2014).
- [39] E. Sakai, K. Yoshimatsu, M. Tamamitsu, K. Horiba, A. Fujimori, M. Oshima, and H. Kumigashira: Bandwidth-controlled metal-insulator transition in epitaxial PrNiO_3 ultrathin films induced by dimensional crossover, *15th International Workshop on Oxide Electronics (WOE15)*, (Bolton Landing, NY, September 28-October 1, 2014)
- [40] M. Horio, K. Okazaki, T. Katagiri, H. Suzuki, J. Xu, K. Ishigami, Y. Takahashi, G. Shibata, S. Sakamoto, K. Ono, H. Kumigashira, K. Horiba, M. Kobayashi, E. Sakai, T. Koide, T. Sasagawa, and A. Fujimori: Coexisting ferromagnetism and superconductivity in $\text{Sr}_2\text{VFeAsO}_{3-\delta}$ studied by photoemission spectroscopy, *Fudan-Todai-Yonsei Joint Workshop 2015* (Yonsei University, January 31, 2015).
- [41] S. Yamamoto, D. Shimonaka, T. Yoshida, A. Fujimori, H. Sato, H. Namatame, M. Taniguchi, H. Kumigashira, K. Ono, S. Miyasaka, S. Tajima, and S. Biermann: ARPES and inverse ARPES study of strongly-correlated electron system SrVO_3 , *19th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation*, (Hiroshima University, March 5-6, 2015).
- [42] K. Koshiishi, L. Liu, K. Okazaki, H. Suzuki, M. Horio, J. Xu, H. Kumigashira, K. Ono, M. Nakajima, S. Ishida, K. Kihou, C. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, S. Uchida, and A. Fujimori: Anisotropic electronic structure of 122-type iron-based superconductors in the electronic nematic phase, *15th Taiwan-Korea-Japan Workshop on Strongly Correlated Electron Systems*, (National Chiao Tung University, Taiwan, March 27-28, 2015).
- [43] H. Suzuki, G. Q. Zhao, K. Zhao, B. J. Chen, M. Horio, K. Koshiishi, J. Xu, M. Kobayashi, M. Minohara, E. Sakai, K. Horiba, H. Kumigashira, Bo Gu, S. Maekawa, Y. J. Uemura, C. Q. Jin, and A. Fujimori: Soft x-ray ARPES study of the new diluted magnetic semiconductor $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x(\text{Zn}_{1-y}\text{Mn}_y)_2\text{As}_2$. *ibid.*
- [44] N. Matsui, D. Shintani, D. Hirai, Y. Nonaka, G. Shibata, A. Fujimori, and H. Takagi: Carrier doping in SrIrO_3 by substituting Eu for Sr, *ibid.*
- [45] 藤森淳：高輝度極紫外・軟 X 線を利用した磁性半導体の研究, PF 研究会「高輝度真空紫外・軟 X 線を利用した次世代サイエンス」(高エネ研, 2014 年 10 月 18-19 日)。
- [46] 藤森淳：鉄系超伝導体の反強磁性斜方晶相と超伝導相の ARPES, 基研研究会「多自由度電子状態と電子相関が生み出す新奇超伝導の物理」(京大基研, 2014 年 10 月 21-22 日)。
- [47] 藤森淳：銅酸化物, 鉄系超伝導体の実験に関する最近の話題と展望, Workshop: CROSSroads of Users and J-PARC 第 13 回「強相関電子系の物理」(総合科学研究機構, 東海村, 2014 年 12 月 1-2 日)。
- [48] 藤森淳：ARPES と XMCD から見た強磁性半導体の電子構造と磁性, 第 19 回半導体スピン工学の基礎と応用 (PASPS-19) (東京大学, 2014 年 12 月 15-16 日)。
- [49] 藤森淳：軟 X 線分光で見た半導体スピントロニクス材料の電子構造と磁性, JAEA 放射光科学シンポジウム 2015「環境・エネルギー研究開発における放射光科学」(SPRING-8, 2015 年 3 月 16,17 日)。
- [50] 藤森淳：銅酸化物, 鉄系超伝導体の電子構造, 実験と計算科学の協奏が拓く物質科学・物質開発のフロンティア—超伝導とトポロジカル物質の新展開 (東京大学, 2015 年 3 月 18, 19 日)。
- [51] 藤森淳：ARPES で見た銅酸化物における反強磁性相関, 日本物理学会第 70 回年次大会 シンポジウム「銅酸化物におけるノン・ドープ超伝導の可能性に迫る」(2015 年 3 月 21-24 日, 早稲田大学)。

一般講演

- [52] 石上啓介： SrRuO_3 薄膜の X 線磁気円二色性による軌道磁気モーメントの観測, 科研費基盤研究 S「多自由度放射光 X 線二色性分光による強相関系界面新規電子相の研究」研究会(熱海, 2014 年 7 月 13-14 日)。
- [53] 芝田悟朗：角度依存 XMCD による $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 薄膜の磁気異方性とスピン分布異方性の観測, 同上。
- [54] 新開智彦, 内海優史, 柳原英人, 井上順一郎, 芝田悟朗, 門野利治, 酒巻真粧子, 雨宮健太, 小出常晴, 喜多英治：高垂直磁気異方性コバルトフェライト (001) 薄膜におけるカチオン価数・サイト分布, 第 38 回日本磁気学会学術講演会 (慶應日吉, 2014 年 9 月 2-5 日)。
- [55] 芝田悟朗, 和達大樹, 田久保耕, 高橋文雄, 藤森淳, R. Sutarto, F. He, 吉松公平, 組頭広志, 小出常晴：強磁性金属 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 薄膜の共鳴軟 X 線散乱 II, 日本物理学会秋季大会 (中部大学, 2014 年 9 月 7-10 日)。
- [56] L. Liu, K. Okazaki, H. Suzuki, M. Horio, J. Xu, M. Hashimoto, D. H. Lu, Z.-X. Shen, M. Nakajima, S. Ishida, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Mikami, S. Uchida, and A. Fujimori: Superconducting gap in isovalent-substituted $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.65}\text{Ru}_{0.35})_2\text{As}_2$ observed by angle-resolved photoemission spectroscopy II, 同上。
- [57] 徐健, 岡崎浩三, 吉田鉄平, 鈴木博人, 堀尾真史, 劉亮, 藤森淳, 橋本信, D. H. Lu, Z.-X. Shen, 小野寛

(国内会議)

招待講演

- 太, 組頭広志, 中島正道, 内田慎一, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋: 鉄系超伝導体 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の超伝導ギャップ, 同上.
- [58] 興石佳佑, 劉亮, 岡崎浩三, 鈴木博人, 堀尾眞史, 徐健, 組頭広志, 小野寛太, 中島正道, 石田茂之, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 内田慎一, 藤森淳: 122系鉄系超伝導体の電子ネマティック相における電子構造の異方性, 同上.
- [59] 野中洋亮, 芝田悟朗, 小堀内類, 石上啓介, 坂本祥哉, 小出常晴, 勝藤拓郎, 藤森淳: スピネル型酸化物 CoV_2O_4 の X 線磁気円二色性, 同上.
- [60] 田久保耕, 大槻太毅, 溝川貴司, 和達大樹, 高橋文雄, 芝田悟朗, 藤森淳, R. Sutarto, F. He, 卞舜生, 工藤一貴, 野原実, R. Comin, G. Levy, I. Elfmov, G. Sawatzky, A. Damascelli: 共鳴軟 X 線散乱により観測した IrTe_2 の Te-Ir 共有ボンドの電荷変調, 同上.
- [61] 大槻太毅, N. L. Saini, 溝川貴司, 堀尾眞史, 藤森淳, A. Barinov, M. Yablonskikh, V. Kandyba, 鳥山達矢, 小西健久, 太田幸則, 卞舜生, 工藤一貴, 野原実: 位置分解光電子分光による IrTe_2 の電子状態, 同上.
- [62] S. Sakamoto, L. D. Anh, P. N. Hai, G. Shibata, Y. Takahashi, Y. Takeda, M. Kobayashi, T. Koide, M. Tanaka, and A. Fujimori: Magnetization process of the *n*-type ferromagnetic semiconductor $(\text{In},\text{Fe})\text{As:Be}$ studied by x-ray magnetic circular dichroism, 第 75 回応用物理学秋季学術講演会 (北大, 2014 年 9 月 17-20 日)
- [63] 石上啓介, 芝田悟朗, 関剛斎, 高橋文雄, 門野利治, 坂本祥哉, 小出常晴, 高梨弘毅, 藤森淳: L_{10} オーダーを制御した FePt 薄膜の Fe $L_{2,3}$ 吸収端 X 線磁気円二色性, 同上.
- [64] 坂本祥哉, Le Duc Anh, Pham Nam Hai, 芝田悟朗, 竹田幸治, 高橋文雄, 小出常晴, 田中雅明, 藤森淳: *n* 型強磁性半導体 $(\text{In},\text{Fe})\text{As:Be}$ の XMCD による磁化過程の研究, 第 19 回半導体スピン工学の基礎と応用 (PASPS-19) (東京大学, 2014 年 12 月 15-16 日).
- [65] Y. K. Wakabayashi, S. Sakamoto, K. Ishigami, Y. Takahashi, Y. Takeda, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, M. Tanaka, and S. Ohya: Local magnetic behavior in ferromagnetic semiconductor GeFe studied by soft X-ray magnetic circular dichroism, 同上.
- [66] 大矢忍, 若林勇希, 坂本祥哉, 伴芳祐, 竹田幸治, 藤森淳, 田中雅明: IV 族強磁性半導体 $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ における強磁性発現機構と局所的室温強磁性の観測, 2015 年誘電体スピントロニクス研究会 (東北大学, 2015 年 1 月 5 日).
- [67] 山本紳太郎, 下中大也, 吉田鉄平, 藤森淳, 佐藤仁, 宮坂茂樹, 田島節子, S. Biermann: 強相関物質 SrVO_3 の共鳴逆光電子分光, 第 28 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム (立命館大びわこ・くさつキャンパス, 2015 年 1 月 11-12 日).
- [68] 小林正起, 吉松公平, 坂井延寿, 北村未歩, 堀場弘司, 藤森淳, 組頭広志: 強相関酸化物 SrVO_3 の金属量子井戸状態における異常な有効質量増大の起源, 同上.
- [69] 田久保耕, 大槻太毅, 溝川貴司, 和達大樹, 高橋文雄, 芝田悟朗, 藤森淳, R. Sutarto, F. He, 石井賢司, 卞舜生, 工藤一貴, 野原実: $\text{Ir}_{1-x}\text{Pt}_x\text{Te}_2$ の Te サイトの共鳴 X 線散乱, 同上.
- [70] 野田智博, 大槻太毅, 杉本拓也, 堀尾眞史, 藤森淳, 小林正起, 堀場弘司, 小野寛太, 組頭広志, 工藤一貴, 高須賀政哉, 野原実, N. L. Saini, 溝川貴司: $\text{BaNi}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の角度分解光電子分光, 同上.
- [71] 藤森伸一, 小島雅明, 竹田幸治, 岡根哲夫, 斎藤祐児, 藤森淳, 山上浩志, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 大貫惺睦: 軟 X 線 ARPES による UGa_3 の電子状態, 同上.
- [72] Y. K. Wakabayashi, S. Sakamoto, K. Ishigami, Y. Takahashi, Y. Takeda, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, M. Tanaka, and S. Ohya: Room-temperature local ferromagnetism and domain growth in the ferromagnetic semiconductor $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$, 第 6 回低温センター研究交流会
- [73] 芝田悟朗, 和達大樹, 田久保耕, 高橋文雄, Ronny Sutarto, Feizhou He, 吉松公平, 組頭広志, 小出常晴, 藤森淳: 共鳴軟 X 線散乱による強磁性金属 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 薄膜の深さ方向電子状態解析, ISSP Workshop 「SPRING-8 BL07LSU の現状と新たな光源に向けた取り組み」 (物性研, 2015 年 3 月 5 日)
- [74] 鈴木博人, G. Q. Zhao, K. Zhao, B. J. Chen, 堀尾眞史, 興石佳佑, 徐健, 小林正起, 簗原誠人, 坂井延寿, 堀場弘司, 組頭広志, Bo Gu, 前川禎通, Y. J. Uemura, C. Q. Jin, 藤森淳: 新規希薄磁性半導体 $\text{Ba}_{1-y}\text{K}_y(\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{As}_2$ の軟 X 線角度分解光電子分光, 同上.
- [75] 堀尾眞史, 足立匡, 森陽介, 高橋晶, 吉田鉄平, 鈴木博人, L. C. C. Ambolode II, 岡崎浩三, 小野寛太, 組頭広志, 安斎太陽, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 大田由一, 山本遇哲, 辛埴, 大槻太毅, 澤田慶, 高橋雅也, 溝川貴司, 小池洋二, 藤森淳: “プロテクト・アニーリング” による電子ドーピング型銅酸化物高温超伝導体の反強磁性擬ギャップの抑制, 同上.
- [76] 石上啓介, 芝田悟朗, 関剛斎, 高橋文雄, 門野利治, 坂本祥哉, 小出常晴, 高梨弘毅, 藤森淳: L_{10} オーダーを制御した FePt 薄膜の Fe $L_{2,3}$ 吸収端 X 線磁気円二色性, 第 3 回物構研サイエンスフェスタ (つくば, 2015 年 3 月 17-18 日).
- [77] 鈴木博人, G. Q. Zhao, K. Zhao, B. J. Chen, 堀尾眞史, 興石佳佑, 徐健, 小林正起, 簗原誠人, 坂井延寿, 堀場弘司, 組頭広志, Bo Gu, 前川禎通, Y. J. Uemura, C. Q. Jin, 藤森淳: 新規希薄磁性半導体 $\text{Ba}_{1-y}\text{K}_y(\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{As}_2$ の軟 X 線角度分解光電子分光, 同上.
- [78] 徐健, 岡崎浩三, 鈴木博人, 堀尾眞史, 劉亮, 出田真一郎, 吉田鉄平, 橋本信, Donghui Lu, Z.-X. Shen, 小野寛太, 組頭広志, 中島正道, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 笠原成, 寺嶋孝仁, 芝内孝禎, 松田祐司, 内田慎一, 藤森淳: 鉄系超伝導体 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の超伝導ギャップ, 同上.
- [79] 北村未歩, 堀場弘司, 小林正起, 坂井延寿, 簗原誠人, 三橋太一, 藤森淳, 藤岡洋, 組頭広志: ペロブスカイト酸化物 $\text{LaMnO}_3/\text{LaNiO}_3$ ヘテロ界面における電荷移動, 同上.

- [80] 石上啓介, 芝田悟朗, 関剛斎, 坂本祥哉, 野中洋亮, 鈴木基寛, 高梨弘毅, 藤森淳: $L1_0$ オーダーを制御した FePt 薄膜の $\text{Pt } L_{2,3}$ 吸収端 X 線磁気円二色性, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会 (2014 年 3 月 11-14 日, 東海大湘南キャンパス)
- [81] S. Sakamoto, Y. K. Wakabayashi, Y. Takeda, S-i. Fujimori, H. Suzuki, H. Yamagami, M. Tanaka, S. Ohya, and A. Fujimori: Electronic structure of ferromagnetic semiconductor $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ studied by soft x-ray angle-resolved photoemission spectroscopy, 同上.
- [82] Y. K. Wakabayashi, S. Sakamoto, K. Ishigami, Y. Takahashi, Y. Takeda, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, M. Tanaka, and S. Ohya: Room-temperature local ferromagnetism and its nanoscale domain growth in the ferromagnetic semiconductor $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$, 同上.
- [83] 北村未歩, 堀場弘司, 小林正起, 坂井延寿, 簗原誠人, 三橋太一, 藤森淳, 藤岡洋, 組頭広志: ペロブスカイト酸化物 $\text{LaMnO}_3/\text{LaNiO}_3$ ヘテロ界面における電荷移動, 同上.
- [84] 野中洋亮, 芝田悟朗, C.-F. Chang, X. Liu, 石上啓介, 坂本祥哉, 田中新, 小出常晴, L. H. Tjeng, 藤森淳: ステップ基板上に作製したマグネタイト Fe_3O_4 薄膜の磁場方向依存 X 線磁気円二色性, 日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21-24 日, 早稲田大学).
- [85] 堀尾眞史, 片桐隆雄, 並木宏允, 岡崎浩三, 鈴木博人, 徐健, 輿石佳佑, 石上啓介, 芝田悟朗, 高橋文雄, 坂本祥哉, 野中洋亮, 小野寛太, 堀場弘司, 小林正起, 坂井延寿, 小出常晴, 組頭広志, 笹川崇男, 藤森淳: 強磁性と超伝導が共存する $\text{Sr}_2\text{VFeAsO}_{3-\delta}$ の ARPES と内殻分光 II, 同上.
- [86] 鈴木博人, G. Q. Zhao, K. Zhao, B. J. Chen, 堀尾眞史, 輿石佳佑, 徐健, 小林正起, 簗原誠人, 坂井延寿, 堀場弘司, 組頭広志, Bo Gu, 前川禎通, Y. J. Uemura, C.Q. Jin, 藤森淳: 新規希薄磁性半導体 $\text{Ba}_{1-y}\text{K}_y(\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{As}_2$ の軟 X 線角度分解光電子分光, 同上.
- [87] 輿石佳佑, 小林達也, 鈴木博人, 堀尾眞史, 徐健, 堀場弘司, 小林正起, 簗原誠人, 組頭広志, 宮坂茂樹, 田島節子, 藤森淳: 軟 X 線共鳴光電子分光による $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{As}_2$ 中の $\text{Cr } 3d$ 電子状態の観測, 同上.
- [88] 芝田悟朗, 和達大樹, 田久保耕, 高橋文雄, Ronny Sutarto, Feizhou He, 吉松公平, 組頭広志, 小出常晴, 藤森淳: 共鳴軟 X 線散乱による強磁性金属 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 薄膜の深さ方向電子状態解析, 同上.
- [89] J. Xu, K. Okazaki, H. Suzuki, M. Horio, L. Liu, S. Ideta, T. Yoshida, M. Hashimoto, D. H. Lu, Z.-X. Shen, K. Ono, H. Kumigashira, M. Nakajima, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, S. Kasahara, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, S. Uchida, A. Fujimori: Superconducting gap in the iron-based superconductor $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, 同上.
- [90] 山本紳太郎, 下中大也, 吉田鉄平, 藤森淳 A, 佐藤仁 B, 宮坂茂樹, 田島節子, S. Biremann: 強相関物質 SrVO_3 の正・逆共鳴光電子分光, 同上.
- [91] Y. Krockenberger, M. Horio, H. Irie, and H. Yamamoto: Beyond annealing: Electronic correlations in as-grown Pr_2CuO_4 , 同上.
- [92] 三橋太一, 簗原誠人, 北村未歩, 坂井延寿, 堀場弘司, 吉松公平, 藤森淳, 小林正起, 組頭広志: ペロブスカイト型遷移金属酸化物 $\text{SrVO}_3(110)$ 薄膜の偏光依存 ARPES, 同上.
- [93] 小林正起, 吉松公平, 坂井延寿, 北村未歩, 堀場弘司, 藤森淳, 組頭広志: 強相関金属酸化物 SrVO_3 薄膜における金属絶縁体転移近傍の振る舞い, 同上.
- [94] 大槻太毅, 高橋雅也, 澤田慶, 溝川貴司, N. L. Saini, 堀尾眞史, 藤森淳, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 下舜生, 工藤一貴, 野原実: 角度分解光電子分光による IrTe_2 の低温構造, 同上.
- [95] 藤森伸一, 小島雅明, 竹田幸治, 岡根哲夫, 斎藤祐児, 藤森淳, 山上浩志, 松本裕司, 山本悦嗣, 立岩尚之, 芳賀芳範: 角度分解光電子分光による ThRu_2Si_2 の電子状態, 同上.

セミナー他

- [96] A. Fujimori: Electron correlation effects in SrVO_3 in bulk and thin film forms, Collège de France (June 20, 2014)

4.2 長谷川研究室

4 月から高山あかりが助教として、また、修士課程 1 年生として石原大嵩が新しくメンバーに加わった。6 月には助教の平原徹が東京工業大学准教授として転出した。12 月には助教として秋山了太が着任した。3 月には久保高幸が修士課程を修了して企業に就職していった。

当研究室では、表面物性、特に「表面輸送」をキーワードにして実験的研究を行っている。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超薄膜を利用し、それら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、3次元バルク結晶の電子状態では見られない新しい現象を見出し、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、ビスマス系合金結晶に表れるトポロジカル表面状態やグラフェン、シリセン、モノレイヤー超伝導などである。このようなナノマテリアルの原子配列構造や成長の制御・解析、表面電子状態、電子輸送特性、スピン状態、電子励起などを、様々な実験手法を用いて多角的に研究を行っている。また、これらの研究のために、新しい手法・装置の開発も並行して行っている。以下に、本年度の具体的な成果を述べる。

4.2.1 表面電子・スピン輸送

スピン分裂した表面状態での超伝導の検出

近年、Si 基板上の金属吸着表面構造で Rashba 効果によるスピン分裂、及び超伝導を示す系が各々発見されたが、その両者を併せ持つ系はまだ見つからない。最近、Tl (1 原子層) と Pb (1/3 原子層) の両者を Si 表面に吸着させた Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Tl, Pb) 構造において Rashba 分裂した大きな Fermi 面が観測された。我々はこの表面構造を超高真空中で準備して *in situ* で 4 端子電気伝導測定を行った。その結果、極低温まで金属的な電気伝導を保ち、2.2 K 程度で超伝導転移を示した。転移温度よりも高温から抵抗の減少が始まっており、2 次元超伝導に特徴的な振幅揺らぎを取り入れた理論式 (Aslamazov-Larkin-Maki-Thompson 補正) で fitting できた。

一方、2 次元超伝導体は T_C 以下で Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) 転移を示すことが知られており、 I - V 特性にその兆候が現れる。そこで T_C 近傍で I - V 特性の測定を行うと、2.2 K 付近で $V \propto I$ から $V \propto I^3$ への飛びが見られた。この事実から、この系は、Si 基板上に形成された原子一層の化合物における 2 次元超伝導体であるといえる。このように、この表面が Rashba 効果と超伝導を併せ持つことが明らかとなった。今後はそのスピン輸送特性や空間反転対称性が超伝導に及ぼしている影響を調べる予定である。(ロシア科学アカデミー・オートメーションプロセス制御研究所との共同研究)

スピンホール効果の検出

トポロジカル絶縁体の表面状態において、電場の印加によって流れる電流の方向と垂直方向にスピン流が流れる「スピンホール効果 (SHE)」が発現する可能性がある。我々は、トポロジカル絶縁体である Bi₂Se₃ (111) の薄膜を Si(111) 基板上に成長させ、*in situ* で集束イオンビーム (FIB) で H 字型の構造に微細加工し、さらに *in situ* で 4 探針プローブで電気伝導測定を行った。まず H 字構造の例えば左側の縦棒に相当する部分に電流を流すと、SHE によりスピン流が H の横棒を流れる。そのスピン流が右側の縦棒に到達し、そこで SHE の逆過程 (逆スピンホール効果) によって電流に変換される。実際に測定を行ったところ、右側の縦棒で有限の電圧が観測された。電圧には SHE に由来するもののほかに、オーム則に従う伝導による電圧降下も含まれるはずで、両者を分離するには工夫が要る。SHE の大きさであるスピンホール抵抗率 (SHE によって生じた電圧を流した電流で割った値) は、通常のオーム則の抵抗率に比例する場合、あるいはその 2 乗に比例する場合、または定数である場合など様々なモデルが考えられる。よって、測定された電圧が、試料の抵抗率の違いに対してどのように変化するか調べれば、SHE の成分が非線形の応答として観測される可能性がある。試料の抵抗率を変える方法には不純物の添加なども考えられるが、今回は温度を変えながら電圧を

測定した。その結果、オーム則の抵抗では説明できない成分が見いだされた。今後この成分が膜厚を変えることでどのように変化するかなど、系統的に調べて表面状態での SHE の確認を得る。

Nickel Bis(dithiolene) Complex π -Nanosheet の電気伝導測定

この物質は「カゴメ格子」状の単分子層物質であり、2 次元トポロジカル絶縁体の有機物シートとして理論的に予想されているが、本測定によって極めて高い電気伝導度を持つことが示された。従来は、多数のフレークをペレット状に固めた試料で電気伝導度を測定していたが、本研究では、4 探針 STM 装置を用いて、単一フレークに 4 本の探針を接触させて電気伝導度を測定した。その結果、従来の値より一桁以上高いことが判明した。もし、この物質が 2 次元トポロジカル有機絶縁体であるのなら、この高い電気伝導度はエッジ伝導に起因していると思われる。さらに酸化還元によって値が変わることもわかった。酸化還元反応によって物質をトポロジカル物質からトリビアル物質に転移させている可能性がある。(化学専攻との共同研究)

ラシュバ効果による光誘起電圧の円二色性の検出

スピン偏極したバンドを持つ物質では、円偏光によって電子がスピン選択的に励起されて光電流に円二色性が現れることが予想され、トポロジカル絶縁体表面や量子井戸において実際に観測されている。我々は、同じくスピン偏極した表面電子状態を持つラシュバ系で光誘起電圧の円偏光依存性とその発現機構を明らかにするため、Si(111) 基板上に成長させた Bi(111) 超薄膜および Ag(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Bi 超薄膜を用いて測定を行った。実験ではレーザーの直線偏光を $\lambda/4$ 板によって円偏光に変換して試料に照射し、誘起される電圧の変化を測定した。その結果、左右円偏光で光誘起電圧に差が現れること、光誘起電圧は入射角に依存していること、およびその電圧差はレーザーの波長に依存していることが明らかになった。特に Bi/Ag 超薄膜では短波長で電圧の円二色性が顕著に大きくなった。しかし円二色性が観測されないと思われていた Si(111)-7 \times 7 清浄表面においても若干の電圧差が見られることから、今後はロックイン検出を導入することで測定精度を高め、波長依存性を詳細に検証することで光誘起電圧の円二色性のメカニズムを探っていく。

Bi 超薄膜における磁気輸送測定

Bi はバルク状態では半金属であるが、その (111) 面における表面状態では金属的なフェルミ面を持ち、電気伝導に寄与していることが超高真空中での *in situ* 電気伝導測定で判明している。しかし、表面状態とバルク状態との間でどのような相互作用をしている

かは不明であった。そこで、Bi 膜の膜厚を変えてバルクの寄与の大きさを変えながら、主に弱反局在に着目して電気伝導を測定した。試料を 0.8 K まで冷却し、0~7 T の範囲で電気抵抗の磁場依存性を *in situ* で測定した。その結果、6~16 BL において磁気抵抗の磁場依存性がほとんど膜厚に依存せず、この膜厚領域では表面状態の伝導が支配的であると推測される。しかし、反弱局在を解析して得られた位相緩和長の結果は、膜厚に対してほぼ線形な依存性を示し、バルクが伝導に関与していることを示唆する。これらの一見矛盾する結果は、Bi 超薄膜においては表面状態とバルク状態が結合し、コヒーレントな単一の伝導チャンネルが形成されているためと考えられる。今後は、Bi のフェルミ準位を操作して測定を行っていく予定である。

Si(110)-2 × 5-Au 表面の 1 次元伝導の測定

Si(110)2×5-Au 表面では、Si 基板上に金原子が一定方向に並んで原子鎖が一定間隔で多数整列し、擬 1 次元金属的な電子状態を持つことが知られている。他の擬 1 次元金属表面系と比べると Au 原子鎖間の相互作用が弱いので、1 次元性が強く表れることが期待される。そこでこの表面を 4 探針法によって超高真空中 *in situ* で電気伝導測定を行った。その結果、4 本の探針を等間隔で直線上に配置して測定する直線 4 端子法において、(1) 探針間隔が 10 μm より狭い場合には抵抗値が探針間隔によって大きく変化した。(2) 端子の配置が原子鎖と平行の場合と垂直の場合で異なる探針間隔依存性を示した。(3) 電流プローブと電圧プローブの組み合わせを入れ替えると、その抵抗値の比が探針間隔に依存して変化した。これらの結果は、原子鎖方向とそれに直角方向で伝導度の異なる異方的 2 次元系とはみなせないことを示しており、従来の擬 1 次元表面構造と著しく異なる。この結果は、電流分布が広がらずに 1 次元的に流れることで解釈できると予想されるので、シミュレーションとの定量的な比較を行う。

4.2.2 表面ナノ構造

Bi 超薄膜の半金属・半導体転移の検出

Bi バルク結晶は、価電子帯上端と伝導体下端のエネルギー位置がほとんど一致している半金属（ゼロギャップ半導体）であるが、十分に薄い膜状になると、膜面垂直方向にキャリアが閉じ込められるので、その方向のエネルギーが量子化されて量子井戸状態となる。その結果、価電子帯の上端が少し下がり、伝導帯の下端が少し上がるので、バンドギャップが開いて半導体となることが予想される。しかし、この「半金属・半導体転移」の確証は長い間得られていなかった。それは、Bi は非常に強い金属的な表面電子状態を持ち、バルク電子状態がそれによって隠されてしまうためであった。今回、シンクロトロン光電子分光法によって、励起光のエネルギー依存性や偏

光依存性を詳しく調べることによって、360 原子層厚の薄膜において半導体状態になっていることを確認し、上記の転移を観測することに成功した。しかし、興味深いことに、さらに薄い 60 原子層厚になると電子状態は再び（半）金属の状態にもどった。これは表面電子状態とバルク状態との間の電荷移動によって電荷中性点が変わったためと解釈された。（東京工業大学および分子科学研究所との共同研究）

トポロジカル絶縁体の近接磁場効果の検出

トポロジカル絶縁体 Bi₂Se₃(111) 表面上に反強磁性体 MnSe(111) を成長させると、その磁場の影響によって時間反転対称性が破られ、ディラックコーンのディラック点にエネルギーギャップが開くことが予想されている。そこで、角度分解光電子分光測定を行った結果、Bi₂Se₃ 上の MnSe 層数が増えるにつれてバルクバンドおよび表面バンドに電子ドープされていくこと、さらに 2 BL 成長した状態でディラック点にギャップが開くことを観測した。また、この系でマイクロ 4 端子電気伝導測定を行った結果、MnSe の層数が増えるにつれて抵抗率が増加した。これは上述の電子ドープから期待される変化と逆である。また、低温領域において、抵抗値に温度ヒステリシスが現れることを観測した。これらは MnSe の磁性特性と関連していると思われる。今後、さらに詳細な実験を行い、ARPES 測定との比較などから、これらの物性発現の起源について議論する予定である。（東京工業大学および分子科学研究所との共同研究）

4.2.3 新しい装置・手法の開発

低温強磁場で動作する走査トンネルポテンシオメトリ装置の開発

昨年度に引き続き、超高真空・極低温・強磁場下で動作する走査トンネルポテンシオメトリ (STP) 装置の開発及び STP 測定を行った。STP は走査トンネル顕微鏡 (STM) から派生した実験手法であり、試料表面の構造と電位分布を同時にイメージングすることができるので、ミクロな構造に対応した電気伝導特性を視覚的に捉えられる。本年度は、Si 基板上にエピタキシャル成長させた Bi(111) 薄膜（厚さ~9 BL）について、5 K での STP 測定に成功した。その結果、5 K ではステップ近傍のポテンシャル像において、常温では見られなかった振動構造が観測された。この振動構造の波数は、Bi(111) 表面状態においてスピンを保存する散乱ベクトルの波数と同程度であった。一方、走査トンネル分光法 (STS) によって電子状態密度の変調（電子定在波）が同じ波数の振動構造として観測されたが、ステップ近傍での位相シフトがポテンシャル像の振動構造と異なっていた。来年度は試料表面上で厳密に同じ場所で STP/STS 測定を行い、ポテンシャル像での振動構造の起源を明らかにしていきたい。（東京工業大学との共同研究）

FIB-4 探針 STM 装置の改造

集束イオンビーム (FIB) 装置と 4 探針 STM 装置を組み合わせた FIB-STM を用いた多探針 STM 測定、特にトンネル接触による電子輸送の測定を行うべく準備を行っている。今年度は以前から問題になっていた走査電子顕微鏡 (SEM) の分解能の向上、および低温での動作の安定化を図り、動作確認を行った。2 探針同時のトンネル接触による電気伝導測定には、分解能の高い SEM および極低温での安定動作が必要であるが、SEM は環境由来の擾乱磁場によって分解能が悪化しており、また極低温での 2 次電子検出効率の低下が問題であった。そこで、超高真空槽中にパーマロイ製の磁気シールドを設置し、磁場遮蔽の対策を行った結果、環境磁場の影響は 100 分の 1 以下に抑えることができた。また同時に 2 次電子検出効率を上げるために内部熱シールドの内側に 2 次電子検出器を搭載し、極低温まで安定して SEM 観察できる改造を行った。これらにより室温から極低温の範囲で分解能 30 nm 程度の分解能が安定して得られるようになった。並行して未完成であった制御ソフトの製作にも着手し、直接コンタクトによる電気伝導測定が安定して行える状態になった。トンネル接触を安定して得ることはまだできていない。これには機械的安定性および制御ソフトの完成が必要であるため、来年度にこれらの対策を行う。

Bi 超薄膜におけるスピン依存イオン散乱の検出

スピン偏極イオン散乱分光 (SP-ISS) とは、スピン偏極した He⁺ ビームを試料表面に照射して表面でのスピン偏極度を測定する手法であり、強磁性体の最表面磁性の研究に用いられてきた。しかし、近年、非磁性体試料でもスピン非対称性が観測された。その起源はスピン軌道相互作用 (SOC) と標的原子の中心力ポテンシャルの効果と考えられるが、詳細は未解明である。本研究では強い SOC を持つ Bi に着目し、Si(111) 基板上的 Bi(111) 薄膜を成長させ、それに対し *in situ* で SP-ISS を行った。その結果、Bi におけるスピン非対称性はイオンの入射方向には依存せず、散乱角、入射エネルギーに強く依存した。散乱角依存性は SOC モデルと一致する一方、入射エネルギー依存性は単純な SOC モデルからの逸脱が見られた。これらの結果は、衝突の際の He⁺ と標的原子間の仮想的な電荷移動がスピン依存散乱に寄与することを示唆している。

Bi 表面では、Rashba 効果によってスピン偏極電流の発生が期待されている。昨年度には、Bi 表面に電流を流しながら SP-ISS 測定を行い、電流に依存するスピン偏極度の変化を得たが、その原因がスピン偏極電流であるのか、上述のスピン依存散乱の効果であるかは未解決であった。今年度得られた知見に基づいて解析と測定条件の見直しを行い、スピン偏極電流を抽出することが今後の課題である。(物質・材料研究機構との共同研究)

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われました。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 「トポロジカル表面およびそのエッジ状態による電子・スピン輸送の研究」(代表 長谷川修司)
- ・日本学術振興会 科研費 若手研究 (A) 「スピン偏極走査ポテンシオメトリ装置の開発と微細加工した表面ラッシュバ系のスピン伝導」(代表 平原徹)
- ・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)

<受賞等>

- [1] 高山あかり：第 7 回井上リサーチアワード (公益財団法人井上科学振興財団, 2015 年 2 月)。
- [2] 高山あかり：第 9 回日本物理学会若手奨励賞 (一般社団法人日本物理学会, 2015 年 3 月)。
- [3] 一ノ倉聖：Travel Award at The 7th International Symposium on Surface Science (ISSS-7)(公益社団法人日本表面科学会, 2014 年 11 月)。
- [4] 高山あかり：平成 26 年度講演奨励賞 (新進研究者部門) (公益社団法人日本表面科学会, 2014 年 11 月)。
- [5] 一ノ倉聖：平成 26 年度講演奨励賞 (スチューデント部門) (公益社団法人日本表面科学会, 2014 年 11 月)。

<報文>

(原著論文)

- [6] M. Aitani, T. Hirahara, S. Ichinokura, M. Hanaduka, D. Y. Shin, S. Hasegawa: *In situ Magnetotransport Measurements of Ultrathin Bi films: Evidence for a Surface-Bulk Coherent Transport*, Phys. Rev. Lett. **113**, 206802 (Nov, 2014).
- [7] T. Shirasawa, M. Sugiki, T. Hirahara, M. Aitani, T. Shirai, S. Hasegawa, and T. Takahashi: *Structure and transport properties of Cu doped Bi₂Se₃ films*, Phys. Rev. B **89**, 195311 (May, 2014).
- [8] T. Shirai, T. Shirasawa, T. Hirahara, N. Fukui, T. Takahashi, and S. Hasegawa: *Structure Determination of Multilayer Silicene Grown on Ag(111) films by Electron Diffraction: Evidence for Ag Segregation at the Surface*, Phys. Rev. B **89**, 241403(R) (Jun, 2014).
- [9] N. Fukui, R. Hobara, T. Hirahara, Y. Miyatake, H. Mizuno, T. Sasaki, T. Nagamura, and S. Hasegawa: *In-situ Micro-fabrication and Measurements of Bi₂Se₃ Ultrathin Films in a Multi-chamber System having Focus Ion Beam, Molecular Beam Epitaxy, and Four-Tip Scanning Tunneling Microscope*, e-J. Surf. Sci. Nanotech. **12**, 423 (Oct, 2014).
- [10] R. Sakamoto, T. Kambe, T. Kusamoto, T. Pal, N. Fukui, T. Shimojima, Z. Wang, T. Hirahara, K. Ishizaka, S. Hasegawa, F. Liu, and H. Nishihara: *Redox control and high conductivity of nickel bis(dithiolene) complex π -nanosheet, a candidate of the first organic topological insulator*, J. Am. Chem. Soc. **136** (41), 14357 (Sep, 2014).

- [11] S. Ichinokura, T. Hirahara, S. Hasegawa, O. Sakai and T.T. Suzuki: *Electron-spin dependent $^4\text{He}^+$ ion scattering on Bi surfaces*, Radiation Effects and Defects in Solids **169** (12), 1003 (Nov, 2014).
- [12] T.T. Suzuki, O. Sakai, S. Ichinokura, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Target element dependent spin-orbit coupling in polarized $^4\text{He}^+$ ion scattering*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms (Dec, 2014) DOI:10.1016/j.nimb.2014.11.055.
- [13] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, and T. Takahashi: *Rashba effect of bismuth thin film on silicon studied by spin-resolved ARPES*, Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena (Nov, 2014 online).
- [14] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, T. Oguchi, and T. Takahashi, *One-Dimensional Edge States with Giant Spin Splitting in a Bismuth Thin Film*, Phys. Rev. Lett. **114**, 066402 (Feb, 2015).
- (国内雑誌)
- [15] 長谷川修司: 表面での電子・スピン輸送研究の最近の展開, 表面科学 **36**, 112 (Mar, 2015).
- (その他)
- [16] 長谷川修司: ローラー先生の思い出, 表面科学 **35** (10), 550 (Oct, 2014).
- [17] 長谷川修司: 物理チャレンジ 10 周年と 2022 年国際物理オリンピック日本大会, 大学の物理教育 **20**, S57 (Nov, 2014).
- [18] 長谷川修司: 編集後記, 日本物理学会誌 **69** (11), 802 (Nov, 2014).
- (学位論文)
- [19] 中村友謙: ビスマス薄膜における走査トンネルポテンシオメトリ測定 (修士論文).
- [20] 久保高幸: トポロジカル絶縁体/磁性薄膜ヘテロ接合の電子構造と輸送特性 (修士論文).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [21] S. Hasegawa, *Spin-split surface states and electronic/spin transport therein*, The 11th Surface Nanoscience Workshop, 2015 年 2 月 14 日, PyeongChang (Republic of Korea).
- [22] S. Hasegawa, *Spins Transport at Crystal Surfaces*, The 2nd International Symposium on the Functionality of Organized Nanostructures (FON '14), 2014 年 11 月 28 日, National Museum of Emerging Science and Innovation (Miraikan), Tokyo.
- [23] S. Hasegawa, *Spins at Crystal Surfaces*, LMU-Todai Cooperation in Physics Workshop, 2014 年 10 月 27 日, Ludwig-Maximilians-Universitat Munchen (Germany).
- [24] A. Takayama, *Edge state of Bi thin film studied by spin-resolved ARPES*, Horn 教授を囲む通研共プロ研究会, 2014 年 6 月 11 日, 東北大学通研 (仙台).
- 一般講演
- [25] R. Akiyama, *Two-dimensional weak antilocalization in topological crystalline insulator SnTe thin films*, The Fudan-Todai-Yonsei Joint Workshop 2015, 2015 年 1 月 31 日, 延世大学 (ソウル, 韓国).
- [26] A. Takayama, *One-dimensional edge states with giant spin splitting in bismuth thin film*, The Fudan-Todai-Yonsei Joint Workshop 2015 2015 年 1 月 31 日, 延世大学 (ソウル, 韓国).
- [27] T. Shirai, T. Shirasawa, T. Hirahara, N. Fukui, T. Takahashi, and S. Hasegawa, *Silicene, is it a cousin of Graphene?*, The Fudan-Todai-Yonsei Joint Workshop 2015, 2015 年 1 月 31 日, 延世大学 (ソウル, 韓国).
- [28] T. Shirai, T. Shirasawa, T. Hirahara, N. Fukui, T. Takahashi, and S. Hasegawa, *Silicene, is it a cousin of Graphene?*, Symposium on Surface and Nano Sciences 2015, 2015 年 1 月 16 日, Furano (富良野、北海道).
- [29] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, T. Oguchi, and T. Takahashi, *Electron structure of Bi edge state studied by spin-resolved ARPES*, Symposium on Surface and Nano Sciences 2015, 2015 年 1 月 17 日, Furano (富良野、北海道).
- [30] T. Tono, N. Fukui, T. Hirahara, R. Hobara, S. Hasegawa, *Spins Current at Surfaces*, Asia-Pacific Symposium on Solid Surfaces, 2014 年 9 月 30 日, Far-Eastern Federal University, Vladivostok (Russia).
- [31] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, T. Oguchi, and T. Takahashi, *1D Rashba effect for edge state of bismuth thin film studied by spin- and angle-resolved photoemission spectroscopy*, The 2nd International Symposium on the Functionality of Organized Nanostructures (FON'14), 2014 年 11 月 27 日 (Tokyo, Japan).
- [32] S. Hasegawa, T. Tono, N. Fukui, T. Hirahara, R. Hobara, A. Takayama, *Spin Current at Surfaces of Strong Spin-Orbit Coupling Materials*, Pacific Rim Symposium on Surfaces, Coatings & Interfaces (PacSurf 2014), 2014 年 12 月 8 日, Hapuna Beach Prince Hotel, Hawaii (USA).
- **The 7th International Symposium on Surface Science (ISSS-7)**, 2014 年 11 月 3-6 日 (くにびきメッセ, 松江)

- [33] T. Shirasawa, M. Sugiki, T. Hirahara, M. Aitani, T. Shirai, S. Hasegawa and T. Takahashi: *Structure and Transport Properties of Cu-Doped Bi₂Se₃ Films*.
- [34] T. Shirai, T. Shirasawa, T. Hirahara, N. Fukui, T. Takahashi and S. Hasegawa: *Structure determination of multilayer silicene grown on Ag(111) films by electron diffraction: Evidence for Ag segregation at the surface*.
- [35] S. Ichinokura, T. Hirahara, S. Hasegawa, O. Sakai and T.T. Suzuki: *Electron-spin dependent ⁴He⁺ ion scattering on epitaxially-grown Bi surfaces*.
- [36] N. Fukui, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *The electric conduction anisotropy of topological insulator thin films, Bi₂Te₃ and Bi₂Se₃ grown on a vicinal substrate*.
- [37] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, T. Oguchi and T. Takahashi: *Edge state of Bi thin film studied by spin-resolved ARPES*.
- (国内会議)
- 招待講演
- [38] 高山あかり: (若手奨励賞) スピン分解光電子分光による V 族半金属薄膜におけるラッシュバ効果の研究, 日本物理学会 第 70 回年次大会 早稲田大学 (早稲田キャンパス) 2015 年 3 月 23 日.
- [39] 高山あかり: スピン分解光電子分光による Bi 薄膜の電子状態の研究, 育志賞研究発表会, 2014 年 8 月 20 日 (東京工業大学東工大蔵前会館, 東京).
- [40] 長谷川修司: 走査プローブ顕微鏡の現在、過去、未来一, 日本表面科学会 実用顕微評価技術セミナー 2014, 東京大学 本郷キャンパス, 2014 年 6 月 6 日.
- [41] 長谷川修司: 走査プローブ顕微鏡 —ピコスケールで物質の表面を覗る、計る、加工する—, 日本顕微鏡学会 第 24 回電子顕微鏡大学, 東京大学 本郷キャンパス, 2014 年 6 月 13 日 (金) .
- 一般講演
- [42] 福居直哉, 保原麗, 高山あかり, 平原徹, 長谷川修司, 表面での原子ステップを横切る電気伝導, 平成 26 年度 東北大電気通信研究所プロジェクト研究会「非平衡スピン/ゆらぎの精緻な制御と観測による新規ナノデバイスの開拓研究」2014 年 11 月 13 日, ベルサンピアみやぎ泉 (宮城) .
- [43] 高山あかり: 高分解能 4 探針 STM による局所的電子・スピン輸送特性の測定, 新学術領域研究分子アーキテクトニクス 第 3 回領域全体会議 2014 年 6 月 13 日 (金)、天童温泉「滝の湯」(山形県天童市) .
- 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21-24 日 (早稲田大学, 東京)
- [44] 並木雅俊, 田中忠芳, 鎌山茂徳, 中屋敷勉, 近藤一史, 長谷川修司, 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.
- [45] 石原大嵩, 福居直哉, 花塚真大, 保原麗, 高山あかり, 平原徹, 長谷川修司: Bi および Bi/Ag 薄膜のラッシュバ効果による光誘起電圧の円二色性.
- [46] 久保高幸, 一ノ倉聖, 保原麗, 高山あかり, 長谷川修司: MnSe/Bi₂Se₃ 薄膜における磁性/トポロジカル絶縁体界面の輸送特性.
- [47] 秋山了太, 藤澤和輝, 山口智也, 黒田真司: トポロジカル結晶絶縁体 SnTe 薄膜における 2 次元表面電気伝導測定.
- [48] 平原徹, 久保高幸, Andrei Mateckij, 高山あかり, 松波雅治, 羽尻哲也, 田中清尚, 木村真一, 長谷川修司: トポロジカル絶縁体/磁性絶縁体超薄膜ヘテロ構造の電子状態.
- [49] 中村友謙, 保原麗, 高山あかり, 長谷川修司, 平原徹: 低温強磁場下における Bi 超薄膜の走査トンネルポテンシオメトリ測定.
- [50] 東野剛之, 平原徹, 長谷川修司: Si(110)2 × 5-Au における擬 1 次元伝導の測定.
- 第 6 回 低温センター研究交流会, 2015 年 3 月 4 日 (小柴ホール, 東京大学)
- [51] 中村友謙, 保原麗, 長谷川修司, 平原徹: 低温における Bi 超薄膜の走査トンネルポテンシオメトリ測定.
- [52] 花塚真大, 相谷昌紀, 平原徹, 一ノ倉聖, 申東潤, 長谷川修司: ビスマス超薄膜の磁気輸送測定.
- [53] 久保高幸, 福居直哉, 一ノ倉聖, 保原麗, 高山あかり, 長谷川修司: MnSe/Bi₂Se₃ 薄膜における磁性 /トポロジカル絶縁体界面の輸送特性.
- 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 7-10 日 (中部大学, 愛知)
- [54] 長谷川修司, 原田勲, 近藤泰洋, 江尻有郷, 興治文字, 近藤一史, 並木雅俊, 増子寛, 光岡薫, 味野道信: 物理チャレンジ 2014 報告: I プレチャレンジ
- [55] 深津晋, 一宮彪彦, 井通暁, 右近修治, 江尻有郷, 大嶋孝吉, 大塚洋一, 岸澤眞一, 毛塚博史, 小牧研一郎, 近藤泰洋, 下田正, 真梶克彦, 鈴木功, 瀬川勇三郎, 武士敬一, 遠山潤志, 長谷川修司, 味野道信: 物理チャレンジ 2014 報告: IV 第 2 チャレンジ実験問題.
- [56] 中村友謙, 保原麗, 長谷川修司, 平原徹: Bi 超薄膜の走査トンネルポテンシオメトリ測定: エッジでのポテンシャル異常.
- [57] 鈴木拓, 酒井治, 一ノ倉聖, 平原徹, 長谷川修司: ヘリウムイオン散乱におけるスピン軌道相互作用の標的要素依存性.
- [58] 長谷川修司: はじめに—金属吸着半導体表面から何を学んだか—.
- [59] 伊藤俊, 平原徹, 申東潤, 一ノ倉聖, 松田巖, 長谷川修司: Si(111)-√7 × √3-In の 2 つの超構造 hex/rect の STM 観察.
- [60] 福居直哉, 平原徹, 長谷川修司: 微斜面 Bi₂Te₃, Bi₂Se₃ 薄膜の異方的電気伝導.

- [61] 一ノ倉聖, 酒井治, 長谷川修司, 平原徹, 鈴木拓: Bi 表面におけるスピン偏極イオン散乱分光.
- [62] 白澤徹郎, 杉木祐人, 平原徹, 長谷川修司, 高橋敏男: Cu ドープ Bi_2Se_3 薄膜の構造と電子輸送特性.
- **日本表面科学会 第34回学術講演会**, 2014年11月6-8日 (くにびきメッセ, 松江)
- [63] 福居直哉, 平原徹, 長谷川修司: 微斜面トポロジカル絶縁体薄膜の電気伝導異方性.
- [64] 一ノ倉聖, 平原徹, 酒井治, 長谷川修司, 鈴木拓: Bi 表面におけるスピン依存イオン散乱.
- [65] 高山あかり, 佐藤宇史, 相馬清吾, 小口多美夫, 高橋隆: Bi 薄膜におけるエッジ構造のスピン分解 ARPES. (セミナー)
- [66] 長谷川修司: 韓流、自己流、スピン流, 東京大学理学部物理教室ランチトーク, 2014年5月2日(金)、東京大学(本郷).
- [67] 高山あかり: *High-Resolution Spin-Resolved Photoemission Spectrometer and the Rashba Effect in Bismuth Thin Films*, 東京大学理学部物理教室ランチトーク, 2014年10月31日(金)、東京大学(本郷). (講義等)
- [68] 長谷川修司, 溝川貴: 現代物理実験学 I, 2014年度夏学期(本郷).
- [69] 長谷川修司, 高山あかり, 一ノ倉聖(TA), 花塚真大(TA), 福居直哉(TA), 石原大嵩(TA): 物理学実験 I (3年生) 電子回折, 2014年度冬学期(本郷).
- [70] 長谷川修司: ナノサイエンスとナノテクノロジー, 東京大学エグゼクティブ・マネジメント・プログラム(東大EMP), 2014年6月14日および2015年1月24日, 東京大学伊藤国際ホール(本郷). (アウトリーチ)
- [71] 長谷川修司: 得意技で田舎から世界にはばたけ, みずほのフェスティバル実行委員会・瑞穂野地区PTA連絡協議会 平成26年度教育講演会, 2014年11月22日, 瑞穂野地区市民センター(宇都宮).
- [72] 長谷川修司: ナノワールドの探索, 「科学先取りグローバルキャンパス岡山」キックオフシンポジウム, 2014年8月23日, 岡山大学50周年記念ホール(岡山).
- [73] 高山あかり: 見えないものを見る—異常感知能力を鍛えて電子の世界を覗く—, 東大理学部 高校生のための夏休み講座2014, 2014年8月21日(小柴ホール, 東京大学).
- [74] 長谷川修司: 実験課題レポートの書き方、大気圧測定実験、プランク定数測定実験, 静岡県教育委員会主催「オリンピックチャレンジ」, 2014年12月24日, 静岡県総合教育センター(掛川).
- [75] 長谷川修司, 近藤泰洋: 実験課題レポートの書き方と重力加速度/ホール効果の測定実験, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2014年12月6日, 福島高校(福島).
- [76] 長谷川修司: 実験・実習: LEDを光らせよう, 平成26年度女子中高生夏の学校2014, 2014年8月8日, 国立女性教育会館(埼玉).
- [77] 長谷川修司, 近藤泰洋: 物理チャレンジ紹介と実験課題レポートの書き方, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2014年6月8日, 千葉市科学館(千葉).
- [78] 長谷川修司, 北原和夫, 田中忠芳: 実験課題レポートの書き方とプランク定数の測定実験 KITサイエンスシティプロジェクト公開講演会(物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ) 2014年4月26日, 金沢工業大学(石川).
- [79] 長谷川修司: 実験データの解析, 物理オリンピック日本委員会 IPHO2015 日本代表選手候補者春合宿, 2015年3月26日(東京工科大学, 八王子).
- [80] 長谷川修司, 並木雅俊: 実験レポートの書き方および重力加速度測定実験, 物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2015年3月14日(栃木県立宇都宮高等学校, 栃木).
- [81] 模擬授業および研究室見学 茨城県立土浦第一高等学校, 2014年8月4日: 兵庫県立姫路西高等学校, 2014年8月5日: 福岡県立筑紫丘高等学校, 2014年8月5日: 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」2014年8月7日: 北海道札幌西高等学校, 2014年8月7日: 神奈川県立湘南高等学校, 2014年8月7日: 兵庫県立豊岡高校 2014年12月25日: シンガポール国立大/オーストラリア・ラトロープ大 2015年1月27日.

4.3 福山研究室

我々は、できるだけ純粋かつ単純な2次元物質を対象として、これまで知られていない、そして一般性のある基底状態、素励起、相転移現象を、熱雑音を取り除かれ物質固有の量子的な性質があらわになる極低温下で探索している。具体的には、量子効果が非常に強いヘリウム液体や固体(量子液体・固体)、炭素の2次元シートであるグラフェンを実験対象としている。

実験手段は、自作の核断熱消磁冷却装置(到達温度 $50 \mu\text{K}$)、超低温 (30 mK)・高磁場 (13 T)・超高真空 (10^{-8} Pa 以下) 下で作動する走査トンネル顕微鏡 (STM)、無冷媒型の希釈冷凍機(到達温度 17 mK) を中心に、比熱、NMR、ねじれ振子、走査トンネル分光 (STS)、電気伝導度測定など多彩な手法を用いている。また、本学低温センター、NTT基礎研、信州大など学内外の実験や理論グループとも共同研究を進めている。

4.3.1 2次元の量子凝縮相研究

ヘリウム (He) は最軽量の希ガス原子なので量子性が非常に強く、その多粒子系は絶対零度でも固化せず液相にとどまる(量子液体)。乱雑な熱運動が減り

熱的ド・ブロイ波長が長くなる極低温で物質が液相(あるいは気相)にとどまれば、構成粒子の量子統計性が重要になる。スピン0のボース粒子である ^4He の液体が2.2 K以下で示す超流動現象は、まさにボース統計性に特徴的なボース・アインシュタイン凝縮が具現化したものである。一方、もう一つの安定同位体である ^3He は核スピン1/2の自由度をもつフェルミ粒子なので、原子間相互作用は ^4He と全く同じながら、その液相の性質は大きく異なる。2 K付近ではフェルミ縮退を示し、それより3桁も低い2 mK以下ではじめてBCS機構により異方的クーパー対を組んで超流動状態に転移する。

液体Heを加圧固化して得られる固相でも量子効果は顕著で(量子固体)、隣接粒子が一定頻度でトンネル交換する。そのため固体 ^3He では核スピン間に交換相互作用が働き、1 mK以下で核磁性秩序が観測される。固体 ^4He の場合は、結晶の周期性を保ったまま超流動性を示す新奇な“超固体”状態の出現が期待されているが、今のところ実験的な確証はない。このように、 ^4He と ^3He あるいはその混合系は、最も単純な物質系でありながら、驚くほど多彩な量子物性を見せるので、量子多体系の重要なモデル物質である。

我々は、Heを原子スケールで平坦なグラファイト基板上に1原子層ずつ物理吸着して単原子層膜試料を作り、Heの2次元系の量子物性を調べている。ここでは、低次元化による大きな量子ゆらぎのため、3次元系では見られなかったさらにエキゾチックな基底状態や素励起そして対称性の変化が期待されている。この分野では、1980年代に2次元液体 ^4He の超流動転移の研究から、コスタリッツ・サウレス転移という物性物理学の普遍的な概念が誕生したが、いま我々の2次元固体 ^3He の研究によって、ギャップレス量子スピン液体状態という新たな磁性状態の正体が見え始めている。また、2次元液体 ^3He の超流動現象や2次元固体 ^4He の超固体現象など、量子多体系研究の新たなパラダイムを拓く意欲的な実験準備を進めている。吸着基板や下地原子層の作る周期ポテンシャルという制御可能な新たな自由度は、2次元He系の物性をより多様なものにしていく。また、吸着系の面密度は3次元系よりさらに大きく変えることができるので、1桁以上広く密度範囲の物性探索コントロールすることで、ミクロな理論的アプローチが可能な希薄極限から強相関領域まで、粒子相関を広い範囲で制御できるのも3次元系にない特徴である。

ギャップレス量子スピン液体状態の実験

グラファイト表面に吸着した単原子層固体 ^3He 試料のゼロ磁場下の核磁気比熱測定を、 $0.3 < T < 90$ mKの広い温度範囲で密度を大きく変えながら網羅的に実施している。この系は、(1) 三角格子という幾何学的フラストレーションをもつ完全な2次元系であること、(2) 量子スピン系($S = 1/2$)であること、(3) 反強磁性と強磁性の多体のリング交換相互作用($|J_P|$)が強く競合していること、などの理由から、ギャップレスの量子スピン液体状態が実現している

とされる最も有力な候補物質である。これは絶対零度でも長距離秩序をもたず、各サイトのスピン期待値もゼロにとどまる特異な非磁性基底状態で、スピン自由度の“量子液体”とも言える。永く1次元ハイゼンベルク反強磁性体特有の特異な基底状態だと理論的に考えられてきたこの状態が、現実の2次元固体 ^3He で実現している可能性を指摘したのは、我々が最初であり(1997年)、2000年以降、電子スピン系でも同様の候補物質が複数見つかるに及んで、最近の磁性研究の一つの潮流ともなっている。初期の研究では、グラファイト表面を高密度の固体 ^3He 単原子層でプレコートした上に吸着した2次元固体 ^3He 試料(以下、 $^3\text{He}/^3\text{He}/\text{gr}$)を対象としたが、今回は、重水素化水素(HD)の2分子層でプレコートした上に吸着させた系($^3\text{He}/\text{HD}/\text{HD}/\text{gr}$)を対象としていることがポイントである。この系では、最上部の ^3He がより低密度(5.25 nm^{-2})で局在するため、 $|J_P|$ が従来より1桁以上大きく、相対的により低温極限での熱力学測定が可能となった。

これまでに得られた比熱の温度依存性を図4.3.1に示す。ブロードなピークが20 mK付近に一つだけ観測されている。このピークはスピンの短距離相関発達に対応しており、 $^3\text{He}/^3\text{He}/\text{gr}$ 試料で観測されたダブルピーク構造(図中破線)とは明らかに異なる振る舞いである。さらに、ピークより低温の広い温度範囲($0.35 < T < 7$ mK)で、比熱が温度の2/3乗に比例する特異な温度依存性をもつことが分かった。比熱データから求めたエントロピー変化はほぼ $k_B \ln 2$ に等しいので、観測した比熱が純粋にスピン自由度のみを反映していることが分かる。この2/3乗則は、他のスピン液体候補物質で報告される $C \propto T^2$ とも異なり、これまで報告されたことのない特異な温度依存性である。ただし、スピノンあるいはマヨラナフェルミオンなど新奇な磁気素励起を仮定する理論予測とはよく一致する。今後、数ヶ月間の追実験を経て、その特異な磁性の全貌を明らかにしたい。

2次元固体 ^4He における超固体性の探索

2次元固体 ^3He が特異なギャップレススピン液体状態を示す同じ低密度固相域で、我々は、ボソン系の2次元固体 ^4He が超固体状態を示すと予想している。それには以下のようにいくつかの状況証拠がある。まず、我々自身を含む複数のグループによる $^4\text{He}/^4\text{He}/\text{gr}$ 試料に対するねじれ振り子実験で、 $T < 200$ mKで超流動応答(共鳴周波数の増加)が観測されている。次に、2次元固体 ^4He では、絶対零度でも安定的に存在して結晶中をトンネル運動する零点空格子点が生じられても不思議でないほどの低密度で局在することが我々の高温比熱測定から明らかになった。そして、上記のようにグラファイト表面をHD2分子層でプレコートした上に吸着した ^3He 系では非常に大きな交換相互作用が観測されており($\sum_P |J_P| \geq 100$ mK)、それらがコヒーレントにトンネル交換すれば2次元固体 ^4He でも100 mKのオーダーの超流動転移が期待できる。

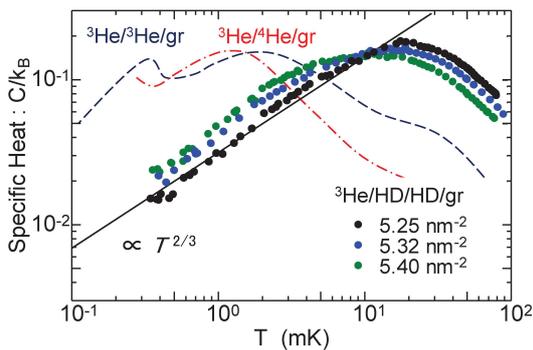


図 4.3.1: HD2 分子層をプレコートしたグラファイト基板に吸着した 2 次元固体 ^3He 試料 ($^3\text{He}/\text{HD}/\text{HD}/\text{gr}$) の核磁気比熱の温度依存性。実線は $C \propto T^{2/3}$ の振る舞い。波線は我々のグループによる $^3\text{He}/^3\text{He}/\text{gr}$ (6.4 nm^{-2}) 試料、一点鎖線は同じく $^3\text{He}/^4\text{He}/\text{gr}$ (6.8 nm^{-2}) 試料の比熱の温度依存性。

しかし、基板にグラフォイルを使用した先行のねじれ振り子実験では、超流動レスポンスを示す質量密度が 2 層目 ^4He の 1 ~ 2% しかなく、グループによってそれを観測した密度範囲もかなり異なる。これは、グラフォイル基板の単結晶子サイズが $\approx 10 \text{ nm}$ と小さいため、回転軸周りの超流動流の連結性が悪いことが原因と考えられる。この問題を解決するため、我々は、より結晶性の高い剥離グラファイトである ZYX 基板 (単結晶子サイズ $\approx 300 \text{ nm}$) を用いてねじれ振り子測定を行ったが、剥離時に入ったと思われるマクロな深い亀裂のため、グラフォイルより逆に超流動流の連結性を悪くすることが分かった。

そこで、ポリイミドフィルムを熱分解して黒鉛化し圧延した厚さ $10 \sim 100 \mu\text{m}$ の柔軟性黒鉛シート (PGS: Pyrolytic Graphite Sheet) の使用を計画し、その物性評価を行った。なお、光学顕微鏡で観測する限り、PGS 表面には剥離グラファイトのようなマクロな亀裂はない。図 4.3.2 に、PGS、ZYX、グラフォイル、天然グラファイトの面内電気抵抗率の温度依存性を示す。PGS のデータは他の剥離グラファイトと同様、低温でピークをもつ。このピークは低温で支配的になる正の温度依存性と、高温で顕著になるホッピング伝導による負の温度依存性の競合の結果生ずる。 $17 \mu\text{m}$ 厚 PGS は、最も高いピーク温度 (50 K) と最も低い抵抗率を示すことから、結晶の連結性が他より優れていることが期待される。一方、等温吸着曲線からは、整合相形成に由来するサブステップ構造も含めて、 $17 \mu\text{m}$ 厚 PGS はグラフォイルと同程度の微結晶サイズをもつようである。また、得られた比表面積 ($\approx 0.07 \text{ m}^2/\text{g}$) の値から、吸着面がほぼ最表面だけであることも確認できた。今後は、この PGS 基板を用いて、ねじり振り子による超固体探索を進める計画である。

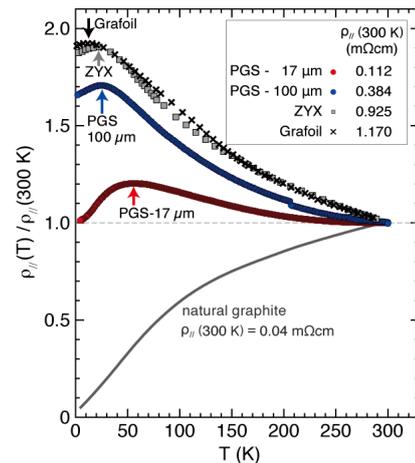


図 4.3.2: PGS ($17 \mu\text{m}$ 厚、 $100 \mu\text{m}$ 厚) と剥離グラファイト (ZYX、グラフォイル)、天然グラファイトの面内抵抗率の温度依存性。300 K での値 (図中に数字で記載) で規格化した抵抗率を示す。PGS ($17 \mu\text{m}$ 厚) は抵抗率が小さいことと、温度依存性のピーク温度が最も高いことから、他の剥離グラファイトよりも金属的な性質が強い。

4.3.2 グラフェンの電子物性研究

グラフェンは炭素原子のハニカム格子からなる理想的な 2 次元物質である。線形のエネルギー分散をもち、電子やホールが質量ゼロのディラック粒子として振舞うため、基礎物理学の観点から注目されると同時に、高い熱伝導度や電気伝導度を備え機械的にも強くしなやかなことから、優れた次世代エレクトロニクス素材としても注目されている。素子の大きさが 10 nm サイズまで小さくなると、試料端の電子状態が重要になってくる。グラフェンはアームチェア型とジグザグ型の 2 種類の端をもつが、水素などで終端されたジグザグ端ではハニカム構造副格子の対称性が破れ、端に局在した電子状態 (ジグザグ端状態あるいはグラフェン端状態) が形成されることが理論的に予測され、実験的にも 2005 年に我々が初めて STS 法で確認した。一方、こうした局在状態はアームチェア端には現れない。端状態のバンド幅は狭いので、わずかな摂動でスピン偏極する。実際、ジグザグ端で挟まれたナノリボンや、ジグザグ端で囲まれたナノピットを作ることができれば、一つのジグザグ端内ではスピンの強磁性的に揃い、端間では反強磁性的に配列すると予測されている。すなわち、局在状態がスピン分裂してバンドギャップが開く。バルクのグラフェンはバンドギャップをもたないため、そのままではスイッチング素子としての高い消光比が得られないが、ナノリボンはギャップ生成の有力な可能性の一つである (巨大磁気抵抗素子への応用)。また、ナノリボンから何らかの方法でスピン流を取り出すこともできるかも知れない。このように、グ

ラフェンのスピン偏極ジグザグ端状態の観測とバンドギャップ誘起が、我々の当面の主要な研究目標である。

スピン偏極ジグザグ端の STM/S 測定

我々の先行研究の後も、世界中で、制御されたジグザグ端の生成と端状態の追観測が試みられ、一定の成果が得られたが、まだ十分明快な結果が得られたとは言い難い。これは、原子スケールで純粋なジグザグ端を作成することや、端を確実に水素終端する試料作成の難しさに因るところが大きい。そこで我々は、グラファイトを高温で水素プラズマに曝して、表面に直線性の良いジグザグ端をもつ六角形のナノピットを多数作成することを試みた。そして、図 4.3.3(a) の STM 像に示すように、これに成功した。ピットは単原子層の深さ (0.335 nm) をもち (図 4.3.3(b))、端周辺の原子配列から、ほぼ選択的にジグザグ端で構成されていることが分かる。実際、ピットで挟まれたナノリボンを横断するように取得したトンネルスペクトル (図 4.3.3(c)) には、フェルミエネルギー ($E = 0$) 近傍に、ジグザグ端状態に特有な明瞭な状態密度ピークが観測された。我々の先行研究では、グラファイト表面に偶然できたジグザグ端リッチなステップ端 (終端は特別制御せず) を対象に今回よりもっと小さなピーク構造を観測していた。したがって、この方法はかなり良好なジグザグ端が作成できること、終端もほぼ間違いなく水素終端したことを示唆している。

水素プラズマによる選択的なジグザグ端の生成 (異方性エッチング) について、いくつかのエッチング初期段階にできる小さなピットは円形に近いが、反応が進むにつれピットサイズが大きくなり端の形状がより直線的な六角形に近づく。これは選択的にジグザグ端を生成するような異方的エッチングが進行している一つの傍証である。また、プラズマを生成する高周波電源の出力を大きくすると、ピット密度が増し、表面から 2 層目や 3 層目にもピット形成が進むことも分かった。これらは、水素プラズマにはグラファイト表面に欠陥を作る作用と、その欠陥を六角形に異方性エッチングする二つの作用があることを示している。今後は、スピン偏極ジグザグ端状態の直接観測に向けて、こうして得られたジグザグ端やジグザグ・ナノリボン、ジグザグ六角形ピットについて、詳細な STM/S 観測を進めていく。

水素プラズマ法以外にも、グラファイト表面に反応触媒としての金属微粒子を散布してから、水素ガス中で高温加熱することでサブ μm 幅の微細トレンチを彫り、ジグザグ端やナノリボンを作成することも試みた。作成した端の多くは大局的にジグザグ方向に異方性をもつが、ナノリボンを得る程に高密度でトレンチを作成することができなかった。また、グラファイト表面を高温で原子状水素に曝すエッチングも試みたが、やはりジグザグ方向に異方性をもつ端を作成することはできるものの、その密度は低く、六角形ナノピットやナノリボンの作成には不向きであった。

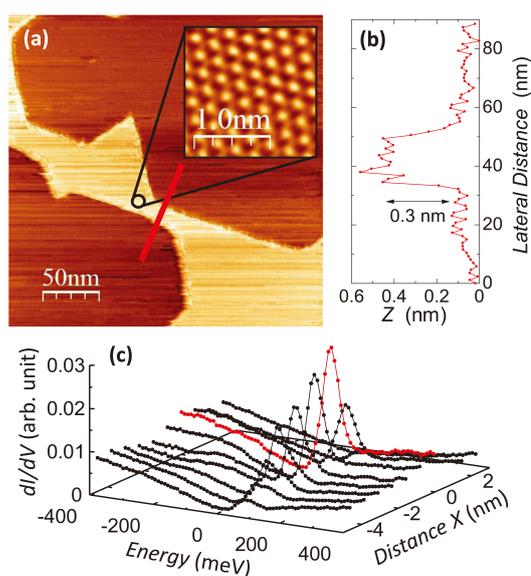


図 4.3.3: (a) 水素プラズマで異方性エッチングしたグラファイト表面の STM 像。幅 25 nm 程度のナノリボンが形成されている。挿入図の原子配列から、リボンの端がジグザグ方向を向いていることが分かる。(b)(a) 中の赤線に沿ったライン・プロファイル。ステップ高はグラファイトの単原子層の厚みと一致している。(c) ナノリボンの端近傍で取得したトンネル分光。ちょうどジグザグ端の位置 ($X = 0$) では、ゼロエネルギー近傍に鋭いピークが現れる (赤いスペクトル)。このピーク構造は、端からテラス方向に向かって数 nm にわたり徐々に減衰するが、反対方向には端を通りすぎると急速に減衰する。

原子・分子修飾によるグラフェンへのバンドギャップ誘起

バンドギャップ誘起をはじめ、グラフェンの物性制御に向けた研究が世界中で様々なアプローチで進められている。我々は特に、グラフェンの原子・分子修飾による物性制御に注目して研究している。グラフェンに対して、 $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$ 構造で原子や分子を吸着させた場合、ハニカム格子の対称性が破れ、バンドギャップが誘起されると考えられる。また、グラフェンと吸着子の電子親和力の差を利用して電子やホールをドーブしたり、不均一ポテンシャルを誘起することで伝導度や移動度を制御することが期待される。

本研究では、グラフェンの Kr 原子吸着によるバンドギャップ誘起の可能性を $T = 1.6$ K の低温に至る電気伝導度測定により探索した。Kr 原子はグラファイト上に物理吸着し、 $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$ の吸着構造をとることが、我々の STM 観測からも分かって

いる。試料は $\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ 基板上にグラファイトを劈開した単層グラフェンで、レジストによる表面汚染を防ぐため In 細線を電極としてグラフェン上に直接溶かしつけた後、真空容器(セル)封入前にベーキングし、大気からの吸着物を除去してある。セル内には 36 m^2 の表面積をもつ劈開グラファイトも封入しており、吸着面密度を精密に制御することができる。Kr 原子の面密度や温度、グラフェン試料を様々に変えながら Kr 吸着によるグラフェンの物性変化を測定したが、しかし、電気伝導度のゲート電圧依存性に有意な変化は確認できなかった。希ガスである Kr 原子では、グラフェンの対称性を破るだけの効果がないことも考えられたが、永久電気双極子モーメントをもつ極性分子である N_2O の吸着に対しても、電気伝導度に有意な変化は確認できなかった。

これらの原因として、吸着子による物性変化を観測するには、グラフェンを支える基板の凹凸や不純物などの影響が無視できないことが考えられる。 SiC 上に合成したグラフェンを用いた我々の STM 実験においても、Kr 原子は表面に吸着するのではなく、グラフェンと基板の間に潜り込む様子が観察されている。そこで、それらの影響をできるだけ排除するため、 $1 \mu\text{m}$ 幅のマイクロな溝を表面に多数微細加工した $\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ 基板上にグラファイトを劈開することで浮遊 (suspended) グラフェン試料を作成した (図 4.3.4(a))。

図 4.3.4(b) に、得られた試料の電気抵抗のゲート電圧 (V_g) 依存性を示す。通常、これはディラック点 (電荷中性点) で最大となるピーク構造を示すが、ここでは $V_g \approx 5 \text{ V}$ 付近のブロードなものと同様であるのに対し、後者は浮遊グラフェンからの寄与と考えられる。ディラック点が $V_g = 0$ に近く、その V_g 依存性が鋭いことから、基板由来のキャリアドーピングが少なく、より移動度も高いグラフェン試料を作成できていることが分かる。こうして得られた浮遊グラフェンは基板の効果がない理想的なグラフェンと考えられ、吸着子の効果も観測できると期待される。

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [1] S. Nakamura, K. Matsui, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Low-Density Commensurate Quantum Solid in Bilayer of Helium Adsorbed on Graphite, 27th International Conference on Low Temperature Physics (LT27), (Buenos Aires, Argentina, August 6-13, 2014).
- [2] S. Nakamura, D. Tsuji, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Mixing of ^3He and ^4He in Bilayer Helium Films Adsorbed on Graphite, 27th International Conference on Low Temperature Physics (LT27), (Buenos Aires, Argentina, August 6-13, 2014).

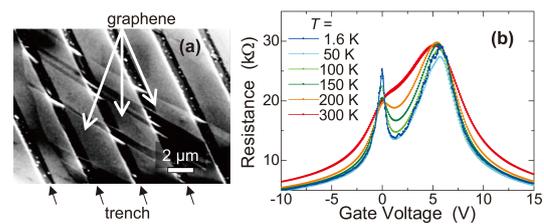


図 4.3.4: (a) 溝を作成した $\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ 基板上に劈開して作成したグラフェンの走査電子顕微鏡像。(b) 基板上的溝をまたぐように作成されたグラフェン抵抗のゲート電圧依存性。基板から浮いた部分と基板に支えられた部分に対応する2つのピーク構造が観測される。

- [3] M. Kamada, D. Sato, S. Nakamura, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Multiple-Spin Exchanges in Quantum Spin Liquid State of Solid Helium-3 in Two Dimensions, 27th International Conference on Low Temperature Physics (LT27), (Buenos Aires, Argentina, August 6-13, 2014).
- [4] T. Matsui, J. R. Bindel, K. Nakayama, H. Hibino, and Hiroshi Fukuyama: STM/S and Electronic Transport Studies of Kr atoms adsorbed on Graphene, The 7th International Symposium on Surface Science (ISSS-7), (Matsue, Japan, November 2-6, 2014).

招待講演

- [5] Hiroshi Fukuyama: Liquefaction of helium three in two dimensions, 27th International Conference on Low Temperature Physics (LT27), (Buenos Aires, Argentina, August 6-13, 2014).
- [6] Sachiko Nakamura: Quantum Effects on 2D Solidification of Helium Isotopes, ULT 2014 - Frontiers of Low Temperature Physics, (San Carlos de Bariloche, Argentina, August 15-19, 2014).
- [7] Hiroshi Fukuyama: Ground States and Phase Transitions of monolayers of ^3He and ^4He adsorbed on graphite, Physics at the Falls: Phase Transitions in reduced Dimensions, (Buffalo, U.S.A., November 12-14, 2014).
- [8] Tomohiro Matsui, J. R. Bindel, H. Hibino, and Hiroshi Fukuyama: STM/S studies of graphite and graphene exposed to Kr atoms, The Fudan-Today-Yonsei Joint Workshop 2015, (Seoul, Korea, January 31, 2015).
- [9] Hiroshi Fukuyama: Two-Dimensional Quantum Materials Physisorbed on Graphite, The Fourth Symposium on Future Challenges for Carbon-based Nanoporous Materials: Adsorption and Energy (CBNM4), (Nagano, Japan, March 16-18, 2015).

(国内会議)

一般講演

- [10] 鎌田 雅博、中村 祥子、松井 朋裕、福山 寛：2次元ヘリウム3の量子スピン液体相の比熱、第6回低温センター研究交流会(東京大学、2015年3月4日).
- [11] 中村 祥子、宮藤 大輔、藤井 武則、戸田 亮、福山 寛：熱分解黒鉛シート PGS の物性評価、第6回低温センター研究交流会(東京大学、2015年3月4日).
- [12] 佐藤 秀樹、大庭 悠輔、松井 朋裕、福山 寛：水素プラズマによって異方性エッチングされたグラファイト表面のSTM/S観測、第6回低温センター研究交流会(東京大学、2015年3月4日).
- [13] 中山 和貴、松井 朋裕、Eric Lebrasseur、三田 吉郎、福山 寛：原子・分子修飾したグラフェンの低温電気伝導特性、第6回低温センター研究交流会(東京大学、2015年3月4日).
- [14] 戸田 亮、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、第6回低温センター研究交流会(東京大学、2015年3月4日).
- [15] 中山 和貴、松井 朋裕、福山 寛：原子・分子吸着したグラフェンの伝導度測定(II)、日本物理学会 第70回年次大会(早稲田大学、2015年3月21-24日).
- [16] 戸田 亮、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I、日本物理学会 第70回年次大会(早稲田大学、2015年3月21-24日).
- [17] 鎌田 雅博、佐藤 大輔、中村 祥子、松井 朋裕、福山 寛：2次元ヘリウム3の低密度整合相の磁性と量子状態、日本物理学会 第70回年次大会(早稲田大学、2015年3月21-24日).
- [18] 中村 祥子、宮藤 大輔、藤井 武則、福山 寛：新しいHe吸着基板：熱分解黒鉛シート PGS の物性評価I、日本物理学会 第70回年次大会(早稲田大学、2015年3月21-24日).
- [19] 佐藤 秀樹、大庭 悠輔、松井 朋裕、福山 寛：グラファイト表面の水素原子によるエッチングとそのSTM/S観測、日本物理学会 第70回年次大会(早稲田大学、2015年3月21-24日).

招待講演

- [20] 福山 寛：研究対象としてのヘリウム3の量子物性、第6回低温センター研究交流会(東京大学、2015年3月4日).

(セミナー)

Department Seminar

- [21] Hiroshi Fukuyama: Frustrated 2D Magnetism in ^3He Monolayer: Spin liquid phase stabilized by many-body exchange interactions, (Department of Physics, Penn State University, U.S.A., November 10, 2014).

集中講義

- [22] 松井 朋裕：走査プローブ顕微鏡、熊本大学大学院自然科学研究科(2014年4月16-18日).

技術職員研修講義

- [23] 福山 寛：低温科学技術入門、東京大学低温センター(2015年2月24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。 ^3He - ^4He 希釈冷凍機を用いた20 mKまでの極低温および15 Tまでの強磁場環境において、さまざまな独自技術により新しい自由度を持たせた研究を行っている。

4.4.1 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キャリアが誘起されることが光電子分光やSTSなどの測定からわかっていたが、面内伝導の測定は電極技術の困難などから行われていなかった。表面に形成された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。近年、我々のグループにおいて、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が確立され、整数量子ホール効果などの現象が観測されている。

走査トンネル分光顕微鏡と電子輸送特性の同時測定

現在までの電気伝導測定から吸着物質の種類や量、表面形態によって誘起された2次元電子系の輸送特性が大きく変化することがわかっているが、吸着物質の構造や表面形態についての知見は得られていない。

本年度は枳富が主体となり走査トンネル分光顕微鏡(STM/STS)と電気伝導測定を同時に行える装置を用いて、鉄原子により誘起された2次元電子系の研究を行った。図4.4.1(a)にInSb劈開表面に鉄原子を0.01原子層(ML)蒸着したときのSTM像を示す。急冷蒸着を行っているため、クラスターなどは形成されず、鉄原子がランダムに分布していることがわかる。鉄原子はドナーとなりInSb表面に電子を供給し、2次元電子系を形成する。図4.4.1(b)に2次元電子系の縦抵抗率とホール抵抗の磁場依存性を示す。ホール係数から見積もられる電子密度は $7.5 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ である。これをSTM像から得られた鉄原子の原子密度と比較することにより、鉄原子1個あたり0.1個の電子をInSb表面に供給していることがわかる。また、この2次元電子系におけるゼロ磁場の電気抵抗率から求めた電子移動度は $14 \text{ m}^2/\text{Vs}$ であり、吸着原子が誘起する2次元電子系で最も高い値になっている。これはドナーの低い電離確率によ

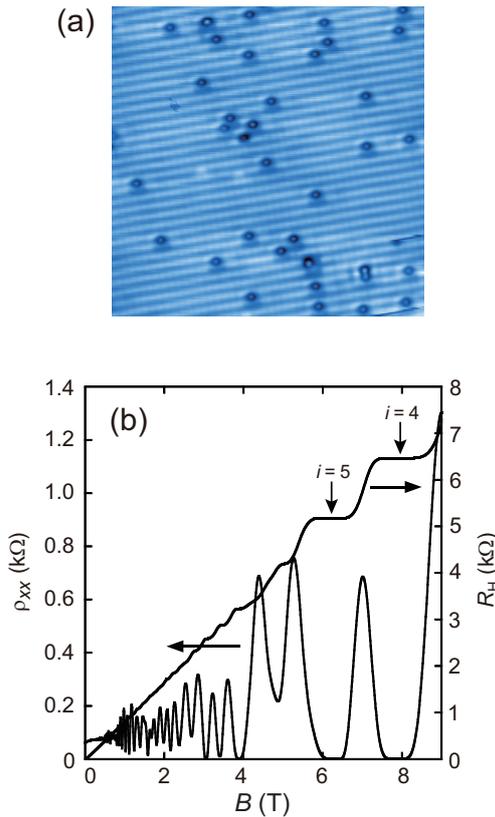


図 4.4.1: (a) InSb 劈開表面に鉄を 0.01 ML つけた場合の STM 像 ($20 \times 20 \text{ nm}^2$)。黒い輪郭を持った丸が Fe であり、明るい縞模様が Sb の副格子である。(b) 4.2 K における縦抵抗率とホール抵抗の磁場依存性。

りポテンシャルの平均化が起きているためだと考えている。一方、Shubnikov-de Haas 振動の減衰から求められる電子移動度は $1 \text{ m}^2/\text{Vs}$ 程度であり、前者より一桁程度小さい値になっている。縦抵抗を見ると、低磁場から明瞭な Shubnikov-de Haas 振動が観測され、3 T を超える磁場領域において量子ホール状態が実現されている。この系では 2 つのサブバンドが伝導に寄与しており、8 T 近傍で見られる $i=4$ の量子ホール状態は第一サブバンドが $i=3$ 、第二サブバンドが $i=1$ のスピン分離に起因する量子ホール状態である。

図 4.4.2 にゼロ磁場と磁場中における微分コンダクタンスの測定結果を示す。 $100 \times 100 \text{ nm}^2$ を 100 点に分割し測定した値を平均化して得たものであり、誘起された 2 次元電子系の状態密度を表していると考えられる。ゼロ磁場のスペクトルにおいては明瞭な立ち上がりが見られる。これは第一サブバンドのバンド端 (E_1) に相当する。また、第二サブバンドのバンド端 (E_2) は磁場中 (14 T) の測定から求められたものである。磁場中の測定ではスピン分離を伴ったランダウ準位が観測されている。ランダウ準位の

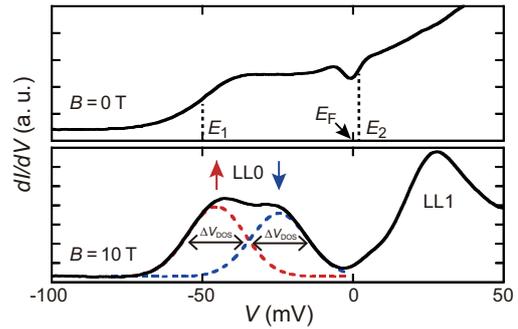


図 4.4.2: 空間的に平均化された微分コンダクタンス。

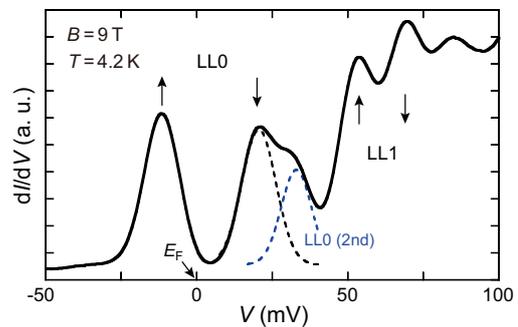


図 4.4.3: ランダウ準位充填率 $\nu = 1$ おける交換相互作用により増強されたスピン分離。

間隔から求められる有効質量 m^* は $0.018m_e$ (m_e : 自由電子の質量)、ランダウの g 因子は 36 であり、バルクの InSb のそれら ($m^* = 0.014m_e$, $|g| = 51$) と若干違いが見られた。これはバンドの非放物線性による寄与が要因である。また、図 4.4.2 のランダウ準位の幅から見積もられる不規則ポテンシャルの大きさは 10 meV 程度であり、Shubnikov-de Haas 振動から見積もられるそれと良い一致を示すことがわかった。

図 4.4.3 に奇数のランダウ準位充填率 ($\nu = 1$) がフェルミレベルに位置する微分コンダクタンスの測定結果を示す。最低ランダウ準位のスピン分離幅は 33 meV 程度であり、図 4.4.2 から得られた g 因子 ($g = 36$) から推測されるスピン分離幅 19 meV に比べると、14 meV 程度増強されていると考えられる。さらに、この増強されたスピン分離幅は平均場近似を用いた交換増強効果の計算と良い一致を示すことがわかった。このことから STS を用いた微分コンダクタンスの測定により交換相互作用によるスピン分離の増強を定量的に評価できていると思われる。

次に、図 4.4.1(b) に示した 8.5 T における $i=4$ の量子ホール状態を考える。この状態は第一サブバンドが $i=3$ 、第二サブバンドが $i=1$ のスピン分離に起因する量子ホール状態であるが、第二サブバンド

は高磁場領域においては電気伝導に寄与していないと考えられるので、第一サブバンドの $i = 3$ のみを考える。この量子ホール状態においても一体のゼーマン分裂に加えて、多体効果によるスピン分離幅の増大が期待される。上述の平均場近似を用いた計算より増強効果は 9.2 meV 程度であり、一体のゼーマン分裂を加えた合計のスピン分離幅は、微分コンダクタンスもしくは Shubnikov-de Haas 振動から得られる不規則ポテンシャルの 3 倍程度になると見積られる。したがって、鉄が誘起する 2 次元電子系においてスピン分離の交換増強がランダウ準位充填率が奇数の量子ホール状態の実現に重要な役割を果たしているといえる。また、図 4.4.2 のフェルミレベル (E_F) 近傍における窪みについても電子相関に起因するクーロンギャップであると推測しているが、詳細については追実験が必要であり、今後の課題である。

本研究に用いている装置は試料基板の劈開、蒸着による試料作成をしたその場で極低温 (4.2 K)・高磁場 (14 T) 環境下において STM/STS と電気伝導測定を行えるものであり、世界的に見ても非常にユニークなものである。今後、この装置を単原子層の磁性や超伝導の研究に応用することも視野に入れている。

4.4.2 金属超薄膜の超伝導

近年、関原を中心として、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、非対称な閉じ込めポテンシャルとスピン軌道相互作用との結合によって、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た。さらに、超伝導転移温度の平行磁場依存性を詳細に測定した結果、磁場の自乗に比例してわずかに減少することが明らかになった。これらの実験結果は、大きな Rashba 分裂を有する 2 次元電子系に対して、散乱が強い場合に予想されていた、超伝導秩序変数の位相が空間変動するヘリカル相と呼ばれる状態を仮定することにより定量的に説明することができた。

単原子層超伝導鉛への保護膜の作製

上述の GaAs 劈開表面に形成された単原子層超伝導鉛の研究は、電気抵抗測定のみに限られているため、本年度は村上を中心としてトンネル分光法による微分コンダクタンスの測定に着手した。単原子層超伝導鉛に対してトンネル分光測定を行うには、試

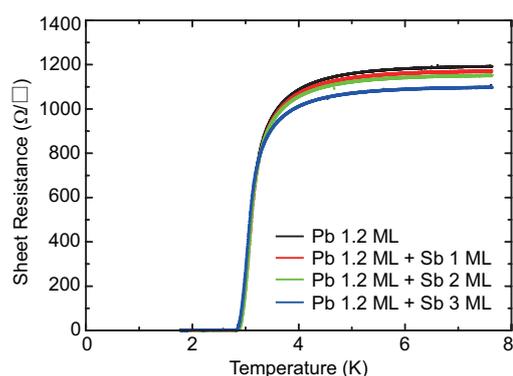


図 4.4.4: 単原子層の Pb の上に Sb を蒸着した場合のシート抵抗の温度依存性。

料を大気中に取り出し、トンネル障壁を作製した後、トンネル分光測定用の電極を付け、再度冷却して測定を行わなければいけない。しかしながら、単原子層鉛は大気中で瞬時に酸化されるため、適切な保護膜を作製する必要がある。したがって、本研究では単原子層鉛を大気中に取り出すことを可能にする保護膜の作製と絶縁膜によるトンネル障壁の開発を行った。

図 4.4.4 に GaAs 絶縁体基板上に単原子層の Pb (1.2 ML) を作成し、その上に保護膜として Sb を蒸着した場合のシート抵抗の温度依存性を示す。測定した試料は保護膜なし (Pb のみ) の場合と、Pb の上に保護膜として Sb を 1 ML、2 ML、4 ML 蒸着したものである。常伝導状態のシート抵抗は若干減少しているが、低温領域のシート抵抗の温度依存性が重なっていることから、超伝導転移温度はほとんど変化していないといえる。このことから、保護膜の Sb は単原子層の Pb の超伝導状態に大きな影響を与えていないと考えられる。

図 4.4.5(a) に単原子層の Pb (1.1 ML) に保護膜として Sb を 8 ML を蒸着させた場合の 300 K までのシート抵抗の温度依存性を示す。図中の番号は昇温と降温の順序を示している。昇温と降温を繰り返した際に構造変化に起因すると思われるシート抵抗の依存性の変化が見られるが、最終的には同じ軌跡を辿り安定な構造を実現している (4 と 5 番目)。さらに低温領域において明瞭な超伝導転移が観測されている。次に、この試料を大気中に取り出した後、再度、冷却した (6 番目)。大気に晒すことにより多少の変化はあったが、大気に晒す前と同様に明瞭な超伝導転移が観測された。最後に 8 K 以下のシート抵抗の温度依存性を図 4.4.5(b) に示す。常伝導状態のシート抵抗は昇温、降温により変化が見られたが、超伝導転移温度に関してはあまり変化していないように思われる。以上の結果から、保護膜に数層の Sb を用いることにより、単原子層の Pb を大気中に取り出すことに成功したと考えている。

トンネル分光測定を行うにはさらに絶縁膜を用いたトンネル障壁を作成する必要がある。現時点においては最適なトンネル障壁の作成には至っていない。次年度は絶縁膜の種類や作成条件を変え、最適なト

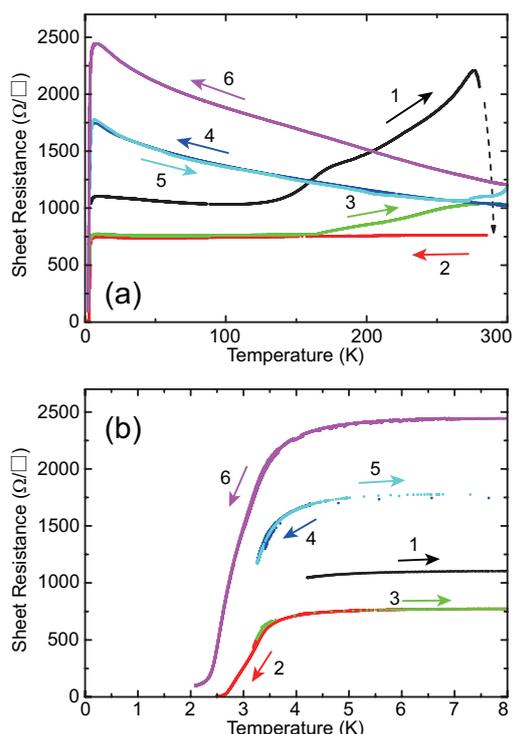


図 4.4.5: (a) 単原子層の Pb に保護膜として Sb を 8 ML 蒸着して、室温までの昇温と降温を繰り返した場合のシート抵抗の温度依存性。5 の昇温の後、試料を大気中に一旦取り出し、再び冷却したときのデータが 6。(b) (a) の低温部。超伝導転移温度は熱サイクルや大気中取り出しにより、あまり変化しない。

ンネル障壁の作成を行う予定である。

ヘリカル相に対する理論の拡張

以前行われた In 単原子層膜に対する研究において、Pb 単原子層膜の場合よりも一桁程度大きな超伝導転移温度の平行磁場依存性が観測された。Pb 単原子層膜の実験結果の解析に用いた理論は、Rashba スピン分裂 Δ_R が $\hbar\tau^{-1}$ (τ は弾性散乱時間) よりも、十分大きいことを前提としていたが、In の場合にはこの条件が満たされていないと考えられる。我々は、 $\Delta_R < \hbar^{-1}\tau$ の場合に対して理論の拡張を行い、In 単原子層膜の Rashba スピン分裂の大きさを導出した ($\Delta_R \approx 0.04$ meV)。

4.4.3 磁性金属超薄膜の電気伝導

金属超薄膜は磁性研究においても魅力的な研究対象である。我々のグループでは、強磁性の出現と遍

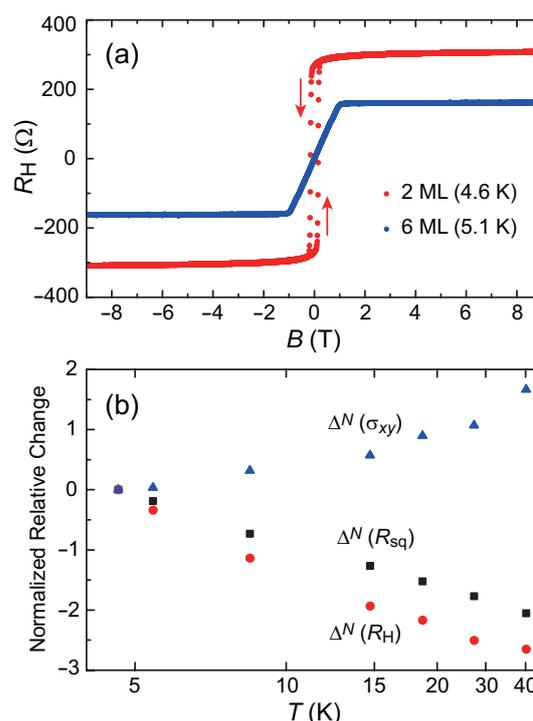


図 4.4.6: (a) GaAs 劈開表面上の Fe 超薄膜の異常ホール効果。磁場は、劈開面に垂直に印加している。(b) シート抵抗、異常ホール抵抗、ホール伝導率の温度依存性。 $T = 4.6$ K における値で規格化している。

歴性との関連や 2 次元スピングラスなどのテーマについての研究を計画しているが、北垣が中心となり本年度より研究を開始した。

Fe 超薄膜の異常ホール効果

超伝導超薄膜に対して行ってきたものと同様の手法を用いて、GaAs 劈開基板上的 Fe 超薄膜に対する電気伝導測定を行った。Pb や In などの場合と比べて、側面電極との導通を取ることが難しかったために試行錯誤に多くの時間を要したが、膜厚 0.44 nm (~ 2 原子層) および 1.36 (~ 6 原子層) の薄膜において四端子測定を行うことができ、明瞭な異常量子ホール効果が観測された。磁化反転に要する磁場の大きさやヒステリシスの振る舞いから、膜厚 0.44 nm では垂直磁気異方性を、1.36 nm では面内磁気異方性をもつことがわかった。また、1.36 nm の薄膜においては、シート抵抗に対する異常ホール抵抗の比が 10% を超え、金属 Fe に対する先行研究と比べても非常に大きな値が得られた。

温度の対数に比例する変化が、シート抵抗および異常ホール抵抗において観測された。異常ホール抵抗の機構として、不純物散乱による外因性の skew 散乱機構と side jump 機構、およびベリー位相を主原

因とする内因性機構が挙げられる。温度依存性の係数の大きさや比を議論することにより、主たる機構を特定することが期待される。

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Sekihara, T. Miyake, R. Masutomi, and T. Okamoto: Effect of Parallel magnetic field on superconductivity of ultrathin metal films grown on a cleaved GaAs surface, *Journal of the Physical Society of Japan* (in press).

(会議抄録)

- [2] T. Sekihara, T. Miyake, H. Ichinomiya, R. Masutomi, and T. Okamoto: Two-dimensional superconductivity with broken inversion symmetry in one-atomic-layer metal films on cleaved GaAs surfaces, *JPS Conference Proceedings* **3**, 015023 (2014).
- [3] R. Masutomi, and T. Okamoto: Simultaneous study by scanning tunneling spectroscopy and transport measurements in adsorbate-induced two-dimensional systems, *Journal of Physics: Conference Series* **568**, 052020 (2014).

(国内雑誌)

- [4] 岡本徹、柁富龍一: 劈開表面における電子輸送現象, *表面科学* **36**, 118-123 (2015).

(学位論文)

- [5] 北垣育大: 「半導体劈開表面上に形成した磁性薄膜の研究」(修士論文)
- [6] 村上綾: 「単原子層超伝導鉛への保護膜の作製」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [7] R. Masutomi and T. Okamoto: Adsorbate-induced quantum Hall system and superconductivity in one-atomic-layer with Rashba spin-orbit coupling, *27th International Conference on Low Temperature Physics* (Buenos Aires, Argentina), August 6-13, 2014.

招待講演

- [8] R. Masutomi: In situ STM/STS and transport studies in adsorbate-induced two-dimensional electron systems, *Collaborative Conference on Materials Research* (Incheon/Seoul, South Korea) June 23-27, 2014.

(国内会議)

一般講演

- [9] 柁富龍一、岡本徹: 吸着原子が誘起する2次元電子系における走査トンネル分光顕微鏡と電子輸送特性の同時測定?, *日本物理学会 秋季大会* (中部大学) 2014年9月7日-日.

- [10] 北垣育大、柁富龍一、岡本徹: GaAs 劈開表面上に形成した Fe 超薄膜、第6回低温センター研究交流会(東京大学小柴ホール) 2015年3月4日.

4.5 島野研究室

島野研究室では、レーザー分光の手法を用いて、凝縮系における光と物質の相互作用の解明、光励起によって発現する多体の量子現象、量子凝縮相の探求に取り組んでいる。特に、低エネルギー(テラヘルツ周波数帯)に発現する素励起(マグノン、励起子内部遷移、プラズモン、準粒子ギャップ、集団モード)に着目し、それをプローブとして、広範な物質群を対象に基底状態における電子相関を明らかにすること、光による量子凝縮相の実現やその制御を行うことを主なテーマとしている。最近では、光による物質相制御の観点から、光励起によって生じる超高速時間領域の相転移現象や、光励起によってのみ発現する、温度や磁場、圧力といった静的な外場では到達しえない非平衡状態のダイナミクス研究を行っている。このために、可視光領域から低エネルギー、テラヘルツ (THz) 周波数帯にわたる広い光子エネルギー範囲での先端分光技術の開拓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 半導体高密度電子正孔系

半導体中に高密度に光励起された電子正孔系は、電子正孔対の密度、温度に依存して励起子ガス、電子正孔プラズマ、電子正孔液体といった多彩な相を示す。密度の増加に伴う励起子気体から電子正孔プラズマへの移行は、励起子モット転移(高温ではクロスオーバー)と呼ばれ、電子正孔系の絶縁体金属転移として長い研究の歴史を持つ。低密度領域ではワニエ方程式に基づく励起子気体描像、高密度領域の電子正孔プラズマ相は平均場近似がよく成り立ち、実験、理論ともによく理解されている。しかし、励起子モット転移密度近傍の中間密度領域では、電子相関の効果を摂動で扱うことは理論的には困難であり、実験的にも励起子がどのように遮蔽されて金属相に至るのかは明らかになっていなかった。この問題の重要性は、ごく最近になって、励起子ボース-アインシュタイン凝縮(BEC)から電子正孔BCS状態(励起子絶縁体とも呼ばれる)へのクロスオーバーの観点から再認識されつつある。

我々はこの問題に、テラヘルツ分光法という新たな手法で挑んできた。多くの半導体では励起子の $1s-2p$ 準位間遷移のエネルギーがテラヘルツ帯にあり、励起子密度や自由キャリア密度を定量的に評価することができるため、励起子遮蔽について詳細に調べることができるからである。この課題に関して本年度は以下の研究を進めた。

間接遷移型半導体 Ge

熱平衡状態下での励起子モット転移(クロスオーバー)を観測するためには、光励起された電子正孔対が長い寿命を持つことが重要である。我々は光励起キャリアが長寿命を持つ間接遷移型半導体 Si を対象に実験を行ってきたが、その結果が普遍的な現象であるかどうかを検証するために、Si と同じ間接遷移型半導体で、より大きな背景誘電率をもつ(励起子束縛エネルギーが小さい) Ge を対象として、励起子モット転移の観測を行った。

テラヘルツ分光により、励起子 $1s-2p$ 遷移による吸収量から励起子密度を定量的に決定し、光励起された全電子正孔密度に対する励起子密度から励起子のイオン化率を実験的に決定した。有限温度における励起子モット転移を議論するうえで、全電子正孔に占める励起子の割合を知ることが本質的に重要であったが、本研究によりこれが可能になった。今回、我々は励起子イオン化率の密度・温度依存性を詳細に調べることで、相図上のどの領域で励起子が存在しうるのかを明らかにした(図 4.5.1)。このイオン化率相図を見ると、高温・低密度領域ではエントロピー効果によって、低温・高密度領域ではモット転移によって励起子がイオン化しており、励起子が安定に存在する領域は低温・低密度の領域に限られていることが分かる。

さらに一連の測定では、電子正孔密度の増加に伴って生じる励起子モット転移において、 $1s-2p$ 遷移エネルギーのシフトは観測されないことを明らかにした。この振る舞いは、キャリア密度が増加するとクーロン引力の遮蔽効果によって励起子束縛エネルギーが連続的に減少し、束縛エネルギーがゼロなり励起子モット転移に至る、という従来の定説が正しくないことを示している。同様の結果は、過去の我々の Si を対象とした研究でも得られていることから、これは背景物質の詳細に依存しない普遍的な性質であると結論した。

直接遷移型半導体 GaAs

上記に述べた励起子モット転移の研究は、比較的高温域(励起子束縛エネルギーの $1/10$ 程度)での準熱平衡状態において行ってきた。この有限温度の場合、励起子が熱的にイオン化して自由なキャリアが発生する。このため、電子正孔系全体としては、励起子と自由キャリアの両方が存在する状況での励起子モット転移について考慮する必要があった。一方、直接遷移型半導体では、励起光の波長を選べば、励起子のみを共鳴的に生成することが可能である。この共鳴励起の手法で励起密度を増加させた場合、励起子のみ状態から出発する励起子モット転移が起こると考えられる。即ち、モットの思考実験で設定された'純粋な'励起子モット転移の状況が実現できる。この手法は電子系に余剰のエネルギーを与えずに済むため、極低温で期待される励起子 BEC、電子正孔 BCS 状態、さらにはそれらのクロスオーバーの問題に実験的にアプローチするうえでも有効である。

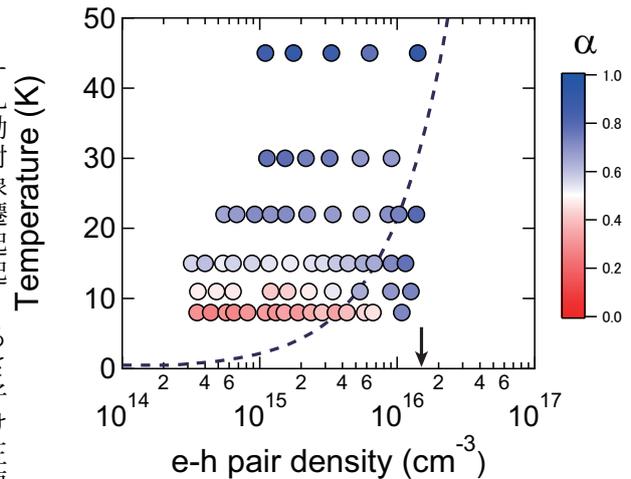


図 4.5.1: Ge 電子正孔相図における励起子イオン化率マップ。破線はデバイ-ヒュッケル型遮蔽を用いて計算したモット密度で、矢印はボーア半径を用いたによるモット密度。

そこで直接遷移型半導体 GaAs を対象に'純粋な'励起子モット転移を調べることにした。

テラヘルツ過渡吸収スペクトルにおいては、モット転移近傍での電子正孔プラズマのプラズマ周波数と励起子 $1s-2p$ 共鳴エネルギー (3 meV) が近いこと、両者を明確に分離することが難しい。しかし、テラヘルツプローブパルスの電場強度を強くすると、形成された励起子がプローブ電場によって解離し、電子正孔プラズマの応答となることが分かった。そこで、テラヘルツパルスの強・弱両極限でのスペクトルの差から、励起子関連の成分を抽出する手法を開発した。

弱励起領域では、共鳴励起によって励起直後から確かに励起子が形成され、時間とともに電子正孔再結合により密度が減少していく様子が観測された。一方、励起密度を大きくしていくと、光学伝導度のスペクトル重みが、全てが自由なキャリアとして振る舞う場合に比べて、低エネルギー側が減少し、高エネルギー側にシフトする振る舞いが観測された。この振る舞いは、平均励起子間距離が励起子ボーア半径程度となる密度で明瞭に現れた。即ち、プラズマ遮蔽を考慮すれば電子正孔系が金属として振る舞うような密度領域においても、電子正孔間引力による電子相関が発達し、電子正孔系の電気伝導性が低下していることを示している。今後、この効果が電子正孔 BCS ペアリングの前兆現象かどうかを明らかにしていく。

4.5.2 光による超伝導状態制御

我々はこれまでにタイトフォーカシング法による高強度テラヘルツパルス光源開発に成功し、テラヘル

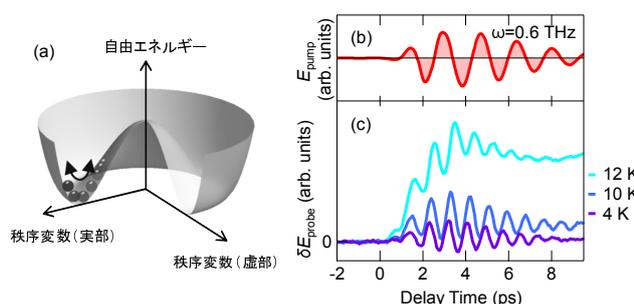


図 4.5.2: (a) 自発的な対称性の破れを表す複素秩序パラメーター Ψ 平面上的自由エネルギー曲線。矢印はヒッグスモードを示す。(b) 狭帯域高強度テラヘルツパルスの時間波形。(c) テラヘルツポンプ-テラヘルツプローブ測定による実験結果。

ツ波による物質相制御に向けた研究を行ってきた。昨年度はこの開発した光源を用いて s 波超伝導体 $\text{Nb}_{1-x}\text{Ti}_x\text{N}$ のヒッグスモードの観測に成功したことを報告した。

ヒッグスモードとは、対称性の自発的な破れに伴って生じる、秩序パラメーター Δ の振幅の揺らぎに相当する集団励起モードである (図 4.5.2(a))。近年では様々な凝縮系においてヒッグスモードが研究され、対称性の破れた量子多体系の基底状態の性質や非平衡状態のダイナミクスを理解する新たな手段として大きな注目を集めている。しかし、 s 波 BCS 状態におけるヒッグスモードは、線形応答の範囲では電磁場と直接結合しないために、電荷密度波と共存する特殊な系を除いてこれまで観測されていなかった。我々は高強度モノサイクルテラヘルツパルスを用いることで、格子系を加熱することなく瞬時に高密度の準粒子を励起し超伝導状態に非断熱的な摂動を与える状況を実現し、その励起直後に秩序パラメーターの自由振動としてヒッグスモードを時間分解観測することに成功した。またその振動の周波数が 2Δ に一致することを確かめた。

本年度は、以下に示すように、ヒッグスモードと光の非線形応答領域における相互作用に注目し、高強度テラヘルツパルス照射中の BCS 状態の振る舞いに着目して実験を行ったほか、ヒッグスモードの減衰機構について詳細に研究を行った。また s 波超伝導体において得られたヒッグスモードに関する知見を活かして、銅酸化物に代表される高温超伝導体や、マルチバンド超伝導体におけるヒッグスモードの振る舞いを明らかにすることを目的に研究を進めた。

光とヒッグスモードの非線形共鳴の発見

図 4.5.2(b) に示すように中心周波数 $\omega=0.6$ THz (スペクトル線半値幅 0.1 THz) のマルチサイクルテ

ラヘルツパルスを生成し、この比較的単色性の高いテラヘルツ電場照射中の秩序パラメーターの時間変化を、テラヘルツポンプ-テラヘルツプローブ分光法により調べた。その結果、ポンプ光の周波数が超伝導ギャップより大きい $\omega > 2\Delta(T)$ の温度領域では準粒子励起による秩序パラメーターの縮小が観測されたのに対し、準粒子を励起しない $\omega < 2\Delta(T)$ の領域では、電場照射中に秩序パラメーターが周波数 2ω でコヒーレントに振動する現象が観測された (図 4.5.2(c))。

物理教室青木秀夫教授、辻直人助教との共同研究により、この現象はアンダーソン擬スピンモデルを用いた微視的理論によってよく説明できることがわかった。アンダーソン擬スピんに作用する有効磁場の z 成分が、入射電場が持つベクトルポテンシャルの偶数次の非線形項によって変調を受ける。ベクトルポテンシャルの 2 次の項の周波数が 2ω であるために、擬スピンの周波数 2ω で回転運動を行い、これに従って秩序パラメーターの強制振動が生じていることが明らかになった。

さらに興味深いことに、 $2\omega = 2\Delta(T)$ を満たした時に、実験で観測された振動の振れ幅が最大になることを発見した。これは、外場によって秩序パラメーターを駆動している周波数が 2ω であるのに対し、秩序パラメーター振動の固有振動モードであるヒッグスモードの周波数が 2Δ であるため、この 2 つが一致した時に「共鳴」が生じて振動が増強する現象であることが理論・実験の両面から明らかになった。これまでヒッグスモードは光と相互作用しないと考えられていたが、これは線形応答領域の場合であり、本研究により非線形応答まで考えると光とヒッグスモードの共鳴現象があることが明らかになった。

超伝導薄膜からの巨大な第三高調波発生

超伝導体における超伝導電流は、クーパー対密度とベクトルポテンシャルに比例するいわゆるロンドン方程式によって記述される。このことを考慮すると、周波数 ω の振動電場下において、ヒッグスモード共鳴によって秩序パラメーターの振幅 (従ってクーパー対密度) が周波数 2ω で振動している場合には、超伝導電流は 3ω で振動することになる。この振動電流は電磁波の源となるはずなので、光とヒッグスモードとの相互作用によって奇数次の高次高調波が発生するはずである。この直観的な予測に基づき、実際に狭帯域高強度テラヘルツパルスを超伝導薄膜に入射したところ、予想通り第三高調波が観測された。図 4.5.3 には第三高調波の強度の温度依存性を示した。3 つの異なる入射周波数 ($\omega=0.3, 0.6, 0.8$ THz) で実験を行ったところ、いずれの場合も第三高調波は $2\omega = 2\Delta(T)$ を満たす温度で最大になった。この結果は、光とヒッグスモードが非線形応答領域において共鳴することを示す明確な証拠となった。

中心周波数 $\omega=0.6$ THz、電場尖頭値 3.5 kV/cm の入射波強度に対して、観測された第三高調波の相対強度は 10^{-4} ほどに達した。この値は、入射電磁波の波長 (0.5 mm) の 2 万分の 1 の厚さ (約 24 nm) しか

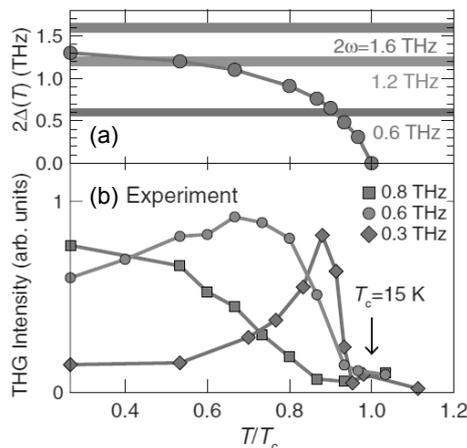


図 4.5.3: (a) 秩序パラメーター 2Δ の温度依存性と入射テラヘルツ周波数の 2 倍 (2ω) を比較したもの。(b) 第三高調波強度の温度依存性。

持たない超伝導薄膜試料を 1 回透過しただけで得られた値であり、変換効率としては極めて高く、量子凝縮相の集団励起モードが巨大なコヒーレント非線形光学応答を発現することを示している。最適な導波路構造を設計して相互作用長をさらに延ばすことができれば、極めて高効率なテラヘルツ帯波長変換素子の開発に繋がる可能性も考えられる。

非従来型超伝導体におけるヒッグスモード

ここまでの研究で開拓したヒッグスモードの観測手法を、他の非従来型超伝導体へと適用することで、例えば異方性を持つ超伝導体における集団励起モードのエネルギー構造や、マルチギャップ超伝導における秩序パラメーター間の相互作用、電荷秩序波など他の秩序との共存・競合関係などを詳細に調べることが可能になると考えられる。

そこでまず超伝導体 MgB_2 に注目した。 MgB_2 はフォノン媒介型の BCS 型超伝導体としては高い転移温度 (約 39 K) を示し、2 次元的な σ バンドと 3 次元的な π バンドからなる 2 つのギャップを持つ超伝導体として知られている。この系を対象に、2 つの超流動成分に相当するヒッグスモードが観測されるか、そ 2 つの超流動成分間の相互作用の影響はどのように現れるかを明らかにすることを目的として、狭帯域高強度テラヘルツ波を用いた第三高調波発生の実験を開始した。また同様の研究手法を鉄系超伝導体 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{As}_x)_2\text{Co}_2$ においても展開し、秩序パラメーターの対称性を明らかにすることを目的に実験を進めている。

さらに銅酸化物高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ に対しても実験を行った。 d 波のペアリング対称性を持つ銅酸化物超伝導体は、低い対称性に由来してヒッグスモードがいくつかの種類に分裂することが理論的

に予測されているが、実験で検証した例はいまだにない。さらに銅酸化物高温超伝導体では、 s 波超伝導体と異なりギャップにノードがあるために、ヒッグスモードから個別励起モードへの強い緩和が生じること予測され、それがヒッグスモードを不安定化することも予想される。しかし我々がこれまでの研究で明らかにしてきたベクトルポテンシャルの 2 次の項で秩序パラメーターを強制振動させそのダイナミクスを時間分解観測することで、ヒッグスモードの性質を捉えることができる可能性がある。高強度テラヘルツ波ポンプ-可視反射プローブ測定を行ったところ、転移温度以下でテラヘルツポンプ電場波形の 2 乗に比例した形のポンププローブ信号が現れることを見出した。これは強いテラヘルツ電場とヒッグスモードの非線形相互作用に由来する可能性が高い。今後は温度依存性と励起強度依存性を詳細に調べることによって共鳴条件を明らかにしていく。

4.5.3 グラフェンにおける相対論的電気磁気光学

グラフェンは炭素原子が蜂の巣格子状に結合した単原子層物質である。グラフェン中の電子は、運動エネルギーが運動量に比例するという特異な性質を持ち、電子はあたかも質量がゼロであるかのように振る舞う。このため、グラフェン中の電子を記述する量子力学は通常のシュレディンガー方程式ではなく相対論を考慮したディラック方程式に従う。このことからグラフェン中の電子はディラック電子と呼ばれ、様々な特異な現象が現れる。

グラフェンが示す興味深い物理現象の一つに量子ホール効果がある。ディラック点に付随するベリー位相 (π) の存在によって、半整数の量子ホール効果が現れる。我々はこれまで、単層グラフェンを対象にこのディラック電子系特有の半整数量子ホール効果が光の領域でも生じることを、磁気光学ファラデー効果、磁気光学カー効果により実証してきた。本年度は、ディラック電子系が示す新たな相対論的電気磁気光学を探求した。

エネルギーが運動量に比例するディラック電子系では、面直磁場下で強い面内電場が加わると、電場と磁場の双対性によって電子が感じる実効磁場が減少し、最終的にランダウ準位が消失することが理論的に示されている。この現象を調べるために、強いテラヘルツ電場を静磁場下にあるグラフェンに照射し、ファラデー回転角の印加電場による変化を調べた。電場が強くなるに従い、ファラデー回転角が減少し、一定の電場を越えると回転角がゼロになる結果を得た。これを、ローレンツ不変性に基づく実効磁場の電場による動的な消失効果とみなすモデルによる数値シミュレーションを行い、実験結果を再現することに成功した。

<受賞>

[1] 松永隆佑 第 9 回日本物理学会 (領域 5) 若手奨励賞 (2015 年 3 月)

<報文>

(原著論文)

- [2] Ryusuke Matsunaga, Naoto Tsuji, Hiroyuki Fujita, Arata Sugioka, Kazumasa Makise, Yoshinori Uzawa, Hirotaka Terai, Zhen Wang, Hideo Aoki, and Ryo Shimano: Light-induced collective pseudospin precession resonating with Higgs mode in a superconductor, *Science*. **345**, 1145 (2014).
- [3] Fumiya Sekiguchi and Ryo Shimano: Excitonic correlation in the Mott crossover regime in Ge, *Phys. Rev. B* **91**, 155202 (2015).

(会議抄録)

- [4] Ryusuke Matsunaga and Ryo Shimano: Higgs amplitude mode in *s*-wave superconductors revealed by terahertz pump-terahertz probe spectroscopy, *Proc. SPIE*. **9361**, 93611D (2015).

(国内雑誌)

- [5] 松永隆佑, 島野亮: テラヘルツパルスを用いた *s* 波超伝導体のヒッグスモードの観測、*日本物理学会誌* **69**, 453 (2014).
- [6] 松永隆佑, 辻直人, 青木秀夫, 島野亮: 超伝導体中のヒッグスモード - 高強度テラヘルツ波による検出とヒッグス共鳴第三高調波発生、*固体物理* (2015) 掲載予定.

(解説等)

- [7] 島野亮, 松永隆佑: 超伝導体のヒッグスモードと光の共鳴現象、*東京大学理学部ニュース* 2015 年 1 月号, 45, 7(2015).
- [8] 松永隆佑, 辻直人, 青木秀夫, 島野亮: 光で誘起する超伝導体の擬スピンの集団歳差運動とヒッグスモードとの共鳴、2014 年サイエンス誌に載った日本人研究者, 64 (2015).
- [9] 松永隆佑, 島野亮: 超伝導と素粒子物理のつながり、2014 年サイエンス誌に載った日本人研究者, 65 (2015).
- [10] Ryusuke Matsunaga and Ryo Shimano: Higgs boson analog in superconductors revealed by terahertz spectroscopy, *SPIE Newsroom*, 30 Mar. 2015.

(プレスリリース)

- [11] 島野亮, 松永隆佑, 青木秀夫, 辻直人, 寺井弘高: 超伝導体中の“ヒッグス粒子”の性質を解明—マクロな量子状態を光で制御する新たな可能性を拓く—, 2014 年 7 月 11 日

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [12] Fumiya Sekiguchi, Masahiro Yoshita, Takashi Ito, Toshimitsu Mochizuki, Changsu Kim, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, and Ryo Shimano: Excitonic signature in the photoluminescence from electron-hole plasma in a bulk GaAs, *The 7th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems (ICSCE)*, Kanagawa, Japan, Apr. 23, 2014.
- [13] Jeyoon Yoo and Ryo Shimano: Formation of high density magnetoexcitons in uniaxially-stressed Ge, *The 7th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems (ICSCE)*, Kanagawa, Japan, Apr. 23, 2014.
- [14] Ryusuke Matsunaga, Naoto Tsuji, Hiroyuki Fujita, Arata Sugioka, Hideo Aoki, and Ryo Shimano: Collective pseudospin precession in a superconductor NbN driven by sub-gap THz electric fields, *Low Energy Electrodynamics in Solids (LEES) 2014*, Loire Valley, France, Jun. 2014.
- [15] Go Yumoto, Ryusuke Matsunaga, and Ryo Shimano: Nonlinear terahertz Faraday rotation in monolayer epitaxial graphene, *Fujihara Seminar: Real-time Dynamics of Physical Phenomena and Manipulation by External Fields*, Tomakomai, Japan, Sep. 2014.
- [16] Yuki I. Hamada, Ryusuke Matsunaga, and Ryo Shimano: Development of Time-resolved Terahertz Near-field Microscope for Observing Ultrafast Spatiotemporal Dynamics in Solids, *Fujihara Seminar: Real-time Dynamics of Physical Phenomena and Manipulation by External Fields*, Tomakomai, Japan, Sep. 2014.

招待講演

- [17] Ryo Shimano: Higgs amplitude mode in *s*-wave superconductors, *The 7th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems (ICSCE)*, Kanagawa, Japan, Apr. 22, 2014
- [18] Ryo Shimano: Ultrafast dynamics of Higgs amplitude mode in *s*-wave superconductors induced by terahertz pulse excitation, *5th International Conference on Photoinduced Phase Transitions and Cooperative Phenomena (PIPT)*, Bled, Slovenia, Jun. 9, 2014
- [19] Ryo Shimano: Observation of Higgs mode in *s*-wave superconductors, *The international workshop "Higgs Mode in Condensed Matter and Quantum Gases"*, Univ. of Kyoto, Kyoto, Japan, Jun. 24, 2014
- [20] Ryo Shimano: Observation of Higgs Amplitude Mode in Superconductors, *The 11th edition of Low Energy Electrodynamics in Solids (LEES)*, Loire Valley, France, Jul. 3, 2014
- [21] Ryo Shimano, Ryusuke Matsunaga, Yuki Hamada, Arata Sugioka, Hiroyuki Fujita, Kazumasa Makise, Yoshinori Uzawa, Hirotaka Terai, Zhen Wang,

- Naoto Tsuji, and Hideo Aoki: Higgs Mode and Terahertz Nonlinear Optics in Superconductors, 19th International Conference on Ultrafast Phenomena (UP), Okinawa, Japan, Jul. 10, 2014.
- [22] Ryo Shimano: Quantum Faraday effect in graphene, The 4th International Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics (NPO), Polvijarvi, Finland, Jul. 28, 2014
- [23] Ryo Shimano: Optical Quantum Hall effect in monolayer graphene, Japan-Korea Joint Symposium on Semiconductor Physics and Technology-Nano-carbon materials including graphene- The 75th JSAP Autumn Meeting, Hokkaido Univ., Hokkaido, Japan, Sep. 17 2014
- [24] Ryo Shimano: Real-time observation of Higgs mode in superconductors, Fujihara seminar, Real-time Dynamics of Physical Phenomena and Manipulation by External Fields, Tomakomai, Japan, Sep. 26, 2014
- [25] Ryo Shimano: Observation of Higgs mode in superconductors, ENS-UTokyo WS, Paris, France, Dec.9 2014
- [26] Ryo Shimano: Observation of Higgs mode in superconductors, International Workshop on Non-equilibrium Dynamics of Low-dimensional Electronic Systems, Leipzig, Germany, Jan. 15, 2015
- [27] Ryusuke Matsunaga and Ryo Shimano: Higgs amplitude mode in *s*-wave superconductors revealed by terahertz pump-terahertz probe spectroscopy, SPIE Photonics West OPTO: Ultrafast Phenomena and Nanophotonics XIX, San Francisco, USA, Feb. 10, 2015.
- [28] Ryo Shimano: Higgs mode in superconductors, The sixth international workshop on Optical Terahertz Science and Technology(OTST), San Diego, USA, Mar. 11, 2015,
- (国内会議)
- 一般講演
- 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 7-10 日、中部大学)
- [29] 関口文哉, 吉田正裕, 伊藤隆, 望月敏光, 金昌秀, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, 島野亮: 励起子共鳴励起条件下でのバルク GaAs の励起子モット転移
- [30] 松永隆佑, 富田圭祐, 濱田裕紀, 島野亮: *s* 波超伝導体 NbTiN におけるテラヘルツ波誘起ヒッグスモードのダイナミクス
- 第 6 回東京大学低温センター研究交流会 (2015 年 3 月 4 日、東京大学)
- [31] 湯本郷, 松永隆佑, 島野亮: 単層グラフェンにおける非線形テラヘルツファラデー回転
- [32] 海老原周, 吉岡信行, 関口文哉, 松永隆佑, 島野亮: テラヘルツ強電場によるバルク GaAs 中励起子のイオン化機構の研究
- [33] 濱田裕紀, 富田圭祐, 松永隆佑, 島野亮: YBa₂Cu₃O₇ 薄膜におけるテラヘルツ非線形応答
- [34] 富田圭祐, 濱田裕紀, 松永隆佑, 島野亮: *s* 波超伝導体におけるヒッグスモードの減衰機構
- [35] 松永隆佑, 島野亮: *s* 波超伝導体 NbN におけるヒッグスモードとテラヘルツ波の非線形共鳴
- 日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21-24 日 早稲田大学)
- [36] 山川大路, 竹中崇了, 井尻吉洋, 矢田祐之, 山本浩史, 須田理行, 加藤礼三, 島野亮, 岡本博: 近赤外ポンプ赤外・テラヘルツプローブ分光による κ 型 BEDT-TTF 塩の光誘起相転移の研究
- [37] 湯本郷, 松永隆佑, 日比野浩樹, 島野亮: 単層エビタキシャルグラフェンにおける非線形テラヘルツファラデー回転
- [38] 濱田裕紀, 富田圭祐, 松永隆佑, 島野亮: YBa₂Cu₃O₇ 薄膜におけるテラヘルツ非線形応答
- その他
- [39] 松永隆佑: 高強度テラヘルツ波で調べる超伝導ヒッグスモード, 研究会「先端物質科学と限界光駆動」、京都大学、2015 年 1 月 11 日
- 招待講演
- [40] 島野亮: テラヘルツ分光による超伝導ヒッグス・モードの観測, CMRC 研究会「超伝導研究の新展開 (鉄系・銅酸化物系+非平衡系)」、KEK つくば 4 号館、2014 年 11 月 18 日
- [41] 松永隆佑: テラヘルツ波を用いた超伝導体におけるヒッグスモードの研究, 日本物理学会第 70 回年次大会 領域 5 若手奨励賞受賞記念講演、早稲田大学、2015 年 3 月 22 日
- [42] 島野亮: 超伝導 NbN におけるヒッグス・モードの THz 波検出と超伝導状態の光操作, 日本物理学会第 70 回年次大会 領域 4, 領域 1, 領域 5 合同シンポジウム「固体と光の融合: 量子状態の制御と観測」、早稲田大学、2015 年 3 月 22 日
- (セミナー)
- [43] 松永隆佑: テラヘルツ波を用いた BCS 状態におけるヒッグスモードの研究, 平成 26 年度第 2 回光 Forum, 東京大学, 2014 年 6 月 16 日
- [44] 松永隆佑: テラヘルツ波を用いた超伝導体中のヒッグスモードの研究, 応用物理学会テラヘルツ電磁波技術研究会若手研究者サマースクール, 木更津, 2014 年 8 月 19 日
- [45] 島野亮: 光による超伝導の制御に関する最近の話題, 超伝導コロキウム, 東京大学, 2014 年 10 月 16 日
- [46] Ryusuke Matsunaga: Higgs amplitude mode in *s*-wave superconductors studied by terahertz pump-terahertz probe spectroscopy, Rice University, USA, Feb. 6, 2015

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26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、エキゾチック超伝導、ディラック電子の創成に特に注力した。

4.6.1 イリジウム複合酸化物におけるスピン軌道相互作用に誘起された新奇電子相の開拓

5d 遷移金属であるイリジウム (Ir^{4+}) の酸化物では強いスピン軌道相互作用が d 電子の状態を大きく変え、 $J_{\text{eff}} = 1/2$ 状態の電子が磁性や伝導を担っていることが明らかとなった。 $J_{\text{eff}} = 1/2$ 状態の電子の波動関数には軌道回転に伴う量子位相が内包されている。量子位相効果を体現するような新しい状態の探索を目指している。

Ir^{4+}O_6 八面体が稜共有で隣接する場合、 $J_{\text{eff}} = 1/2$ 波動関数の複素位相項の存在により干渉効果が生じ、 Ir^{4+} 間には $\text{Ir}-\text{O}_2-\text{Ir}$ 面に垂直な方向にのみ強磁性相互作用が働く。 x, y, z 方向にのみ働く3種類の強磁性結合が3つの 120° 結合からなるハニカム格子の上にそれぞれ置かれると3種の強磁性結合は競合し、量子計算の分野でよく知られる Kitaev 模型と等価になる。その基底状態は強磁性 RVB 状態と見なすことができる新奇な量子スピン液体状態となることが知られており、その現実物質での実現が望まれる。 Ir^{4+} がハニカム格子を形成する $\alpha\text{-A}_2\text{IrO}_3$ ($A = \text{Li}, \text{Na}$) では直交する3つの $\text{Ir}-\text{O}_2-\text{Ir}$ 面からなる 120° 結合の実現が期待されていた。しかし実際には、 $\alpha\text{-A}_2\text{IrO}_3$ は結晶歪やその他の磁気相互作用の影響により理想的な Kitaev モデル系とはならず、反強磁性秩序を示す。そこで我々は Kitaev 型スピン液体の実現を目指して物質開発を進め、新物質 $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ を発見した。 $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ では Ir^{4+} が直交する3つの $\text{Ir}-\text{O}_2-\text{Ir}$ 面からなる 120° 結合で結ばれ、ハニカム格子の三次元版と呼べるネットワーク (ハイパーハニカム格子) を形成する。理想的な異方的強磁性結合で結ばれれば、基底状態が2次元ハニカム格子と同様に Kitaev スピン液体と予言されている。その後の研究で $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ は磁化率の振る舞いから $\alpha\text{-A}_2\text{IrO}_3$ とは異なり強磁性相互作用が支配的とわかった。さらに強磁場を印加すると強磁性状態が誘起される。低磁場中では約 40 K でノンコリニア型の磁気秩序を示すが、Kitaev 型スピン液体に極めて近い状態が実現していると考えられ現在極めて注目を集めている。今年度は圧力下で強磁性モーメントが消失することを見出し、Kitaev 型スピン液体実現の可能性を含めて圧力下の微視的磁気状態の解明を進めている。

IrO_2 の巨大スピンホール効果とスピン流検出への応用

5d Ir 酸化物のスピン軌道相互作用によるスピン自由度と電荷の運動の強い結合、量子位相の内在は、新しいデバイス機能への展開を期待させる。自明なターゲットとしてスピントロニクス応用が挙げられる。その視点に基づいて Ir 酸化物のスピンホール効果を調べ、二元系 IrO_2 が極めて大きな逆スピンホール効果を示すことを見出した。 IrO_2 では、貴金属元素の s 電子などに比べ局在性の高い d 電子が伝導を支配しているため、より高い電気抵抗率を有する。我々はスピン流の検出素子として用いた場合より大きな電圧が得られことに気が付いた。実際、スピン流検出デバイスの性能を表すスピンホール抵抗は $\rho_{\text{H}} \sim 38 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$ を達成する。従来の貴金属ベースのデバイスに比べ桁程度大きな値である。

4.6.2 エキゾチック半金属の探索

3次元ディラック電子の創成

アンチペロブスカイト酸化物 Sr_3PbO において3次元ディラック電子の存在を確認し、すべてのキャリアが最低ランダウ準位に落ち込む量子極限を実現した。Sr 八面体の中央に酸素が位置するこの物質では Pb 6p 価電子帯と Sr 4d 伝導帯がわずかに重なる。結晶対称性によって伝導帯と価電子帯の混成は k 空間で異方的となり、一点でほぼゼロギャップとなる。このため3次元ディラック電子が出現することが窺宿、小形によって理論的に指摘された。これを受けて Sr_3PbO の単結晶を合成し、磁気抵抗、磁気トルク測定で 100 K 以上の高温まで量子振動を観測した。振動から求められた有効質量の大きさは $0.016m_e$ と極めて小さく、ディラック電子の存在が確認された。ディラック電子特有の大きなランダウ準位分裂により、5 T 程度の磁場で試料は量子極限状態となる。この状態では室温まで温度に依存しない線形磁気抵抗や、ホール抵抗の強い抑制などの異常が観測され、解析を進めている。

励起子絶縁体

励起子絶縁体とはナローギャップ半導体もしくは半金属において、電子-正孔がクーロン相互作用により対 (励起子) を形成することで絶縁化した状態である。以前から理論的に活発に議論されてきた。その電子相を体現する物質はいくつか候補が提案されてきたが決定的な証拠は未だ得られていない。5d 遷移金属層状カルコゲナイド Ta_2NiSe_5 が励起子絶縁体の最も有力な候補物質であることを示した。 Ta_2NiSe_5 は約 330 K で半導体-絶縁体転移を示す。我々はこの転移について、(1) ほぼゼロギャップ状態から 0.3 eV 程度のギャップが出現する、(2) 励起子束縛エネルギーはギャップの程度であると見積もられる、(3) 元素置換および圧力効果により一電子バンドギャップ

プを変化させた際、ゼロギャップ付近で転移温度が励起子絶縁体に特徴的なドーム型のギャップ依存性を示す。この転移温度のドーム型は、ギャップの変化のほかに、電子バンド構造の変化によるものと考えられる。これは電圧以上の電圧を印加することで観測される。

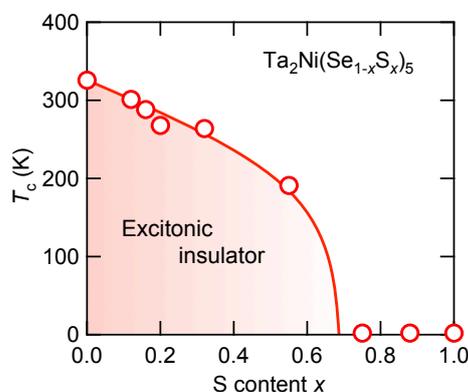


図 4.6.1: Ta_2NiSe_5 の電子相図。S 置換によって一電子バンドギャップを大きくすると励起子転移に対応すると思われる転移は抑制され、消滅する。

4.6.3 薄膜超格子構造を用いた新奇電子相の開拓

(111) 超格子による人工的ハニカム格子の創成とトポロジカル相の開拓

新奇トポロジカル相実現を目指し、(111) 配向のペロブスカイト型 $(\text{Ca,Sr})\text{IrO}_3/\text{SrTiO}_3$ 超格子薄膜を作製した。ペロブスカイト酸化物を [111] 結晶軸方向へ 2 層ずつ積層させた超格子構造は「人工的なハニカム格子」とみなすことができる。グラフェンの強スピン軌道相互作用極限版とみなすことができ、トポロジカル絶縁体の実現も理論的に予言されている。しかし、(111) 表面は極性を持つため、このような超格子の作製は技術的にきわめて非常に困難であり、遷移金属酸化物ペロブスカイト全体でも数えるほどしか例がない。製膜条件の最適化や、組成を工夫することで、原子層レベルで制御された (111) 超格子膜の実現に初めて成功した。2 層、4 層、6 層の Ir の (111) 超格子では磁気秩序に伴う金属絶縁体転移が観測され、電子相関によりモット絶縁体へのトポロジカル転移が起きたと考えられる。Ir を Rh に置き換えるなどの相関効果の制御により、より多彩なハニカム格子由来の新奇電子相の発現が期待される。

<受賞>

- [1] Hidenori Takagi, 高被引用論文著者賞、トムソンロイター、2014 年 7 月。

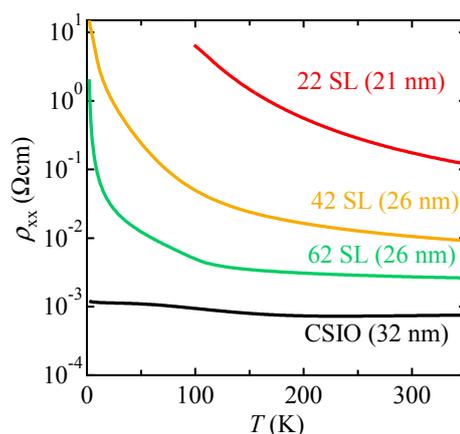


図 4.6.2: $(\text{Ca,Sr})\text{IrO}_3/\text{SrTiO}_3$ 超格子構造による人工的なハニカム格子中の層数制御による金属絶縁体転移

<報文>

(原著論文)

- [2] H. Kawasoko, T. Takayama, and H. Takagi: Thermoelectric properties of semi-metallic $\text{Ru}_2\text{Sn}_{3-\delta}$ with low thermal conductivity, *Applied Physics Express* **7**, 115801 (2014).
- [3] S. Niitaka, S. Lee, Y. Oshima, K. Kato, D. Hashizume, M. Takata, and H. Takagi: Synchrotron X-ray powder diffraction and convergent beam electron diffraction studies on the cubic phase of MgV_2O_4 spinel, *Journal of Solid State Chemistry* **215**, 184-188 (2014).
- [4] D. Hirai, R. Kawakami, O. V. Magdysyuk, R. E. Dinnebier, A. Yaresko, and H. Takagi: Superconductivity at 3.7K in Ternary Silicide Li_2IrSi_3 , *Journal of the Physical Society of Japan* **83**, 103703 (2014).
- [5] K. Tomiyasu, K. Iwasa, H. Ueda, S. Niitaka, H. Takagi, S. Ohira-Kawamura, T. Kikuchi, Y. Inamura, K. Nakajima, and K. Yamada: Spin-Orbit Fluctuations in Frustrated Heavy-Fermion Metal LiV_2O_4 , *Physical Review Letters* **113**, 236402 (2014).
- [6] T. Takayama, A. Yaresko, A. Matsumoto, J. Nuss, K. Ishii, M. Yoshida, J. Mizuki, and H. Takagi: Spin-Orbit coupling induced semi-metallic state in the 1/3 hole-doped hyper-kagome $\text{Na}_3\text{Ir}_3\text{O}_8$, *Scientific Reports* **4**, 6818 (2014).
- [7] S. Bahr, A. Alfonsov, G. Jackeli, G. Khaliullin, A. Matsumoto, T. Takayama, H. Takagi, B. Büchner, and V. Kataev: Low-energy magnetic excitations in the spin-orbital Mott insulator Sr_2IrO_4 , *Physical Review B* **89**, 180401 (2014).

- [8] M. Autore, P. Di Pietro, P. Calvani, U. Schade, S. Pyon, T. Takayama, H. Takagi, and S. Lupi: Phase diagram and optical conductivity of $\text{La}_{1.8-x}\text{Eu}_{0.2}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, *Physical Review B* **90**, 035102 (2014).
- [9] Y.-S. Fu, M. Kawamura, K. Igarashi, H. Takagi, T. Hanaguri, and T. Sasagawa: Imaging the two-component nature of Dirac-Landau levels in the topological surface state of Bi_2Se_3 , *Nature Physics* **10**, 815-819 (2014).
- [10] D. Präpper, A. N. Yaresko, T. I. Larkin, T. N. Stanislavchuk, A. A. Sirenko, T. Takayama: Fano Resonances in the Infrared Spectra of Phonons in Hyperkagome $\text{Na}_3\text{Ir}_3\text{O}_8$, A. Matsumoto, H. Takagi, B. Keimer, and A. V. Boris, *Physical Review Letters* **112**, 087401 (2014).
- [11] K. Seki, Y. Wakisaka, T. Kaneko, T. Toriyama, T. Konishi, T. Suda, N. L. Saini, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, N. Katayama, M. Nohara, H. Takagi, T. Mizokawa, and Y. Ohta: Excitonic Bose-Einstein condensation in Ta_2NiSe_5 above room temperature, *Physical Review B* **90**, 155116 (2014).
- [12] K. Fujita, M. H. Hamidian, S. D. Edkins, C. K. Kim, Y. Kohsaka, M. Azuma, M. Takano, H. Takagi, H. Eisaki, S.-i. Uchida, A. Allais, M. J. Lawler, E.-A. Kim, S. Sachdev, and J. C. Séamus Davis: Direct phase-sensitive identification of a d-form factor density wave in underdoped cuprates, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **111**, E3026-E3032 (2014).
- [13] J. M. Riley, F. Mazzola, M. Dendzik, M. Michiardi, T. Takayama, L. Bawden, C. Granerød, M. Leandersson, T. Balasubramanian, M. Hoesch, T. K. Kim, H. Takagi, W. Meevasana, P. Hofmann, M. S. Bahramy, J. W. Wells, and P. D. C. King: Direct observation of spin-polarized bulk bands in an inversion-symmetric semiconductor, *Nature Physics* **10**, 835-839 (2014).
- [14] A. Prodi, A. Daoud-Aladine, F. Gozzo, B. Schmitt, O. Lebedev, G. van Tendeloo, E. Gilioli, F. Bolzoni, H. Aruga-Katori, H. Takagi, M. Marezio, and A. Gauzzi: Commensurate structural modulation in the charge- and orbitally ordered phase of the quadruple perovskite $(\text{NaMn}_3)\text{Mn}_4\text{O}_{12}$, *Physical Review B* **90**, 180101-180105 (2014).
- [15] A. Nakamura, Y. Gu, K. Taniguchi, N. Shibata, H. Takagi, and Y. Ikuhara: Phase Interface Structures in $\text{Li}_{1+x}\text{Rh}_2\text{O}_4$ Zero Strain Cathode Material Analyzed by Scanning Transmission Electron Microscopy, *Chemistry of Materials* **27**, 938-943 (2015).
- [16] K. Taniguchi, T. Yoshino, Y. Gu, Y. Katsura, and H. Takagi: Reversible Electrochemical Insertion/Extraction of Mg and Li Ions for Orthorhombic Mo_9Se_4 with Cluster Structure, *Journal of the Electrochemical Society* **162**, A198-A202 (2015).
- [17] D. Hirai, J. Matsuno, and H. Takagi: Fabrication of (111)-oriented $\text{Ga}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{IrO}_3/\text{SrTiO}_3$ superlattices – a design playground for honeycomb physics, *APL Materials* **3**, 041508 (2015).
- [18] T. Takayama, A. Kato, R. Dinnebier, J. Nuss, H. Kono, L.S.I. Veiga, G. Fabbris, D. Haskel, and H. Takagi: Hyperhoneycomb iridate beta- Li_2IrO_3 as a Platform for Kitaev Magnetism, *Physical Review Letters* **114**, 077202 (2015).
- [19] B. Fauqué, X. Xu, A. F. Bangura, E. C. Hunter, A. Yamamoto, K. Behnia, A. Carrington, H. Takagi, N. E. Hussey, and R. S. Perry: Thermal Conductivity across the Metal-Insulator Transition in the Single-Crystalline Hyper-kagome Antiferromagnet $\text{Na}_{3+x}\text{Ir}_3\text{O}_8$, *Physical Review B* **91**, 074129 (2015).
- [20] C. R. Hunt, D. Nicoletti, S. Kaiser, T. Takayama, H. Takagi, and A. Cavalleri: Two Distinct Kinetic Regimes for the Relaxation of Light-Induced Superconductivity in $\text{La}_{1.675}\text{Eu}_{0.2}\text{Sr}_{0.125}\text{CuO}_4$, *Physical Review B* **91**, 020505(R) (2015).
- (博士論文)
- [21] 河底 秀幸: Two-dimensional Superconductivity in $\text{BaBiO}_3/\text{BaPbO}_3$ Heterostructure ($\text{BaBiO}_3/\text{BaPbO}_3$ ヘテロ構造における二次元超伝導)
- [22] 魯 楊帆: Excitonic Insulator Transition in the Zero-Gap Semiconductor Ta_2NiSe_5 (ゼロギャップ半導体 Ta_2NiSe_5 における励起子絶縁体転移)
- (修士論文)
- [23] 河野 洋人: エキゾチック半金属の圧力効果 (Pressure effects in exotic semimetals)
- [24] 葉山 慶平: アンチペロブスカイト Sr_3PbO の三次元ディラック電子 (Three dimensional Dirac electrons in antiperovskite Sr_3PbO)
- <学術講演>
- (国際会議)
- [25] H. Takagi: Exotic magnetism of $J_{\text{eff}} = 1/2$ iso-spins in complex Ir oxides, (DPG Dresden, Germany, Apr. 2, 2014).
- [26] H. Takagi: Exotic magnetism produced by strong spin-orbit coupling in complex Ir oxides, (Workshop on Correlated oxides & oxide interfaces, Minneapolis, USA, May 2, 2014).
- [27] H. Takagi: Spin-orbit coupling and electron correlations - exotic magnetism of $J_{\text{eff}} = 1/2$ iso-spins in complex Ir oxides” (Plenary), (The 13th International Conference on Muon Spin Rotation, Relaxation and Resonance, μSR 2014, Grindelwald, Switzerland, Jun. 3, 2014).
- [28] T. Takayama: Spin-orbit induced semi-metals in complex iridates, (Condensed matter physics in the city, London, UK, Jun. 17, 2014)

- [29] T. Takayama: Exotic magnetism in new complex iridates, (Condensed matter physics in the city, London, UK, Jun. 18, 2014).
- [30] H. Takagi: Novel electronic phases produced by strong spin-orbit coupling in complex Ir oxides, (Gordon Research Conference on Correlated Electron Systems, Mount Holyoke, MA, USA, Jun. 23, 2014).
- [31] H. Takagi: Exotic magnetism of $J_{\text{eff}} = 1/2$ iso-spins in complex Ir oxides, (SCES, Grenoble, France, Jul., 8, 2014).
- [32] H. Takagi: Materializing exotic phases of complex Ir oxides, (Summer school on “Topological Aspects of Condensed Matter Physics”, Ecole de Physique des Houches, Les Houches, France, Jul. 12, 2014).
- [33] D. Hirai: Exotic magnetism produced by strong spin-orbit coupling in complex Ir oxides, (Advanced Topics in Magnetism and Superconductivity 2014, Baliruche, Argentina, Jul. 31-Aug. 4, 2014).
- [34] H. Takagi: Exotic magnetism produced by strong spin-orbit coupling in complex Ir oxides, (Research Frontier of Transition-metal Compounds Opened by Advanced Spectroscopies IMR workshop on Research Frontier of Transition-metal Compounds Opened by Advanced Spectroscopies, Sendai, Japan, Oct. 2, 2014).
- [35] D. Hirai: Exploration of exotic phases produced by strong spin-orbit coupling in Ir oxide thin films, (Mott Physics Beyond the Heisenberg Model 2014, Oxford, UK, Sep. 16-19, 2014)
- [36] H. Takagi: Personal perspectives on oxide research, (International Workshop on “Single Crystals : growth and physico-chemical properties, Orsay, France, Dec. 18, 2014).
- [37] H. Takagi: 3D Dirac electrons in anti-perovskite Sr_3PbO , (Dirac Electrons in Solids, Tokyo, Japan, Jan. 14, 2015).
- [38] H. Takagi: Strong spin-orbit coupling meets with honeycomb physics in complex Ir oxides, (TKJ Workshop on strongly correlated electron systems, Hsinchu, Taiwan, Mar. 28, 2015).
- (国内会議)
一般講演
- [39] 幸坂祐生, 加納学, 高木英典, 花栗哲郎, 笹川崇男: 極性半導体 BiTeI における両極性 2 次元キャリアの自発形成, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014 年 9 月
- [40] 松林和幸, 山中里奈, 久田旭彦, 片山尚幸, 野原実, 高木英典, 上床美也: 励起子絶縁体候補物質 Ta_2NiSe_5 における圧力誘起超伝導, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014 年 9 月
- [41] 中埜彰俊, 片山尚幸, 澤博, 松林和幸, 岡田卓, 上床美也, 宗像孝司, 中尾胡子, 野原実, 高木英典: 励起子絶縁体候補物質 Ta_2NiSe_5 の高圧下放射光 X 線構造解析, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014 年 9 月
- [42] 千葉優, 澤田慶, 野田智博, 杉本拓也, 大槻太毅, 溝川貴司, 小林正起, 堀場弘司, 小野寛太, 組頭広志, 中埜彰俊, 片山尚幸, 澤博, 野原実, 高木英典: Ta_2NiX_5 ($X=\text{S,Se}$) の光電子分光, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014 年 9 月
- [43] 磯部正彦, 桜井裕也, 高木英典: 混合原子価クロム酸化物 $\text{ACu}_3\text{Cr}_4\text{O}_{12}$ ($A=\text{希土類元素}$) の高圧合成と物性, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014 年 9 月
- [44] 葉山慶平, A.W.Rost, J.Nuss, C.Muehle, 高木英典: 逆ペロブスカイト A_3EO における三次元ディラック電子の輸送特性 ($A=\text{Ca,Sr,Ba}; E=\text{Pb,Sn}$), 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014 年 9 月
- [45] 平井大悟郎, 松野丈夫, 高木英典: ペロブスカイト CaIrO_3 におけるスピン軌道相互作用誘起半金属状態, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014 年 9 月
- [46] 吉村政洋, 加藤優介, 清水康弘, 武田晃, 伊藤正行, 新高誠司, 高木英典: 重い電子の挙動を示す LiV_2O_4 の軌道状態と磁気揺らぎの圧力効果, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014 年 9 月
- [47] 李尚, 小林義明, 伊藤正行, 平井大悟郎, 高木英典: $\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x\text{P}$ の電子状態 ^{31}P 核の NMR, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014 年 9 月
- [48] 富安啓輔, 岩佐和晃, 植田浩明, 新高誠司, 高木英典, 河村聖子, 菊池龍弥, 中島健次, 山田和芳: 重い電子を示すフラストレーション系 LiV_2O_4 におけるスピン揺らぎ, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014 年 9 月
- [49] 中山充大, 近藤猛, Walid Malaeb, 石田行章, 吉田良行, 高木英典, 辛埴: 超高分解能レーザー ARPES を用いて研究する $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ の電子状態, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014 年 9 月
- [50] Ulrike Niemann, Daigorou Hirai, Hidenori Takagi: Transport properties of Heavy Fermions in LiV_2O_4 thin films, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014 年 9 月
- [51] 白井優美, 葉山慶平, A.Yaresoko, A.W.Rost, C.Muehle, J.Nuss, 高木英典: 逆ペロブスカイト A_3EO における三次元ディラック電子の輸送特性 ($A=\text{Eu,Sr}; E=\text{Pb,Sn}$), 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月
- [52] 千葉優, 澤田慶, 野田智博, 杉本拓也, 大槻太毅, 溝川貴司, 小林正起, 堀場弘司, 小野寛太, 組頭広志, 中埜彰俊, 片山尚幸, 澤博, 野原実, 高木英典: 光電子分光法による Ta_2NiX_5 ($X=\text{S,Se}$) の研究, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月
- [53] 澤田慶, 大槻太毅, 溝川貴司, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 平井大悟郎, 高木英典: 光電子分光による RuP の電子構造, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月

- [54] 宮崎正範, 門野良典, 平石雅俊, 幸田章宏, 小嶋健児, 大橋啓, 高山知弘, 高木英典: $\text{Sr}_2\text{IrO}_4 \cdot \text{Sr}_3\text{Ir}_2\text{O}_7$ の反強磁性相に現れる第 2 の磁気相と頂点酸素スピン偏極
- [55] 松井直樹, 新谷大樹, 平井大悟郎, 高木英典: SrIrO_3 への磁気不純物置換による半金属絶縁体転移, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月
- [56] 吉村政洋, 加藤優介, 武田晃, 清水康弘, 伊藤正行, 新高誠司, 高木英典: 高圧下における重い電子系 LiV_2O_4 の軌道状態と磁気ゆらぎ, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月
- [57] 中埜彰俊, 鬼頭俊介, 片山尚幸, 佐賀山基, 熊井玲児, 松林和幸, 岡田卓, 上床美也, 宗像孝司, 中尾朗子, 高木英典, 市村晃一, 丹田聡, 澤博: 放射光 X 線回折を用いた励起子絶縁体の構造解析, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月

招待講演

- [58] 高木英典: Ta_2NiSe_5 は励起子絶縁体か? -物性概観-

5 一般物理理論

5.1 宇宙理論研究室(須藤・吉田)

宇宙は、微視的スケールから巨視的スケールにわたる多くの物理過程が複雑に絡まりあった物理系であり、具体的な研究テーマは多岐にわたっている。しかしそれらの共通のゴールは、宇宙の誕生から現在、さらには未来に至る進化史を物理学によって記述することである。そのためには、常に学際的かつ分野横断的な活動が本質的である。我々は、ビッグバン宇宙国際研究センターやカブリ数物連携宇宙連携機構はもちろん、国内外の他研究機関とも積極的に共同研究を実行しており、常に開かれた研究室を目指している。現在我々が行っている中心的課題は、宇宙のダークエネルギーとダークマター、太陽系外惑星、第一世代の天体形成の3つである。これらについて簡単に説明を加えておこう。

1916年のアインシュタインによる一般相対論の構築によって始まった自然科学としての宇宙論は、ハッブルによる宇宙膨張の発見(1929年)、ガモフによるビッグバン理論の提案(1946年)、宇宙マイクロ波背景放射の発見(1965年)を通じて、理論と観測の双方からの進展を受け現在の標準宇宙論に至る。多くの観測データを組み合わせることで、宇宙の全エネルギー密度の3/4がダークエネルギー、1/5がダークマター、残りの約4パーセントが通常の元素、という結論が得られている。これが宇宙の「標準モデル」である。しかしながら宇宙の主成分の正体が全く理解されていないという驚くべき事実は、宇宙・素粒子物理学のみならず、さらにより広く21世紀科学に対して根源的な謎を突きつけている。

最近の大型望遠鏡や宇宙望遠鏡を用いた深宇宙探査により、130億年以上も前、つまり宇宙が誕生してから数億年という早期に存在した銀河やブラックホールが発見されている。ビッグバンの後文字通り暗黒となった宇宙にいつ、どのように光り輝く天体が生まれたのか。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。第一世代の天体はその後の銀河形成や宇宙の進化に大きな影響を及ぼすと考えられており、現代天文学のホットトピックの一つである。次世代の大型望遠鏡により第一世代天体の形成や宇宙進化の最初の段階が明らかになると期待されている。

第2の地球は存在するか。荒唐無稽にも聞こえかねないこの疑問に対して、現在の天文学は確実に科学的に迫りつつある。1995年の初発見以来、太陽系外惑星はすでに1500個以上が発見されている。その初期に検出された系外惑星のほとんどは木星型(ガス)惑星だったが、2009年3月に打ち上げられたケ

プラー衛星を始めとする観測手段の進歩で、地球程度の質量を持つ惑星も検出されるようになった。とすればそれら遠方の地球型惑星に生命の兆候をいかにして見出すか。まさに「第2の地球は存在するか」という問いに答える日が現実のものとなりつつある。これは、物理学のみならず、天文学、地球惑星学、生物学などを総動員して取り組むべき、まさに理学部横断的な研究テーマである。

我々はこのような状況を踏まえつつ、すばる望遠鏡による広視野深宇宙探査国際共同研究を牽引し、さらには太陽系外惑星探査の新たな地平を切り開く研究を展開しつつある。具体的には、ダークエネルギーの状態方程式の決定、ダークマター分布の進化と重力レンズ統計、銀河のクラスターリング解析、ミッシングバリオンの起源と観測的検証、ロシター効果による主星と系外惑星の自転・公転軸のずれの検出、地球型惑星系の反射光を用いた表面分布の再構築とバイオマーカーの検出、第一世代星やブラックホールの形成進化を研究しつつある。さらに既存の枠にとられない独創的なテーマの開拓をも目指しており、宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測による背景重力波の検出や、重力波観測を用いた重力理論の検証、超並列計算機を用いたボルツマンシミュレーションなど、次世代宇宙論を担う新たな研究テーマにも取り組んでいる。

これらに関しては、研究室ホームページからより詳細な情報を入手することができる。

5.1.1 観測的宇宙論

遠方銀河撮像観測とガンマ線観測の相関解析

重力レンズ現象とは、遠方天体の像が、観測者と遠方天体の間に位置する質量分布によってゆがめられる一般相対論的な効果である。一般に重力レンズ効果による像のゆがみ具合はわずかなものであるが、統計処理を施すことにより視線方向に位置する質量分布を再構築することが可能である。重力レンズ現象によって再構築された質量分布は、我々の宇宙の組成や膨張史に依存しているために、重力レンズ解析により我々の宇宙の組成や膨張史に制限を与えることができる。

重力レンズ解析は、視線方向の物質分布を明らかにする点においては、非常に優れた解析手法であるものの、暗黒物質の素粒子的な性質には感度を持たない。そのため、弱重力レンズ解析を通じて暗黒物質の素粒子的な性質を探るには、多波長による観測データを併用する必要がある。本研究では、重力レンズ解析とガンマ線観測データの組み合わせにより、暗黒物質の素粒子的性質の一つである対消滅反応を調査した。暗黒物質がもし対消滅しているなら、宇宙の物質分布の高密度領域では、対消滅によるガンマ線が発生していることが予想される。一方で、物質分布の高密度領域では、その背景の銀河の像は重力レンズ現象によりゆがめられている。このことを考慮すると、銀河系内からくるガンマ線(背景ガンマ線放射)

と重力レンズ効果による銀河の像のゆがみの間には、角度相関が生じていることが期待される。

本研究では、実在するガンマ線観測と銀河撮像観測の2種のデータの相関解析を世界で初めて行い、暗黒物質の対消滅可能性を探索した。Fermi Large Area Telescopeによる背景ガンマ線放射と、Canada-France-Hawaii Telescope Lensing Survey (CFHTLenS)による銀河楕円率の角度相関関数の測定を行い、現行のデータでは有意な相関は見られなかった。この測定結果と理論モデルの比較から、暗黒物質対消滅に関する上限を与えることに成功した。本研究の提案する手法は、宇宙論的な距離スケールを利用した解析手法であり、近傍の矮小銀河や銀河中心のガンマ線観測からくる制限とは独立な制限を与える。また、将来銀河撮像計画における背景銀河楕円率のデータ蓄積により、期待される暗黒物質対消滅に関する制限は、幅広い暗黒物質質量の範囲で近傍の制限と同等かそれ以上になることを示した。[12, 89, 64, 66, 49]

弱重力レンズ効果による宇宙論パラメータ推定に対するバリオンの影響

星形成や輻射冷却などのバリオンによる過程によって宇宙の大規模構造の分布や重力レンズ効果が影響を受けることが近年、示唆されてきた。また、すばる望遠鏡に搭載される Hyper Suprime-Cam などの将来観測を鑑みて、これらバリオンが存在することによる統計誤差を正確に推定することが必要になった。我々、特に弱重力レンズ効果において、このバリオンによる効果が定量的にどれほどかをバリオンを考慮したN体シミュレーションを行うことによって明らかにした。特に弱重力レンズ効果の統計量を用いた宇宙論パラメータの推定において、従来のダークマターのみシミュレーションを用いたときと、バリオンを含めた場合でどれだけパラメータ推定値に違いが生じるかを調べた。我々の研究から、Hyper Suprime-Camの観測条件を仮定した場合、バリオンによる統計誤差は最大で 2σ 程度になり、将来観測においてはバリオンの影響を評価することが重要であることが明らかになった。

銀河撮像観測による銀河団内部構造調査

標準的な宇宙モデルでは、小さい構造がまず形成し、時間進化とともに合体や衝突などを繰り返し、より大きな構造を階層的に形成していくことが期待される。この階層的構造形成は、数値シミュレーションにより確認されている一方で、観測的に階層的構造形成を明らかにする試みが継続的に行われてきた。

弱重力レンズ解析は、銀河や銀河団といった天体の周りの物質分布を明らかにできる強力な手法である。これまでの観測により、銀河から銀河団まで質量にして約3桁程度の範囲で、天体周りの物質分布が数値シミュレーションによる予言と整合的であることが示されている。一方、階層的構造形成の重要な特徴の一つとして、大構造内の微細構造の存在が挙げ

られる。これは、例えば銀河団を構成する銀河(メンバー銀河)の物理的な起源と考えられ、銀河団内部の物質分布の詳細な調査は、構造形成の精密検証には欠かせない研究である。

本研究では、先行研究の多くが導入している仮定を用いずに、メンバー銀河の中心からの距離を弱重力レンズ解析を通じて推定する手法を開発した。この手法では、中心から離れたメンバー銀河周りの背景銀河の像の歪みのパターンに特徴的な性質が現れることを利用し、中心からの距離を推定する。高解像度数値シミュレーションを利用し、我々の手法をテストした結果、銀河群および銀河団の外縁部に位置するメンバー銀河を高精度で同定できる可能性があることを発見した。この手法を将来銀河撮像計画に応用すると、銀河団外縁部に位置するメンバー銀河の物質分布を高精度で明らかにすることができる。メンバー銀河の物質分布の測定を利用し、例えば、階層的構造形成における重要な効果の一つである潮汐破壊が、銀河団内のどの領域で起こるかを明らかにすることが可能である。

この手法は、より少ない仮定の下で銀河団内部構造を明らかにし、階層的構造形成の新しい検証方法を提供する。それと同時に、メンバー銀河の性質と質量の関係についても可視光観測の結果から議論でき、銀河形成理論への新たな制限を与えるはずである。[13]

弱重力レンズを用いたフィラメントの研究

フィラメントは宇宙の大規模構造を特徴付けるものの一つであり、特に銀河団を結ぶように存在することが多い。しかしフィラメントに起因する重力レンズ信号は非常に弱く、いままですら報告されていない。我々は大規模シミュレーションを用いてフィラメントの重力レンズ信号がどの程度検出されるかの詳細な統計研究を行った。この理論予言は将来のハイパースプリームカムサーベイなどによって観測と比較することで宇宙の構造形成の新たな検証が可能となる。[30]

強重力レンズで増光されたIa型超新星の発見

パンスターズサーベイで発見された特異な超新星爆発 PS1-10afx について、我々のグループは重力レンズで30倍に増光されたIa型超新星であるという説を唱え、論争になっていた。この説を検証すべく、超新星が十分暗くなった2013年にケック望遠鏡で超新星母銀河の深い分光観測を行い、その解析の結果重力レンズを引き起こす手前の銀河を検出し、重力レンズ説が正しいことを証明した。これは超新星の強重力レンズ効果の初発見である。また、今回の発見をもとに、将来のサーベイ観測で重力レンズ超新星を色等級図を用いて効率よく検出する新手法を考案し、この方法により将来発見される重力レンズ超新星の数を約一桁増やしうることを指摘した。[17]

銀河団背後の高赤方偏移銀河の観測が与える再イオン化への示唆

遠方銀河を銀河団の重力レンズ増光効果を利用して調べるハッブル望遠鏡 Frontier Fields 計画の最初の銀河団 Abell 2744 のデータを用いて、 $z \sim 5 - 10$ の銀河の光度関数の進化を調べた。その結果、紫外光度密度の減少が $z > 8$ で加速していることを確認し、その結果 WMAP 衛星で観測されていた宇宙のトムソン散乱の光学的深さが観測された銀河だけでは説明できないことを示した。[9]

重力レンズクエーサー探索

スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) DR7 を用いた重力レンズクエーサーの最後の重力レンズ発見報告を行った。[15] 新たに発見された重力レンズクエーサーの一つ SDSS J1405+0959 についてすばる望遠鏡でレーザーガイド星補償光学観測を行った結果、重力レンズを受けたクエーサー母銀河と三つめのクエーサー像を発見し、この重力レンズクエーサーは複雑な構造を持っていることが示された。[3] また SDSS で見つかった、現在知られている中で最大分離角をもつ SDSS J1029+2623 の分光追観測によってクエーサー近傍のアウトフローの微細構造を調べ、アウトフローがクランピーな構造をもつことを突き止めた。[25]

銀河団の探索手法の開発

銀河団を構成するメンバー銀河は色等級図上で特徴的な関係を示すため、多波長撮像サーベイ観測で似た色等級関係を示す銀河の集合を選び出すことで銀河団を同定することができる。これまでは特定のバンドの色等級関係に基づき銀河団探索が行われていたが、メンバー銀河をいわゆる種族合成モデルを用いてモデル化することで、任意のバンドの組み合わせで銀河団探索を行う新手法を開発した。これをスローンデジタルスカイサーベイの撮像データに適用し約 7 万個の銀河団カタログを構築した。[10]

高赤方偏移銀河の形成シミュレーション

宇宙論的流体シミュレーションを用いて銀河種族の進化を明らかにした。銀河風と星からの輻射圧によるフィードバック効果を取り入れ、 $z = 4$ から現在までの星質量関数とその進化を再現することに成功した。このシミュレーションを用いてダウンサイジングや金属量の進化、また星質量とハロー質量の関係を調べたところ、既存の観測結果に整合することも明らかになった。[22]

遠方サブミリ波銀河の検出可能性と統計的特徴

近年の高分解能・高感度のサブミリ波観測によって、遠方宇宙のダストに隠された星形成史が明らかになりつつある。とくに、電離炭素輝線 ([CII] 輝線) は分光赤方偏移の決定や、その時代の星形成領域の描像の理解に貢献すると期待されている。一方で、最近の観測結果から、[CII] 輝線光度と遠方サブミリ波銀河の統計量の関係は近傍とは異なることが分かってきた。そのため、既存の観測結果を説明し、遠方サブミリ波銀河の検出可能性やサイエンスケースを議論できる理論研究が必要とされている。

本研究では、宇宙論的銀河形成シミュレーションの結果から得た銀河の [CII] 輝線光度を見積もり、遠方銀河の [CII] 輝線光度と銀河の統計的性質の関係を予測し、検出可能性を議論した。シミュレーション中のガス粒子は、計算コストの制限により [CII] 輝線が起源とする水素原子ガス雲まで分解されていない。そのため、[CII] 輝線光度の見積りには、水素原子ガス雲の熱平衡状態を解いた one-zone simulation の結果を用いる。

結果として、本研究の理論モデルは近傍の観測で示される、遠赤外線光度と [CII] 輝線光度の相関を再現した [92]。さらに、ALMA による deep survey においては、感度ではなく観測体積を優先する観測が適すると結論した [70]。また、理論的に見積もられた [CII] 光度関数は赤方偏移 $z = 4.0$ から $z = 6.5$ にかけて bright end が 0.25 dex 明るくなる。これは、星形成領域の紫外線輻射場の強さの赤方偏移進化を反映している [113]。これらの結果から、遠方 [CII] 輝線銀河は $z \sim 6$ 付近の検出可能性が高く、この付近の星形成史の理解に貢献すると示唆される [50]。

スタック解析による銀河遠赤外放射量測定が与えるダスト分布への示唆

ダスト (宇宙塵) は超新星や AGB 星の活動過程で形成されるとされており、したがって主には銀河ディスク内の星間空間に分布していると通常考えられている。一方で、Ménard et al. (2010, 以下 MSFR) は SDSS 測光銀河の分布と遠方クエーサーの色との角度相関を用いて、銀河周辺での平均的なダスト赤化量を測定し、その結果銀河の中心から数 Mpc のスケールにまで、クエーサーの赤化が見られることを示した。この赤化が中心の銀河に付随するダストのみによるものとするならば、ダストの分布が普遍的に、銀河ディスク (~ 10 kpc) をはるかに超えた銀河団スケールまで広がっていることを意味する。

本研究では IRAS の全天遠赤外放射マップのスタック解析により、MSFR で用いられた SDSS 銀河サンプルおよびこれに付随する赤外放射量を測定を行った。遠赤外放射の主な寄与はダストによるものと考えられるため、MSFR とスタック解析はそれぞれダストの吸収量と放射量という独立な物理量を通して、本質的に同等の観測結果を示したものと期待される。MSFR によるダスト赤化と、スタック解析により得られたダスト放射のプロファイルを比較することでダ

スト温度を推定し、典型的な星間ダスト温度 ($\sim 20\text{K}$) と整合的な値を得た。このことは、MSFR およびスタック解析の観測結果は、ダストが銀河団スケールに広がっているという解釈と同等に、銀河ディスク内の星間ダストが銀河の空間的クラスタリングによって統計的に重ね合わさったものとしても説明可能であることを示唆している。[48, 26, 27]

AKARI FIS データを用いた系外銀河のスタック解析

銀河からの赤外線放射は星形成史を探る上で重要な指標となるが、その表面輝度は弱く個々では検出できないものがほとんどである。Kashiwagi et al. (2013、以下 K13) では SDSS 銀河サンプルを IRAS の全天遠赤外線放射マップでスタックすることにより、SDSS 銀河およびこれに付随する銀河からの赤外線放射を、統計的にはあるが直接検出することに成功した。このスタック解析は銀河からの赤外線放射を探る現状では唯一の方法である。しかしながらここで用いられた、IRAS のデータは角度分解能が悪く (約 6 分角) 精度の良い解析をするのは困難であった。

そこで我々は分解能の良い (約 1 分角) 赤外線衛星 AKARI に搭載された観測器、Far-Infrared Surveyor (FIS) による全天遠赤外線放射マップを用いて、K13 と同様の解析を行った。結果として、AKARI FIS マップを用いても K13 と同様に系外銀河からの赤外線放射を直接検出することに成功した。また K13 で示唆されていた、SDSS 銀河ではない赤外線源は AKARI による解析では見つからず、単に IRAS の分解能が悪く解析がうまくいっていなかったことが判明した。さらに IRAS とは異なり AKARI は遠赤外域に多波長のバンドを持っているため、同様の解析を各バンドで行うことにより、ダストの温度を推定することができる。ダストの温度は銀河のダストが、銀河ディスク (\sim 数 kpc) を超えたホストダークマタースケール (\sim 数 Mpc) まで広がっているのかどうかを決定する上で非常に重要である。実際はその解析を行ったところ、推定された温度は約 30K であり、Hwang et al. (2010) で測定された SDSS 銀河のダスト温度と整合性のあるものであった。[97]

マルチトレーサー法を用いた原始非ガウス性への制限

銀河のパワースペクトルの特に大スケールでの振る舞いを調べることで宇宙の原始非ガウス性を強く制限できることが知られていたが、大スケールではサーベイ領域の有限性に起因するサンプルバリエーションが卓越する。このサンプルバリエーションを克服する方法として、異なるバイアスを持つ天体のパワースペクトルの比を用いるいわゆるマルチトレーサー法が Seljak により提唱された。我々は任意のサーベイ領域の相互パワースペクトルの共分散の一般的な表式を導出し、これを用いて将来の Euclid と SKA サーベイにおけるマルチトレーサー法を用いた原始非ガ

ウス性への制限を調べ、現存のプランク衛星からの制限よりも強い制限を課しうることを指摘した。[4]

個々の銀河のハロー質量の推定法

個々の銀河のハロー質量の確率分布関数を、その銀河周辺の銀河密度から見積もる方法論を Halo Occupation Distribution (HOD) の考え方にに基づき議論した。特に HOD を用いて確率分布関数の解析的な表式を導出し、それを N 体計算に基づく銀河の模擬カタログから直接得られた確率分布関数と比較し、解析モデルが確率分布関数の複雑な振る舞いをよく再現することを示した。[11]

宇宙論的 N 体シミュレーションによる非等方銀河クラスタリングの解析

分光サーベイにより得られた銀河分布は、銀河自身の持つ特異速度場の影響による赤方偏移歪みを受けており、そのクラスタリングは非等方性を帯びる。銀河の特異速度場は局所的な重力ポテンシャルを反映しており、そのため、この非等方性の強さは構造成長と密接に関係している。また、クラスタリングの非等方性は、銀河の距離を測定された見込み角・赤方偏移から共同距離に変換する際に仮定した宇宙論パラメータと真の宇宙論パラメータが異なることによっても引き起こされる。したがって、分光サーベイにより得られた銀河のクラスタリングに刻まれた非等方性を精密に解析することで構造成長と宇宙膨張を同時に測定すること、すなわち、重力理論の宇宙論的検証が原理的に可能となる。

銀河のクラスタリングは、パワースペクトルや二点相関関数といった二点統計量により特徴づけることが可能である。実際に銀河の二点統計量の解析を行うためには、観測された銀河固有のクラスタリングの性質 (銀河バイアス) を考慮した理論テンプレートを構築する必要がある。銀河バイアスは、物理的に正しく、十分な精度を保証された解を解析的に導出することが困難であるため、 N 体シミュレーションによる模擬銀河カタログ作製ができてはじめて銀河クラスタリングの解析から信用できる結果を得ることが可能となる。

視野 10,000 平方度、赤方偏移 0.5 に渡る大規模測光・分光サーベイである Sloan Digital Sky Survey (SDSS) により提供されている Luminous Red Galaxy (LRG) は、その広大なサーベイ体積ゆえに大規模構造を探る上で非常に有意なサンプルである。SDSS LRG サンプルは、サンプルのうち 95% もの LRG が周囲に LRG を伴わず単独で存在するため、暗黒物質ハローの中心と対応していると考えられていた。しかし、 N 体シミュレーションを用いて、LRG の非等方パワースペクトルを十分高精度で再現するためには、暗黒物質ハローの中心に LRG を対応づけるだけでは不十分であることを明らかにし、さらに、ハロー中よりも局所的な重力束縛系であるサブハローと LRG を対応づけることで非等方パワースペ

クトルを再現できることを示した。また、サブハローを用いた模擬銀河カタログ自身を理論テンプレートとして使用し、宇宙論パラメータの推定をこれまでよりも高精度に行うことができる可能性を示した。[74, 62, 23]

非等方銀河クラスタリング解析における高次統計量が持つ情報量の評価

これまでの研究では、非等方銀河クラスタリングの解析にはパワースペクトルや二点相関関数といった二点統計量が用いられてきたが、非等方銀河クラスタリングをより精密に特徴付けるためにはより高次の統計量が必要となる。

我々は、銀河クラスタリングの三点統計量であるパワースペクトルを解析することで得られる、宇宙論的規模における重力理論の検証精度をフィッシャー解析により評価し、銀河クラスタリング解析におけるパワースペクトルの重要性を明らかにした。[29]

3.5 keV X 線輝線と Mixed Dark Matter モデルでの Substructure 問題

Λ CDM モデルは銀河団程度以上の大規模構造の観測結果を説明するが、銀河程度以下の小規模構造の観測は単純には説明できない。具体的には、天の川銀河サイズの銀河周辺に存在する矮小銀河の最大回転速度 V_{\max} に対する分布が一致しない Substructure 問題が知られている。これを Warm Dark Matter (WDM) の自由流減衰により小規模構造を均すことで解決しようとする、Lyman- α 吸収線の観測から加わる WDM モデルへの制限と矛盾する。ところが、WDM と CDM を混ぜた Mixed Dark Matter (MDM) モデルならこの制限を緩和し、矛盾を解消できる可能性がある。また、最近 Andromeda 銀河や Perseus 銀河団等から起源不明な 3.5 keV の X 線輝線が検出された。これは Dark Matter 粒子が崩壊した信号の可能性がある。我々は、この信号と CMB 観測等で調べられた宇宙の全物質密度を共に説明できる素粒子モデルは MDM モデルとなることに注目した。

我々は、この 3.5 keV 輝線を説明できる MDM モデルでの構造形成を調べた。 N 体シミュレーションを行うと、天の川銀河サイズ ($\sim 10^{12} M_{\odot}$) のハロー中のサブハローの数は CDM モデルの場合より ~ 30 – 50% 減少した。また、 $V_{\max} \geq 9 \text{ km/s}$ のサブハローの最大回転速度に対する分布について、MDM モデルは CDM モデルよりも観測をよく説明できた。即ち、この MDM モデルは 3.5 keV 輝線と Substructure 問題を共に説明できる。[1, 94]

シミュレーションを用いた球対称崩壊モデルの正当性の検証

X 線や重力レンズによる銀河団観測は近年の観測技術の向上により、これまで以上に精確かつ大規模な宇宙論的応用が期待されている。そのために、最も重要な銀河団質量の推定において従来簡単化のために置かれていた球対称の仮定などを必要としない理論的モデルの構築が必要である。

我々はそれを構築する前段階として、そもそも球対称の仮定がどの程度正しいものかを検証した。具体的には、球対称崩壊モデルが、シミュレーション中のダークマターハローの進化をどの程度よく記述しているかを調べた。すなわち、宇宙論的シミュレーションから取り出したハローを構成する粒子の初期時刻から現在までの分布の変化を、球対称崩壊モデルの予測と比較した。その結果、球対称崩壊モデルは、ダークマターハローの半径が最大になる時刻を早く、その最大半径を小さく予測することがわかった。また、しばしば球対称モデルと併せて用いられる、ビリアル定理が予測するハローの現在の半径は、シミュレーション中のハローの半径よりも小さいことを示した。さらにこのずれは、本来ダークマターの運動を記述する方程式であるジーンズ方程式の、速度分散に起因する項によって説明されることもわかった。この結果は球対称のモデルを超えた構築する際の基礎となるものである。

ブラソフ方程式を用いた無衝突系の数値計算法の開発

宇宙論的構造形成においては、密度分布を質点で近似して表現する N 体数値シミュレーションが広く用いられ、多くの重要な結果を明らかにしてきた（ちなみに、世界的にもっともその先駆的な研究の一つは、当物理教室の木原太郎先生が 1975 年に行ったものであり、物理的モデル化の本質はその論文に尽きているといっても過言ではない）。一方、この粒子法に基づく方法では、粒子の離散性に起因する系統的誤差の問題が不可避である。したがって、無衝突ボルツマン方程式（ブラソフ方程式）を、直接数値的に解いて粒子法による結果と比較することには大きな意義がある。我々はフランスのグループと共同で、6 次元ブラソフ方程式の数値シミュレーションコードの開発という長期プロジェクトを進めている。今年度は、マクスウェル分布に従う速度分散を持つ球対称系の計算を行い、粒子法の結果と詳細に比較を行った。[18]

5.1.2 系外惑星

星震学とロスター効果を用いたスピン軌道角の 3 次元決定

惑星の公転軸と中心星の自転軸のなす角（スピン軌道角 ψ ）は、惑星系の形成・軌道進化過程の解明

につながる重要な観測量である。例えばホットジュピターの場合、軌道移動が円盤との相互作用によるものであれば ψ はつねに小さく、古在機構や惑星散乱によるものであれば ψ はランダムにばらつくと考えられる。従って、観測された ψ の統計的な分布は、ホットジュピターが経験した軌道移動の過程を解明する手掛かりとなる。

ψ の観測的制限には、これまで主にトランジット惑星系におけるロシター・マクローリン効果 (RM 効果) が用いられてきた。ところが、RM 効果から制限できるのは天球面に射影したスピン軌道角 λ のみであり、これは一般に真のスピン軌道角 ψ とは異なる。 ψ を正確に求めるには、 λ に加えて中心星の自転軸が視線方向となす角 i_* を決定する必要がある。

そこで我々は、これまで RM 効果が観測されている 2 つのトランジット惑星系 (HAT-P-7 および Kepler-25) において星震学を用いて i_* を決定し、これを RM 効果やトランジットの減光曲線と組み合わせて解析することで、スピン軌道角 ψ の 3 次元的な推定を行った。その結果、HAT-P-7 の惑星 b については、真のスピン軌道角 $\psi \approx 120^\circ$ は、観測された $\lambda \approx 180^\circ$ よりもやや小さいことが分かった。また Kepler-25 の惑星 c に対しては、 λ が 0° 程度であるにも関わらず、3 次元的にみると惑星公転軸と中心星自転軸がずれていることを示唆する結果 ($\psi = 27^{+7}_{-9}^\circ$) を得た。Kepler-25 系は複数トランジット惑星系であるため、惑星どうしの公転軌道面はほぼ揃っており、それらはもとの原始惑星系円盤をトレースしていると考えられる。従って今回の結果は、惑星の軌道移動とは無関係に、中心星の自転軸を原始惑星系円盤に対して相対的に傾ける機構が存在することを示唆する [16, 68, 91]。

重力減光を用いたホットジュピターのスピン軌道角測定と軌道の長期進化

系外惑星系のスピン軌道角 (主星自転軸と惑星公転軸のなす角) は、ホットジュピターの軌道移動や惑星形成の初期条件と密接な関わりをもつ重要な特性である。トランジット惑星のスピン軌道角は、スピン軌道角の天球面成分 λ および主星自転軸の視線に対する傾き i_* の 2 つから決まる。通常、スピン軌道角への制限は、ロシター効果や星震学によって λ または i_* のいずれかを決定することで与えられる。

これら 2 つの成分を測光データから同時に制限できるユニークな手法として、高速自転星における重力減光を用いるものがある。von Zeipel の定理によると、主星の表面輝度は有効表面重力に比例するため、高速自転星の赤道付近は極付近と比べて暗くなる。このような星を惑星がトランジットすると、主星の極と惑星軌道の位置関係に応じてライトカーブの形状が変化するため、 i_* と λ を決定できる。この手法はホットジュピター系 Kepler-13A に適用され、スピン軌道角を高精度で決定 ($i_* = 45^\circ \pm 4^\circ$, $\lambda = 24^\circ \pm 4^\circ$) することに成功した。ところが、その後の分光観測からは、重力減光の結果と矛盾する値 ($\lambda = 58.6^\circ \pm 2.0^\circ$) が得られた。この差異の原因を特定するため、我々

は重力減光を用いた手法における系統誤差の要因を精査した。結果、重力減光から求まる i_* や λ は主星の周辺減光パラメータに非常に敏感であり、その値次第では分光観測と整合的な解 ($i_* = 81^\circ \pm 5^\circ$, $\lambda = 59^\circ \pm 2^\circ$) が得られることがわかった。従って、重力減光からスピン軌道角を決定する際は、周辺減光の信頼できるモデル化、あるいは他の独立な観測による制限のいずれかが必須であるといえる。さらに、上記の解の正当性の検証手段として、主星の四重極ポテンシャルに起因する軌道歳差運動の追観測が有用であることも示した [8, 106, 108, 112]。

以上の理解を踏まえたうえで、上記の手法をホットジュピター系 HAT-P-7 にも新たに適用した。その結果、惑星の公転軌道面が我々の視線方向と揃っているのに対し、主星の極は視線方向に向いている ($i_* \approx 0^\circ$) ことが明らかとなった。このような構造は星震学の結果と整合的だが、今回の結果はそれをより高い精度で定量的に裏付けるものである [8]。

トランジット光度曲線の時間変化性を利用した系外惑星系 PTF08-8695 のパラメータ推定

PTFO 8-8695 系は、高速自転する T タウリ型星と超短周期のホットジュピターからなる系外惑星系である。この系に対しては 2009 年と 2010 年の 2 回トランジット (惑星による主星の食) が観測されているが、その際の主星の光度曲線の形状が互いに大きく異なるという特異性が指摘されている。過去の研究ではこの解釈の難しい特徴を、主星の重力減光 (高速自転による極領域に対する赤道領域の光度の低下) 及び主星の自転軸と惑星の公転軸の歳差運動に帰着させ、それをモデル化することで惑星の質量や半径、軌道傾斜角など種々のパラメータを決定している。しかし、その内容は主星の自転周期と惑星の公転周期の同期という、この系においては物理的根拠の乏しい仮定の下に限定されており、解析が十分尽くされていないとは言い難い。そこで本研究では自公転同期の仮定を取り除き、より広いパラメータ空間の下で観測データを再解析した結果、この系に対しては過去の研究の解以外にも様々な解が存在しうることを示した。さらに、それぞれの解においては惑星の質量、半径などの物理的特徴が互いに大きく異なるため歳差運動を通じて光度曲線の形状が変化する時間スケールも異なる点に着目し、それぞれの光度曲線の形状の今後の理論予測を与えた。この理論予測は、追観測によって得られるトランジット光度曲線との比較を通じた系の真の解の峻別に有用であると期待される。[51, 93]

5.1.3 星形成

紫外線背景光影響下での種族 III 星の質量分布

初期宇宙で金属量ゼロのガスから形成される星は種族 III 星と呼ばれ、銀河系の星と比べて質量が大きかったと言われている。今回我々はこのような種族

III 星が生まれるような始原ガス雲を宇宙論的シミュレーション中で多数同定し、その統計的性質を吟味することで具体的な星質量分布を求めた。本年の研究で特筆すべきはまずガス雲のサンプル数の多さであり、実に 1500 例以上のガス雲の重力収縮過程を計算した。さらに、種族 III 星の形成過程は周りの他の星が作る紫外線輻射場にも依存することが分かっており、輻射強度に応じて III.1 星、III.2 星の副種族に分かれると言われている。我々は次々と生まれる種族 III 星が作る紫外光輻射強度を全ての星形成ガス雲で評価し、III.1/III.2 別の星質量分布を計算した。その結果、100Msun を上回る大質量の星が全体としては多いこと、redshift が下がるにつれて III.2/III.1 星の比が小さくなって平均星質量が下がること、などの性質を初めて予言した。[19]

初期宇宙での超大質量星形成におけるバースト的質量降着と紫外線フィードバック

可視・赤外線観測によって、宇宙が 10 億歳程度未満の時に 10 億太陽質量程度の超巨大ブラックホールが活動銀河核の中に存在している証拠が幾つか見つかっている。このようなブラックホールの形成過程については詳しく知られていないため、それを説明しようと試みる研究が多くなされている。形成モデルの中でも有力なものが direct collapse モデルである。このモデルでは $\sim 10^5 M_{\odot}$ の超大質量星が $\sim 10^5 M_{\odot}$ の中間質量ブラックホールとなる過程を考える。このブラックホールが種となり、ガス降着・ブラックホール合体により成長していくことで超巨大ブラックホールが形成されていく。

超大質量星は、原始星から周囲のガスの急速降着により形成される。ここで問題となるのが星からの紫外線フィードバックである。星から大量の紫外線が放出されると、ガスの降着が抑制されて星の成長が止まり、超大質量星が形成されない。

降着率が一定の場合には、フィードバックが起きず問題にならないことが既に知られている。しかしより現実的には降着率は変動する。特に星の周囲にできる円盤は重力不安定になると分裂片を形成し、これが降着率のバーストを起こす。

本研究では、バースト降着が起きる状況で超大質量星形成を考え、この場合に紫外線フィードバックが星形成に与える影響を調べた。平均降着率が $\sim 10^{-1} M_{\odot}/\text{yr}$ の場合で、バースト質量降着史を手で与え、1次元の星の進化計算を行った。

降着率が一定の場合には、星は進化の過程で収縮せず単調に膨張していく。その際、有効温度は 5000 K 程度と低い値に保たれるため、放出される紫外線量は少なく、フィードバックは効かない。一方バースト降着が起きる場合には、降着率が低い時期に星が収縮してしまい、その結果有効温度が上がり電離光子も大量に放出され、フィードバックが効く可能性が出てくる。フィードバックが効く条件は、降着率が低い時期の長さに大きく依存する。これは電離光子放出量が、降着率が低い時間が長いほど星が大きく収縮するために多くなるからである。本研究では、

低降着率期の長さが 10^3 yr 以上になると、フィードバックが重要になると結論づけた。

初期宇宙における巨大ブラックホールの種形成

近年の遠方宇宙の観測により、ビッグバンからわずか 8 億年あまりで $10^9 M_{\odot}$ の質量を持つ超大質量ブラックホール (SMBH) が存在する事が分かってきた。このような短い時間で観測されたような大質量天体を形成する機構は未だ知られていない。現在のところ Direct Collapse シナリオと呼ばれる形成プロセスが精力的に研究されている。これは初期宇宙において大きなジーンズ質量を持つガス雲が重力不安定により崩壊し、結果として $10^5 M_{\odot}$ の超大質量星が形成される。この星が死後 BH に崩壊し観測された SMBH の種となる、というシナリオである。Direct Collapse は初期宇宙における非常に強い輻射を受けたガス雲で起こると考えられている。本研究では、この Direct Collapse 現象が初期宇宙においてどの程度起こりうるかを検証した。

現在のところ宇宙論的初期条件から出発した N 体計算をもとに約 40 個の Direct Collapse 候補ハロー (DC ハロー) を同定し、その中の 20 サンプルに対して流体計算を行った。これらのハローにおいては先行研究が示唆するような、超大質量星形成は起こらないということがわかった。これは先行研究では、孤立した環境下にある理想的な DC ハローの進化が調べられていたのみであり、より現実的な宇宙論的な環境下では光源となる星・銀河を含むハローに起因する複雑な相互作用 (潮汐作用、合体) によって崩壊が妨げられるためである。

低金属量ガス雲の収縮シミュレーション

金属 (ヘリウムより重い元素) を含まないガス雲の収縮により形成される初代星は現在より大質量 (数 10–1000 太陽質量) であったと考えられる。一方、現在の星は 0.1–1 太陽質量である。これまでの研究で、ガス雲中の金属量がある程度上昇すると、ダスト (金属が凝縮して形成される固体微粒子) による冷却でガスが分裂し、小質量星が形成される傾向になったことが明らかになっている。本研究では、ガス雲が分裂するのに必要なダスト量と、それに対応する金属量 (臨界金属量) を求めた。特に、我々は初期宇宙においてより現実的なダストモデルの構築を試みた。

初期宇宙において、ダストは初代星を親星とする超新星によって供給される。また、収縮ガス雲中では、ダストが気相中の金属原子や分子を取り込む現象 (ダスト成長) が効果的である。我々は両方を考慮した準解析的計算を行い、ガス雲の分裂条件に与える影響を調べた。いくつかのモデルパラメータ (超新星の親星質量、星周ガス密度) について計算を行った結果、臨界金属量は 10^{-5} 太陽金属量程度と見積もられた。また、先行研究では、初期宇宙のダスト組成・サイズ分布として、現在と同じものを仮定している場合が多いが、本研究のダストモデルと比較

して、最大で 1 桁程度臨界金属量を過小評価していることがわかった [20, 5, 63]。

続いて我々は、低金属量ガス雲の重力収縮過程を 3 次元流体シミュレーションで追うことにより、分裂条件を求めた。超新星ダストモデルとダスト成長を考慮したシミュレーションは本研究が初めてである。また、中心解像度を高めるため、ポロノイ図を用いた新しい粒子分割法 [110] を用いた。結果的に、金属量が 10^{-6} 太陽金属量の場合、ダスト冷却が不十分で、ガス雲は分裂せずに単一の原始星が形成された。一方、 10^{-4} 太陽金属量の場合、ダスト成長によってダスト冷却が促進され、円盤部分が分裂することが分かった。したがって、臨界金属量は 10^{-6} と 10^{-4} 太陽金属量の間にあることが示された [59, 60, 90]。

<報文>

(原著論文)

- [1] Akira Harada, Ayuki Kamada, Naoki Yoshida: “Structure formation in a mixed dark matter model with decaying sterile neutrino: the 3.5 keV X-ray line and the Galactic substructure”, arXiv:1412.1592
- [2] Bun’ei Sato, Teruyuki Hirano, Masashi Omiya, Hiroki Harakawa, Atsushi Kobayashi, Ryo Hasegawa, Takuya Takarada, Kiyoe Kawauchi, & Kento Masuda: “Precise Radial Velocity Measurements for Kepler Giants Hosting Planetary Candidates: Kepler-91 and KOI-1894,” *The Astrophysical Journal*, **802** (2015) 57
- [3] Cristian E. Rusu, Masamune Oguri, Yosuke Minowa, Masanori Iye, Anupreeta More, Naohisa Inada, & Shin Oya: “Adaptive Optics Observations of the Gravitationally Lensed Quasar SDSS J1405+0959”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **444** (2014) 2561-2570
- [4] Daisuke Yamauchi, Keitaro Takahashi, & Masamune Oguri: “Constraining Primordial Non-Gaussianity via a Multitracer Technique with Surveys by Euclid and the Square Kilometre Array”, *Physical Review D*, **90** (2014) 083520
- [5] Gen Chiaki, Stefania Marassi, Takaya Nozawa, Naoki Yoshida, Raffaella Schneider, Kazuyuki Omukai, Marco Limongi & Alessandro Chieffi: “Supernova dust formation and the grain growth in the early universe: the critical metallicity for low-mass star formation” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **446** (2015) 2659
- [6] Ikkoh Shimizu, Akio Inoue, Takashi Okamoto & Naoki Yoshida: “Physical Properties of UDF12 Galaxies”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **440** (2014) 731
- [7] Ken Osato, Masato Shirasaki & Naoki Yoshida: “Impact of Baryonic Effects on Weak Lensing Cosmology: Higher-Order Statistics and Parameter Bias”, ArXiv:1501.02055
- [8] Kento Masuda: “Spin-orbit Angles of Kepler-13Ab and HAT-P-7b from Gravity Darkened Transit Light Curves,” arXiv:1503.05446 (2015)
- [9] Masafumi Ishigaki, Ryota Kawamata, Masami Ouchi, Masamune Oguri, Kazuhiro Shimasaku, & Yoshiaki Ono: “Hubble Frontier Fields First Complete Cluster Data: Faint Galaxies at $z \sim 5 - 10$ for UV Luminosity Functions and Cosmic Reionization”, *The Astrophysical Journal*, **799** (2015) 12
- [10] Masamune Oguri: “A Cluster Finding Algorithm Based on the Multiband Identification of Red Sequence Galaxies”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **444** (2014) 147-161
- [11] Masamune Oguri & Yen-Ting Lin: “Inferring Host Dark Matter Halo Masses of Individual Galaxies from Neighboring Galaxy Counts”, *The Astrophysical Journal*, **801** (2015) 94
- [12] Masato Shirasaki, Shunsaku Horiuchi, & Naoki Yoshida: “Cross correlation of cosmic shear and extragalactic gamma-ray background: Constraints on the dark matter annihilation cross section”; *Physical Review D*, **90** (2014) 063502
- [13] Masato Shirasaki “Weak Gravitational Lensing as a Probe of Physical Properties of Substructures in Dark Matter Halos”; *The Astrophysical Journal*, **799** (2015) 188
- [14] Matthew B. Bayliss, Jane R. Rigby, Keren Sharon, Eva Wuyts, Michael Florian, Michael D. Gladders, Traci Johnson, & Masamune Oguri: “The Physical Conditions, Metallicity and Metal Abundance Ratios in a Highly Magnified Galaxy at $z = 3.6252$ ”, *The Astrophysical Journal*, **790** (2014) 144
- [15] Naohisa Inada, Masamune Oguri, Cristian E. Rusu, Issha Kayo, & Tomoki Morokuma: “Discovery of Four Doubly Imaged Quasar Lenses from the Sloan Digital Sky Survey”, *The Astronomical Journal*, **147** (2014) 153
- [16] Othman Benomar, Kento Masuda, Hiromoto Shibahashi, & Yasushi Suto: “Determination of three-dimensional spin-orbit angle with joint analysis of asteroseismology, transit lightcurve, and the Rossiter-McLaughlin effect: Cases of HAT-P-7 and Kepler-25,” *Publication of the Astronomical Society of Japan*, **66** (2014) 94
- [17] Robert M. Quimby, Masamune Oguri, Anupreeta More, Surhud More, Takashi J. Moriya, Marcus C. Werner, Masayuki Tanaka, Gaston Folatelli, Melina C. Bersten, Keiichi Maeda, & Ken’ichi Nomoto: “Detection of the Gravitational Lens Magnifying a Type Ia Supernova”, *Science*, **344** (2014) 396-399
- [18] S. Colombi, T. Sousbie, S. Peirani, G. Plum, and Y. Suto: “Vlasov versus N -body: the Hénon sphere”, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* (2015) in press.

- [19] Shingo Hirano, Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida, Kazuyuki Omukai, & Harold W. Yorke: “Primordial star formation under the influence of far ultraviolet radiation: 1540 cosmological haloes and the stellar mass distribution”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **448** (2015) 568
- [20] Stefania Marassi, Gen Chiaki, Raffaella Schneider, Marco Limongi, Kazuyuki Omukai, Takaya Nozawa, Alessandro Chieffi & Naoki Yoshida: “The Origin of the Most Iron-poor Star”, *The Astrophysical Journal*, **794** (2014) 100
- [21] Steve Schulze, et al.: “GRB 120422A/SN 2012bz: Bridging the Gap between Low- and High-Luminosity Gamma-Ray Bursts”, *Astronomy & Astrophysics*, **566** (2014) A102
- [22] Takashi Okamoto, Ikkoh Shimizu, & Naoki Yoshida, “Reproducing the Cosmic Evolution of Galaxy Population from $z = 4$ to 0”, *PASJ*, **66** (2014) 70
- [23] Takahiro Nishimichi, Akira Oka: “Simulating the Anisotropic Clustering of Luminous Red Galaxies with Subhalos: A Direct Confrontation with Observation and Cosmological Implications”, 2014, *Physical Review D* 89, 043509,
- [24] Teruyuki Hirano, Kento Masuda, Bun’ei Sato, Othman Benomar, Yoichi Takeda, Masashi Omiya, Hiroki Harakawa, & Atsushi Kobayashi: “Global Analysis of KOI-977: Spectroscopy, Asteroseismology, and Phase-curve Analysis,” *The Astrophysical Journal*, **779** (2015) 9
- [25] Toru Misawa, Naohisa Inada, Masamune Oguri, Poshak Gandhi, Takashi Horiuchi, Suzuka Koyamada, & Rina Okamoto: “Resolving the Clumpy Structure of the Outflow Winds in the Gravitationally Lensed Quasar SDSS J1029+2623”, *The Astrophysical Journal*, **794** (2014) L20
- [26] Toshiya Kashiwagi, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Issha Kayo, Takahiro Nishimichi, and Kazuhiro Yahata: “Modeling the anomaly of surface number densities of galaxies on the Galactic extinction map due to their FIR emission contamination”, *The Astrophysical Journal*, **799**(2014)132 (arXiv:1412.0354)
- [27] Toshiya Kashiwagi and Yasushi Suto: “Constraining spatial extent and temperature of dust around galaxies from far-infrared stacking image analysis”, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* (2015) in press.
- [28] Yousuke Utsumi, Satoshi Miyazaki, Margaret J. Geller, Ian P. Dell’Antonio, Masamune Oguri, Michael J. Kurtz, Takashi Hamana, & Daniel G. Fabricant: “Reducing Systematic Error in Weak Lensing Cluster Surveys”, *The Astrophysical Journal*, **786** (2014) 93
- [29] Yong-Seon Song, Atsushi Taruya, Akira Oka: “Cosmology with anisotropic galaxy clustering from the combination of power spectrum and bispectrum”, 2015, arXiv:1502.03099
- [30] Yuichi Higuchi, Masamune Oguri, & Masato Shirasaki: “Statistical Properties of Filaments in Weak Gravitational Lensing”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **441** (2014) 745-756
- [31] Zhang Yichen, Jonathan C. Tan, & Takashi Hosokawa: “Radiation Transfer of Models of Massive Star Formation. III. The Evolutionary Sequence”, *The Astrophysical Journal*, **788** (2014) 166
- (国内雑誌)
- [32] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その二十七: 科学者倫理をめぐる狂騒”, 東京大学出版会 UP **500**(2014)6月号, pp.33-41.
- [33] 須藤 靖: “宇宙の加速膨張: 宇宙定数か、ダークエネルギーか”, 日本物理学会誌 **69**(2014)7月号, pp.442-443.
- [34] 須藤 靖: “サイエンス最前線 2: 宇宙の始まり インフレーションと金融ビッグバン”, 週刊エコノミスト 2014年7月22日号, pp.80-81.
- [35] 須藤 靖: “サイエンス最前線 6: 時空のさざ波を見る 重力波で宇宙を探る「目」: KAGRA”, 週刊エコノミスト 2014年8月18日号, pp.72-73.
- [36] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その二十八: 西安で学んだ日中関係打開の糸口”, 東京大学出版会 UP **503**(2014)9月号, pp.30-38.
- [37] 須藤 靖: “サイエンス最前線 10: 世界最大のデジカメ すばる望遠鏡で宇宙史を紐解く”, 週刊エコノミスト 2014年9月23日号, pp.70-71.
- [38] 須藤 靖: “サイエンス最前線 14: 太陽系外惑星 第二の地球を探すケプラー探査機”, 週刊エコノミスト 2014年10月21日号, pp.70-71.
- [39] 須藤 靖: “サイエンス最前線 18: CMB 全天温度地図 誕生後38万年の宇宙の姿”, 週刊エコノミスト 2014年11月18日号, pp.46-47.
- [40] 須藤 靖: “注文の多い雑文 その二十九: 書評という仕事”, 東京大学出版会 UP **506**(2014)12月号, pp.24-30.
- [41] 須藤 靖: “サイエンス最前線 22: SDSS 銀河宇宙のデジタル3次元地図”, 週刊エコノミスト 2014年12月16日号, pp.86-87.
- [42] 須藤 靖: “サイエンス最前線 26: たんぼぼ計画 地球上の生命はどこから来たのか”, 週刊エコノミスト 2015年1月20日号, pp.66-67.
- [43] 須藤 靖: “サイエンス最前線 30: ハッブル宇宙望遠鏡 可視光で探る銀河宇宙の果て”, 週刊エコノミスト 2015年2月17日号, pp.72-73.
- [44] 須藤 靖: “一般相対論ミニマム”, 日本物理学会誌 **70**(2015)2月号, pp.87-94.
- [45] 須藤 靖: “サイエンス最前線 34: TMT 史上最大の口径 30メートル工学赤外線望遠鏡”, 週刊エコノミスト 2015年3月17日号, pp.72-73.

- [46] 須藤 靖 朝日新聞 asahi.com webronza 科学・環境
論説 2014 年 6 月 23 日、7 月 16 日、9 月 9 日、12
月 6 日、2015 年 2 月 6 日、2 月 11 日、3 月 20 日
- [47] 須藤 靖 読売新聞 書評 2014 年 4 月 27 日、5 月 12
日、6 月 8 日、6 月 15 日、6 月 29 日、7 月 20 日、8
月 17 日、8 月 24 日、8 月 31 日、9 月 14 日、9 月 21
日、10 月 12 日、10 月 19 日、11 月 2 日、11 月 9 日、
12 月 7 日、12 月 14 日、12 月 21 日
- (学位論文)
- [48] Toshiya Kashiwagi: “Stacking image analysis of
SDSS galaxies in far-infrared and its implications
for the Galactic extinction map” (博士論文)
- [49] Masato Shirasaki: “Probing Cosmic Dark Matter
and Dark Energy with Weak Gravitational Lensing
Statistics” (博士論文)
- [50] 早津夏己: “数値シミュレーションで探るサブミリ輝
線銀河の検出可能性と統計的特徴” (修士論文)
- [51] Shoya Kamiaka “Characterization of a planetary
system PTFO 8-8695 from the variability of its
transit lightcurve induced by the nodal precession”
(修士論文)
- [52] 原田了: “重力崩壊型超新星爆発のニュートリノ加熱
メカニズム” (修士論文)
- [53] 櫻井祐也: “初期宇宙における超大質量星形成と超大
ブラックホール” (修士論文)
- (著書)
- [54] 須藤 靖: 水素エネルギー協会 (編) “水素の事典”、朝
倉書店 (2014 年 4 月刊行、728 ページ、2.2 節 宇宙
の始まりと水素 執筆)
- [55] 須藤 靖: “宇宙人の見る地球”、毎日新聞社 (2014 年
5 月刊行、180 ページ)
- [56] 吉岡一男・有本信雄・山田亨・須藤 靖: “宇宙とその
進化”、放送大学印刷教材 (2015 年 3 月刊行、12 ~ 15
章 執筆)
- [57] 内田樹 他: “高校生と考える日本の問題点”、桐光学園
訪問授業 (2015 年 4 月刊行) (第 6 章 吉田直紀担当)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [58] Kento Masuda: “Low Density Planets around
Kepler-51 Revealed with Transit Timing Varia-
tions”; Exoplanetary Science 2014 (Quy Nhon,
Vietnam, 4/20-26, 2014)
- [59] Gen Chiaki: “Hydrodynamic simulations of col-
lapsing gas clouds with low metallicities” The
physics of first star and galaxy formation (Edin-
burgh, 6/10-12, 2014)
- [60] Gen Chiaki: “Hydrodynamic simulations of col-
lapsing gas clouds with low metallicities” EWASS
2014 (Geneve, 6/30-7/4, 2014)
- [61] Masamune Oguri: “Strong Gravitational Lenses in
the 2020s”; Thirty Meter Telescope Science Forum
(Tucson, USA, July 2014)
- [62] Akira Oka: “Simulating the Anisotropic Clustering
of the SDSS DR7 LRGs with Subhalos”; RESCEU
APCosPA Summer School on Cosmology and Par-
ticle Astrophysics (Poster, Nagano, 7/31, 2014)
- [63] Gen Chiaki: “The effect of grain growth on star
formation in low-metallicity collapsing gas clouds”
Cosmic Dust (Osaka, 8/4-8, 2014)
- [64] Masato Shirasaki: “Cross-Correlation of Cos-
mic Shear and Extragalactic Gamma-ray Back-
ground”; International Conference on Particle
Physics and Cosmology (COSMO 2014) (Chicago,
8/25-29, 2014)
- [65] Sunmyon Chon: “The formation of SMBH in
cosmological simulation”; The 6th EAST-ASIAN
NUMERICACAL ASTROPHYSICS MEETING
(Kyung Hee University, Suwon, Korea, 9/15-19,
2014)
- [66] Masato Shirasaki: “Dark Matter Annihilation
Cross Section Constraints from the Cross-
correlation of Cosmic Shear and Extragalac-
tic Gamma-ray Background”; Fifth International
Fermi Symposium (Nagoya, 10/20-24, 2014)
- [67] Masamune Oguri: “Gravitationally Lensed Super-
novae”; Galaxies and Cosmology in Light of Strong
Lensing (Kavli IPMU, November 2014)
- [68] Kento Masuda, Othman Benomar, Hiromoto
Shibahashi, Yasusi Suto: “Spin-orbit angle from
the joint analysis of the Rossiter-McLaughlin ef-
fect, transit lightcurve, and asteroseismology: mild
misalignment in a multi-transiting planetary sys-
tem,” The Workshop for Exoplanetary Science
(Kunming, China, 11/17-19, 2014)
- [69] Sunmyon Chon: “The formation of SMBH in
cosmological simulation”; Enzo Workshop 2014
(Hokkaido University, 11/18-21, 2014)
- [70] N. Hayatsu, N. Yoshida, Y. Matsuda, & I.
Shimizu: “Detectability and Statistical Properties
of the [CII] Emitter in Cosmological Hydrodynam-
ics Simulations”; Revolution in Astronomy with
ALMA -The 3rd Year- (Tokyo, 12/8-11, 2014)
- [71] Ken Osato, Masato Shirasaki, Naoki Yoshida;
“Peak-halo connection in weak lensing surveys
with baryonic N-body simulations”; Astroparticle
View of Galaxy Clusters (Hiroshima, Japan, March
24-26, 2015)
- [72] Takashi Hosokawa, & Shu-ichiro Inutsuka: “Gen-
eration of dark molecular gas in magnetized PDR”;
HI workshop (Nagoya university, 3/28, 2015)
- 招待講演
- [73] Naoki Yoshida: “Formation of Early Blackholes”,
Focus Week on Hyper Accretion (Kashiwa, Japan,
April 9, 2014)

- [74] Akira Oka: “Redshift-Space Distortions; Applications to Observations”; invited talk at CosKASI Workshop (Oral, Korea, 4/21, 2014)
- [75] Yasushi Suto: “Anomaly in the SFD extinction map and discovery of FIR emission of SDSS galaxies and quasars by stacking image analysis”; invited talk at the 10th Sino-Germany Workshop on Galaxy Formation and Cosmology “From Dark Matter to Galaxies”(Xian, China; May 22, 2014)
- [76] Naoki Yoshida: “Formation of Primordial Stars”, Physics of First Star and Galaxy Formation (Edinburgh, June 10, 2014)
- [77] Takashi Hosokawa: “The Endgame of the First Star Formation: protostellar evolution and radiative feedback” Physics of First Stars and Galaxy Formation (Edinburgh, UK, 6/15, 2014)
- [78] Naoki Yoshida: “Structure Formation in the Early Universe”, Unsolved Problems in Astrophysics (Budapest, Hungary, July 3, 2014)
- [79] Takashi Hosokawa: “The first stars and SMBHs” The 6-th East-Asian Numerical Astrophysics Meeting (Suwon, Korea, 9/15, 2014)
- [80] Yasushi Suto: “Spatial extent of dust from stacking image analysis of SDSS galaxies over IRAS and AKARI maps”; invited talk at the 6th KIAS workshop on Cosmology and Structure Formation (Korea Institute for Advanced Study; Nov.5, 2014)
- [81] Yasushi Suto: “Workshop summary: from After Dark to Beyond Dark” summary talk at the 6th KIAS workshop on Cosmology and Structure Formation (Korea Institute for Advanced Study; Nov.6, 2014)
- [82] Masamune Oguri: “Weak lensing with SuMIRe HSC/PFS”; Dawn of New Cosmology: Opportunities and Challenges in CMB Polarization and Large Scale Structure (ASIAA, Taiwan, R.O.C., December 2014)
- [83] Masamune Oguri: “Scatter and bias in cluster mass estimates”; Astroparticle View of Galaxy Clusters (Hiroshima Univ., March 2015)
- [84] Naoki Yoshida: “Statistical Computational Cosmology”, JST Symposium on Big Data Application (Tokyo, Japan, March 5, 2015)
- [85] Naoki Yoshida: “Subaru Hyper-Suprime Cam Survey and Big Data Cosmology”, 10th International Workshop on Databases in Networked Information Systems (Aizu, Japan, March 23, 2015)
- (国内会議)
- 一般講演
- [86] 須藤靖: “Spin-orbit angles of transiting planets”, RESCEU summer school (浅間温泉地本屋, 2014年7月31日)
- [87] 大栗 真宗: “種族合成モデルを用いた銀河団同定法の開発”; 日本天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学, 9/11, 2014)
- [88] 細川 隆史、Rolf Kuiper、平野信吾、Harold W. Yorke、大向一行、吉田直紀: “Forming the First Stars in 3D: 電離領域形成に伴う質量降着抑制”; 天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学、9/13, 2014)
- [89] 白崎 正人: “ガンマ線背景放射と弱重力レンズの相関解析による暗黒物質対消滅の制限”; 日本天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学, 9/11-13, 2014)
- [90] 千秋元、平野信吾、吉田直紀、野沢貴也: “低金属量ガス雲の重力収縮シミュレーション II” 日本天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学, 9/11-13, 2014)
- [91] 増田賢人、Othman Benomar、柴橋博資、須藤靖: “星震学とロスター効果を用いたスピン軌道傾斜角の3次元決定”; 日本天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学, 9/11-13, 2014)
- [92] 早津夏己、吉田直紀、松田有一、清水一紘: “数値シミュレーションで探る遠方 [CII] 輝線銀河の検出可能性と統計的特徴”; 日本天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学, 9/11 - 13)
- [93] 上赤 翔也、増田賢人、Yuxin Xue、須藤靖: “高速自転星と超短周期惑星からなる系の角運動量の力学進化”; 日本天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学, 9/11, 2014)
- [94] 原田了、鎌田歩樹、吉田直紀: “3.5 keV X 線輝線と Mixed Dark Matter モデルでの Substructure 問題”; 日本天文学会 2014 年秋季年会 (口頭発表, 山形大学, 9/13, 2014)
- [95] 櫻井祐也、細川隆史、吉田直紀: “時間変動降着率下での超大質量星形成計算”; 日本天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学, 9/11-13, 2014)
- [96] 大里 健、白崎 正人、吉田 直紀: “重力レンズ効果に対するバリオンの影響”; 日本天文学会 2014 年秋季年会 (山形大学, 9/13, 2014)
- [97] 岡部泰三、柏木俊哉、須藤靖: “AKARI FIS データを用いた系外銀河のスタック解析”; CIB ワークショップ (宇宙航空研究開発所, 10/6-8, 2014)
- [98] 鄭 昇明: “初期宇宙における巨大ブラックホールの種形成” 「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第2回ワークショップ (筑波大学, 11/3-4, 2014)
- [99] 櫻井祐也、細川隆史、吉田直紀: “初期宇宙における超大質量星形成過程の計算”; 「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第2回ワークショップ (筑波大学, 11/3-4, 2014)
- [100] 大里 健、白崎 正人、吉田 直紀: “弱重力レンズ効果を用いたパラメータ推定に対するバリオンの影響”; 第三回観測的宇宙論ワークショップ (名古屋大学, 11/27, 2014)
- [101] 鄭 昇明: “初期宇宙における超大質量 BH の種形成” 第27回 理論懇シンポジウム (国立天文台, 12/24-26, 2014)
- [102] 細川 隆史: “初代星形成におけるバースト的降着と間欠的 UV feedback”; 初代星・初代銀河研究会 2015 (東北大学, 1/18, 2015)

- [103] 鄭昇明: "宇宙論的環境下での Direct Collapse シナリオによる SMBH の形成可能性" 初代星・初代銀河研究会 2015 (東北大学, 1/19-21, 2015)
- [104] 櫻井祐也, 細川隆史, 吉田直紀: "初期宇宙における超大質量星形成の数値計算"; 初代星・初代銀河研究会 2015 (東北大学, 1/19-21, 2015)
- [105] 櫻井祐也, 細川隆史, 吉田直紀: "初期宇宙における超大質量星形成: パースト降着のもとでの星の進化"; コンパクト連星合体からの重力波・電磁波放射とその周辺領域 (京都大学, 2/12-14, 2015)
- [106] 増田賢人: "重力減光を用いた高速回転星まわりのトランジット惑星系の構造決定"; 大質量星の進化・活動現象と星の回転 (北海道大学, 2/18-20, 2015)
- [107] 櫻井祐也, 細川隆史, 吉田直紀: "初期宇宙での超大質量星形成におけるパーストの質量降着と輻射フィードバックの影響"; 大質量星の進化・活動現象と星の回転 (北海道大学, 2/18-20, 2015)
- [108] 増田賢人: "Spin-orbit configuration of an exoplanetary system from gravity-darkened transit light curves"; 系外惑星大研究会 (東京大学, 3/2-3/3, 2015)
- [109] 吉田 直紀: "大規模数値計算と広域宇宙観測データの融合"; 「京からポスト京へ向けて」シンポジウム (紀尾井ホール, 3/12, 2015)
- [110] 千秋元, 吉田直紀: "ボロノイ図を用いた粒子分割法" 日本天文学会 2015 年春季年会 (大阪大学, 3/18-21, 2015)
- [111] 須藤大地, 大里健, 北山哲, 佐々木伸, 須藤靖: "球対称崩壊・楕円体崩壊モデルの再考"; 日本天文学会 2015 年春季年会 (大阪大学 2015 年 3 月 19 日)
- [112] 増田賢人: "重力減光を用いたホットジュピターのスピン軌道角測定と軌道の長期進化"; 日本天文学会 2015 年春季年会 (大阪大学, 3/18-21, 2015)
- [113] 早津夏己, 吉田直紀, 松田有一, 清水一紘: "数値シミュレーションで探る遠方 [CII] 光度関数の赤方偏移進化"; 日本天文学会 2015 年春季年会 (大阪大学, 3/18 - 21, 2015)
- [114] 大里 健, 白崎 正人, 吉田 直紀: "バリオンを考慮した弱重力レンズ効果による宇宙論パラメータ推定"; 日本天文学会 2015 年春季年会; (大阪大学, 3/21, 2015)
- 招待講演
- [115] 大栗 真宗: "重力レンズ研究の最近の進展"; 3rd Workshop on Particle Physics of the Dark Universe (東京大学, 4/19, 2014)
- [116] 吉田 直紀: "広域サーベイによるダークマター探索"; 3rd Workshop on Particle Physics of the Dark Universe (東京大学, 4/20, 2014)
- [117] 吉田 直紀: "初期宇宙での化学反応"; 第 11 回 AMO 検討会 (大阪大学, 6/7, 2014)
- [118] 須藤靖: "ダークバリオンのサイエンス"; 研究会「2020 年代の高エネルギー宇宙物理学: X 線・ γ 線天文学の展望」(宇宙科学研究所, 2014 年 8 月 23 日)
- [119] 須藤靖: "日本学術会議科学と社会委員会科学力増進分科会高校理科教育検討小委員会からの報告"; 日本天文学会 2014 年秋季年会天文教育フォーラム「これからの学校教育における天文学」(山形大学, 2014 年 9 月 11 日)
- [120] 細川 隆史: "円盤散逸と近傍大質量星の役割"; 第一回 DTA シンポジウム "星団形成領域および星団環境での惑星の形成と進化" (国立天文台, 9/30, 2014)
- [121] 須藤靖: "第 2 2 期日本学術会議科学と社会委員会科学力増進分科会高校理科教育検討小委員会からの報告"; サイエンスアゴラ 2014 学術会議シンポジウム「高校で学ぶべき科学とは」(科学未来館, 2014 年 11 月 9 日)
- [122] 大栗 真宗: "Weak lensing with Subaru Hyper Suprime-Cam"; 第 3 回観測的宇宙論ワークショップ (名古屋大学, 11/27, 2014)
- [123] 細川 隆史: "大質量星の形成と回転"; "大質量星の進化・活動現象と星の回転" 研究会 (北海道大学, 2/18, 2015)
- [124] 吉田 直紀: "初代星の形成"; "大質量星の進化・活動現象と星の回転" 研究会 (北海道大学, 2/20, 2015) (セミナー)
- [125] Naoki Yoshida: "The Dark Age of the Universe", ASIAA Colloquium (Taipei, Taiwan, May 13, 2014)
- [126] 細川 隆史: "The First Stars: their diversity and beyond"; IoA 談話会 (東京大学天文教育センター, 5/15, 2014)
- [127] Masamune Oguri: "Gravitationally lensed supernovae"; Colloquium at Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics (Taipei, Taiwan, R.O.C., 8/20, 2014)
- [128] Naoki Yoshida: "Matter Distribution around Galaxies", Astroparticle seminar at UC Riverside (Riverside, USA, December 2, 2014)
- [129] Naoki Yoshida: "Formation of Primordial Stars and Galaxies", UCLA Astronomy Colloquium (Los Angeles, USA, December 3, 2014)
- [130] Naoki Yoshida: "Putting the Universe on a Computer", CRA Distinguished Lecture (Atlanta, USA, December 5, 2014)
- [131] Masamune Oguri: "Gravitationally lensed supernovae"; Colloquium at Department of Physics, National Tsing Hua University (Hsinchu, Taiwan, R.O.C., 12/12, 2014)
- [132] Naoki Yoshida: "Structure Formation in the Universe", ISAS Space Science Colloquium (Sagami-hara, Japan, January 14, 2015)
- [133] 須藤靖: "トランジット惑星系の主星自転・惑星軌道公転角"; 神戸大学地球惑星科学教室談話会 (神戸大学, 2015 年 1 月 29 日)
- [134] Ken Osato: "Impact of Baryonic Effects on Weak Lensing Cosmology: Higher-Order Statistics and Parameter Bias"; Kavli IPMU Astrophysics seminar (Kashiwa, Japan, March 31, 2015)

(講演)

- [135] Yasushi Suto: “Different cultures, same science”, UTRIP lecture (University of Tokyo, July 9, 2014)
- [136] 吉田 直紀: “ダークマターとダークエネルギー”; SSH 講演 (埼玉県立川越高校, 7/18, 2014)
- [137] 須藤靖: “系外惑星とバイオマーカー”, 東京大学理学部クラスター講義 「伝える」(小柴ホール, 2014年7月22日)
- [138] 吉田 直紀: “宇宙のダークマターの謎”; ナガセ 大学 学部研究会 (東京国際フォーラム, 8/21, 2014)
- [139] 吉田 直紀: “宇宙 138 億年の進化”; 日本天文学会公開講演会 (山形テルサ, 9/14, 2014)
- [140] 須藤靖: “もう一つの地球の色を解説する”, 河合塾 未来発見フォーラム 2014 (東京国際フォーラム, 2014年10月12日)
- [141] 吉田 直紀: “山頂で見る夜空、地下で見る物質”; 桐光 学園訪問授業 (神奈川県 私立桐光学園, 11/15, 2014)
- [142] 須藤靖: “みどりの地球の探し方”, 高校生のための 冬休み講座 2014 (東京大学理学部 4号館 1220号 室, 2014年12月24日)
- [143] 吉田 直紀: “星と銀河の誕生”; じっくり学ぶ宇宙 誕生の歴史 (名古屋 中日文化センター, 12/28, 2014)
- [144] 吉田 直紀: “ファーストスター”; コズミックフロン トプラネタリウム版記念 講演会 (渋谷プラネタリウ ム, 12/28, 2014)
- [145] 須藤靖: “昨今の大学をとりまく環境に関する大い なる懸念”, 神戸大学地球惑星科学教育部会外部評価 委員会 (神戸大学, 2015年1月30日)

5.2 村尾研究室

本研究室では、物理学の中でも最も新しい研究分野の一つである量子情報の理論的研究を行っている。量子情報とは、0と1のみならず0と1の任意の重ね合わせ状態を取ることができるような量子力学的な状態で表される情報である。量子情報を用いると古典情報とはクラスの違う情報処理が可能となるため、古典情報処理の限界を超えるブレイクスルーの候補として注目を集めている。

今年度は、村尾美緒准教授(2015年1月より教授)、添田彬仁助教、ポスドクの仲山将順博士、Adel Sohbi 客員研究員、博士課程大学院生の若桑江友里氏、秋笛清石氏、加藤晃太郎氏、宮崎慈生氏、修士課程大学院生の新保厚氏、森祐樹氏、山崎隼汰氏、坂井亮介氏および日本学術振興会外国人研究員の Fabian Furrer 博士のメンバーで、量子計算における因果性・並列性・非局所性の解析、分散型量子計算、多体エンタングルメント理論、量子アルゴリズムおよび量子シミュレーション、連続変数を用いた量子暗号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 量子計算における因果性・並列性・非局所性の解析

計算とは、入力に対して、ある定められた操作の列(アルゴリズム)を実行し、出力を得る過程と定義することができる。アルゴリズムにおける計算操作の順序は、計算を実行する物理系での操作の時間順序(因果的順序)とは必ずしも一致せず、異なる順番の操作を同時に行うことができる場合もある。このような計算上の操作の同時化を、並列化と呼ぶ。我々は、測定ベース量子計算および断熱量子計算における因果性と並列性の解析を行った。また、時空点における量子操作を合成して得られる大局的操作における非局所性と非因果性の関連を新しい視点から定式化した。

並列断熱ゲートテレポーテーション可能性と時間反転ハミルトニアンダイナミクス実装可能性

ゲートテレポーテーションは、量子回路上の計算を全て並列に行うことができる確率的計算モデルである。本研究では、決定論的計算モデルである断熱量子計算を用いて、ゲートテレポーテーションがその並列化可能性まで含めてシミュレート可能であるかを分析した。ある量子ゲートの列が、断熱ゲートテレポーテーションを用いて並列化可能であることは、ゲート列の任意のステップまでの積を実装する断熱ゲートテレポーテーションのリソースで、その任意のステップまでの積ゲートの転置ゲートを実装できることと同値であることを示した。物理的には転置ゲートは、元のゲートに対するハミルトニアンをのみを時間反転した場合のダイナミクスと捉えることができる。さらに、元のゲートテレポーテーションで用いられていたハミルトニアンにある相互作用項を足すことにより、どのようなユニタリーの時間反転ハミルトニアンダイナミクスも実装可能にすることができることも発見した。このとき並列化がいつでも成立する。数値計算の結果から並列化したゲート数の5乗に比例した時間で、計算を行うことができることが示唆された。本研究はシンガポール工科大学の M. Hajdušek 博士との共同研究である。[担当: 中郷、仲山、村尾]

測定ベース量子計算の並列処理能力と因果律

測定ベース量子計算は、多体エンタングル状態をリソースとして、部分系への量子測定を行うことで、ユニタリ演算を実装する量子計算のモデルである。測定ベース量子計算では、より計算を並列化することができるため、量子計算の標準的なモデルである量子回路モデルと比べて短い時間でユニタリ演算を実装できる場合がある。本研究では、ゲートテレポーテーションと呼ばれる量子プロトコルを使用できるように拡張された量子回路モデルの計算時間と、測定ベース量子計算の計算時間の比較を行った。測定ベース量子計算が gflow と呼ばれる特別な構造を持

つ場合には、測定ベース量子計算で表されるユニタリ変換を、因果性を満たさないような量子演算（非因果的量子演算）を含む特殊な量子回路で表示できる。我々は非因果的演算をゲートテレポーテーションを用いて実装することによって、元々の測定ベース量子計算と同じ時間で計算を終えることができるという仮説を立て、gflow を持ついくつかの測定ベース量子計算の例において、仮説の成立を確認した。本研究はシンガポール工科大学の M. Hajdušek 博士との共同研究である。[担当：宮崎、村尾]

非因果的古典相関による分離可能量子操作の解析

エンタングルメントの非局所性は局所操作と古典通信を組み合わせた操作（LOCC）によって解析される。一般に LOCC の数学的構造は非常に複雑なため、代わりに簡潔な数学的構造を持つ分離可能量子操作という量子操作を用いて非局所性を解析することが多い。また、LOCC と分離可能量子操作には隔たりがあることが知られている。しかし、LOCC と分離可能量子操作の隔たりに存在する量子操作の操作論的意味は知られていなかった。本研究では因果律に関する制限を緩めた古典相関を定義することで、そのような量子操作に操作論的意味を与えた。具体的には、局所操作と非因果的古典相関を組み合わせた操作（LOSC）を定義し、LOSC のうち量子操作に対応する部分が分離可能量子操作であることを示した。また、LOSC と近年研究が盛んな「量子因果律」の関連を示した。更に、LOCC と分離可能量子操作の隔たりに存在する量子操作に別の操作論的意味も与えた。本研究は、NTT コミュニケーション科学基礎研究所の尾張正樹博士および加藤豪博士との共同研究である。[担当：秋笛、村尾]

5.2.2 分散型量子計算

量子通信ネットワークを通じて小規模な量子計算機を結ぶことにより大規模な量子計算を行うことを目指す分散型量子情報処理は、スケーラブルな量子計算を実現する方法の一つとして、活発に研究が進められてきている。分散型量子情報処理を効率的に行うためには、量子計算と量子通信、そして量子暗号のすべての要素が関連するため、分散型量子情報処理の研究は、応用研究的への有効性のみならず、量子情報処理の本質を総合的に理解するための基礎研究としても、大きな意味を持つ。

2体ユニタリ演算の LOCC 実装における資源圧縮

分散型量子計算の最も基本的な場合である2体ユニタリ演算に対する考察を行った。エンタングルメントと LOCC（局所操作と古典通信）を用いた2者間での2体ユニタリ演算の実装に必要な古典通信量およびエンタングルメント資源について、情報理論を用い

た解析を行った。従来の研究では、1ペアの入力に対する実装のみが扱われていたが、我々は情報理論の手法にない、 n ペアの独立な入力に対して同じユニタリをまとめてかける、という漸近的な状況を考えて定量的な解析を行った。 $n \rightarrow \infty$ でエラーがゼロに収束するという条件で、必要な古典通信量・エンタングルメント量の1ペアあたりの最適レート・導出を試みた。古典通信のステップ数が必要最小（2ステップ）であるような実装方法については、最適レートの具体的な表式を求めた。この表式は、実装したいユニタリ演算から Choi-Jamiołkowski isomorphism という対応関係によって得られる3体純粋状態のマルコフ化コストによって与えられることを示した。[担当：若桑、添田、村尾]

2量子ビットユニタリ演算の Kraus-Cirac 数の操作論的意味

複数の量子ビットからなる多体量子系を用いた量子計算においては、個々の量子ビット系への操作に分解できないような、「大局的」なユニタリ演算が用いられる。最も基本的な2量子ビットの大局的ユニタリ演算が持つ「大局性」は、Kraus と Cirac の研究 (Phys. Rev. A **63**, 062309 (2001)) により、最大3つの変数で特徴づけられることが分かっている。しかし、必要とする大局性変数の個数（Kraus-Cirac 数）が持つ操作論的意味は知られていなかった。本研究では、「LOCC 部分逆変換」というタスクを導入し、大局的な2量子ビットユニタリ演算が持つ大局性を分散型量子計算の視点から LOCC を用いて解析した。その結果、2量子ビットのユニタリ演算の Kraus-Cirac 数が、実は多体量子系のエンタングル状態の一部を2量子ビットユニタリ演算によって変換する際に意味を持つ量であることが分かった。とくに、Kraus-Cirac 数が2と3の2量子ビットユニタリ演算は、演算子の Schmidt 分解などの既存の方法で分類することは不可能だったが、本研究で用いた枠組みによって、これら2種類の2量子ビットユニタリ演算を分類することに成功した。最後に、2つ以上の2量子ビットユニタリ演算を続けて施した際における、Kraus-Cirac 数の変化則を導出した。[担当：添田、秋笛、村尾]

ネットワーク符号化によるユニタリ演算の実装可能性

古典通信においてネットワーク符号化は通信容量や通信方向に制限のある衛星通信や無線通信ネットワークなどで効率的な通信を達成するために、近年活発に研究されてきている。ネットワーク符号化を量子計算へ応用するために、ネットワーク上の離れた入出力ノード間でのユニタリ演算の分散的な実装可能性を解析した。本研究では、ネットワークの通信容量が1量子ビットに制限されているが、古典通信は自由に行えるという条件下で解析を行った。まず、クラスターネットワークを量子回路へ変換する方法を提唱し、それを用いてクラスターネットワーク

上で実装可能な k 量子ビットユニタリ演算のクラスを定式化した。次に、古典ネットワーク符号化で基本ネットワークとして知られているバタフライネットワークとグレイルネットワーク上では任意の 2 量子ビットユニタリ演算が実装可能であることを示した。最後に、クラスターネットワーク上での確率的なユニタリ演算の実装可能性も解析した。本研究は、多者間通信を目的に解析されてきたネットワーク符号化を多者間分散量子計算に用いるという新しい方法を与えた。また、一般に多者間の量子情報処理の研究において有用である多者間の確率的量子情報処理の解析方法を確立した。[担当：秋笛、村尾]

局所操作を用いた量子状態に対する古典情報の符号化

古典情報を量子状態へ符号化・復号化することは、量子情報処理において最も基本的なタスクである。エンタングル量子状態に対し、古典情報を符号化・復号化する際に、その状態が持つ非局所性が符号化・復号化に与える影響を解析することは、量子情報処理の性能や特徴を探るための鍵となる。これまでの研究によって、古典情報が符号化されたエンタングル状態に対して局所的な操作によって古典情報を復号化する局所復号化においては復号化可能な古典情報量が、復号化する状態の距離的エンタングルメント測度の平均値によって制限されること、すなわち、距離的エンタングルメント測度が大きいほど、局所的な操作のみによる復号化が難しくなることが知られている。しかし、局所的な操作によってエンタングル状態に古典情報を符号化する局所符号化に関しては、これまで多量子ビット系に対する研究しか行われていなかった。我々は 2 体の 3 準位系の状態における古典情報の局所復号化を解析した。ある条件を満たす状態に対して、最大限の局所符号化が可能であることを示し、局所符号化の方法を構成した。また 2 体の 2 準位系の任意の状態は局所符号化可能であるのに対して、2 体の 3 準位系においては局所符号化が不可能な状態が存在することを示した。[担当：新保、添田、村尾]

分散型量子計算による量子もつれ状態共有アルゴリズム

ネットワーク上のノードに分散した量子計算機の全体に広がるエンタングル状態を効率的に生成し、用意するための方法を考察した。このようなエンタングル状態を共有するための自明な方法は、一人の送信者が分配するエンタングル状態を量子計算機を用いて作成し、次にネットワークのエッジに対応する通信路を通じた量子通信によって各ノードの受信者にエンタングル状態を分配することである。この方法では、エンタングル状態の生成のために大きな量子計算機が必要となり、分配にも多くの量子通信量が必要となる点が問題である。本研究では、ネットワーク上のあるノードの計算機が、そのノードと隣接する送信先のノードとの間にエンタングル状態だ

けを作りながら量子通信を行って状態を分配することによって、通信路で 1 量子ビットの通信を 1 回だけ用いて GHZ 状態および W 状態を共有するためのプロトコルを構築した。この方法では、各ノードの量子計算機の規模を抑えることができ、通信量も少なくすることができる。また、ネットワーク上で GHZ 状態および W 状態が共有可能であることの必要十分条件は、ネットワーク上の全ての量子計算機が 1 量子ビットの量子状態を送信できる通信路で連結していることであることを示した。[担当：山崎、添田、村尾]

トポス理論に基づいた合成量子系の定式化

従来の量子力学は非可換代数を用いて定式化されているが、トポス理論を用いれば、可換代数上の積分によって量子状態を表現することができる。古典統計学における観測量はトポス **Sets** 内の可換代数を成し、古典状態は可換代数上の確率積分によって表現される。可換代数、確率積分の概念は **Sets** 以外の任意のトポス内でも定義可能であり、与えられた **Sets** 内の非可換代数に対し適当なトポスと可換代数を選ぶことによって、確率積分と量子状態を 1 対 1 対応させることができる。本研究では、独立な量子系を表すトポスと可換代数の組 2 つを用いて合成量子系を表現する可能性について検証した。トポスと可換代数の組 2 つがそれぞれ 3 次元以上の量子系を表しているならば、トポスと可換代数の組を対象として持つ圏における 2 組の引き戻しが、合成量子系の状態を確率積分として表すことを示した。[担当：宮崎、添田、村尾]

5.2.3 多体エンタングルメント理論

3 体量子純粋状態のマルコフ化

3 体量子純粋状態の多体エンタングルメントの性質を、マルコフ化という新しい視点を導入して解析した。条件付き相互情報量が 0 であるような 3 体量子状態はマルコフ状態と呼ばれ、近年研究が活発に行われている。我々は、与えられた任意の 3 体量子状態を、3 つのうち 1 つの部分系にランダムユニタリ操作を施すことによってマルコフ状態に変換する、というタスクを考案し、必要なランダム性のコストの解析を行った。とくに、与えられた状態が同一の 3 体量子純粋状態の多数のコピーである場合に、1 コピーあたりのランダム性のコストがどのくらいになるかを考察し、コピーの数が無限であるような漸近極限について、そのコストの具体的な表式を求めた。本結果は、量子通信理論で重要な役割を果たしている「Decoupling 定理」の多体量子状態への一般化の一つになっており、多体エンタングルメント、多体量子相関の解析や多端子量子通信理論への応用が期待される。[担当：若桑、添田、村尾]

トポロジカル・エンタングルメント・エントロピーと既約相関及びその情報論的意味

分数量子ホール効果の系に代表されるトポロジカル秩序相は、基底状態の縮退度が系のトポロジカルな形状に依存する等の新奇な性質を持つ量子相であり、局所的な擾乱に強いという性質から量子情報処理への応用が期待されている。このトポロジカル秩序相の研究においては、基底状態の持つエンタングルメントを調べることで局所的な秩序変数では分類不可能な相の分類が可能となるとして、「トポロジカル・エンタングルメント・エントロピー」と呼ばれる量が注目されている。

本研究では、トポロジカル・エンタングルメント・エントロピーの持つ情報理論的な性質を探るため、近年量子情報の分野で研究が進んでいる、既約相関と呼ばれる多体間相関の尺度との関連を調べた。この既約相関は秘密共有プロトコルと呼ばれる情報理論的なタスクの最適値と同値であることが予想されており、我々は相関長がゼロであるような理想的な状況では、トポロジカル・エンタングルメント・エントロピーと既約相関及びあるクラスの秘密共有プロトコルの最適値が厳密に一致することを示した。この結果は Levin-Wen モデルのような、幅広いクラスのトポロジカル秩序相を記述するモデルに適用することができ、トポロジカル・エンタングルメント・エントロピーに2つの新たな側面を与える。また、我々は相関長が有限であるような場合でも、近似的に同様の性質が成り立つことを示した。本研究の結果を用いることで、トポロジカル・エンタングルメント・エントロピーとトポロジカル秩序相が持つその他の性質との関係を明らかにし、より統一的にトポロジカル秩序相を理解する手段を与えることが期待される。[担当:加藤、Furrer、村尾]

幾何学的エンタングルメント測度の数値的解析

幾何学的多体エンタングルメント測度とは、純粋状態の持つ多体エンタングルメントの大きさを定量的に表す測度の1つとして広く知られているものである。本研究では前年度に我々が考案した幾何学的多体エンタングルメントの近似計算法を改良し、精度をある程度犠牲にすることで比較的短時間で8量子ビット系程度までの計算を可能にする計算法を考案した。また元々の計算法と新たな計算法を用いて、7量子ビット系までの様々な純粋状態について計算を行った。その結果、これまで解析的・数値的に計算不能であったある6量子ビットグラフ状態について7桁の精度で幾何学的多体エンタングルメント量を計算することに成功したことをはじめ、7量子ビットグラフ状態においてもこれまでの方法で得られている結果よりも高い精度で計算することに成功した。さらに与えられた純粋状態に内積の意味で最も近い積状態（最近接積状態）の持つ性質と幾何学的多体エンタングルメント量の間の関係の特徴づける量として新たにCPSランクを定義し、解析を行った。まず2体系において任意の状態のCPSランクを解析的に計算し、最大の幾何学的エンタングルメント量を

もつ状態は同時に最大のCPSランクを持つことを示した。そして一般の多体系においても同様の主張が成り立つ可能性があることを6量子ビットまでの数値計算により確認した。[担当:森、添田、村尾]

5.2.4 量子アルゴリズムおよび量子シミュレーション

エネルギーの射影測定の実装

本研究では量子アルゴリズムの一つである位相推定アルゴリズムを用いることで、ハミルトニアンに依存しないエネルギーの射影測定を実装し、トモグラフィを用いた先行研究では系のサイズの指数関数に依存していた測定時間を系のサイズに依存しないものに改善した。位相推定アルゴリズムを現実の量子系に適用するために、我々は量子ゼノン効果を利用したハミルトニアンダイナミクスのユニバーサルなコントロール化アルゴリズムを提案した。我々の手法はハミルトニアンの最小と最大の固有値の差の上界が与えられた場合のみに使えるが、我々はさらにその値の推定を行うことができるアルゴリズムを提案し、さらにその詳細な性能評価を行った。[担当:仲山、添田、村尾]

量子計算機を用いた虚時間の時間発展シミュレーション

量子計算機上で可能な操作（CPTP写像と量子測定）を用いて、さらに測定結果を選ぶこと（postselection）ができれば、一般に非ユニタリ演算のシミュレーションが可能であることが知られている。そこでこのメカニズムを状態の虚時間の時間発展シミュレーション（ e^{-Ht} 型）に用いることを考えた。ここで H は系のハミルトニアンを意味するが、このハミルトニアンが量子計算機上で実装できるものであれば、そのまま確率的な虚時間の時間発展シミュレーションに使えることを示した。また、入力を最大混合状態にして虚時間の時間発展シミュレーションを行うと、求める温度におけるハミルトニアンの平衡状態を確率的につくることが可能であることを示した。[担当:坂井、添田、村尾]

5.2.5 連続変数を用いた量子暗号

連続変数の量子鍵配布

昨年度までの研究によって得られた量子メモリー効果を考慮した不確定性関係を応用することによって、サイズ効果・量子メモリー効果が存在するより厳しい状況においても安全な連続変数の量子鍵配布を保証する量子鍵の生成レートを求めるための研究を行った。特に現在のテクノロジーを用いて15km以

上の距離における安全な量子鍵配布を保証する、という現実的な設定における解析を行った。統計的解析の改善と、実験設定に対応するエネルギーのカットオフ定理の適応による量子測定の出力の値域制限によって、より精密な安全性証明が可能となった。その結果、現実的な状況下において 26km 程度の距離までの安全な量子鍵配布を保証する、より高い量子鍵の生成レートを得ることができた。さらに、非二値の LDPC 符号という量子誤り訂正符号を量子鍵配布プロトコルに用いることで得られる最適化の解を求め、安全な量子鍵配布が保証される距離をより伸張させることができることを示した。この結果は、非二値の LDPC 符号を量子鍵配布プロトコルに用いた世界初の結果であると考えている。これらの理論的解析の結果に基づいて、対応する連続変数系を用いた量子鍵配布実験がハノーヴァー大学において進行中である。本研究の理論部は、チューリッヒ工科大学の M. Berta 博士、V. Scholz 博士と M. Christandl 教授及びシンガポール国立大学 CQT の M. Tomamichel 博士、ハノーヴァー大学の J. Duhme 博士、T. Franz 博士と R.F. Werner 氏教授およびオーストラリア工科大学の C. Pacher 博士、実験部はハノーヴァーのアルバート・アインシュタイン研究所の T. Eberle 博士、V. Haendchen 博士、R. Schnabel 博士との共同研究である。[担当：Furrer]

<受賞>

- [1] J. Miyazaki, M. Hajdušek and M. Murao, Student Poster Award, The 14th Asian Quantum Information Science Conference, Aug. 2014

<報文>

(原著論文)

- [2] M. Markiewicz, P. Kurzyński, J. Thompson, S.-Y. Lee, A. Soeda, T. Paterek, and D. Kaszlikowski, *Unified approach to contextuality, nonlocality, and temporal correlations*, Phys. Rev. A **89**, 042109 (2014)
- [3] K. Kato, F. Furrer and M. Murao, *Information-theoretical formulation of anyonic entanglement*, Phys. Rev. A **90**, 062325 (2014)
- [4] A. Soeda, S. Akibue, and M. Murao, *Two-party LOCC convertibility of multipartite states and Kraus-Cirac number of two-qubit unitaries*, J. Phys. A: Math. Theor. **47**, 424036 (2014); Special issue on ‘50 years of Bell’s theorem’
- [5] P. Kurzyński, A. Soeda, J. Thompson, and D. Kaszlikowski, *Contextuality in bosonic bunching*, Phys. Rev. Lett. **112**, 020403 (2014)
- [6] P. Kurzyński, A. Soeda, J. Thompson, and D. Kaszlikowski, *Reply to Comment on ‘Contextuality in bosonic bunching’*, Phys. Rev. Lett. **113**, 138902 (2014)
- [7] L. A. Rozema, D. H. Mahler, A. Hayat, P. S. Turner and A. M. Steinberg, *Quantum Data Compression of a Qubit Ensemble*, Phys. Rev. Lett. **113**, 160504 (2014); Selected for “top ten breakthroughs in 2014” by Physics World

- [8] Y. Nakata and M. Murao, *Diagonal quantum circuits: their computational power and applications*, Eur. Phys. J. Plus **129**, 152 (2014)
- [9] Y. Nakata, M. Koashi and M. Murao, *Generating a state t -design by diagonal quantum circuits*, New J. Phys. **16**, 053043 (2014)
- [10] R. Blume-Kohout and P. S. Turner, *The Curious Nonexistence of Gaussian 2-Designs*, Comm. Math. Phys. **326**, 755 (2014)

(会議抄録)

- [11] Y. Nakata, P. S. Turner and M. Murao, *Entanglement of phase-random states*, AIP Conference Proceedings 1633, 32 (2014)
- [12] E. Wakakuwa and M. Murao, *Generalized Mutual Information and Tsirelson’s Bound*, AIC Conference Proceedings 1633, 47 (2014)
- [13] T. Sugiyama, P. S. Turner and M. Murao, *Understanding boundary effects in quantum state tomography – One qubit case*, AIP Conference Proceedings 1633, 87 (2014)
- [14] S. Akibue and M. Murao, *Implementability of two-qubit unitary operations over the butterfly network and the ladder network with free classical communication*, AIP Conference Proceedings 1633, 141 (2014)
- [15] M. Hajdušek and M. Murao, *Evaluation of multipartite entanglement in graph states*, AIP Conference Proceedings 1633, 168 (2014)
- [16] A. Soeda, Y. Kinjo, P. S. Turner and M. Murao, *Implementing controlled-unitary operations over the butterfly network*, AIP Conference Proceedings 1633, 180 (2014)
- [17] S. Nakayama, A. Soeda and M. Murao, *Universal construction of controlled-unitary gates using dynamical decoupling and the quantum Zeno effect*, AIP Conference Proceedings 1633, 183 (2014)

(学位論文)

- [18] 新保厚, *Local encodability of classical information in composite quantum systems*, 修士論文
- [19] 森祐樹, *Numerical analysis of distance-like measures of multipartite entanglement*, 修士論文
- [20] 若桑江友里, *Information Theoretical Analysis of Distributed Quantum Computation*, 博士論文

<特許>

- [21] 国内特許 (出願)、出願番号 (特願 2014-102986)、発明等の名称 (マルチキャスト量子ネットワーク符号化方法)、出願日 (2014 年 5 月 19 日)、特許出願人 (日本電信電話株式会社、国立大学法人東京大学)、発明者 (尾張正樹、加藤豪、村尾美緒)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [22] J. Miyazaki, M. Hajdušek and M. Murao, *Translating measurement-based quantum computations into quantum circuits*, The 11th workshop on Quantum Physics and Logic, Kyoto (Japan), Jun. 2014
- [23] A. Soeda, S. Nakayama, and M. Murao, *Circuit model implementation of controllization functional on unitary with and without fractional query*, The 11th workshop on Quantum Physics and Logic, Kyoto (Japan), Jun. 2014
- [24] M. Murao, K. Nakago, M. Hajdusek and S. Nakayama, *Parallelized adiabatic gate teleportation*, The 11th workshop on Quantum Physics and Logic, Kyoto (Japan), Jun. 2014
- [25] P. Coles and F. Furrer, *Entropic Formulation of Heisenberg's Measurement-Disturbance Relation*, The 11th workshop on Quantum Physics and Logic, Kyoto (Japan), Jun. 2014
- [26] S. Akibue, O. Masaki, G. Kato and M. Murao, *Globalness of separable maps in terms of time and space resources*, The 11th workshop on Quantum Physics and Logic, Kyoto (Japan), Jun. 2014
- [27] J. Miyazaki, M. Hajdušek and M. Murao, *Translating measurement-based quantum computations into quantum circuits*, The 14th Asian Quantum Information Science Conference, Kyoto (Japan), Aug. 2014
- [28] Y. Mori, A. Soeda and M. Murao, *Numerical analysis of multipartite entanglement in terms of the geometric measure*, The 14th Asian Quantum Information Science Conference, Kyoto (Japan), Aug. 2014
- [29] K. Kato, F. Furrer and M. Murao *Information-theoretical formulation of anyonic entanglement*, The 14th Asian Quantum Information Science Conference, Kyoto (Japan), Aug. 2014
- [30] A. Soeda, A. Soeda, S. Nakayama, and M. Murao, *Circuit model implementation of controllization supermap on unitary with and without fractional queries*, The 14th Asian Quantum Information Science Conference, Kyoto (Japan), Aug. 2014
- [31] Y. Nakata, K. Fujii, M. Ohzeki and M. Murao, *Measurement-based quantum computation protected by a long-range order induced by a thermal phase transition*, The 14th Asian Quantum Information Science Conference, Kyoto (Japan), Aug. 2014
- [32] Y. Nakata, M. Koashi and M. Murao, *Generating a state design by diagonal quantum circuits*, The 14th Asian Quantum Information Science Conference, Kyoto (Japan), Aug. 2014
- [33] E. Wakakuwa, A. Soeda, and M. Murao, *Asymptotic Compressibility of Entanglement and Classical Communication in Distributed Quantum Computation*, The 14th Asian Quantum Information Science Conference, Kyoto (Japan), Aug. 2014
- [34] S. Akibue, O. Masaki, G. Kato and M. Murao, *Globalness of separable maps in terms of classical temporal correlations and quantum spatial correlation*, The 14th Asian Quantum Information Science Conference, Kyoto (Japan), Aug. 2014
- [35] F. Furrer, *Reverse Reconciliation Continuous Variable Quantum Key Distribution Based on the Uncertainty Principle*, The 14th Asian Quantum Information Science Conference, Kyoto (Japan) Aug. 2014
- [36] F. Furrer, *Reverse Reconciliation Continuous Variable Quantum Key Distribution Based on the Uncertainty Principle*, The 4th International Conference on Quantum Cryptography, Paris (France), Sep. 2014
- [37] K. Nakago, M. Hajdušek, S. Nakayama and M. Murao, *Parallelized adiabatic gate teleportation*, The 14th Asian Quantum Information Science Conference, Kyoto (Japan), Aug. 2014
- [38] S. Akibue, O. Masaki, G. Kato and M. Murao, *Globalness of separable maps characterized by classical correlations without globally causal structure*, The 18th Conference on Quantum Information Processing, Sydney (Australia), Jan. 2015
- [39] E. Wakakuwa, A. Soeda, and M. Murao, *Excluding one of the parties and Markovianizing of tripartite quantum states*, The 18th Conference on Quantum Information Processing, Sydney (Australia), Jan. 2015
- [40] S. Akibue and M. Murao, *Network coding for distributed quantum computation over the butterfly and cluster networks*, The 18th Conference on Quantum Information Processing, Sydney (Australia), Jan. 2015
- [41] K. Kato, F. Furrer and M. Murao *Information-theoretical formulation of anyonic entanglement*, Quantum Information Workshop, Tokyo (Japan), Feb. 2015
- [42] E. Wakakuwa, A. Soeda, and M. Murao, *Markovianizing cost of tripartite quantum states*, Quantum Information Workshop, Tokyo (Japan), Feb. 2015

招待講演

- [43] M. Murao, *Entanglement as a resource for deterministically simulating acausal classical correlations*, Workshop on Quantum Metrology, Interaction, and Causal Structure 2014, Beijing (China), Dec. 2014
- [44] A. Soeda, *Computational quantum algorithms and projective measurement of energy*, Quantum Information Workshop, Tokyo (Japan), Feb. 2015

(国内会議)

一般講演

- [45] 森祐樹、添田彬仁、村尾美緒、幾何学的多体エンタングルメント測度の数値的解析、ナノ量子エレクトロニクスの新展開、東京、2014年5月
- [46] 新保厚、添田彬仁、村尾美緒、多体エンタングル状態に対する古典情報の符号化と復号化、ナノ量子情報エレクトロニクスの新展開、東京、2014年5月
- [47] 新保厚、添田彬仁、村尾美緒、エンタングル状態に対する古典情報の符号化と復号化、若手のための量子情報基礎セミナー、京都、2014年8月
- [48] 添田彬仁、P. Kurzyński, J. Thompson, D. Kaszlikowski, *Contextuality in bosonic bunching*, 日本物理学会 2014 年秋季大会 (中部大学春日井キャンパス)、愛知、2014 年 9 月
- [49] 添田彬仁、秋笛清石、村尾美緒、多体量子状態のエンタングルメント変換と、2 量子ビットユニタリ操作の Kraus-Cirac 数の操作論的意味、日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年) (早稲田大学早稲田キャンパス)、東京、2015 年 3 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。近年の実験技術と (固体物理、統計力学も含む) 理論概念の進展を背景に、私たちは、スピノル BEC におけるトポロジカル励起や相関効果、原子間相互作用の強さを制御するもとの BCS-BEC クロスオーバーや Efimov 状態、人工ゲージ場中での量子ホール状態、孤立量子系の熱平衡化などについて研究を行っている。同時に私たちは、情報をキーワードとして量子論や統計力学の基礎概念を捉え直し、物理と情報を融合させた新分野の構築を目指す研究にも取り組んでいる。特に測定やフィードバック制御を行うもとの情報の流れに着目し、熱力学の第二法則や揺らぎの定理の一般化、波束収縮のダイナミクスなどの研究を行っている。

5.3.1 冷却原子気体

反平行磁場中の二成分ボース気体

光学的に導入された人工ゲージ場のもとの冷却原子系が示す多体トポロジカル現象に近年、大きな

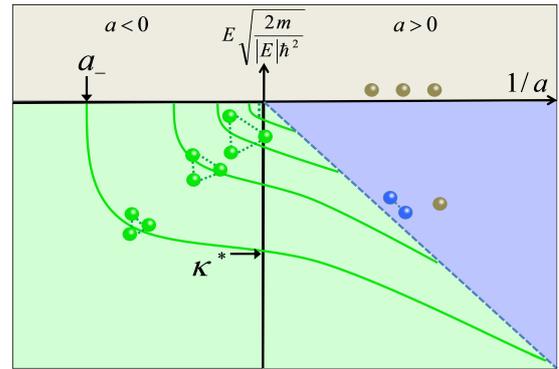


図 5.3.1: 3 粒子ボソン系の示す Efimov 状態。散乱長の逆数 $1/a$ およびエネルギーの平方根の空間において、離散スケール不変な無限個の状態が形成される。スケール因子 22.7 に加えて、三体パラメータ κ^* (あるいは a_-) の普遍性が示された。[10]

関心が集まっている。量子スピン・ホール物理における相互作用効果を研究できる例として、我々は、二成分ボース気体に反平行な人工磁場を印加した時間反転対称な系の基底状態の性質を解析した。その結果、(i) 二つの分数量子ホール状態の直積で近似される分数量子スピン・ホール状態が成分間斥力相互作用の非常に強い領域まで安定に現れること、(ii) 成分間相互作用が引力の場合には二成分の粒子がペアを組んだ厳密な基底状態が得られることを示した。[4]

スピノル BEC における量子的質量獲得

通常は質量ゼロの粒子が量子揺らぎにより有限の質量を獲得することがある。このような粒子は quasi-Nambu-Goldstone (qNG) ボソンと呼ばれ、ヘリウム超流動やカラー超伝導などで存在すると予言されたが、これまで実験的に観測されていない。量子揺らぎの効果は通常小さく、観測には非常に高い解像度を持つプローブが必要だからである。我々は、スピノル BEC では qNG ボソンの獲得エネルギーギャップが系のゼロ点エネルギーの百倍オーダーで大きく、量子的質量獲得が始めて実験的に観測される舞台となり得ることを示した。さらに、フォノンと異なり、この qNG モードの伝播速度は量子揺らぎにより減少することを示した。[9]

Efimov 状態における三体パラメータの普遍性とリミット・サイクル

強く相互作用する同種ボソン系においては、離散スケール不変な無限個の 3 粒子束縛状態 (Efimov 状態; 図 5.3.1) が普遍的に現れる。Efimov 状態は近年、冷却原子系で観測され、マグノンやエキシトンでもそ

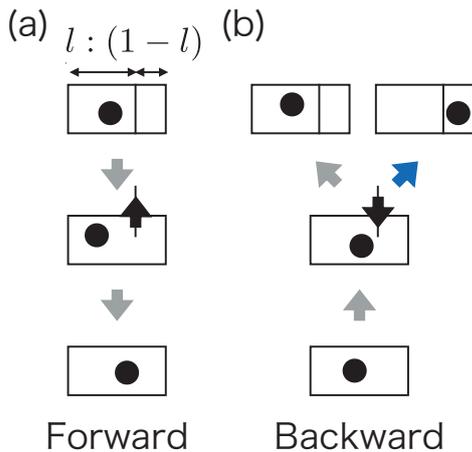


図 5.3.2: 自由膨張の絶対不可逆性。順過程 (a) の初期状態では右室にいる確率が零である一方、逆過程 (b) をたどると右室にいる確率は有限になる。その結果、確率の比の対数で定義されるエントロピー生成が発散し、通常の揺らぎの定理が適用できない。[6]

の存在が予言されている。Efimov 状態は、臨界現象と異なり、くりこみ群のリミットサイクルによってその普遍性クラスが特徴づけられるという点で、極めてユニークである。最近、Efimov 状態を特徴づける 3 体パラメータが原子種に依らずに決まるという新たな普遍性が実験的に見出された。我々は、この普遍性が、リミットサイクルの開始点の普遍性として理解されることを明らかにし、さらに 4 体束縛状態の性質がリミットサイクルのトポロジーから理解できる可能性を提案した。[10]

5.3.2 量子論・統計力学と情報理論の融合

絶対不可逆過程における非平衡等式

ゆらぎの定理は線形応答を超える強い非平衡系においても成立する普遍的な等式であるが、定理が適用できない例として自由膨張過程 (図 5.3.2) 等が個別的に知られていた。我々は、それらの過程にエントロピー生成が発散する非常に不可逆性が強い経路が含まれていることを洞察し、絶対不可逆性という不可逆性のクラスを導入した。数学的には、絶対不可逆性は確率測度の特異部分に対応し、Lebesgue の分解定理によって通常の不可逆な部分から一意的に分離することができる。この知見に基づき、絶対不可逆な過程におけるゆらぎの定理を導いた。我々のゆらぎの定理から導かれる不等式は、非平衡過程のエントロピー生成に対して、(情報) 熱力学第二法則よりも強い制約を与える。[6]

フィードバック制御で取り出せる仕事の達成可能な上限

メゾスコピック系の制御技術の発展により、測定に基づいたフィードバック制御でミクロな自由度を操作する事が可能となっている。すなわち、いわゆるマクスウェルの悪魔の問題が実験室で検証可能となった。この発展に鑑み、我々は揺らぎの定理の枠組みを用いることで、フィードバック制御で取り出せる仕事エネルギーの達成可能な上限を導いた。結果として、今まで知られていた不等式と異なり、有限の操作パラメータでも等号達成可能なより強い不等式が与えられた。新しい不等式は、ごく最近揺らぎの定理に導入された新しい概念である「絶対不可逆性」を、測定誤差が無限小の理想的な制御下の場合に取り扱うことで得られた。[8]

ユニタリー時間発展と外部操作のもとでの熱力学第二法則

外部操作も含めて完全にユニタリーな時間発展をする孤立量子系においても、実効的な熱平衡化が生じることが認識され、統計力学の基本仮定を量子力学だけから基礎付ける研究が盛んに行われている。このような系における熱平衡状態の熱力学エントロピーを記述する表式として、フォン・ノイマンエントロピーは適当ではない。なぜなら、ユニタリー不変性のために、それはあらゆる外部操作の下で不変に保たれ、熱力学第二法則と整合しないためである。我々は、近年提案された対角エントロピーの外部操作の下での単調増加性を調べた。これはエネルギー固有基底における密度行列の対角成分が表す確率分布のシャノン・エントロピーとして定義される。我々は、行う外部操作を固定し、操作を行う時刻の関数として対角エントロピー変化を解析し、それが殆ど全ての操作時刻に対して非負となることを示した。すなわち、系のミクロな状態を参照することなく外部操作を行う限り対角エントロピーは単調に増加し、熱力学第二法則と整合することを示した。[11]

量子測定における相対エントロピー保存則

量子測定においては量子系は、測定結果に依存した非ユニタリーな状態変化を伴う。こうした、量子測定における情報の定義および定量化には、測定の目的に応じて様々な可能性が存在するが、我々は量子系のある正作用素値測度であらわされるオブザーバブル X に着目した。例えば量子光学系における光子数計数測定やホモダイン測定では、測定する物理量 X としてはそれぞれ光子数および直交位相振幅を取るのが自然である。このとき、量子測定過程 Y が考えているオブザーバブル X の情報を保存する条件として、 Y の後に X の測定を行う結合測定過程が情報論的に X 一回の測定過程と同等であることとして定義し、 Y の測定出力の相対エントロピーが Y 前後の量子系の X の相対エントロピーの差のアンサンブル

ル平均に等しいとする相対エントロピーの保存則を証明した。相対エントロピーを情報量として採用することで、測定出力が離散・連続に関わらず一貫した情報量の取り扱いが可能になり、また先行研究において得られていたシャノンエントロピーの保存則が成り立たないが相対エントロピーが保存する測定として、ホモダイン測定などの現実的な例が存在することを発見した。[12]

<受賞>

- [1] 村下湧音: 平成 26 年度理学系研究科研究奨励賞 (修士課程) (東京大学、2015 年 3 月).

<報文>

(原著論文)

- [2] M. Hotta, J. Matsumoto and K. Funo: Black hole firewalls require huge energy of measurement, *Phys. Rev. D* **89**, 124023 (2014).
- [3] M. Frey, K. Funo and M. Hotta: Strong local passivity in finite quantum systems, *Phys. Rev. E* **90**, 012127 (2014).
- [4] S. Furukawa and M. Ueda: Global phase diagram of two-component Bose gases in antiparallel magnetic fields, *Phys. Rev. A* **90**, 033602 (2014).
- [5] J. Jeong, M. D. Le, P. Bourges, S. Petit, S. Furukawa, S.-A. Kim, S. Lee, S.-W. Cheong, and J.-G. Park: Temperature-dependent interplay of Dzyaloshinskii-Moriya interaction and single-ion anisotropy in multiferroic BiFeO₃, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 107202 (2014).
- [6] Y. Murashita, K. Funo, and M. Ueda: Nonequilibrium equalities in absolutely irreversible processes, *Phys. Rev. E* **90**, 042110 (2014).
- [7] H. Kim, T. N. Ikeda, and D. A. Huse: Testing whether all eigenstates obey the eigenstate thermalization hypothesis, *Phys. Rev. E* **90**, 052105 (2014)
- [8] Y. Ashida, K. Funo, Y. Murashita, and M. Ueda: General achievable bound of extractable work under feedback control, *Phys. Rev. E* **90**, 052125 (2014).
- [9] N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, and M. Ueda: Quantum mass acquisition in spinor Bose-Einstein condensates, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 230401 (2014).
- [10] Y. Horinouchi and M. Ueda: Onset of a limit cycle and universal three-body parameter in Efimov physics, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 025301 (2015). Editors' Suggestion.
- [11] T. N. Ikeda, N. Sakumichi, A. Polkovnikov, and M. Ueda: The second law of thermodynamics under unitary evolution and external operations, *Annals of Physics* **354**, 338 (2015).
- [12] Y. Kuramochi and M. Ueda: Classicality condition on a system observable in a quantum measurement and a relative-entropy conservation law, *Phys. Rev. A* **91**, 032110 (2015).

(解説)

- [13] M. Ueda: Topological aspects in spinor Bose-Einstein condensates (Key Issues Review), *Rep. Prog. Phys.* **77**, 122401 (2014).

(会議抄録)

- [14] E. Kaminishi, J. Sato and T. Deguchi: Exact quantum dynamics of yrast states in the finite 1D Bose gas, *J. Phys.: Conf. Ser.* **497**, 011001 (2014).

(国内雑誌)

- [15] 古川俊輔, 白石潤一: エンタングルメント・エントロピーと共形場理論 (最近の研究から), *日本物理学会誌* **69**, 541 (2014).

(学位論文)

- [16] Tatsuhiko Ikeda: Theoretical Study on the Foundation of Statistical Mechanics in Isolated Quantum Systems (博士論文).
- [17] Yui Kuramochi: Relative-entropy conservation law in quantum measurement and its applications to continuous measurements (博士論文).
- [18] Yuto Murashita: Absolute Irreversibility in Information Thermodynamics (修士論文).
- [19] Tomohiro Shitara: Inequalities between Information and Disturbance in Quantum Measurement (修士論文).
- [20] Shuhei M. Yoshida: Universal Relations in Strongly Interacting P-Wave Fermi Gases (修士論文).

(著書)

- [21] 上田正仁: 東大物理学者が教える「伝える力」の鍛え方 (知と学び)、ブックマン社、2015.1.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [22] E. Kaminishi, T. N. Ikeda, T. Mori and M. Ueda: Bethe ansatz approach to prethermalization in a coherently split 1D Bose gas, The 24th international conference on atomic physics, Washington D.C., USA, 2014.8.3-8
- [23] K. Funo: Quantum fluctuation theorems under measurement and feedback control, YITP Workshop on Quantum Information Physics, Kyoto University, 2014.8.4-7.
- [24] K. Funo: Quantum fluctuation theorems under measurement and feedback control, Physics of Quantum Information Processing, Osaka University, 2014.8.25-26.
- [25] Y. Ashida and M. Ueda: Quantum non-demolition measurement of single atoms in optical lattices, Physics of Quantum Information Processing, Osaka University, 2014.8.25-26.

- [26] Y. Ashida: Achievable upper bound of extractable work under feedback control, Okinawa School in Physics: Coherent Quantum Dynamics, OIST, 2014.9.15-25.
- [27] Y. Murashita: Nonequilibrium Equalities in Absolutely Irreversible Processes, Okinawa School in Physics: Coherent Quantum Dynamics, OIST, 2014.9.15-25.
- [28] Y. Horinouchi and M. Ueda: Universal Three-Body Parameter in Efimov Physics and Renormalization-Group Limit Cycle, 7th International Conference on the Exact Renormalization Group, Lefkada, Greece, 2014.9.22-26.
- [29] Y. Ashida and M. Ueda: Quantum non-demolition measurement of single atoms beyond the diffraction limit, DOQS 2014 Workshop: Many Body Dynamics and Open Quantum Systems, Glasgow, Scotland, 2014.10.20-22.
- [30] Y. Horinouchi and M. Ueda: Onset of a Limit Cycle and Universal Three-Body Parameter in Efimov Physics, International Conference on Topological Quantum Phenomena, Kyoto, Japan, 2014.12.16-24.
- [31] Y. Murashita, K. Funo and M. Ueda: Nonequilibrium equalities in absolutely irreversible processes, APS March Meeting 2015, San Antonio, USA, 2015.3.2-6.
- 招待講演
- [32] M. Ueda: Physical Origin of the Universality of the Three-Body Parameter in Efimov Physics, Conference on Non-equilibrium Phenomena in Condensed Matter and String Theory, Trieste, Italy, 2014.6.30-7.4.
- [33] M. Ueda: Absolute Irreversibility and New Nonequilibrium Equalities, Shortcuts to Adiabaticity, Optimal Quantum Control, and Thermodynamics Conference, Telluride, USA, 2014.7.13-18.
- [34] S. Furukawa and M. Ueda: Quantum Hall states in two-component Bose gases in a synthetic magnetic field, 23rd Annual International Laser Physics Workshop, Sofia, Bulgaria, 2014.7.14-18.
- [35] M. Ueda: Absolute Irreversibility and Nonequilibrium Equalities under Feedback Control, International Conference on Control of Self-Organizing Nonlinear Systems, Rostock-Warnemunde, Germany, 2014.8.25-28.
- [36] S. Furukawa: Quantum Hall states in two-component Bose gases in a synthetic magnetic field, Quantum Gases 2014: Synthetic Gauge Field and Large Spin Systems, Beijing, China, 2014.8.26-28.
- [37] M. Ueda: Topological Excitations of Bose-Einstein Condensates, IAS/School of Science Joint Lecture, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, 2014.9.18.
- [38] M. Ueda: Introduction to Information Thermodynamics, Mesoscopic fluctuation, information, and nonequilibrium, Busan, Korea, 2014.11.21-22.
- [39] S. Furukawa and M. Ueda: Quantum Hall states in two-component Bose gases in synthetic gauge fields, YITP Long-Term Workshop “Novel Quantum States in Condensed Matter 2014”, Kyoto, 2014.12.1.
- [40] T. N. Ikeda: Entanglement Prethermalization, Yukawa International Seminar (YKIS) 2014: Nonequilibrium Phenomena in Novel Quantum States, Kyoto, 2014.12.4
- [41] M. Ueda: Optical lattice/quantum information, ENS Workshop, Paris, 2014.12.8-10.
- [42] M. Ueda: Absolute irreversibility in nonequilibrium processes under feedback control, Workshop on Quantum Information and Thermodynamics, Sao Paulo, Brazil, 2015.2.23-27.
- (国内会議)
- 一般講演
- [43] 倉持結、上田正仁: 共鳴二準位原子を用いた直交位相振幅の量子非破壊測定の実現法について、若手のための量子情報基礎セミナー、2014.8.8-10
- [44] 蘆田祐人、布能謙、村下湧音、上田正仁: フィードバック制御で取り出せる仕事の達成可能な上限、日本物理学会 2014 年秋季大会、中部大学、2014.9.7-10.
- [45] 上西慧理子、森貴司、佐藤純、出口哲生: 一次元ボース気体の弱結合および強結合領域における再帰時間、日本物理学会 2014 年秋季大会、中部大学、2014.9.7-10.
- [46] 倉持結、上田正仁: 二準位原子を用いた直交位相振幅の量子非破壊測定モデル、日本物理学会 2014 年秋季大会、中部大学、2014.9.7-10.
- [47] 古川俊輔、上田正仁: 光格子中の Bose-Einstein 凝縮体における Bogoliubov 励起バンドのトポロジー、日本物理学会 2014 年秋季大会、中部大学、2014.9.7-10.
- [48] 吉田周平、上田正仁: p 波相互作用する Fermi 原子系における Tan の関係式、日本物理学会 2014 年秋季大会、中部大学、2014.9.7-10.
- [49] 蘆田祐人、上田正仁: 光格子系における回折限界を超えた位置測定方法、日本物理学会第 70 回 (2015 年) 年次大会、早稲田大学、2015.3.21-24.
- [50] 池田達彦、上田正仁: 小さな孤立量子系におけるマイクロカノニカルアンサンブルの精度、日本物理学会第 70 回 (2015 年) 年次大会、早稲田大学、2015.3.21-24.
- [51] 上西慧理子、森貴司、池田達彦、上田正仁: 前期熱平衡化のエンタングルメントによる新しい機構の提案、日本物理学会第 70 回 (2015 年) 年次大会、早稲田大学、2015.3.21-24.
- [52] 倉持結、上田正仁: 相対エントロピーの観点から見た量子測定における情報の流れについて、日本物理学会第 70 回 (2015 年) 年次大会、早稲田大学、2015.3.21-24.
- [53] 設楽智洋、倉持結、上田正仁: 量子測定における情報と擾乱の関係の推定理論に基づく定式化、日本物理学会第 70 回 (2015 年) 年次大会、早稲田大学、2015.3.21-24.

- [54] 濱崎立資、池田達彦、上田正仁: 対称性を持つ非可積分な孤立量子系の緩和、日本物理学会第 70 回 (2015 年) 年次大会、早稲田大学、2015.3.21-24.
- [55] 東川翔、上田正仁: $SU(N), SO(N)$ 対称性を持つ系の対称性の破れ方の分類と南部ゴールドストーンボソンの数え上げ、日本物理学会第 70 回 (2015 年) 年次大会、早稲田大学、2015.3.21-24.
- [56] 古川俊輔、上田正仁: 光格子中の Bose-Einstein 凝縮体における Bogoliubov 励起バンドのトポロジー II、日本物理学会第 70 回 (2015 年) 年次大会、早稲田大学、2015.3.21-24.
- [57] 堀之内裕理、上田正仁: 強相関ボソン系における普遍的 4 体束縛状態とくりこみ群のリミットサイクル、日本物理学会第 70 回 (2015 年) 年次大会、早稲田大学、2015.3.21-24.
- 招待講演
- [58] 古川俊輔: ボソンの整数量子ホール状態、日本物理学会 2014 年秋季大会シンポジウム講演、中部大学、2014.9.7-10.
- [59] 蘆田祐人、上田正仁: 回折限界を超えた光格子量子撮像方法の提案、新学術領域「ゆらぎと構造の協奏: 非平衡系における普遍法則の確立」冷却原子研究会、学習院大学、2014.11.3
- [60] 古川俊輔: 人工ゲージ場中の冷却原子系における量子ホール物理、統計物理学懇談会 (第 3 回)、慶応大学、2015.3.9-10.
- (セミナー)
- [61] 古川俊輔: 人工ゲージ場中の二成分ボース気体における量子ホール状態、低次元量子機能セミナー、物質・材料研究機構、2014.4.22.
- [62] 村下湧音: 完全不可逆過程の非平衡等式、羽田野研セミナー、東京大学、2014.6.18.
- [63] S. Furukawa: Entanglement spectra in topological phases and coupled Tomonaga-Luttinger liquids, Seminar of Department of Physics, Tsinghua University, China, 2014.9.1.
- [64] 古川俊輔: Entanglement spectra in topological phases and coupled Tomonaga-Luttinger liquids, 東京無限可積分系セミナー、東京大学、2014.10.3.
- [65] 古川俊輔: 人工ゲージ場中の二成分ボース気体における量子ホール状態、量子物理学・ナノサイエンス第 109 回セミナー、東京工業大学、2014.11.5.
- [66] 池田達彦: Accuracy of the microcanonical ensemble in small isolated quantum systems, 羽田野研セミナー、東京大学、2014.11.13.
- [67] 古川俊輔: 人工ゲージ場中の二成分ボース気体における量子ホール状態、羽田野研セミナー、東京大学、2014.11.20.
- [68] 上西慧理子: Entanglement prethermalization, 羽田野研究室セミナー、東京大学、2014.11.27.
- [69] 上西慧理子: エンタングルメントによる前期熱平衡化、理科共通コロキウム、愛知教育大学、2014.12.10.
- [70] 上西慧理子: エンタングルメントによる前期熱平衡化、西成研究室セミナー、東京大学、2014.12.15.
- (その他)
- [71] 蘆田祐人、布能謙、村下湧音: 上田正仁: フィードバック制御で取り出せる達成可能な上限、第 59 回物性若手夏の学校、浜名湖ロイヤルホテル、2014.7.29-8.2.
- [72] 設楽智洋: 適応測定による測定の効率化とホモダイントモグラフィへの応用、第 59 回物性若手夏の学校、浜名湖ロイヤルホテル、2014.7.29-8.2.
- [73] 東川翔: 近藤効果: classic of electron correlation, 第 59 回物性若手夏の学校、浜名湖ロイヤルホテル、2014.7.29-8.2.
- [74] 村下湧音、布能謙、上田正仁: 絶対不可逆性とゆらぎの定理、第 59 回物性若手夏の学校、浜名湖ロイヤルホテル、2014.7.29-8.2.
- [75] 池田達彦: 小さな孤立量子系におけるマイクロカノニカルアンサンブルの精度、第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.
- [76] 倉持結: 量子測定における系の POVM に関する古典条件と相対エントロピーの保存則、第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.
- [77] 設楽智洋: 量子測定における情報と擾乱の満たす不等式、第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.
- [78] 曾弘博: Gross-Pitaevskii 汎関数の厳密な導出、第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.
- [79] 濱崎立資: Relaxations in Nonintegrable Systems with Discrete Symmetries, 第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.
- [80] 東川翔: 対称性の破れの分類理論と $U(N)$ 対称性を持つ系への応用、第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.
- [81] 古川俊輔: 光格子中の BEC における Bogoliubov 励起バンドのトポロジー、第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.
- [82] 堀之内裕理: Property of a Limit Cycle and Efimov Physics, 第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.
- [83] 村下湧音: 絶対不可逆性から見た Gibbs パラドックス、第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.
- [84] 吉田周平: p 波フェルミ気体の相関関数と熱力学の普遍的な関係、第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.

6 一般物理実験

6.1 牧島研究室+中澤研究室

6.1.1 はじめに

牧島は2014年度末をもって65歳の定年で退職する運びとなり、1986年に開設された牧島研究室は、29年間の歴史を閉じ[110]、後を中澤研究室に託す。研究室はこの間、JAXA宇宙科学研究所による第3世代の宇宙X線衛星「ぎんが」(1987年2月打ち上げ)、第4世代の「あすか」(1993年2月)、第5世代ASTRO-Eの打ち上げ失敗(2000年2月10日)を経て、その再挑戦機となる「すざく」(2005年7月)に深く参加し、搭載装置の開発、衛星運用への協力、観測データを用いた研究遂行の三面から貢献した。ASTRO-Eと「すざく」では釜江研究室と緊密な協力を行った。

我々は、2015年度末に打ち上げ予定の第6世代ASTRO-Hに向けても、中澤を中心に、宇宙科学研究所の学際理学併任の3研究室(満田研、高橋研、山崎研)と協力し装置開発を続けてきた。

牧島研究室は、1991年8月に打ち上げられた太陽X線衛星「ようこう」に対しても、装置開発とデータ解析の両面で貢献した。さらに牧島は昨年引き続き、宇宙科学研究所の宇宙物理学委員長を勤めた。

こうした科学衛星による観測的宇宙物理学を主軸として、牧島研と中澤研を合わせて、今日までに40名の博士学位取得者と17名の修士取得者を輩出することができ、牧島は3月に学士院賞を拝受した[1]。

6.1.2 科学衛星の運用と稼働状況

○ 宇宙X線衛星「すざく」

2005年7月10日に打ち上げられた宇宙X線衛星「すざく」は、観測の9年目に入った。放射線損傷による太陽電池の出力低下と、二次電池の劣化のため、X線CCDカメラ(XIS; X-ray Imaging Spectrometer)による観測が中心となり、我々が設計製作に貢献した硬X線検出器(HXD; Hard X-ray Detector)は、断続的なオンオフを余儀なくされている。我々は本年度も、衛星およびHXDの運用を支援し、観測データの解析を進めた。

○ 国際宇宙ステーション搭載 MAXI

2009年夏に国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」の曝露部に搭載された全天X線監視装置MAXI(Monitor of All-sky X-ray Image)は、理研、JAXA、東工大、青学大、阪大、日大、京大、中央大、宮崎

大などにより、運用が続けられている。その運用はJAXAにより2014年度末まで認可されていたが、年度末の審査で、さらに3年間の運用延長が認められた。牧島は引き続き、理研MAXIチームの責任者を非常勤で兼務した。

○ 後継機 ASTRO-H

「すざく」後継機ASTRO-Hは、2015年度末の打ち上げに向け、建造が進んでいる。§6.1.9に詳述するように、我々はそれに全面的に参加している。

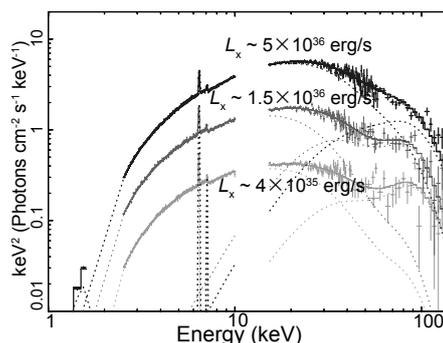


図 6.1.1: X-ray spectra of the “X-ray pulsar like object” 4U 1700–37, accumulated with *Suzaku* over three different luminosity levels. They are fitted with a standard “NPEX” continuum model. A Cyclotron Resonance Scattering Feature is suggested at ~ 60 keV, particularly in the faintest spectrum [75].

6.1.3 強磁場中性子星の研究

○ 中性子星の磁場とサイクロトロン共鳴

強磁場の中性子星(NS)に連星の相手星からガスが降着すると、連星X線パルサー(BXP)となる。そのX線スペクトル中には、しばしば電子サイクロトロン共鳴に基づく構造(CRSF)が現れ、磁場計測の切り札となる(Makishima et al. 1999) [6, 7, 18]。主星は多くは大質量星だが、低質量星の場合もある[7, 47, 65]。本研究室ではこれまで、「ぎんが」や「すざく」を用い、多数のBXPからCRSFの検出に成功し、この研究で世界をリードして来た。

室田らは、「すざく」による4U 1700–37の公開データを解析した[35, 75]。これは1970年代から知られたNS連星で、そのX線スペクトル、激しいX線変動、主星の型などはBXPのものに酷似するが、X線パルス(=NSの自転)は未検出である。解析の結果、X線強度の激しい変動につれ、蛍光鉄輝線の中心エネルギーがわずかに変化することが発見された[87]。これは鉄輝線を発生する周辺物質が、X線の照射を受けて光電離するためと考えられる。さらに図6.1.1に示すように、そのスペクトルの ~ 60 keVにCRSFの徴候が発見され、NSが $B \sim 5 \times 10^{12}$ Gの強磁場をもつ可能性が強まった。

○ 長周期パルサーの研究

既知の約 50 例の BXP のうち、約半数では CRSF が未検出で、磁場強度が算出できない。そこで笹野らは、スペクトル連続成分の形、パルス深さのエネルギー依存性、鉄輝線の形状、パルス周期と変化率などから、降着 NS の磁場を経験的かつ総合的に推定する方法を開発し、CRSF を示すパルサーを用い、その推定方法を較正した。その結果、BXP のうち低い X 線光度と数百秒～1 万秒の長いパルス周期をもつ「長周期パルサー」(LPP) は、周期の他にも、深い X 線パルス、きわめて硬いスペクトルなどの観点から、通常の BXP より一桁も強い $B \sim 10^{13}$ G の磁場をもつ可能性が強まった [12, 38, 43, 68]。これらはマグネターが連星を成した可能性をもち、ASTRO-H による > 100 keV での CRSF 探査が待たれる。

これを踏まえ笹野らは図 6.1.2 に示すように、磁気圧と重力の釣り合うアルフヴェン半径 r_A 、主星からの星風捕獲が起きる上限半径であるボンディ半径 r_B 、NS の自転角速度がケプラー角速度と一致する共回転半径 r_{co} の三者を用い、BXP の新しい分類方法を考案した [38]。LPP は、磁場が強いため r_A が大きく、それとトルク平衡から r_{co} も大きくなり、この両者が r_B に近づくため、星風捕獲の効率が下がり、結果として X 線光度が低いと説明できる。

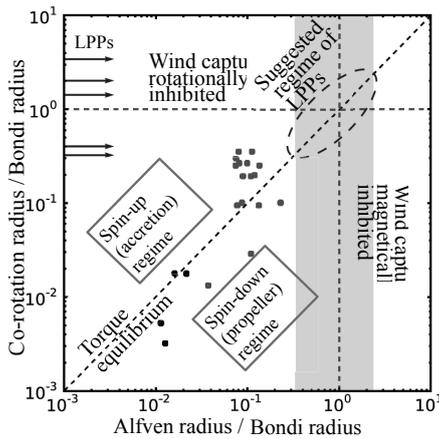


図 6.1.2: A new classification scheme of binary X-ray pulsars in terms of three characteristic radii; the Alfvén radius, the Bondi radius, and the co-rotation radius. Filled dots represent X-ray pulsars of known magnetic field strength, while horizontal arrows represent five Long Period Pulsars (LPPs) [38]. In LPPs, the 3 radii become comparable to one another.

○ マグネターの自由歳差運動の研究

一群の孤立 NS はマグネターと呼ばれ、遅いスピン周期 ($P = 2 - 10$ sec) と高いスピンドウン率から、 $B = 10^{14-15}$ の超強磁場をもち、磁場エネルギーを消費して X 線を放射すると考えられる。～ 30 個のマグネターのうち、数例は超新星残骸の中に存在する。マグネターのスペクトルは一般的に、黒体放射的な軟 X 線成分ときわめて硬い硬 X 線成分から成る。

牧島、村上らは昨年、理研の榎戸と協力し、マグネター 4U 0142+61 の 2009 年のデータで、 $P = 8.6$

sec パルスの位相が周期 $T = 55$ msec で位相変調される現象を発見し、それを軸対称に変形した NS の自由歳差運動の発現と解釈した [2, 44, 66, 61, 102]。剛体の慣性モーメントが $\epsilon \equiv \Delta I / I$ だけ非対称だと、自由歳差周期と自転周期 P が ϵ だけずれ、周期 $T = P/\epsilon$ のうなりが生じ、それがパルスに位相変調をもたらすと考えられる。4U 0142+61 の場合 $\epsilon = 1.6 \times 10^{-4}$ で、NS 内部に $B \sim 10^{16}$ G のトロイダル磁場が存在する結果、星が縦長に変形している考えられる。この成果はプレスリリースされた [112]。

村上らは今年度、2011 年と 2013 年に追観測した 4U 0142+61 の「すざく」データを同様に解析した結果、2009 年の現象を再確認することに成功した。さらに図 6.1.3 に示すように、位相変調の振幅が年のオーダーで変化することもわかった [31, 59, 72, 107, 82]。これは歳差の首振り角の変化ではなく、硬 X 線の放射パターンが NS 対称軸回りに非対称性をもち、その度合いが時間変化した結果と解釈される。

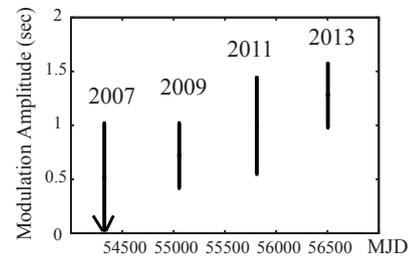


図 6.1.3: Evolution of the phase-modulation amplitude of hard X-ray pulses of the magnetar 4U 0142+61, as observed with *Suzaku* [2, 72, 82, 107].

牧島らは今年度は、最速自転マグネター 1E 1547-5408 が 2009 年 1 月に活性化された際の「すざく」データを再解析した。図 6.1.4 に示すように、この天体でも $P = 2.07$ sec の硬 X 線パルスに位相変調が見られ、自由歳差運動の検出の二例目となった [77, 103, 107]。この位相変調の周期は $T = 36$ msec で、変調振幅は $\sim P/4$ に達すること、軟 X 線パルスは位相変調されていないことがわかった。 $\epsilon \equiv P/T = 0.6 \times 10^{-4}$ は、一例目と同程度であり、やはり $\sim 10^{16}$ G のトロイダル磁場が内在する可能性を示唆する。これは外部に現れる双極子磁場より 2 桁も強い。これらの重要な結果は、NuSTAR 衛星や ASTRO-H で大幅に強化できるであろう。

6.1.4 質量降着する弱磁場中性子星

弱磁場 ($B < 10^9$ G) の NS が低質量の恒星と連星系をなすものを、LMXB (Low-Mass X-ray Binary) と呼ぶ。それらは質量降着率が高い時には「ソフト状態」、低い時には「ハード状態」にある。櫻井らは昨年続き、代表例である Aql X-1 を中心に、「すざく」で観測されたハード状態 LMXB のデータを統一的に解析した [37]。また小野らは GS 1826-238 の「すざく」のデータ解析を進めた [32, 73, 50]。その結果、ソフト状態でもハード状態でも X 線放射は、(1) 降着円盤からの多温度黒体放射、(2) NS 表面か

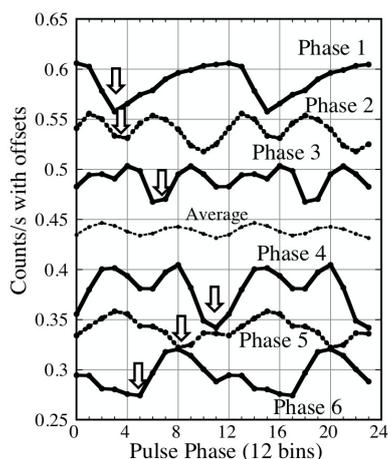


図 6.1.4: Hard X-ray (15–40 keV) pulse profiles (two cycles) of the magnetar 1E 1547–5408 observed with *Suzaku*, folded at the pulse period of 2.072147 sec. They were accumulated over six different phases of a 35-ksec “slip period”, arising as a beat between the rotation and free precession periods. The pulse phase is modulated (see arrows) with this period.

らの黒体放射、(3) 降着流の最終段階で生じる「コロナ」により (2) が逆コンプトン化された硬い放射、という 3 成分で記述できること、状態遷移に伴いそれらの相対強度や物理パラメータが、顕著な変化を示すことが明らかになった [37, 45]。図 6.1.5 は、Aql X-1 がハード状態からソフト状態に約半日で遷移した、貴重なデータで、スペクトルの変化が明らかである [37]。

学振外国人研究員の Zhang Zhongli (張仲莉) は、LMXB のうち周期的ディップを示す (円盤を横から見る) ものを研究した [19, 14, 48]。昨年の 4U 1916–053 (ソフト状態) [5] に続き、今年度はハード状態にある dipping LMXB として、EXO 0748–676 の「すざく」データを解析した。その結果この天体は、図 6.1.6 に示すように、同じ $Q \equiv$ (コロナ電子温度)/(円盤温度) をもつ LMXB に比べ、系統的にコンプトン雲の光学的厚みが大きなことが判明した [64, 83]。これは LMXB のコロナが扁平であることを示す [79, 14, 48, 19]。

6.1.5 超新星残骸の研究

我々はビッグバンセンターの平賀らと協力しつつ、「すざく」を用い超新星残骸 (SNR) の研究を続けている。中野らは昨年続き、マグネター 1E 2259+586 に付随する、CTB 109 と呼ばれる SNR の研究を進めた。「すざく」による X 線分光の結果、その爆発エネルギー ($\sim 10^{51}$ erg) は重力崩壊型 SNR として典型的で、マグネター生成現場を特徴づける特異性は検出されなかった。しかし図 6.1.7 に示すように、プラズマ 2 成分を分離し、それらを親星イジェクタと衝撃波加熱された星間物質とに同定できた。そこから X 線放射プラズマを積算した結果、超新星爆発を

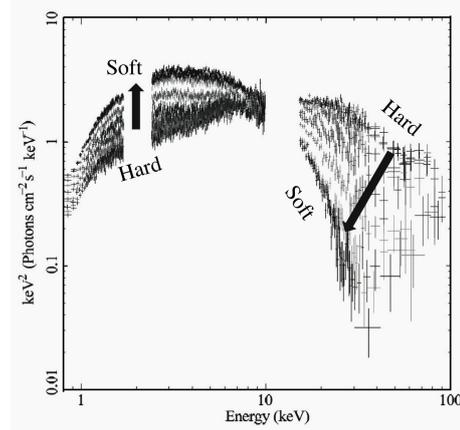


図 6.1.5: A remarkable state transition of the LMXB Aql X-1, witnessed with *Suzaku*. In about half a day, the spectrum changed from those typical of the Hard State to those of the Soft State [37].

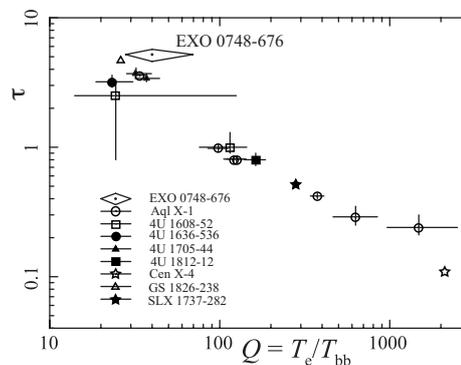


図 6.1.6: Compton optical depths of various LMXBs in the Hard State, plotted against $Q \equiv$ (electron temperature)/(disk temperature) [48]. The dipping source EXO 0748–676 is indicated by a diamond.

起こした親星は、太陽の ~ 40 倍の大質量星であったことを突き止め [36]、マグネターが超大質量星の重力崩壊で作られるという理論描像を強化できた。重元素アバundanceもこの結論を支持する。*ASTRO-H* により、さらに精密な測定が可能となろう。

中野らはまた CTB 109 の推定年齢が中心マグネター 1E 2259+586 の特性年齢よりずっと若いという矛盾を逆手に取り、マグネターの特性年齢は、その磁場が減衰するため過大評価されていること、よってマグネターが真の磁気駆動 NS であること、またマグネターが従来の理解より若いことを示した [36, 9, 42]。よって $\sim 10^{12}$ G の磁場をもつ通常の NS より、マグネターの方が多く誕生するという、斬新な可能性が示唆される。*ASTRO-H* による、老齡マグネターの探査に期待がかかる。

古田らは「すざく」および *XMM-Newton* 衛星のデータを用い、RCW103 と呼ばれる SNR を研究した [34, 74, 86]。この天体は中心に、6.7 h という超長周期の奇妙な NS を擁している。CTB 109 と類似の解析を行った結果、SNR の全面にわたって ~ 0.6

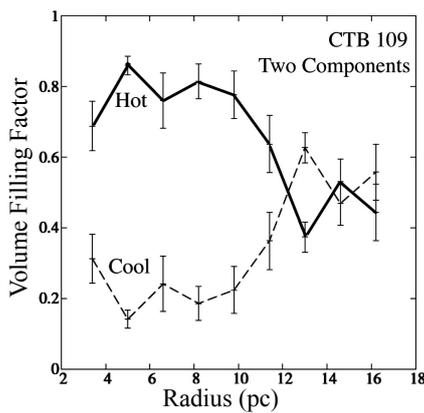


図 6.1.7: Volume filling factors of the hotter ($kT \sim 0.68$ keV) and cooler ($kT \sim 0.23$ keV) plasma components in the SNR CTB 109, measured with *Suzaku* and shown against the projected radius from the center [36]. The hotter and cooler components can be identified with the progenitor's ejecta and the shock-heated inter-stellar medium, respectively.

keV と ~ 0.3 keV の二温度プラズマが存在し、その温度は図 6.1.8 に示すように、円周方向に $\pm 20\%$ で一定であることがわかった [86]。これは超新星爆発が、強い非対称性は持っていないことを意味する。

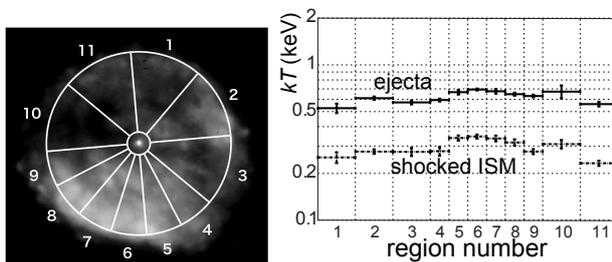


図 6.1.8: An X-ray image of the SNR RCW103 obtained with *XMM-Newton* (left), and the azimuthal distributions of the two temperatures (right) [86].

6.1.6 質量降着するブラックホール

ブラックホール (BH) にガスが降着すると、静止質量エネルギーの $< 10\%$ が、 ~ 0.01 keV から ~ 100 MeV までの広範囲な帯域に放射として解放される。当研究室では長年にわたり、大質量星の末裔である恒星質量 BH (Makishima et al. 1986) [3, 17, 50]、謎の天体 ULX、ある種の銀河の中心に見られる巨大 BH という 3 カテゴリーに対して、世界をリードする研究を展開して来た [109]。

○ ULX 天体 [54, 81]。

牧島らは、近傍銀河に見られる大光度の X 線点源に ULX (Ultra-Luminous X-ray Source) という呼称を与え、それらが恒星質量 BH と巨大 BH の橋渡しを

する「中質量 BH」であると論じてきた (Makishima et al. 2000)。他方それらは超臨界降着する恒星質量 BH との解釈もあり、決着がついていない。

ULX は、Power-Law 的なスペクトルを示す PL 状態と、上に凸なスペクトルを示す円盤的状态の間を遷移し、後者の方が光度が高い。小林らは「すざく」を用いて ULX の研究を続けた結果、1–10 keV のスペクトルは両状態とも、 < 2 keV に見られる降着円盤放射と、その光子が強く熱的コンプトン散乱を受けたものとの和で、表現できることを確立した。

さらに小林らは、NGC 1313 X-1 と呼ばれる ULX を「すざく」で追観測し、図 6.1.9 に示すように、顕著な時間変動の検出に成功した。1–10 keV の光度が 1.3×10^{40} から 3.4×10^{40} erg s^{-1} に増加するさい、円盤のパラメータやコンプトン電子温度はほぼ不変だが、コンプトンの光学的厚みが ~ 13 から ~ 18 に増加することがわかった。さらに光度が上がると disk-like 状態に遷移すると、円盤温度が上がり、コロナの電子温度が下がると同時に、円盤放射のうち直接に見える成分がほぼ消失する (すべてコンプトン化される) ことも示唆される。

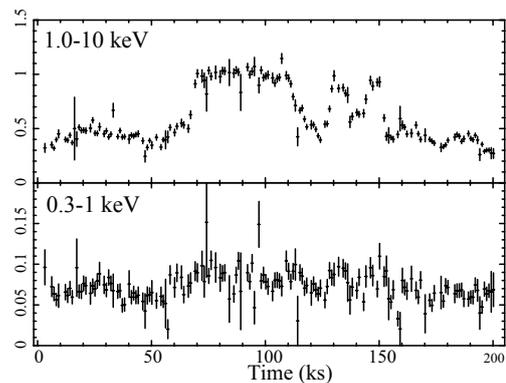


図 6.1.9: Two-band light curves (1 ksec/bin) of the ULX NGC 1313 X-1 obtained with the *Suzaku* XIS [30, 54, 81]. The variation is prominent in the harder band.

○ 巨大ブラックホールと活動銀河核

銀河の中心にある巨大 BH にガスが降着すると、活動銀河核 (AGN) となる。その円盤放射は真空紫外領域に来るため、複雑なスペクトル成分を切り分けることが難しい。三宅、牧島らは、理研の野田らと協力し、「すざく」で得た広帯域の AGN スペクトルを、変動を手掛かりに成分分解する「C3PO」法を進めた。その結果、従来は単一成分とされていた AGN の X 線放射が、光子指数 $\Gamma \approx 2.3$ と柔らかく変動の激しい成分と、 $\Gamma \approx 1.4$ と硬く、吸収が強く、変動の遅い成分との混合であり、光度 (Eddington 比) が高くなると前者が卓越することが確実となった [11, 20, 49, 69]。この重要な結果は、8 月にプレスリリースされた [113]。三宅らは、セイファート銀河 IC 4329A にこの描像を適用し成功を収めた [33, 56]。

昨年度は野田のリードにより、国内の中型望遠鏡を総動員し、NGC 3516 の「すざく」と可視光の同時観測を実施した。今年度は野田らとともに、そのデータを解析した結果、暗い時に卓越する $\Gamma \approx 1.4$

のX線成分が、降着円盤からの可視光と強く相関すること、硬X線変動に比べ可視光変動が2~3日ほど遅れることを発見した[78, 57]。これは可視光のかなりの部分が、硬X線による降着円盤の照射で発生することを示唆する。

6.1.7 銀河団の研究

銀河団は、暗黒物質、X線を放つ高温プラズマ(ICM=Intra Cluster Medium)、数十~数百のメンバー銀河から成る宇宙最大の自己重力系で、その研究は宇宙論的な意義が大きい。

○ 銀河団の宇宙論的進化の新描像 [13, 21, 101, 46]

牧島らは「あすか」のX線観測により、銀河団に関し独創的な磁気流体的描像(Makishima et al. 2001)を構築してきた。それは「銀河団のメンバー銀河たちは、ICM中を運動するさい抵抗を受け、渦巻から楕円へと形態を変化させつつ中心に落下し、その解放エネルギーがICMの放射冷却を止め、粒子加速を駆動する」という壮大な筋書きで、銀河団に関する多くの謎を一挙に解決できる。

この予言を証明すべく我々は、ビッグバンセンターのGu Liyi(雇 力意)、奈良高専の稲田直久らと協力し、ハワイ大学88インチ望遠鏡で観測された近傍($z \sim 0.1$)から遠方($z \sim 0.9$)までの34個の銀河団(サンプル1)、ついでSloan Digital Sky Surveyのデータを2次処理した、 $z = 0 \sim 0.5$ の250個の銀河団(サンプル2)を用い、個々の銀河団の可視光サイズとX線サイズの比較を行ってきた。その結果、図6.1.10に示すように、銀河たちは暗黒物質に比べて中心へ落下する一方で、ICMは暗黒物質より空間的に広がってゆくことを世界で初めて発見した。これは宇宙論的な時間の間に、銀河たちの力学的エネルギーがICMの熱エネルギーへと転化することを意味する。これは牧島の予言を立証するものであり、かつ、宇宙最大級のエネルギー流の新発見を意味する。ASTRO-Hを用い、大きな視線速度をもつメンバーの周囲で、ICMのX線放射のドップラーシフトを検出できれば、動かぬ証拠となる。

○ 衝突銀河団 CIZA J1358.9 – 4750 の研究 [10, 29, 58, 70, 80, 40]

銀河団は大規模構造の節であり、宇宙年齢の中で衝突合体を繰り返しながら、成長してきたと考えられている。加藤、中澤、Guらは、銀河系から $z = 0.07$ 、距離300 Mpcという近傍に、衝突の初期段階にある銀河団CIZA J1358.9 – 4750を発見し、その研究を進めてきた。この段階はごく短時間($\sim 10^8$ 年)で終わるため、これまで観測例がなく、しかも銀河団として極めて近傍にあり、X線観測に適しているため、重要な発見であった。我々は「すざく」衛星の観測からICMの温度ジャンプを、欧州のXMM-Newton衛星の短時間データから密度ジャンプを発見し、2つの銀河団の中央で衝撃波が形成されていることを示し、論文にまとめた[10]。

さらに、2014年夏に「すざく」を用いて周辺領域を追観測したところ、衝撃波領域が2つの銀河団の

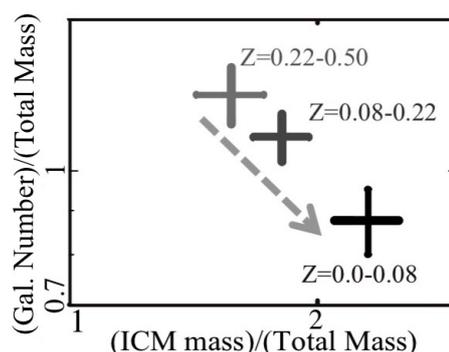


図 6.1.10: Spatial distributions of the three mass components of clusters of galaxies. Abscissa shows the ratio of the ICM mass to the total gravitating mass, while ordinate is the ratio of the galaxy number vs. the total mass. The three mass quantities are all calculated at $0.5R_{500}$ and normalized to unity at $0.2R_{500}$. The three crosses represent ensemble averages over three subsamples with different redshift ranges [13].

ほぼ中間から北東に向かって伸びていること、南西には見られないことを発見した(図6.1.11)。これは衝突のジオメトリに対称性から外れる成分があることを示している。現在、山形大の滝沢准教授、大阪大学の藤田准教授、鹿児島大の赤堀准教授らとともに、衝突前の銀河団質量、衝突速度と角度等のパラメータ導出を進めている。

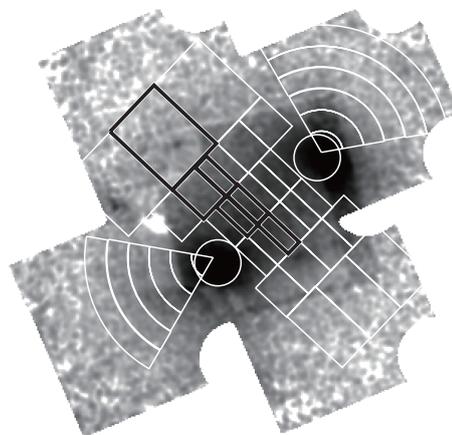


図 6.1.11: Suzaku X-ray image of the merging cluster CIZA J1358.9 – 4750. Overlaid is the spectral analysis regions. Black boxes represent hot regions, with $kT > 7.5$ keV, while the white boxes are for cooler regions with $kT = 4.5 \sim 7.5$ keV [80].

○ 低光度銀河団 Abell 548W の研究 [71]

銀河団の光度 L_X は、概ね温度 kT の ~ 3 乗に比例することが知られているが、Abell 548W は、この関係から X 線光度が 1 桁以上も低い特異な銀河団である。同様の例はこれまでに数個知られているが、他は全て顕著な非一様構造を持ち直ちに衝突銀河団と分かるのに対し、Abell 548W は比較的丸く、安

定しているように見える点が謎である。中澤、加藤、Guらはこの天体を「すぎく」で観測し、その高感度で初めてビリアル半径近くまで ICM の温度、密度を決定した。この結果、ICM に顕著な温度構造は無い一方で、その密度が際立って少ないことが示された。実際、ビリアル半径までの積分で ICM 質量を総質量と比較すると、通常の銀河団の半分しかない。[71]

一つのシナリオとして、温度 2 keV 程度の小型銀河団 (あるいは銀河群) が高速で衝突し、強く加熱された後の姿を見ている可能性がある。このような銀河団は、放射冷却が効かないため通常の銀河団の持つ $kT-L_X$ 関係に戻ることは無い。同様の安定した銀河団は一定数存在するはずで、将来、より感度の良い観測でその性質を明らかにしてゆくことが重要である。

6.1.8 雷雲ガンマ線の研究

近年、雷雲から 10 MeV に達する高エネルギーのガンマ線が放射されていることが分かってきた。これは雷雲中に静電場加速器があり、そこで ~ 10 MeV 以上に加速された電子から、制動放射が出ていると理解されているが、その加速器の仕組みや、成立条件等はまだまだ分かっていない。我々は新潟県の柏崎刈羽原発の敷地内で、日本海岸で発達する冬季雷雲からのガンマ線を観測する実験 (GROWTH 実験) を 2006 年の冬から継続している。2014 年度の冬は、ガンマ線の方向検知能力をもつ新たな観測装置を設置し、11 月 14 日から 2015 年の 4 月 14 日まで観測を実施した。低温な気候と日本海の海水温が高かったこともあり、今期は非常に雷雲が活発で、これまでに解析した 2 月までのデータだけで、8 個のガンマ線イベントを新たに検出した。これまでの 8 シーズン合計 12 個と比較して、大幅に数が多いのは、異常気象の影響だけでなく、検出器面積が大きかったからと考えられる。

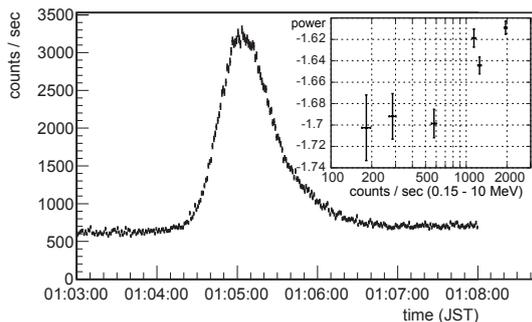


図 6.1.12: A 0.15–10 MeV gamma-ray count rate profile of the thunder storm event on 2015.01.25 (JST). Gamma-ray enhancement was observed for ~ 1.5 min, and its spectral index was harder at its brightness peak by $\Delta\Gamma = 0.1$ compared to those in the rising and falling edge [92, 93]. Note that the countrate profiles includes background, while it is subtracted in the inserted index plot.

8 個のイベントのうち、2 個はかつて無い統計の良

いデータとなった。そのうちのひとつを図 6.1.12 に示す。レーダーで確認できる雷雲の通過に同期して、ガンマ線フラックスが上昇・下降していることが分かる。その大統計を活かして、連続成分スペクトルのベキの時間変化を追ったところ、光度が高いときほどベキが $\Delta\Gamma = 0.1$ ほど硬くなっていることを初めて示した。これは上空から強くビーミングしたガンマ線が来ており、放射域の端の方ではオフビームの柔らかいスペクトルが混ざっていると解釈できる。方向検知の結果も、天頂角 30 度以内ほどから放射がビーミングして到来していると考えたと説明でき、加速器の構造に迫る重要な結果を得た。

6.1.9 ASTRO-H 衛星計画

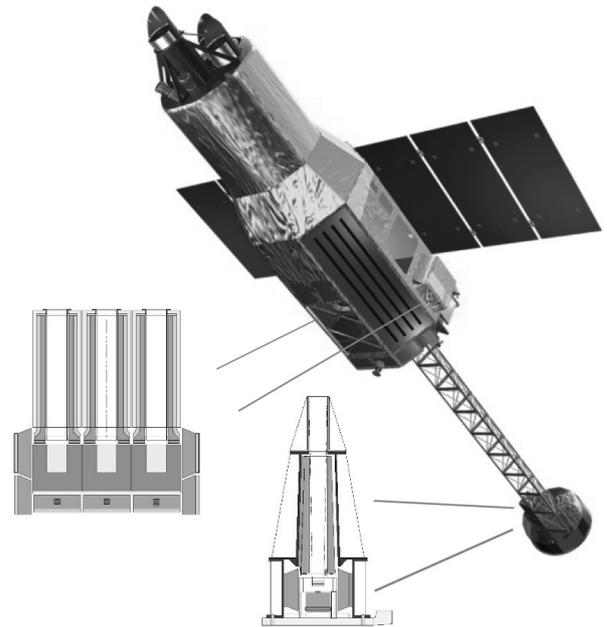


図 6.1.13: Drawing of the *ASTRO-H* satellite, to be launched in JPY 2015. The overall length is 14 m, and the weight is 2.7 t. Also plotted are cross sectional views of the HXI (right: 40 cm tall) and SGD (left: 50 cm tall). Two identical units of each instrument are mounted.

ASTRO-H 衛星は、2015 年度末の打ち上げを目指して開発の進められている次世代の宇宙 X 線衛星で、広帯域、高感度、高精度での X 線分光観測において、これまでと比較して桁違いの性能を発揮し、ブラックホールや銀河団の研究などに飛躍的な進展をもたらす。この衛星には、0.5–10 keV 域で X 線エネルギーを 5–7 eV の精度で測定する X 線マイクロカロリメータ、38' の広視野を持つ X 線 CCD カメラに加え、5–80 keV を集光結像する 2 台のスーパーミラー硬 X 線望遠鏡 (HXT) とその焦点面に置かれる硬 X 線イメージャー (HXI)、60–600 keV で働く軟ガンマ線検出器 (SGD) が搭載される。*ASTRO-H* は長さ 14 m、重さ 2.7 t と日本の科学衛星として最大で、H-IIA ロケットで打ち上げられる。我々は、JAXA、広島

大、理研ほか国内外の大学研究機関、スタンフォード大、フランス CNES などと共同し、中澤を中心に研究室の総力を挙げて、HXI と SGD の開発に参加している。

HXI は、5–80 keV の帯域を 9 分角の視野と 1.7 分角の角分解能で撮像しつつ、エネルギー分解能 1.5 keV の精度で分光する。その検出器部は図 6.1.13 に示すように、BGO 結晶シンチレータを用いたアクティブシールドにより低バックグラウンド環境を実現し、その中に 4 段の両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) と 1 段の両面 CdTe ストリップ検出器 (CdTe-DSD) を重ねたイメージャーを搭載する。HXT と HXI の組み合わせは、従来の装置より 2 桁よい感度を実現する。

SGD は図 6.1.13 のように、3×2 台の「コンプトンカメラ」と、それらを取り囲む 25×2 個の BGO 結晶シンチレータで構成される。コンプトンカメラは、半導体パッド検出器 (シリコンおよび CdTe) を 40 層重ね、その中で光子をコンプトン散乱させ、エネルギーと運動量の保存から入射方向を推定するもので、60–600 keV の帯域で動作する。視野を絞った井戸型 BGO アクティブシールドの内側に置くことで、バックグラウンドを除去し、「すざく」HXD より感度を一桁上げる。

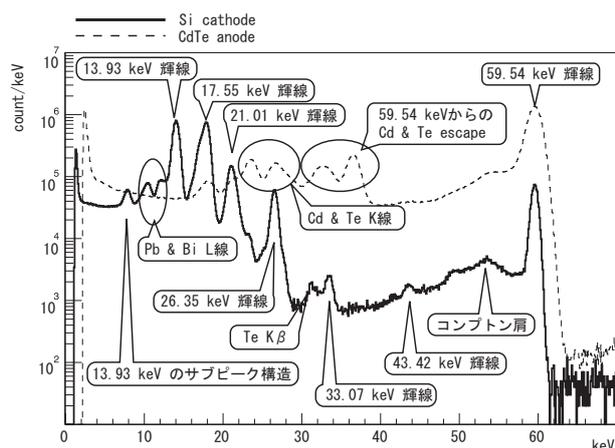


図 6.1.14: X-ray spectra obtained with HXI2-S FM model in the low temperature test. ^{241}Am source was irradiated to the imager part, and spectra from the 1st DSSD (dashed line) and the CdTe-DSD (solid line) is shown [41, 94, 105]

2014 年度は、HXI、SGD ともに衛星搭載品 (Flight Model: FM) が完成し、小林、村上、三宅、中澤らを中心に、JAXA の国分、川原田、佐藤 (悟)、佐藤 (理)、萩野、広島大学の 大野氏らとともに、環境試験 (熱真空試験、振動試験、音響試験) と性能評価試験 (低温試験) を実施し、要求する性能が達成できていることを確認した (図 6.1.14)。試験には、加藤、小野、古田、室田らもサポートに入っている。これらの結果、どちらの衛星搭載品も完成を迎え、衛星に搭載された。そのときの集合写真を図 6.1.15 に示す。

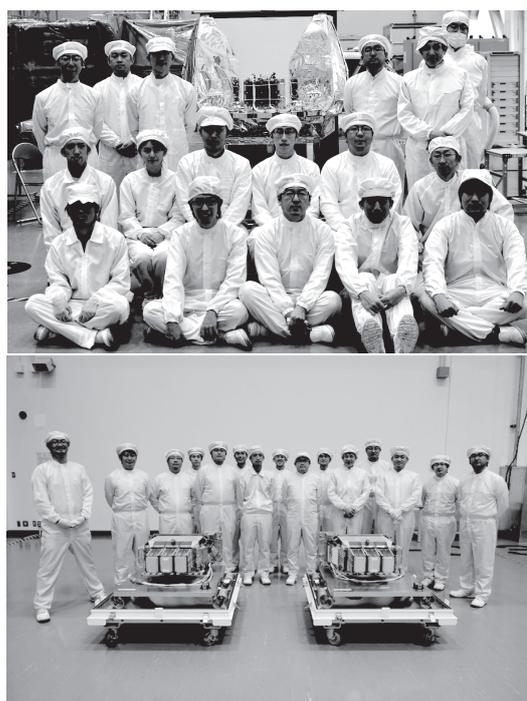


図 6.1.15: (Top) Photo of the 2 flight model HXIs with core team members snapped in February 2015, and (bottom) those with the 2 SGDs in April 2015.

6.1.10 将来計画

ASTRO-H 衛星の打ち上げが迫る中で、次の世代にどのような高エネルギー宇宙観測が必要とされているかの検討を進めている。

○ 広視野 MeV ガンマ線観測計画 [28, 52, 106]

一つの方向性は、*ASTRO-H* の観測帯域より上のエネルギーを目指すことである。0.1 から数 MeV の帯域は物質と光子の相互作用のうちコンプトン散乱が支配的で、ガンマ線検出が難しい。*ASTRO-H* SGD は Si と CdTe を組み合わせた半導体コンプトンカメラでこの難題に取り組むが、同じ技術を使って広い視野をコンプトン撮像し、0.2–2 MeV という sub-MeV から MeV の帯域の全天観測を目指すのが *CAST* (Compton telescope for Astronomy and Solar Terrestrial physics) 計画である。主検出器は、30 cm 立方の Si/CdTe コンプトン望遠鏡であり、これを単独の小型衛星、または国際宇宙ステーションなどの大型衛星のサブ機器として軌道に上げる計画である。*ASTRO-H* 開発の中で、Si/CdTe コンプトン望遠鏡の技術開発は着実に進んでおり、2020 年代中頃からの軌道投入へ向けて、コンセプトの検討を進めている。

同様の発想の、より大型の衛星として、ヨーロッパを中心として *ASTROGAM* が ESA の中規模ミッションとして提案されている。この計画では、Si の両面ストリップ検出器を多数並べたものの周りを、CeBr₃ シンチレータのアレイで覆うことで、0.3–30 MeV でコンプトン望遠鏡として、0.03–3 GeV では対生成望

遠鏡として動作させる。sub-MeV 帯域では *CAST* にわずかに劣る性能となるが、数 10 MeV でも動作し、GeV 帯域では *Fermi* GeV ガンマ線衛星の検出器からタングステンコンバーターを除く概念で設計され、電子散乱を押さえることで、より低いエネルギーまで対生成望遠鏡の稼働範囲を広げたものである。2024 年の打ち上げを目指して 2014 年末に ESA に提案されている。日本もシリコン検出器の提供を中心に貢献することを検討しており、中澤が日本を代表してその発起人の一翼を担っている。審査の結果は、2015 年の夏頃に出る予定であるが、ここで落選したとしても 2-3 年後の次の中型計画へ向けてさらに計画をリファインし、より強力な衛星計画にしてゆく予定である。

○ 高角分解能の広帯域 X 線撮像分光衛星 (*NGHXT*) 計画 [104, 99, 100, 89, 90, 91]

ASTRO-H に続く世界の宇宙 X 線観測衛星としては、2028 年打ち上げ予定の *ATHENA* という大型衛星が ESA 主導でプロジェクト化されている。この衛星は、*ASTRO-H* の 2 つの特徴の一つ、精密分光を引き継ぐもので、望遠鏡の有効面積を 1 桁、角度分解能を 1 桁改善する計画である。日本もこの計画に参加しており、分光検出器の冷却機構や、もう一つの広視野イメージャの評価試験などへの貢献が期待されている。一方で *ASTRO-H* のもう一つの特徴、0.5-80 keV までの広帯域の撮像分光観測は、天体のスペクトルからその正体を探る有力なツールであるが、*ASTRO-H* 以後にこの特徴を引き継ぐ衛星計画は世界に存在しない。

Next Generation Hard X-ray Telescope (*NGHXT*) 計画は、2020 年代前半の打ち上げを目標に、*ASTRO-H* 同様の 0.5-80 keV の広帯域を、角分解能を 1 桁改善し、同等の有効面積を 800 kg ほどの比較的小型の衛星で実現しようという計画である。中澤は、宮崎大、京都大、大阪大、NASA のゴダード宇宙センターの研究とともに、この計画の発起人を勤めている。2014 年度は、X 線コミュニティ内で本計画の重要性を議論した上で、この計画を検討するためのワーキンググループ申請書を提出した。この計画は、優れた望遠鏡 (NASA の担当) と検出器 (我々や京大の担当)、そして効率的な衛星システム、特に姿勢系の構築 (JAXA と共同で) が鍵を握っており、*ASTRO-H* の「次」を目指して精力的にサイエンス、検出器システム、そして衛星システムの検討を行っている。

○ その他の開発 [39, 63, 96]

こうした X 線ガンマ線観測の将来検討と並行して、太陽フレアからの ~ 10 MeV 中性子の観測を目指した検出器の研究も進めている。2014 年度に、小野、村上らは、中性子散乱のリコイル陽子からの信号と、ガンマ線を区別できる新しいプラスチックシンチレータ 2 個を用いて、中性子の弾性散乱をエネルギー損失から再構成し、入射方向とエネルギーを知る装置の概念実証となる基礎実験を行い、 ^{251}Cf 線源からの数 MeV の中性子の散乱角を検出することに成功した [39]。

このほかに、中澤は、宇宙重力波観測計画 *DECIGO* の検討にもアドバイザーとして参加している [63, 96]。

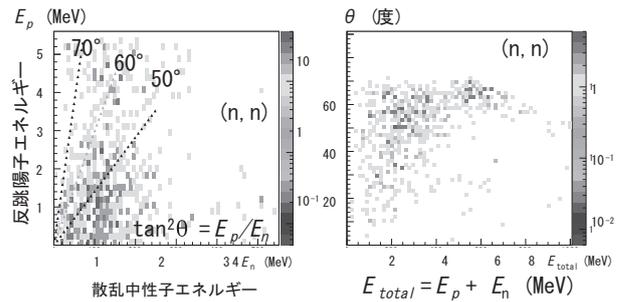


図 6.1.16: Angular resolution of elastic neutron scattering within the detectors. (left) Energy comparison between recoil proton (E_p) and scattered neutron (E_n , measured via time-of-flight) is shown. (right) The same plot, converted into scattering angle vs initial neutron energy [39].

<受賞>

- [1] 牧島一夫、第 105 回学士院賞、「X 線観測による中性子星の強磁場の研究」にて。2015 年 3 月 12 日。

<報文>

(原著論文 (Refereed))

- [2] Makishima, K., Enoto, T., Hiraga, J.S., Nakano, T., Nakazawa, K., Sakurai, A., Sasano, M. & Murakami, H.: “Possible Evidence for Free Precession of a Strongly Magnetized Neutron Star in the Magnetar 4U 0142+61”, *Phys. Rev. Lett.* **112**, id.171102 (2014)
- [3] Koyama, S., Yamada, S., Kubota, A., Tashiro, Makoto S., Terada, Y., & Makishima, K.: “Suzaku observation of X-ray variability in soft state LMC X-1”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **67**, in press (2015)
- [4] Yasuda, T., Iwakiri, W.B., Tashiro, M., Terada, Y., (8 co-authors), Makishima, K.: “Sub-MeV band observation of a hard burst from AXP 1E 1547.0-5408 with the Suzaku Wide-band All-sky Monitor”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **67**, in press (2015)
- [5] Zhang, Z., Makishima, K., Sakurai, S., Sasano, M., & Ono, K.: “Probing the Accretion Scheme of the Dipping X-ray Binary 4U 1915-05 with Suzaku”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, id.120 (2014)
- [6] Yamamoto, T., Mihara, T., Sugizaki, M., Nakajima, M., Makishima, K. & Sasano, M.: “Firm detection of a cyclotron resonance feature with Suzaku in the X-ray spectrum of GRO J1008-57 during a giant outburst in 2012”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, id.59 (2014)
- [7] Sasano, M., Makishima, K., Sakurai, S., Zhang, Z. & Enoto, T.: “Suzaku View of the Neutron Star in the Dipping Source 4U 1822-37”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, id.35 (2014)

- [8] Okabe, K. Umetsu, T. Tamura, et al. : “Universal profiles of the intracluster medium from Suzaku X-ray and Subaru weak-lensing observations” , *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, id.9914 (2014)
- [9] Nakano, T., Murakami, H., Makishima, K., Hiraga, J.S., Uchiyama, H., Kaneda, H., Enoto, T., : “Suzaku studies of the supernova remnant CTB 109 hosting the magnetar 1E 2259+586” , *Publ. Astron. Soc. Japan* **67**, id.912 pp.
- [10] Kato, Y., Nakazawa, K., Gu, L., Akahori, T., Takizawa, M., Fujita, Y., & Makishima, K., : “Discovery of a nearby early-phase major cluster merger CIZA J1358.9-4750” , *Publ. Astron. Soc. Japan* **67**, in press (2015)
- [11] Noda, H., Makishima, K., Yamada, S., Nakazawa, K., Sakurai, S., & Miyake, K.: “Suzaku Studies of the Central Engine in the Typical Type I Seyfert NGC 3227: Detection of Multiple Primary X-Ray Continua with Distinct Properties” , *Astrophys. J.* **786**, id.127 (2014)
- [12] Enoto, T., Sasano, M., Yamada, S., Tamagawa, T., Makishima, K. et al.: “Spectral and Timing Nature of the Symbiotic X-ray Binary 4U 1954+319: The Slowest Rotating Neutron Star in an X-ray Binary System” , *Astrophys. J.* **786**, id.127 (2014)
- (会議抄録)
- Proc. *Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe* (2014 February 19–22, Matsuyama, Ehime)
- [13] Gu, L., Gandhi, P., Han, J., Inada, N., Kawaharada, M., Kodama, T., Konami, S., Nakawaza, K., Shimasaku, K., Wen, Z., Xu, H., & Makishima, K.: “Probing of the Interactions Between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters over a Cosmological Timescale” , p.382
- [14] Zhang, Z., Makishima, K., Sakurai, S., Sasano, M. & Ono, K.: “Probing the geometry of the Comptonizing coronae of LMXBs” , p. 264
- [15] Terada, Y., (6 co-authors), Makishima, K., Mukai, K., Urata, Y., (7 co-authors): “Systematic surveys of non-thermal emission from white dwarfs with Suzaku” , p.248
- [16] Sugita, S., Yamaoka, K., Takahashi, H., Yoshida, A., Tawara, Y., Nakazawa, K., & Makishima, K.: “Suzaku Observation of LMXB 4U 0614+091” , p.224
- [17] Koyama, S., Yamada, S., Tashiro, M., Terada, Y., Kubota, A., & Makishima, K.: “Spectral Variability of LMC X-1 with SUZAKU” , p.170
- [18] Mihara, T., Yamamoto, T., Sugizaki, M., Nakajima, M., Makishima, K., Sasano, M., Yamaoka, K., & Morii, M.: “Cyclotron lines at high energies in GRO J1008-57 and GX 304-1 with MAXI-Suzaku collaboration”
- Proc. *The X-ray Universe 2014* (2014 June 16-19, Dublin, Ireland)
- [19] Zhang, Z., Makishima, K., Sakurai, S., Sasano, M., & Ono, K.: “Probing the Geometry of the Comptonizing Coronae of Neutron Star LMXBs” , id.341
- [20] Noda, H., Makishima, K., Yamada, S., & Miyake, K.: “Understanding X-ray Spectral and Timing Characteristics of Active Galactic Nuclei by a Novel Picture with Multiple Primary Emission” , id. 153
- [21] Gu, L., & Makishima, K.: “Probing of Interactions between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters over a Cosmological Timescale” , id.87
- Proc. SPIE, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray
- [22] Takahashi, T., Mitsuda, K., Kelley, R., Nakazawa, K., Makishima, K., et al. : “The ASTRO-H X-ray astronomy satellite” , *Proc. SPIE*, **9144**, 914425 24 pp. (2014).
- [23] Noda, H., Nakazawa, K., Makishima, K., et al. : “Thermal design of the hard x-ray imager and the soft gamma-ray detector onboard ASTRO-H” , *Proc. SPIE*, **9144**, 91445E 11 pp. (2014).
- [24] Sato, G., Kokubun, M., Nakazawa, K., Makishima, K., et al. : “The Hard X-ray Imager (HXI) for the ASTRO-H Mission” , *Proc. SPIE*, **9144**, 914427 11 pp. (2014).
- [25] Ohno, M., Tokuda, S., Kawano, T., Nakazawa, K., Makishima, K., et al. : “Development and verification of signal processing system of BGO active shield onboard Astro-H” , *Proc. SPIE*, **9144**, 91445G 13 pp. (2014).
- [26] Mizuno, T., Kimura, D., Fukazawa, Y., Nakazawa, K., Makishima, K., et al. : “Development and calibration of fine collimators for the ASTRO-H Soft Gamma-ray Detector” , *Proc. SPIE*, **9144**, 91445F 10pp. (2014).
- [27] Fukazawa, Y., Tajima, H., Watanabe, S., Nakazawa, K., Makishima, K., et al. : “Soft gamma-ray detector (SGD) onboard the ASTRO-H mission” , *Proc. SPIE*, **9144**, 91442C 12 pp. (2014).
- [28] Nakazawa, K., Takahashi, T., Watanabe, S., Makishima, K., et al. : “Sub-MeV all sky survey with a compact Si/CdTe Compton telescope” , *Proc. SPIE*, **9144**, 91440J 13 pp. (2014).
- 天文・天体物理若手夏の学校 2014 (長野： 2014年7月28日～31日) 集録
- [29] 加藤佑一、中澤知洋、Liyi Gu、赤堀卓也、滝沢元和、藤田裕、牧島一夫：「衝突銀河団 CIZA J1358.9-4750 の観測」銀河・銀河団分科会 c2
- [30] 小林翔悟：「Ultra Luminous X-ray source の Te/Tin による統一的理解」、コンパクトオブジェクト分科会 a23

- [31] 村上浩章ほか:「自由歳差運動する中性子星からのパルス放射」、コンパクトオブジェクト分科会 c21
- [32] 小野光、櫻井壮希、Zhang Zhongli、中澤知洋、牧島一夫:「『すざく』を用いたソフト状態とハード状態における LMXB の統一的な研究」、コンパクトオブジェクト分科会 a13
- [33] 三宅克馬、野田博文、山田真也、牧島一夫:「セイファート I 型活動銀河核 IC4329A の新たな硬 X 線成分とスペクトル画像」、コンパクトオブジェクト分科会 a24
- [34] 古田禄大ほか:「Central Compact Object 1E 161348-5055 を伴う超新星残骸 RCW 103 の『すざく』による観測的研究」、星間現象分科会 a3
- [35] 室田優紀ほか:「『すざく』による大質量星と中性子星との連星系 4U 1700 - 37 の解析」、コンパクトオブジェクト分科会 14a
- その他の集録
- (学位論文)
- [36] Toshio Nakano: “*Suzaku* Studies of Supernova Remnants Hosting Non-Rotation-Powered Neutron Stars”, 博士学位論文
- [37] Soki Sakurai: “X-ray Study of Mass Accretion Flow in Weakly-Magnetized Neutron Star Binaries”, 博士学位論文
- [38] Makoto Sasano: “X-ray Studies of Highly Magnetized Neutron Stars in Binary Systems with *Suzaku*”, 博士学位論文
- [39] 小野光:「プラスチックシンチレータを用いた太陽フレア MeV 中性子の検出の試み」、修士学位論文
- [40] 加藤佑一:「衝撃波を伴う衝突初期の銀河団 CIZA J1358.9 - 4750 の X 線観測」、修士学位論文
- [41] 三宅克馬:「ASTRO-H 衛星硬 X 線イメージャ実機の地上較正試験と応答関数の構築」、修士学位論文
- <学術講演>
- (国際会議講演)
- European Week of Astronomy and Space Science, Special Session 1 (2014 June 30, Geneva)
- [42] Nakano, T.: “Study of Magnetic Fields Decays in Magnetars through Age discrepancy between the Anomalous X-ray pulsar 1E 2259+586 and the Supernova Remnant CTB 109”, No.204
- [43] Sasano, M.: “Study of long period pulsars as a candidate of magnetar in X-ray binaries”, No. 280
- [44] Makishima, K.: “Evidence for Magnetic Deformation of the Magnetar 4U 0142+61”, No. 287
- The 40th COSPAR Scientific Assembly (2014 August 2-10, Moscow)
- [45] Makishima, K.: “State Transitions and Diagnostics of Accretion Flows in Neutron Star Systems”, Symp, E1.1-1 (invited)
- [46] Makishima, K.: “X-ray Diagnostics of Clusters of Galaxies with ASTRO-H”, Symp. E1.4-3 (invited)
- [47] Sasano, M., Enoto, T., Makishima, K., & Sakurai, S.: “Study of magnetic field effects for accretions with highly magnetized neutron stars in low mass X-ray binaries”, Symp. E1.1-18 (contributed)
- [48] Zhang, Z., Sasano, M., Ono, K., Makishima, K., & Sakurai, S.: “Probing the Geometry of the Comptonizing Coronae of Neutron Star LMXBs”, Symp. E1.1-2 (contributed)
- [49] Noda, H., Yamada, S., Makishima, K., Gu, L., & Minezaki, T.: “A Novel Picture of the AGN Central Engine Derived with X-ray and Optical Simultaneous Observations”, Symp. E1.5-15.
- [50] Ono, K. Sakurai, S. Zhongli, Z. Kazuhiro, N. Kazuo, Makishima: “Unified view of the accretion corona in the LMXBs across the soft and the hard state”, E1.1 STW-S-056
- [51] Koyama, S., Kubota, A., Yamada, S., Makishima, K., Tashiro, & M., Terada, Y.: “A study of X-ray variation in LMC X-1 with Suzaku”, Symp. E1.5-55
- その他の国際会議
- [52] Nakazawa, K. et al.: “Sub-MeV all sky survey with a compact Si/CdTe Compton telescope”, 10th INTEGRAL Workshop: A Synergistic View of the High Energy Sky (2014 9/15-19 Annapolis, USA)
- [53] Nakazawa, K., Takahashi, T., et al.: “The ASTRO-H mission”, 10th INTEGRAL Workshop: A Synergistic View of the High Energy Sky (2014 9/15-19 Annapolis, USA)
- [54] Kobayashi, S., Makishima, K., Nakazawa, K. : “A Unified View of the Spectral States of ULXs Using the Te/Tin Ratio” (Poster), The X-ray Universe 2014 (2014 6/16-19, Trinity College, Ireland, Dublin)
- [55] Zhang, Z. et al. : “Probing the Geometry of the Comptonizing Coronae of Neutron Star LMXBs” (Poster), The X-ray Universe 2014 (2014 6/16-19, Trinity College, Ireland, Dublin)
- [56] Miyake, K., Noda, H., Yamada, S., Makishima, K. : “The New Spectral Picture of Seyfert 1 AGNs” (Poster), The X-ray Universe 2014 (2014 6/16-19, Trinity College, Ireland, Dublin)
- [57] Noda, H., Makishima, K., Yamada, S., Miyake, K.: “Understanding X-ray Spectral and Timing Characteristics of Active Galactic Nuclei by a Novel Picture with Multiple Primary Emission” (Oral), The X-ray Universe 2014 (2014 6/16-19, Trinity College, Ireland, Dublin)
- [58] Kato, Y., Nakazawa, K., Gu, L., Akahori, T., Takizawa, M., Fujita, Y., & Makishima, K. : “Observation of nearby early merging clusters with clear shock, CIZA J1358.9-4750”, *ASTRO-H* summer school 2014 (2014 7/7-8, Paris)

- [59] Murakami, H., “Pulsation from a free-precessing neutron star”, *ASTRO-H summer school 2014* (2014 7/7-8, Paris)
- [60] Ono, K. Sakurai, S. Kazuhiro, N. Kazuo, M.: “Investigation into a possible spectral feature at 30 keV in Low-Mass X-ray Binaries in the hard state”, *ASTRO-H summer school 2014* (2014 7/7-8, Paris)
(国内会議/招待講演/一般講演/ポスター講演)
- 日本物理学会・秋季分科会 (2014 年 9 月 18 日～21 日; 佐賀大学; 口頭)
- [61] 牧島一夫、榎戸輝揚、村上浩章、平賀 S. 純子、中野俊男、中澤知洋、櫻井壯希、笹野理: 『『すざく』で探るマグネター 4U 0142+61 における中性子星の自由歳差運動と磁気変形 II』、18pSA-7
- [62] 榎本大悟、土屋晴文、榎戸輝揚、湯浅孝行、山田真也、中澤知洋、牧島一夫: 『GROWTH 実験で 2012 年に検出された北陸冬季雷雲からの対消滅線』19pSB-12
- [63] 安東正樹、中澤知洋、ほか: 『スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (55): DECIGO/DPF の概要』、21aSB-4
- 日本天文学会・秋季年会 (2014 年 9 月 11 日～13 日; 山形大学; 口頭)
- [64] Zhang, Z., Makishima, K., Sakurai, S., Ono, K., Sasano, M., & Yamada, S.: “Suzaku observation of eclipsing source EXO 0748-676 in the LHS”, J117a
- [65] 笹野理、榎戸輝揚、牧島一夫、堂谷忠靖、岩井将親: 『『すざく』による特異な低質量星と中性子星の連星 GRO J1744-28 の観測』、J119a
- [66] 牧島一夫、榎戸輝揚、中澤知洋、平賀純子、中野俊男、笹野理、櫻井壯希、村上浩章: 『マグネター 4U 0142+61 における自由歳差運動の徴候 II』、J133a
- [67] 安田哲也、田代信、寺田幸功、神頭知美、岩切渉、榎戸輝揚、中川友進、馬場彩、浦田裕次、柴田晋平、牧島一夫: 『『すざく』衛星搭載 WAM 検出器による AXP 1E1547.0 - 5408 の硬 X 線バーストの観測 (II)』、J137a
- [68] 榎戸輝揚、笹野理、山田真也、玉川徹、牧島一夫: 『自転周期のきわめて遅い X 線パルサー 4U 1954+319 の『すざく』観測』、J138a
- [69] 野田博文、牧島一夫、山田真也)、中澤知洋、三宅克馬: 『セファート NGC 3227 が示す巨大ブラックホールへの降着流の状態遷移』、S29a
- [70] 加藤佑一、中澤知洋、Liyi Gu、赤堀卓也、滝沢元和、藤田裕、牧島一夫: 『衝突初期の銀河団 CIZA J1358.9-4750 における衝撃波の観測的研究』、T18a
- [71] 中澤知洋、加藤佑一、Liyi Gu、川原田円、滝沢元知: 『『すざく』による衝突銀河団 Abell 548W の観測』、T16a
- [72] 村上浩章、古田禄大、中野俊男、笹野理、櫻井壯希、中澤知洋、牧島一夫: 『自由歳差運動する中性子星からのパルス放射の定式化』、J135a
- [73] 小野光、櫻井壯希、Zhang Zhongli、中澤知洋、牧島一夫: 『『すざく』衛星による弱地場中性子星の観測とコンプトン過程の統一解釈』、19aSB
- [74] 古田禄大、中野俊男、村上浩章、中澤知洋、牧島一夫: 『長周期パルサー 1E 161348-5055 を伴う超新星残骸 RCW 103 の『すざく』による観測的研究』、J134a
- [75] 室田 優紀、笹野 理、中澤 知洋、牧島 一夫: 『『すざく』による大質量星中性子星連星 4U 1700 - 37 の解析』、J118a
- [76] 栗山翼、佐藤浩介、松下恭子、赤松弘規、大橋隆哉、藤田裕、川原田円、田村隆幸、中澤知洋、岡部信広、太田直美、滝沢元和: 『銀河団外縁部のエントロピー異常の原因の検証』、T06a
- 日本天文学会・春季年会 (2015 年 3 月 18 日～21 日; 大阪大学; 口頭)
- [77] 牧島一夫、榎戸輝揚、村上浩章、古田禄大、笹野理、中野俊男、中澤知洋: 『マグネター歳差運動の二例目: 『すざく』による 1E1547.0 - 5408 の結果』、J125a
- [78] 野田博文、峰崎岳夫、牧島一夫、中澤知洋ほか: 『セファート NGC 3516 の X 線と可視光の間に見られた光度変動の遅延』、S30a
- [79] Zhang, Z., Makishima, K., Sakurai, S., Ono K., Sasano, M.: “Suzaku observations of eclipsing LMXB 2S 0921-630 in the hard state”, J117a
- [80] 加藤佑一、中澤知洋、Liyi Gu、赤堀卓也、滝沢元和、藤田裕、牧島一夫: 『衝突初期の銀河団 CIZA J1358.9-4750 の『すざく』による追加観測～外縁部の ICM の特徴～』、T04a
- [81] 小林翔悟、牧島一夫、中澤知洋: 『『すざく』による ULX 天体 NGC1313 X-1 の観測』、J137a
- [82] 村上浩章、牧島一夫、榎戸輝揚、古田禄大、中野俊男、笹野理、櫻井壯希、中澤知洋: 『マグネター 4U 0142+61 における自由歳差運動の兆候 IV』、J124a
- [83] Zhang, Z., Makishima, K., Sakurai, S., Ono, K. & Sasano, M.: “Suzaku observations of eclipsing LMXB 2S 0921-630 in the hard state”, J117a
- [84] 中野俊男、村上浩章、古田禄大、平賀純子、牧島一夫、金田英宏、内山秀樹、榎戸輝揚: 『マグネター 1E 2259+586 と付随する超新星残骸 CTB109 の親星質量』、K16a
- [85] 中澤知洋、国分紀秀、佐藤悟朗、中野俊男、牧島一夫ほか: 『ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の現状 FM の完成』、W101a
- [86] 古田禄大、中野俊男、村上浩章、中澤知洋、牧島一夫: 『長周期パルサー 1E 161348-5055 を伴う超新星残骸 RCW 103 の XMM-Newton による詳細解析』、Q03a
- [87] 室田 優紀、笹野 理、中澤 知洋、牧島 一夫: 『『すざく』が得た大質量星中性子星連星系における鉄輝線の光電離の兆候』、J119a
- [88] 内田悠介、渡辺伸、太田方之、中澤知洋 ほか: 『ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器 (SGD) の搭載品を用いた地上較正』、W107a

- [89] 森浩二、久保田あや、中澤知洋ほか：「軟 X 線から硬 X 線の広帯域を高感度で撮像分光する小型衛星計画 NGHXT」、W131a
- [90] 上田佳宏、信川正順、鶴剛、中澤知洋ほか：「NGHXT で狙うブラックホールのサイエンス」、W131a
- [91] 鶴剛、幸村孝由、佐藤悟朗、中澤知洋ほか：「NGHXT に搭載する広帯域 X 線撮像分光器」、W134a
- 日本物理学会・春季大会（2015 年 3 月 21～24 日；早稲田大学；口頭）
- [92] 榎本大悟、土屋晴文、湯浅孝行、中澤知洋、榎戸輝揚、古田禄大、山田真也、牧島一夫：「GROWTH 実験 1：2014 年末に新規設置した雷雲ガンマ線検出器と初期成果」22pDK-10
- [93] 古田禄大、榎本大悟、土屋晴文、湯浅孝行、中澤知洋、榎戸輝揚、山田真也、牧島一夫：「GROWTH 実験 2：2014-2015 冬に観測された雷由来ガンマ線の詳細解析」、22pDK-11
- [94] 三宅克馬、室田優紀、小野光、加藤佑一、小林翔悟、村上浩章、笹野理、櫻井壮希、中野俊男、中澤知洋、牧島一夫、萩野浩一、小高裕和、川原田円、佐藤理江、渡辺伸、国分紀秀、高橋忠幸、湯浅孝行、斎藤新也、勝田隼一郎、大野雅功、高橋弘、深沢泰司、山岡和貴、田島宏康、谷津陽一、佐藤悟朗、内山秀樹、他 HXI/SGD チーム：「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線イメージャの実機の地上での機能検証試験」、23pDK-6
- [95] 小野光、中澤知洋、牧島一夫：「太陽フレア MeV 中性子の検出のための基礎開発実験」、23pDM-14
- [96] 安東正樹、中澤知洋 ほか：「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (59)：DECIGO/DPF の概要」、23pDJ-1
- [97] 田島宏康、深沢泰司、渡辺伸、中澤知洋 ほか：「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器の衛星搭載器試験結果」、23pDK-3
- [98] 大野雅功、河野貴文、古井俊也、枝廣育実、村上浩章、小林翔悟、三宅 克馬、小野光、室田優紀、ほか：「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線軟ガンマ線検出器における BGO アクティブシールドの地上較正試験」、23pDK-5
- [99] 鶴剛、田中孝明、信川正順、内田裕之、武田彩希、上田佳宏、久保田あや、中澤知洋、馬場彩、幸村孝由、内山泰伸、北山哲、高橋忠幸、渡辺伸、松本浩典、森英之、古澤彰浩、常深博、中嶋大、粟木久光、寺島雄一、森浩二、岡島崇、山口弘悦：「軟 X 線から硬 X 線の広帯域を高感度で撮像分光する小型衛星計画 NGHXT」、23pDK-12
- [100] 信川正順、上田佳宏、鶴剛、田中孝明、内田裕之、武田彩希、久保田あや、中澤知洋、馬場彩、幸村孝由、内山泰伸、北山哲、高橋忠幸、渡辺伸、松本浩典、森英之、古澤彰浩、常深博、中嶋大、粟木久光、寺島雄一、森浩二、岡島崇、山口弘悦ほか：「NGHXT で狙うブラックホールのサイエンス」、23pDK-13
- その他の国内研究集会
- [101] 牧島一夫：「宇宙論的な銀河の落下現象：その発見、プラズマ物理学的な意味、および ASTRO-H 衛星を用いた検証」、地球惑星科学連合大会（2014 年 5 月 1 日、横浜パシフィコ）
- [102] Makishima, K: “Evidence for Free Precession of a Strongly Magnetized Neutron Star in the Magnetar 4U 0142+61: X-ray Observations with *Suzaku*”, in *Mini Workshop on High-Density Nuclear Matter and Compact Stars* (2014 年 6 月 7 日、千葉工業大学スカイツリーキャンパス)
- [103] 牧島一夫：「マグネターの自由歳差運動と磁気変形」、科研費新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」第 3 回研究会（2014 年 9 月 23 日～25 日、伊豆熱川ハイッ）
- [104] 中澤知洋：「X 線検出器を衛星に載せるということ～ASTRO-H 衛星の硬 X 線イメージャの例から～」（招待講演）、新学術研究領域研究「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 3 回研究会（2014 年 11 月 26-27 日、金沢工科大学）
- [105] 国分紀秀、川原田円、佐藤悟朗、中澤知洋ほか：「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の開発」、第 15 回宇宙科学シンポジウム（2015 年 1 月 6 日～7 日、JAXA 宇宙科学研究所・相模原キャンパス）
- [106] 中澤知洋、高橋忠幸、田島宏康ほか：「MeV/sub-MeV 全天サーベイ CAST の現状」、第 15 回宇宙科学シンポジウム（2015 年 1 月 6 日～7 日、JAXA 宇宙科学研究所・相模原キャンパス）
- [107] 牧島一夫、榎戸輝揚、村上浩章、古田禄大、中野俊男、笹野理、中澤知洋：「『すざく』によるマグネターの自由歳差運動の検出」、第 15 回宇宙科学シンポジウム（2015 年 1 月 6 日～7 日、JAXA 宇宙科学研究所・相模原キャンパス）
- [108] 榎本大悟、土屋晴文、榎戸輝揚、湯浅孝行、山田真也、中澤知洋、牧島一夫：「GROWTH 実験の最前線 2012 年に検出された対消滅線について」（招待講演）、宇宙線研究所共同利用研究会「次の 10 年の宇宙線研究」（2014 年 11 月 6-7 日、東京大学宇宙線研究所）
- (セミナー、談話会、集中講義)
- [109] 牧島一夫：「ブラックホールの宇宙物理学」、京都大学・物理第二教室集中講義（2014 年 11 月 17 日～19 日）
- [110] 牧島一夫：「宇宙で見る物理、物理で見る宇宙」、最終講義（2015 年 3 月 10 日、小柴ホール）
- (一般向け講演、新聞記者発表)
- [111] 牧島一夫：「ロケットとブラックホールの話」、第 13 回東大ホームカミングデー一般向け講演会「理学のワンダーランド」の一環として（2014 年 10 月 18 日、小柴ホール）。
- [112] 牧島一夫、平賀純子、中澤知洋ほか：「宇宙で最強な磁石天体が、磁力でわずかに変形している兆候を発見」、プレスリリース（掲載依頼）、2014 年 6 月 2 日。

- [113] 野田博文、牧島一夫ほか：「巨大ブラックホールが支配する『AGN エンジン』の解明へ。吸い込むガスの重力エネルギーが2種類の X 線放射に変換される」、プレスリリース（掲載依頼；理研主導、東大副主導）、2014 年 9 月 18 日。

6.2 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、日本原子力研究機構で建設中の 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、米国 MIT の Alcator C-Mod 装置を対象とした共同研究を進めている。

6.2.1 TST-2 実験の概要

TST-2 は球状トカマク (ST) 型の装置であり、プラズマの大半径、小半径はおよそ 0.38、0.25 m、電磁誘導 (OH)、高周波波動を用いた最大プラズマ電流はそれぞれ 120、18 kA である。球状トカマクは高い規格化圧力を安定に維持できる方式として近年注目を浴び、当研究室では、早い時期からその基礎研究を行ってきた。現在もっとも重要な研究課題は、電流駆動とそれによるプラズマの立ち上げであり、TST-2 では、様々な種類の高周波を用いた電流駆動実験を行っている。

2014 年度は、主として、低域混成波励起に適した静電結合型コムライン (Capacitively Coupled Comblines, CCC) アンテナを用いた実験を行い、これまで、最大 18 kA のプラズマ電流の駆動・維持に成功した。さらに、高周波駆動プラズマの種々のパラメータやその性質を調べ、電流駆動機構の解明を進めた。その結果、プラズマ圧力の大半は高速電子が担うこと、イオン温度は比較的低いが、軌道損失が無視できず、プラズマの電位に影響を及ぼし得ることがわかった。高速電子が重要であることから、プラズマの平衡状態は従来型の平衡の式では表現できない。そこで、高速電子を考慮した三流体プラズマ平衡を定式化し、測定されたパラメータと矛盾しない平衡配位を求めることに成功した。駆動電流をさらに増大させるには、波動の伝搬特性とエネルギーの流れを理解する必要がある。アンテナから銅不純物が叩きだされることを見出したが、これのエネルギー損失への寄与は小さいことがわかった。また、効率的な電流駆動の高密度限界が、単純に波の伝搬特性から予測されるよりもシャープであることが観測された。

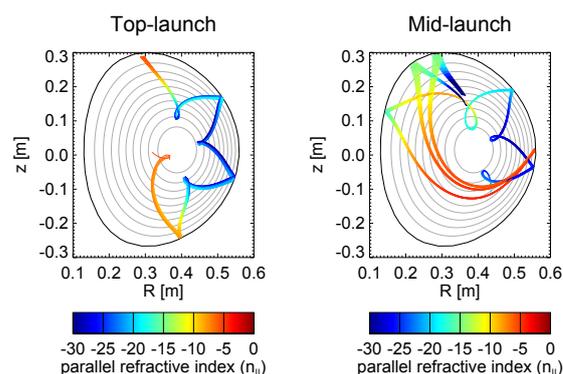


図 6.2.1: GENRAY による上側入射 (左) と外側入射 (右) の比較。

6.2.2 高周波プラズマ立ち上げ実験

CCC アンテナ実験

米国 General Atomics 社と共同で開発した静電結合型コムライン (CCC) アンテナを用いて、低域混成波 (LHW) による非誘導プラズマ電流立ち上げ実験を行った。CCC アンテナは、LHW の直接励起が可能なアンテナである。本実験では、LHW (~ 100 kW) と電子サイクロトロン波 (ECW, ~ 5 kW) を用いて、プラズマ電流を 18 kA まで非誘導的に立ち上げることに成功した。プラズマ電流の最大値は、トロイダル磁場に比例して増加することが明らかになった。さらなるプラズマ電流立ち上げのためには、トロイダル磁場の増強を行う必要があることが示唆された。また、LHW は高密度で伝搬しないため、プラズマ立ち上げの過程で密度を低く保つことが重要となるが、ECW を同時入射することで密度上昇が抑制されることがわかった。詳細な物理的機構は未だ解明されていないが、ECW によって磁力線垂直方向に加速された電子の損失が原因と考えられている。

CCC アンテナから励起される LHW のスペクトルを改善した。リミターと呼ばれる金属板を用いてプラズマとアンテナの距離を広げ、結合を弱めることでスペクトル幅を狭めることに成功した。これにより、励起されるスペクトルの幅が $-9 \leq n_{\parallel 0} \leq -2$ に改善された ($n_{\parallel 0}$ は入射時の磁力線方向の屈折率)。

TST-2 における LHW の最適入射位置について検討するために、光線追跡コード GENRAY を用いて波の伝播を計算した (図 6.2.1)。上側入射では、プラズマ中心付近で n_{\parallel} の顕著なアップシフトが起きていることがわかる。従来の外側入射でも、プラズマ上側で反射した波がアップシフトしながらプラズマ中心に伝播しているが、反射時には非線形現象等による波の損失が起きうる。また、上側入射の方が波の広がりが少ない。上側入射の有効性について実験的に調べるため、上側入射用アンテナを General Atomics 社と共同で開発中である。

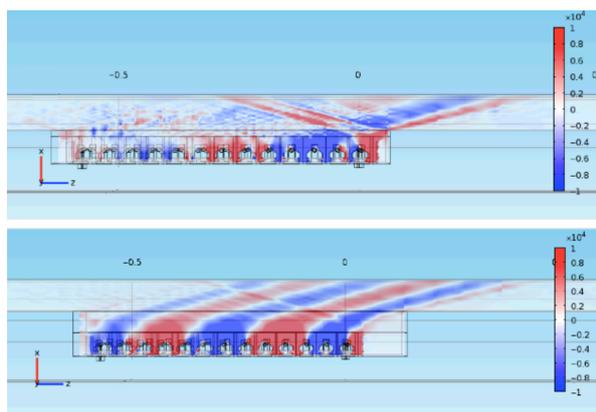


図 6.2.2: 現在のリミター位置 (上図、 $R = 585$ mm) 及び最適化されたリミター位置 (下図、 $R = 550$ mm) での LHW の励起の比較。

COMSOL による CCC アンテナモデリング

CCC アンテナで問題となっている、アンテナとプラズマとの強い結合による波数スペクトルの劣化を、有限要素法コード COMSOL を用いて検証した。精密な計算を行うため、ラングミュアプローブを用いてリミター内の密度分布を測定した。その結果、リミターにより LHW が反射されている可能性があることが示された。一方、鋭い波数スペクトルを得るためには、プラズマをアンテナから遠ざけ、透過率を 10% 程度に下げることが必要である。リミターを現在よりも 30 mm 突き出し、さらに入射アンテナストラップとリミターの間に 60 mm 程の隙間をあけることで、鋭いスペクトルが得られ、また、LHW の反射も発生しないことがわかった (図 6.2.2)。

硬 X 線計測

LHW を用いて生成したプラズマには高速電子が存在しており、硬 X 線測定を行うことによって、その実効的な温度や空間分布を知ることができる。本研究では 5 チャンネルの NaI シンチレーターを用いて、X 線放射の径方向分布を測定した。様々なトロイダル磁場で計測を行うことで、高磁場において硬 X 線放射が増加し、プラズマ中心部からの放射量が顕著に上昇することがわかった。これは、プラズマ中心部まで LHW が到達できるようになったためだと考えられる。

上記の計測はシンチレーター光の読み出しに光電子増倍管を用いていたが、TF コイルの側では磁場の影響を受けてしまうという問題がある。そこで、現在シンチレーター光の読み出しに磁場の影響を受けない APD (Avalanche Photo Diode) を用いた装置の開発を行っている。

軟 X 線計測

現在 TST-2 では、2 つの AXUV アレイにより 40 視線での X 線計測を行っている。AXUV とは IRD 社の開発したフォトダイオードであり、可視光から軟 X 線領域に渡る広いエネルギー帯 (1 eV–10 keV) の光子に対して感度を持つ。

LHW 立ち上げプラズマにおける高速電子の輸送を評価するため、入射電力変調に対する X 線放射の変調を解析した。その結果、X 線変調の位相遅れがプラズマ中心で大きくなることが確認され、高速電子がプラズマ周辺部で生成され、中心部に輸送されていることが示唆された。

アンテナからの銅不純物の影響

LHW の励起に用いている CCC アンテナは主に銅からできており、その銅が不純物としてプラズマ電流立ち上げに影響を与えている可能性がある。そこで LHW 立ち上げプラズマにおいて銅のラインスペクトルを可視分光器で測定することにより、銅の検出及びその発生機構の解明を試みている。分光測定の結果、プラズマ中には中性銅 (CuI) が存在することが判明した。また、アンテナ近傍の視線の銅のラインスペクトル強度が他の視線に比べて大きいことが判明し、プラズマ中の銅はアンテナから放出されていることが示された。さらに、プラズマの最外殻磁気面がアンテナに近づくにつれて、銅のラインスペクトルの強度が大きくなることがわかり、銅は RF シーススパッタリングによりアンテナ表面から放出されていることが示唆された。

干渉計による密度分布計測

上下に振ったプラズマをマイクロ波干渉計の水平方向の視線で測定することで、線積分電子密度の鉛直方向の分布を得た。これにより、電子密度が $|Z| \leq 0.3$ m に局在しており、 10^{17} – 10^{18} m^{-3} 程度の中心密度であることがわかった。この方法で得られた電子密度分布から計算した線積分電子密度に比べて、鉛直方向の視線による線積分電子密度は大きく、最外殻磁気面外に有限な電子密度が存在することが示唆された。また、最外殻磁気面内の電子密度分布を再構成するためには水平方向の視線が有用であることもわかった。

水平方向の視線を増設する際、従来のホーンアンテナはその長さが問題となるが、ホグホーンアンテナではその点が解消される。このアンテナを 4 つ並べて取り付けることで $0 \leq Z \leq 0.3$ m に 3 つの水平方向の視線を増設した。

6.2.3 OH プラズマ実験

静電プローブによる乱流測定

プラズマ中の乱流はその閉じ込め性能を悪化させる主たる原因であり、乱流輸送の物理解明は核融合プラズマ研究の最重要課題の一つである。トカマクプラズマにおいて、プラズマフローの生成が乱流輸送の抑制に大きく寄与しているが、これにはレイノルズストレスとマクスウェルストレスが寄与している。

TST-2 に設置したフロー、電場、磁場ストレスが同時計測可能なプローブを用いて、トカマクの弱磁場側の広い領域において測定を行った。これまでストレスの解析のための電場揺動の評価は電極をプラズマに挿入した際に得られる浮遊電位から行っていた。しかし、浮遊電位は電子温度の影響を受けるため、電子温度の揺動が強い範囲ではこの評価方法を使用することが難しい。そのため従来のラングミュアプローブの電圧の高速掃引の解析手法に手を加え、電流電圧特性曲線から得られるプラズマポテンシャルの時間発展を最大 200 kHz で複数点で計測することで、電場揺動の評価を行なった。その際、電場及び流速の平均値の関係が平衡条件を満たすことを確認した。

IRE 時の電子温度測定

球状トカマクにおいて IRE は顕著な不安定性であり、機構の解明が急がれる。理論的には磁気島の生成に伴って電子フローが変化し、非等方的に電子が加速される可能性が示唆されているが、実際に計測された例はない。本研究では、TST-2 においてダブルパストムソン散乱計測を用いて、IRE 前後における電子温度非等方性の時間発展を計測した。

結果としてプラズマ中心では電子温度は減少する一方で、プラズマ端では一時的に上昇し、IRE 発生直後の時刻では互いに同じ電子温度となることが確認できた。そして IRE は発生後、プラズマ中心において電子温度非等方性を生じることが観測された (図 6.2.3)。

6.2.4 計測器開発

ログスキープローブによる局所電流計測

トカマクプラズマの内部電流分布は、例えば高周波による電流駆動実験において重要な物理量であるが、その計測は一般に困難である。本研究では局所電流計測用の小型ログスキーコイルを開発し、誘導立ち上げプラズマにおいて局所電流を計測することに成功した [3]。さらに、圧力・磁場・電流を同時計測するために、静電プローブ 2 つ、磁場コイル 5 つ及び開発したログスキーコイル 2 つを搭載したログスキープローブを設計・製作した。本装置は、ログスキーコイルの電流貫通穴が大半径方向を軸として

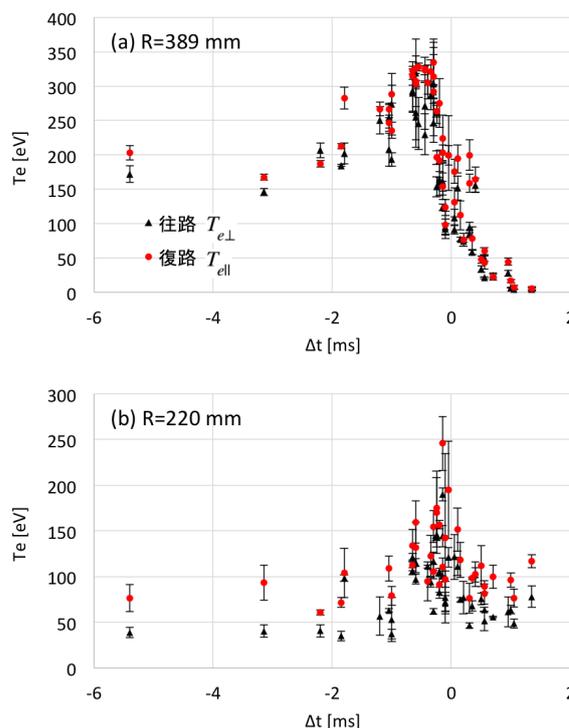


図 6.2.3: プラズマ中心 (a) とプラズマ端 (b) での電子温度の時間発展。 $\Delta t = t -$ (電流ピークの時間)。

回転可能であり、トカマクの大半径方向に移動可能なため、電流の方向を含めた分布計測が可能となっている。

本装置を用いた初期実験では、OH プラズマの周辺部では電流の方向と磁場の方向は $\pm 1^\circ$ 以内で一致することがわかった。また、径方向分布では大半径 $R < 550$ mm において、計測したデータと平衡計算コード EFIT にて計算された分布にずれが生じることがわかった [9]。圧力の径方向勾配と電流の方向、磁場の方向のそれぞれの関係性については今後の研究課題である。ログスキーコイル信号へのプラズマシースの影響についても実験及び計算を行うことで調査中である。

共同研究として、東京大学の球状トカマク UTST にログスキーコイルを設置し、磁気リコネクション時に生成される電流シート内部の電流分布計測に取り組んでいる。また、米国ウィスコンシン大学の球状トラス Pegasus への設置も予定している。2014 年度は Pegasus を訪問し、試作したログスキーコイルと積分回路のノイズ試験を真空容器外にて実施し、十分な信号雑音比で計測できることがわかった。

マルチパストムソン散乱計測

電子温度・密度分布の計測には、トムソン散乱 (TS) 計測法が広く用いられている。TST-2 のような低密

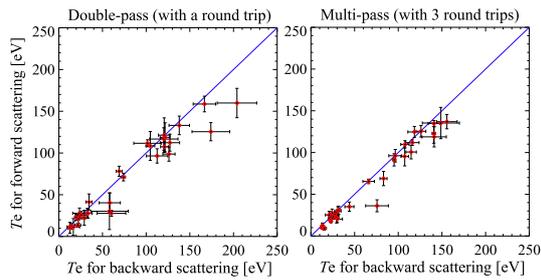


図 6.2.4: 往路と復路に対する電子温度計測結果 (左: 信号積算なし、右: 3 往復分の信号積算時)。

度なプラズマの TS 計測における低信号量の問題を解決するため、同軸マルチパス TS 計測法を開発した。ポッケルスセルを用いてレーザーの偏光を高速で制御することによって、レーザーパルスと同軸光路上に閉じ込める光学キャビティを整備した。高密度のプラズマに対してマルチパス TS 計測を行い、10 往復分前後の TS 信号を確認した。結果として、3 往復分の信号の積算によって 30% 程度の SN 比の改善が見られた (図 6.2.4)。信号積算で改善される SN 比の理論的な予測値と実測値は同様の傾向を示しており、より高効率な光学キャビティの開発が必須であることが実験的に示された。そこで、余計な光学素子をできる限り省き、高効率な素子だけで構成される光学キャビティを設計した。

6.2.5 共同研究

QUEST におけるトムソン散乱

QUEST 球状トカマク装置では、電子バースタイン波電流駆動による定常高性能プラズマの生成を目標としており、これまで 60 kA 程度の非誘導プラズマ電流が維持されている。電流駆動機構を解明し、さらなる高性能化をはかるためには、プラズマの基礎データである電子温度、電子密度を測定する必要がある。本共同研究では、そのためのトムソン散乱計測システムを開発している。2012-2014 年度には、種々のプラズマの電子温度密度分布計測をするとともに、測定可能な空間点を 12 点に倍増し、より詳細な分布計測を可能にした。また、高速応答を計測するためのレーザー入射タイミング制御回路の製作による時間分解能の改善を行った。来年度からも引き続き、非等方温度測定のためのダブルパストムソン散乱配位、マルチパストムソン散乱配位の研究開発を行っていく。

LHD における ICRF 研究

高周波は、プラズマの加熱や電流駆動に用いられるが、その理解と制御のために、プラズマ中での高周波波動を計測する手段の確立が求められている。マ

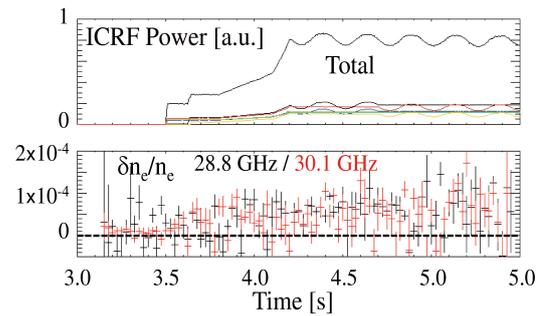


図 6.2.5: 上図: 入射 ICRF 電力の時間発展。下図: RF による密度揺動。黒: 28.8 GHz、赤: 30.1 GHz。

イクロ波反射計は、プラズマ中で反射したマイクロ波の位相を測定する計測であり、微小な電子密度変動を測定できることから、高周波波動計測手法として注目されている。本研究室では、核融合科学研究所の LHD 装置において、ICRF (周波数 38.47 MHz) 波動の計測を行っており、2014 年度は、測定空間点を 1 点から 2 点に増やして実験を行い初期的な結果を得た。図 6.2.5 は、反射計で求めた高周波で誘起された相対密度揺動の時間変化を示したものであり、二つの周波数 (28.8、30.1 GHz) のマイクロ波を用いて、正常波の反射から測定したものである。これらはプラズマ周辺部の近接した 2 点での高周波電場を反映している。

また、米国オークリッジ国立研究所において開発された全波計算コード AORSA を用いて、3 次元 ICRF 波動シミュレーションを行った [39]。今後、実験の実験における様々なパラメータでの加熱分布の理論的評価や、反射計計測の定量的解析を行っていく予定である。

MIT における LHW 計測用プローブ開発

プラズマ中を伝播する低域混成波 (LHW) の波数と偏波を Alcator C-Mod で計測するために、4.6 GHz に対応する高周波用磁気プローブの設計及び較正を行った。共鳴周波数を 4.6 GHz から十分離すため、COMSOL を用いたプローブモデリングを行い、最適な幾何形状を決定した。耐熱性を持たせるため、試作で用いていたのはんだはスポット溶接に変更した。製作したプローブを校正するため、導波管の短辺側に穴を開け、プローブ先端を内壁まで差し込み、導波管内の波を計測した。その結果、4.6 GHz 周辺における平坦な感度と、線形的な位相信号が確認された。計測された導波管内の波数は、理論値と矛盾しない値であり、開発されたプローブで波数計測が可能であることが示された。来年度、Alcator C-Mod での波数計測を予定している。

TST-2 と LATE におけるイオン温度、フロー計測

球状トカマクの RF プラズマでは、高速電子の軌道損失が大きいと、プラズマポテンシャルが大きな正の値をとり、大きなフローが生成される可能性がある。これを実験的に確かめるために、低発光な RF プラズマに対する可視分光計測システムを開発し、TST-2 装置(東京大学)と LATE 装置(京都大学)において、CIII の発光 (C^{2+}) に対して温度計測及び流速計測を行った。その結果、TST-2 で 1 km/s、LATE で 5 km/s 以下という非常に小さなトロイダルフローが観測された。高速電子の損失のみを考えると数 10 km/s のフローが予想されるが、イオン温度から算出した粒子軌道では、イオンも軌道損失が起こることが示唆された。このことから、高速電子の損失のみから予想されるよりもプラズマポテンシャルが小さくなり、フローも小さな値になったと考えられる。

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Shinya, A. Ejiri, Y. Takase, T. Wakatsuki, T. Oosako, N. Tsujii, H. Kakuda, H. Furui, J. Hiratsuka, T. Inada, K. Imamura, K. Nakamura, A. Nakanishi, M. Sonehara, H. Togashi, S. Tsuda, T. Yamaguchi, H. Kasahara, K. Saito, T. Seki, F. Shimpo, Y. Nagashima, O. Watanabe and T. Yamada: Identification of Waves by RF Magnetic Probes during Lower Hybrid Wave Injection Experiments on the TST-2 Spherical Tokamak, *Plasma Fusion Res.* **9** 3402040 (2014).
- [2] H. Togashi, A. Ejiri, J. Hiratsuka, K. Nakamura, Y. Takase, T. Yamaguchi, H. Furui, K. Imamura, T. Inada, H. Kakuda, A. Nakanishi, T. Oosako, T. Shinya, M. Sonehara, S. Tsuda, N. Tsujii, T. Wakatsuki, M. Hasegawa, Y. Nagashima, K. Narihara, I. Yamada and H. Tojo: Note: Multi-pass Thomson scattering measurement on the TST-2 spherical tokamak, *Rev. Sci. Instrum.* **85** 056103 (2014)
- [3] H. Furui, Y. Nagashima, Y. Takase, A. Ejiri, H. Kakuda, M. Sonehara, T. Oosako, N. Tsujii, J. Hiratsuka, K. Imamura, T. Inada, K. Nakamura, A. Nakanishi, T. Shinya, H. Togashi, S. Tsuda, T. Wakatsuki and T. Yamaguchi: Development of a Local Current Diagnostic using a Small Rogowski Coil for a Spherical Tokamak Plasma in TST-2, *Plasma Fusion Res.* **9** 3402078 (2014).
- [4] T. Wakatsuki, A. Ejiri, T. Shinya, Y. Takase, H. Furui, J. Hiratsuka, K. Imamura, T. Inada, H. Kakuda, H. Kasahara, Y. Nagashima, K. Nakamura, A. Nakanishi, T. Oosako, K. Saito, T. Seki, M. Sonehara, H. Togashi, S. Tsuda, N. Tsujii and T. Yamaguchi: Plasma current start-up experiments using a dielectric-loaded waveguide array antenna in the TST-2 spherical tokamak, *Nucl. Fusion* **54** 093014 (2014).
- [5] T. Shinya, Y. Takase, C. P. Moeller, T. Wakatsuki, T. Inada, T. Oosako, H. Kakuda, A. Ejiri, N. Tsujii, H. Furui, J. Hiratsuka, K. Imamura, K. Nakamura, A. Nakanishi, M. Sonehara, H. Togashi, S. Tsuda and T. Yamaguchi: Plasma Density Suppression by Electron Cyclotron Wave in Lower Hybrid Wave Driven TST-2 Spherical Tokamak Plasma, *Plasma Fusion Res.* **9** 1202133 (2014).
- [6] M. Greenwald, A. Bader, S. Baek, M. Bakhtiari, H. Barnard, W. Beck, W. Bergerson, I. Bepamyatnov, P. Bonoli, D. Brower, D. Brunner, W. Burke, J. Candy, M. Churchill, I. Cziegler, A. Diallo, A. Dominguez, B. Duval, E. Edlund, P. Ennever, D. Ernst, I. Faust, C. Fiore, T. Fredian, O. Garcia, C. Gao, J. Goetz, T. Golfopoulos, R. Granetz, O. Grulke, Z. Hartwig, S. Horne, N. Howard, A. Hubbard, J. Hughes, I. Hutchinson, J. Irby, V. Izzo, C. Kessel, B. LaBombard, C. Lau, C. Li, Y. Lin, B. Lipschultz, A. Loarte, E. Marmor, A. Mazurenko, G. McCracken, R. McDermott, O. Meneghini, D. Mikkelsen, D. Mossessian, R. Mumgaard, J. Myra, E. Nelson-Melby, R. Ochoukov, G. Olynyk, R. Parker, S. Pitcher, Y. Podpaly, M. Porkolab, M. Reinke, J. Rice, W. Rowan, A. Schmidt, S. Scott, S. Shiraiwa, J. Sierchio, N. Smick, J. A. Snipes, P. Snyder, B. Sorbom, J. Stillerman, C. Sung, Y. Takase, V. Tang, J. Terry, D. Terry, C. Theiler, A. Tronchin-James, N. Tsujii, R. Vieira, J. Walk, G. Wallace, A. White, D. Whyte, J. Wilson, S. Wolfe, G. Wright, J. Wright, S. Wukitch, S. Zweben: 20 years of research on the Alcator C-Mod tokamak, *Phys. Plasmas* **21** 110501 (2014).
- [7] Y. M. Peng, A. Ishida, Y. Takase, A. Ejiri, N. Tsujii, T. Maekawa, M. Uchida, H. Zushi, K. Hanada and M. Hasegawa: Two-Fluid Equilibrium Considerations of $Te/Ti \gg 1$, Collisionless ST Plasmas Sustained by RF Electron Heating, *Plasma Fusion Res.* **9** 3403146 (2014).
- [8] J. Hiratsuka, A. Ejiri, M. Hasegawa, Y. Nagashima, K. Nakamura, Y. Takase, H. Togashi, H. Tojo, T. Yamaguchi and TST-2 group: Simultaneous Measurement of Plasma Pressure Anisotropy with Double-Pass Thomson Scattering Diagnostic System on TST-2, *Plasma Fusion Res.* **10** 1402007 (2015).

(会議抄録)

- [9] H. Furui, Y. Nagashima, Y. Takase, A. Ejiri, H. Kakuda, M. Sonehara, T. Oosako, N. Tsujii, J. Hiratsuka, K. Imamura, T. Inada, K. Nakamura, A. Nakanishi, T. Shinya, H. Togashi, S. Tsuda, T. Wakatsuki and T. Yamaguchi: Local current density measurement using a Rogowski probe in Tokyo Spherical Tokamak, *Rev. Sci. Instrum.* **85** 11D813 (2014).
- [10] H. Togashi, A. Ejiri, J. Hiratsuka, K. Nakamura, Y. Takase, T. Yamaguchi, H. Furui, K. Imamura,

T. Inada, H. Kakuda, A. Nakanishi, T. Oosako, T. Shinya, M. Sonehara, S. Tsuda, N. Tsujii, T. Wakatsuki, M. Hasegawa, Y. Nagashima, K. Narihara, I. Yamada and H. Tojo: Demonstration of improvement in the signal-to-noise ratio of Thomson scattering signal obtained by using a multi-pass optical cavity on the Tokyo Spherical Tokamak, *Rev. Sci. Instrum.* **85** 11D846 (2014).

(国内雑誌)

- [11] 江尻晶: 男女共同参画推進委員会だより: 第三回科学技術系専門職の男女共同参画実態調査から見える日本物理学会会員のワークライフバランス, *日本物理学会誌* Vol. 69, 795–797 (2014).
- [12] 江尻晶: 講座: 今日からはじめる磁場閉じこめ実験: 4. 楽しい実験は安全第一の精神から, *J. Plasma Fusion Res.* **90** 732–739 (2014).

(学位論文)

- [13] Electron temperature and density measurements by Thomson scattering on the QUEST spherical tokamak (博士論文).
- [14] 稲田拓真: TST-2 球状トカマクプラズマにおける有限要素法コートを用いた静電結合型コムラインアンテナの性能評価とアンテナ前面密度の測定 (修士論文).
- [15] 今村和宏: 硬 X 線測定システムを用いた TST-2 球状トカマクにおける低域混成波電流駆動の研究 (修士論文).
- [16] 津田慎太郎: Measurement of ion temperature and flow in RF start-up plasmas on Spherical Tokamaks (修士論文).
- [17] 中村京春: TST-2 球状トカマクにおける内部再結合現象前後の電子温度非等方性に関する研究と QUEST でのダブルパストムソン散乱計測の検討 (修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [18] T. Wakatsuki, et al.: Accessing advanced scenario with small magnetic flux consumption, JT-60SA 3rd Research Coordination Meeting, JAEA, Naka, May 19–23, 2014.
- [19] Y. Takase: TST-2 and LHW experiments, A3 Foresight Summer School and Workshop on Spherical Torus (ST) 2014, Kensington Resort, Jeju, Korea, Jun. 30–Jul. 4, 2014.
- [20] A. Ejiri: Plasma Diagnostics I & II, A3 Foresight Summer School and Workshop on Spherical Torus (ST) 2014, Kensington Resort, Jeju, Korea, Jun. 30–Jul. 4, 2014.
- [21] H. Honma: Thomson Scattering in QUEST, A3 Foresight Summer School and Workshop on Spherical Torus (ST) 2014, Kensington Resort, Jeju, Korea, Jun. 30–Jul. 4, 2014.

- [22] K. Nakamura: Design of Hard X-ray measurement system for TST-2, A3 Foresight Summer School and Workshop on Spherical Torus (ST) 2014, Kensington Resort, Jeju, Korea, Jun. 30–Jul. 4, 2014.
- [23] T. Takeuchi: Spectroscopic measurement of impurity radiation in tokamak plasmas, A3 Foresight Summer School and Workshop on Spherical Torus (ST) 2014, Kensington Resort, Jeju, Korea, Jun. 30–Jul. 4, 2014.
- [24] S. Yajima: AXUV array measurement in TST-2, A3 Foresight Summer School and Workshop on Spherical Torus (ST) 2014, Kensington Resort, Jeju, Korea, Jun. 30–Jul. 4, 2014.
- [25] Y. Yoshida: Electron density measurements of non-inductive start-up plasmas using an interferometer, A3 Foresight Summer School and Workshop on Spherical Torus (ST) 2014, Kensington Resort, Jeju, Korea, Jun. 30–Jul. 4, 2014.
- [26] H. Furui, Y. Nagashima, Y. Takase, A. Ejiri, H. Kakuda, M. Sonehara, T. Oosako, N. Tsujii, J. Hiratsuka, H. Homma, K. Imamura, T. Inada, K. Nakamura, K. Nakamura, T. Shinya, T. Takeuchi, H. Togashi, S. Tsuda, T. Wakatsuki, S. Yajima, T. Yamaguchi and T. Yoshida: Local current density profile measurement using a Rogowski probe in the TST-2 spherical tokamak, 7th Japan-Korea Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State Fusion Plasmas, Rubino Horikawa Kyoto, Kyoto, Japan, Aug. 17–20, 2014.
- [27] H. Togashi, A. Ejiri, H. Homma, K. Nakamura, T. Yamaguchi, H. Furui, K. Imamura, T. Inada, K. Nakamura, T. Shinya, T. Takeuchi, M. Sonehara, S. Tsuda, N. Tsujii, S. Yajima, Y. Yoshida, and Y. Takase: Improvement of signal-to-noise ratio by applying multi-pass Thomson scattering diagnostics in TST-2, 7th Japan-Korea Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State Fusion Plasmas, Rubino Horikawa Kyoto, Kyoto, Japan, Aug. 17–20, 2014.
- [28] N. Tsujii, A. Ejiri, Y. Takase, H. Kasahara, K. Tanaka, E. F. Jaeger, and L. A. Berry: Three-dimensional modeling of ICRF waves with AORSA on LHD, US-Japan Workshop on RF Heating Physics 2014 Rakuyu Kaikan, Kyoto Univ. Yoshida Campus, Kyoto Japan, Sep. 17–19, 2014.
- [29] Y. Takase: Plasma current start-up by the lower hybrid wave on TST-2, US-Japan Workshop on RF Heating Physics 2014 Rakuyu Kaikan, Kyoto Univ. Yoshida Campus, Kyoto Japan, Sep. 17–19, 2014.
- [30] S. G. Baek, P. T. Bonoli, I. C. Faust, R. R. Parker, S. Shiraiwa, G. M. Wallace, B. L. Labombard, M. Porkolab, Y. Takase, T. Shinya: Lower Hybrid Current Drive Experiments Toward Strong Single-Pass Landau Absorption Regime on Alcator C-Mod, US-Japan Workshop on RF Heating Physics 2014 Rakuyu Kaikan, Kyoto Univ. Yoshida Campus, Kyoto Japan, Sep. 17–19, 2014.

- [31] T. Shinya, Y. Takase, C. P. Moeller, T. Inada, T. Wakatsuki, H. Kakuda, S. Yajima, A. Ejiri, N. Tsujii, H. Furui, H. Honma, K. Imamura, K. Nakamura, K. Nakamura, M. Sonehara, T. Takeuchi, H. Togashi, T. Tsuda, Y. Yoshida, T. Yamaguchi: Experimental study of antenna-plasma coupling using the capacitively-coupled combline antenna on the TST-2 spherical tokamak, 2014 US-EU-JPN Workshop on RF Heating Technology, Sedona, AZ, USA, Sep. 23–26, 2014.
- [32] Y. Takase, T. Wakatsuki, T. Shinya, A. Ejiri, H. Furui, J. Hiratsuka, K. Imamura, T. Inada, H. Kakuda, H. Kasahara, R. Kumazawa, C. P. Moeller, T. Mutoh, Y. Nagashima, K. Nakamura, A. Nakanishi, T. Oosako, K. Saito, T. Sakamoto, T. Seki, M. Sonehara, H. Togashi, S. Tsuda, T. Yamaguchi: Non-inductive Plasma Start-up Experiments on the TST-2 Spherical Tokamak Using Waves in the Lower-hybrid Frequency Range, 25th Fusion Energy Conference (FEC 2014), Saint Petersburg, Russia, Oct. 13–18 (2014) (EX/P5-49).
- [33] S. G. Baek, R. R. Parker, S. Shiraiwa, G. M. Wallace, P. T. Bonoli, I. C. Faust, A. E. Hubbard, B. L. LaBombard, M. Porkolab, Y. Takase, T. Shinya, R. Vieira, N. Mucic: Spectral Measurements of Lower Hybrid Waves in the High-Density Multi-Pass Regime of Alcator C-Mod, 56th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics Marriott Hotel, New Orleans, LA, USA Oct. 27–31, 2014.
- [34] T. Wakatsuki, T. Suzuki, N. Hayashi, J. Shiraishi, S. Ide, Y. Takase: Simulation of plasma current ramp-up with reduced magnetic flux consumption in JT-60SA using TOPICS transport code, 56th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics Marriott Hotel, New Orleans, LA, USA Oct. 27–31, 2014.
- [35] M. Yoshida for the JT-60SA Team and JT-60SA Research Plan Contributors: Progress in JT-60SA Construction, Research Plan and Research Activities, 24th International Toki Conference (ITC24), Ceratopia Toki, Toki, Gifu, Japan, Nov. 4–7, 2014.
- [36] A. Ejiri, T. Tokuzawa, N. Tsujii, K. Saito, T. Seki, H. Kasahara, T. Mutoh, R. Seki, S. Kamio, I. Yamada and Y. Takase: Study of ICRF waves in LHD using a microwave reflectometer, 24th International Toki Conference (ITC24), Ceratopia Toki, Toki, Gifu, Japan. Nov. 4–7, 2014.
- [37] S. Tsuda, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, T. Shinya, T. Takeuchi, H. Furui, H. Homma, K. Imamura, T. Inada, K. Nakamura, K. Nakamura, M. Sonehara, H. Togashi, S. Yajima, T. Yamaguchi, Y. Yoshida: Measurement of ion temperature and flow in RF start-up plasmas on Spherical Tokamaks, 24th International Toki Conference (ITC24), Ceratopia Toki, Toki, Gifu, Japan. Nov. 4–7, 2014.
- [38] K. Nakamura, A. Ejiri, J. Hiratsuka, H. Togashi, T. Yamaguchi, H. Homma, Y. Takase, N. Tsujii, H. Furui, K. Imamura, T. Inada, K. Nakamura, T. Shinya, M. Sonehara, T. Takeuchi, S. Tsuda, S. Yajima, Y. Yoshida: Study of internal reconnection events using a double-pass Thomson scattering system on TST-2, 24th International Toki Conference (ITC24), Ceratopia Toki, Toki, Gifu, Japan. Nov. 4–7, 2014.
- [39] N. Tsujii, A. Ejiri, Y. Takase, H. Kasahara, K. Tanaka, E. F. Jaeger and L. A. Berry: Three-dimensional modeling of ICRF waves with AORSA on LHD, Plasma Conference 2014, Toki Messe, Niigata, Japan Nov. 18–21, 2014.
- [40] A. Ejiri and T. Akiyama: Inevitable Measurement Parameters for the Control of DEMO reactors, Plasma Conference 2014, Toki Messe, Niigata, Japan Nov. 18–21, 2014.
- [41] S. Tsuda, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, T. Shinya, T. Takeuchi, H. Furui, H. Homma, K. Imamura, T. Inada, K. Nakamura, K. Nakamura, M. Sonehara, H. Togashi, S. Yajima, T. Yamaguchi, Y. Yoshida: Measurement of ion temperature and flow in RF start-up plasmas on Spherical Tokamak, Plasma Conference 2014, Toki Messe, Niigata, Japan Nov. 18–21, 2014.
- [42] H. Togashi, A. Ejiri, H. Homma, K. Nakamura, T. Yamaguchi, H. Furui, K. Imamura, T. Inada, K. Nakamura, T. Shinya, M. Sonehara, T. Takeuchi, S. Tsuda, N. Tsujii, S. Yajima, Y. Yoshida and Y. Takase: Thomson Scattering Measurement for Lower Hybrid Driven TST-2 Spherical Tokamak Plasma, Plasma Conference 2014, Toki Messe, Niigata, Japan Nov. 18–21, 2014.
- [43] H. Furui, Y. Nagashima, M. Sonehara, Y. Takase, A. Ejiri, N. Tsujii, T. Yamaguchi, T. Shinya, H. Togashi, T. Inada, K. Imamura, S. Tsuda, K. Nakamura, T. Takeuchi, K. Nakamura, H. Homma, S. Yajima and Y. Yoshida: Analysis of a current density diagnostic using a small Rogowski coil in the TST-2 spherical Tokamak, Plasma Conference 2014, Toki Messe, Niigata, Japan Nov. 18–21, 2014.
- [44] K. Imamura, A. Ejiri, Y. Takase, N. Tsujii, K. Nakamura, H. Furui, H. Homma, T. Inada, K. Nakamura, T. Shinya, M. Sonehara, T. Takeuchi, H. Togashi, S. Tsuda, S. Yajima, T. Yamaguchi and Y. Yoshida: Hard X-ray Measurement on the TST-2 Spherical Tokamak Plasma Driven by Lower Hybrid Wave Power, Plasma Conference 2014, Toki Messe, Niigata, Japan Nov. 18–21, 2014.
- [45] M. Sonehara, Y. Nagashima, A. Ejiri, Y. Takase, H. Furui, N. Tsujii, T. Yamaguchi, T. Shinya, H. Togashi, K. Imamura, T. Inada, S. Tsuda,

- K. Nakamura, T. Takeuchi, H. Homma, S. Yajima, Y. Yoshida and K. Nakamura: Measurement of Temperature Fluctuation in TST-2 Spherical Tokamak by Langmuir Probe, Plasma Conference 2014, Toki Messe, Niigata, Japan Nov. 18–21, 2014.
- [46] T. Shinya, Y. Takase, C. P. Moeller, T. Inada, T. Wakatsuki, H. Kakuda, N. Tsujii, S. Yajima, A. Ejiri, H. urui, H. Homma, K. Imamura, K. Nakamura, K. Nakamura, M. Sonehara, T. Takeuchi, H. Togashi, S. Tsuda, T. Yamaguchi and Y. Yoshida: Non-inductive current start-up experiments using the Lower Hybrid Wave on the TST-2 Spherical Tokamak, Plasma Conference 2014, Toki Messe, Niigata, Japan Nov. 18–21, 2014.
- [47] O. Watanabe, H. Furui, T. Yamaguchi, J. Hiratsuka, T. Wakatsuki, M. Sonehara, T. Shinya, H. Togashi, A. Ejiri, N. Tsujii, Y. Takase, Y. Nagashima, T. Inada, K. Imamura, S. Tsuda, K. Nakamura: ECH Start-up Experiment with Stationary Direct Current of Central Solenoid Coil on TST-2, Plasma Conference 2014, Toki Messe, Niigata, Japan Nov. 18–21, 2014.
- [48] N. Fukumoto, Y. Yamasaki, I. Yagi, K. Hanada, N. Hamada, H. Togashi, K. Nakamura, T. Yamaguchi, M. Nagata, T. Onchi, H. Zushi, H. Idei, M. Hasegawa, A. Fujisawa, K. Nakamura, A. Kuzmin, K. Mishra, A. Ejiri, Y. Takase, Y. Nagashima, O. Mitarai, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima: Plasma response to a compact torus injection in QUEST, Plasma Conference 2014, Toki Messe, Niigata, Japan Nov. 18–21, 2014.
- [49] N. Tsujii: Overview of TST-2 Research, 3rd A3 Foresight Workshop on Spherical Torus (ST), Okura Akademia Park Hotel, Kisarazu, Chiba, Japan, Dec. 15–17, 2014.
- [50] Y. Yoshida, TST-2 team: Electron density measurements of non-inductive start-up plasmas using an interferometer, 3rd A3 Foresight Workshop on Spherical Torus (ST), Okura Akademia Park Hotel, Kisarazu, Chiba, Japan, Dec. 15–17, 2014.
- [51] S. Yajima: Soft X-ray measurement and tomographic reconstruction in non-inductive start-up plasma, 3rd A3 Foresight Workshop on Spherical Torus (ST), Okura Akademia Park Hotel, Kisarazu, Chiba, Japan, Dec. 15–17, 2014.
- [52] K. Nakamura and TST-2 team: Design of a hard X-ray measurement system for TST-2, 3rd A3 Foresight Workshop on Spherical Torus (ST), Okura Akademia Park Hotel, Kisarazu, Chiba, Japan, Dec. 15–17, 2014.
- [53] T. Takeuchi, TST-2 team: Spectroscopic measurement of impurity radiation in TST-2, 3rd A3 Foresight Workshop on Spherical Torus (ST), Okura Akademia Park Hotel, Kisarazu, Chiba, Japan, Dec. 15–17, 2014.
- [54] Y. Takase and TST-2 team: Recent progress in the TST-2 RF start-up experiments, Third Kyushu Workshop on Solenoid-Free RF-Only ST Plasmas, RIAM, Kyushu-University, Kasuga, Mar.25–26, 2015.
- [55] A. Ejiri, S. Tsuda, H. Tanaka, Y. Takase, M. Uchida, T. Maekawa, N. Tsujii and T. Takeuchi: Ion temperature and flow measurements on TST-2 and LATET, Third Kyushu Workshop on Solenoid-Free RF-Only ST Plasmas, RIAM, Kyushu-University, Kasuga, Mar.25–26, 2015.
- 招待講演
- [56] A.Ejiri: Analysis of office/laboratory staying hour and home working hour of Japanese scientists and engineers, 5th IUPAP International Conference on Women in Physics, Waterloo, Canada August 5–8 2014.
- (国内会議)
- 一般講演
- [57] Y. Takase for the TST-2 Group: Recent Progress of TST-2 Experiment, ST 研究会「球状トカマク炉のための非誘導電流駆動等の要素技術の開発」、核融合科学研究所、土岐、2014年8月4日–5日。
- [58] 新屋貴浩、高瀬雄一、C. P. Moeller、稲田拓真、矢島悟、江尻晶、辻井直人、古井宏和、本間寛人、今村和弘、中村京春、中村建大、曾根原正晃、竹内敏洋、富樫央、津田慎太郎、吉田裕亮、山口隆史: TST-2 球状トカマク装置における低域混成波を用いた電流立ち上げ実験、ST 研究会「球状トカマク炉のための非誘導電流駆動等の要素技術の開発」、核融合科学研究所、土岐、2014年8月4日–5日。
- [59] 古井宏和、永島芳彦、曾根原正晃、高瀬雄一、江尻晶、辻井直人、山口隆史、新屋貴浩、富樫央、今村和宏、稲田拓真、津田慎太郎、中村京春、竹内敏洋、中村建大、本間寛人、矢嶋悟、吉田裕亮: ログスキープロープを用いた電流分布計測、ST 研究会「球状トカマク炉のための非誘導電流駆動等の要素技術の開発」、核融合科学研究所、土岐、2014年8月4日–5日。
- [60] 津田慎太郎、江尻晶、高瀬雄一、辻井直人、新屋貴浩、竹内敏洋、稲田拓真、今村和宏、曾根原正晃、富樫央、中村京春、中村建大、古井宏和、本間寛人、矢嶋悟、山口隆史、吉田裕亮: 球状トカマクにおける高周波立ち上げプラズマのフロー計測、ST 研究会「球状トカマク炉のための非誘導電流駆動等の要素技術の開発」、核融合科学研究所、土岐、2014年8月4日–5日。
- [61] 中村京春、江尻晶、平塚淳一、富樫央、山口隆史、高瀬雄一、辻井直人、TST-2 グループ: 球状トカマク装置 TST-2 におけるダブルパストムソン散乱計測を用いた IRE 前後の電子温度非等方性計測、ST 研究会「球状トカマク炉のための非誘導電流駆動等の要素技術の開発」、核融合科学研究所、土岐、2014年8月4日–5日。

- [62] 今村和宏、高瀬雄一、江尻晶、辻井直人、中村健大、山口隆史、曾根原正晃、新屋貴浩、古井宏和、富樫央、稲田拓真、中村京春、津田慎太郎、竹内敏洋、本間寛人、矢嶋悟、吉田裕亮: TST-2 における制動 X 線の径方向分布測定、ST 研究会「球状トカマク炉のための非誘導電流駆動等の要素技術の開発」、核融合科学研究所、土岐、2014 年 8 月 4 日-5 日。
- [63] 稲田拓真、高瀬雄一、新屋貴浩、江尻晶、辻井直人、矢嶋悟、今村和宏、曾根原正晃、津田慎太郎、竹内敏洋、富樫央、中村京春、中村建大、古井宏和、本間寛人、山口隆史、吉田裕亮: 有限要素法コード COMSOL を用いた CCA(静電結合型コムラインアンテナ)の性能評価、ST 研究会「球状トカマク炉のための非誘導電流駆動等の要素技術の開発」、核融合科学研究所、土岐、2014 年 8 月 4 日-5 日。
- [64] 高瀬雄一: TST-2 におけるプラズマ電流ランプアップ実験、第 9 回 QUEST 研究会「コア、SOL (周辺)、壁での現象を連結する物理」、九州大学筑紫キャンパス応用力学研究所 2F 会議室、2014 年 9 月 11-12 日。
- [65] 辻井直人、江尻晶、高瀬雄一、笠原寛史、田中謙治、E. F. Jaeger: AORSA を用いた ICRF 波動加熱の 3 次元全波計算、第 4 回 ICRF 加熱研究会「ICRF 加熱装置の高性能化と将来応用」、核融合科学研究所、土岐、2015 年 2 月 17 日。
- [66] 新屋貴浩、高瀬雄一、C. P. Moeller、江尻晶、辻井直人、稲田拓真、矢嶋悟、古井宏和、本間寛人、今村和弘、中村京春、中村建大、曾根原正晃、竹内敏洋、富樫央、津田慎太郎、山口隆史、吉田裕亮: 低域混成波を用いた TST-2 における電流立ち上げ実験、第 4 回 ICRF 加熱研究会「ICRF 加熱装置の高性能化と将来応用」、核融合科学研究所、土岐、2015 年 2 月 17 日。
- [67] 江尻晶、徳澤季彦: LHD におけるマイクロ波反射計を用いた波動計測、光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測技術・解析モデルの開発とその応用に関する研究集会、核融合科学研究所、土岐、2015 年 2 月 26-27 日。
- [68] 江尻晶: トカマク炉の制御、第 2 回原型炉の運転制御に関するシンポジウム、核融合科学研究所、土岐、2015 年 3 月 12-13 日。

招待講演

- [69] 高瀬雄一: ST 研究の進展、第 10 回 QUEST 研究会、九州大学応用力学研究所、春日、2015 年 3 月 11-12 日。

6.3 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、大自由度を持ち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。

非平衡系において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、流体现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統計則や、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。

こうした研究の行き着く先として、非平衡状態にある系に適用可能な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、非平衡度を制御し上げ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た研究を行っている。

スタッフの構成としては、3 月末で竹内一将助教が東工大准教授に転出し、4 月から新たに平岩徹也助教が着任した。また、太田隆夫(京大名誉教授)が客員共同研究員として在籍している。

6.3.1 巨視的非平衡系の物理

古典乱流転移の普遍性

パイプ流やチャンネル流のような、せん断流と呼ばれる流れでは、層流が線形安定であるにもかかわらず乱流への遷移がみられ、層流・乱流転移の解明は、一世紀以上ものあいだ未解決問題となっている。当研究室では、この遷移現象が非平衡系における相転移現象として捉えられる可能性に着目した。特に、乱流状態を活性化状態、層流状態を非活性化状態とみなすと、非平衡臨界現象の一種である、Directed Percolation 普遍クラス (DP) という、吸収状態(系が一度入ると 2 度と出て行けない状態)への転移として特徴付けられる可能性がある。この様な系では、臨界点近傍で秩序変数や相関長がべき乗則に従い、

各々の普遍クラスは複数の臨界指数で特徴付けられる。我々は、臨界指数の高精度な測定を目的として、統計量の点で有利な擬似2次元系の大型チャンネル流装置を製作し、秩序変数 [64, 67] および相関長に対応する物理量 [26, 80] を測定した。その結果、少なくとも2つの独立な臨界指数について、DPと整合する値が得られ、チャンネル流における乱流への遷移がDPに属することが強く示唆された。

成長界面ゆらぎの普遍的諸性質の解析

Kardar-Parisi-Zhang(KPZ) 普遍クラスは、ゆらぎを伴い成長する界面のほか、交通流や流体ゆらぎなど様々な非平衡輸送現象を記述することがわかりつつある。我々は、液晶乱流実験と数値計算を併用して、KPZ 普遍ゆらぎの諸性質の解析を進めた [22, 27, 30, 47, 49, 56, 82, 84, 86, 90, 92, 95]。具体的には、基板サイズが膨張する場合の界面成長を数値的に実現し、一見平面状の界面であっても円形界面のような挙動を示すことを発見した [11]。また、界面ゆらぎを弱いエルゴード性の破れの観点から解析し、円形界面の特異な時間相関の一部性質が、更新過程と呼ばれる単純な模型で定量的に再現できることを発見した [30, 49, 56]。

成長する界面ゆらぎの普遍性と初期条件

KPZ 普遍クラスにみられる、初期条件に依存した分布・相関の普遍性を詳細に調べるため、液晶電気乱流と紫外レーザーを用いて、任意の初期条件からの界面成長過程を観察できる実験系を構築した。この実験系を用いて、理論的な取り扱いが難しいリング状の初期条件から内向きに成長する界面に関して、普遍的なゆらぎが現れるか解析を行っている。並行して数値モデルによる検証を行い、平面界面から円形界面への分布のクロスオーバーなど、今までに知られていない現象が起こる可能性を示した。さらに数値計算によって、KPZ 普遍クラスに属することが提案されている時空カオスの摂動に関して、KPZ 普遍クラスの平面界面にみられる普遍的な分布が現れることを確認している [72]。

カイラルな液晶の温度勾配による回転現象

カイラルな液晶(コレステリック液晶)では温度勾配により液晶の様子が回転する現象「レーマン効果」が見られる。レーマン効果は非平衡熱力学の枠組みで系のもつカイラリティに起因した温度勾配と配向ベクトルの運動のカップリング(thermo-mechanical coupling)による非平衡輸送のクロス効果として理解されてきた。しかし、レーマン効果は実験的検証が数少なく、現象としてまだわからないことが多いというのが現状である。そこで、私達は共焦点顕微鏡を用いて、回転運動をおこなう液晶液滴の三次元構造を決定し、レーマン効果の現象論的な解析を行っ

た。その結果、従来の液晶の流体理論では説明することのできない「液滴の表面効果」が重要であることを示唆する結果を得た [18, 39, 41, 61, 65, 66]。

非ブラウン粒子懸濁液の粘弾性

懸濁液の粘性の研究は、高充填率では実験を元にした、現象論的な理解が中心である。近年、非ブラウン粒子懸濁液において、系の粘弾性と粒子の運動の可逆・不可逆が強く結びついていることが示唆された。当研究室ではこれを受けて、ミクロな粒子の運動から、系の粘弾性というマクロな応答の性質を説明することを目的にし、「KAPSEL」と呼ばれる懸濁液をシミュレートするためのオープンソースを用いて、懸濁液のシミュレートを行っている。その結果、粒子衝突確率 ρ に対して、弾性 η'' が $\eta'' \sim \rho^2$ で振る舞う事(図 6.3.1) がわかった [68, 79]。

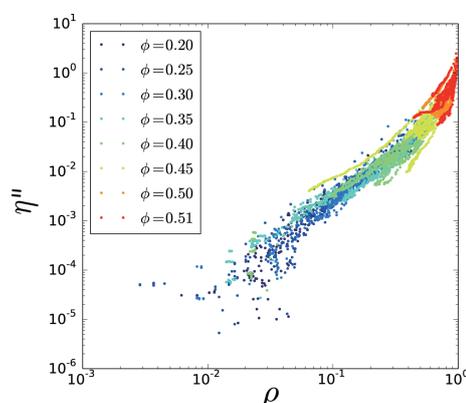


図 6.3.1: 弾性 η'' の粒子衝突確率 ρ 依存性。

6.3.2 小さな非平衡系の物理

微小系における熱と粗視化の関係

近年の実験技術の発展にともなって、熱浴に接している微小系において成り立つ熱力学的な関係式が関心を集めている。微小系の実験においては、放出・吸収される熱が熱エネルギー(ボルツマン定数×温度)のオーダーであるため、その大きさを熱量計を用いて測定することは事実上不可能である。そのため、ゆらぎのエネルギー論と呼ばれる、系の運動のゆらぎの性質から放出・吸収した熱を見積もる枠組みを用いることで、それらの関係式が検証されてきた。

当研究室では、モデルの粗視化によって消去された自由度があるときに、ゆらぎのエネルギー論の一般論が正しく熱の値を与えないことがある、という問題に注目した。そして、定常状態熱力学の枠組みにもとづいてこの問題を回避する方法を報告する [17, 25, 91] と同時に、現実的な実験系を念頭においてどのよう

な系においてこの問題が発生するのか/しないのかを調べた [25, 77]。

微小系の非平衡熱力学

小さな非平衡系における熱力学法則と情報理論との関係が盛んに議論されてきている。我々は昨年度に引き続き情報と熱力学に関する一般法則の拡張を行った [23, 16, 31, 76, 83, 99, 102]。また、微小非平衡熱機関と見なした分子モーターのエネルギー効率についても関心が集まっている。我々は分子モーターの微小非平衡系の散逸と設計原理に関する研究を進めた [10]。

6.3.3 アクティブマターの物理

アクティブマターに関する研究: 並進運動する液滴

非平衡条件下で自律的に並進運動を行う粒子やその集団は、アクティブマターと呼ばれ、物理化学的な系から生物系に至るまで様々な自己駆動する系に関する研究が行われている。自己駆動する粒子は、変形を伴うものが多いが、変形と並進運動の関係を明らかにするために外部から制御可能な実験系はこれまで殆ど存在しなかった。我々は、水面上に浮かべた油滴を垂直加振することで、制御パラメータを変えると、液滴が逐次的に分岐を繰り返し、自発的に対称性を破り、様々な変形を伴った並進運動が起こることを見いだした。加振の振動数と加速度を変えることで、Straight, rotating, spinning, squirming, zigzag, reciprocal motion, irregular polygonal turningなどの様々な並進運動 (図 6.3.2) を見だし、それらの相図を得た。また、対称性の考察から得られる Ohta-Ohkuma モデルの分岐解析と良く一致する分岐ダイアグラムが得られた。[20]

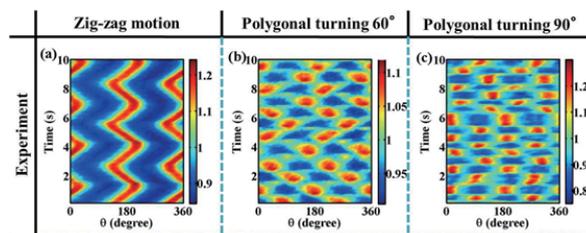


図 6.3.2: 加振された水面上の油滴に現れる特徴的な並進モードに対応する変形モード ((a) Zig-zag motion, (b) 60 度方向へのターン、(c) 90 度方向へのターン) [20]

自己駆動粒子の作るマクロ構造

自ら動き回る粒子 (自己駆動粒子) の集団が作るマクロな構造が、粒子のアスペクト比にどのように依存するかを実験的に調べるために、次の 2 種類の粒子を使用して実験をおこなった。

1 つは、ポリスチレン粒子の半球を金属でコートした非対称なコロイド粒子 (ヤヌス粒子) である。水中に分散したヤヌス粒子に交流電場を加えると、電場に垂直な 2 次元面内を駆動させることができる。ヤヌス粒子はアスペクト比が小さいため、密度を高くしても、粒子の進行方向がマクロに揃った秩序相は生じにくい [3, 36, 37, 60, 63, 96, 97, 98]。

比較のために、アスペクト比の高い粒子の例として、フィラメント状の大腸菌で実験をおこなった。フィラメント状の大腸菌は、通常の大腸菌の 10-50 倍程度の長さのものである。これを 2 次元に閉じ込める実験系を構築することにより、マクロな秩序相として、局所的に向きの揃ったドメインが共存する状態 (図 6.3.3) と、大域的な nematic 相を実現した。Nematic 相では、自己駆動系特有の giant number fluctuation が先行する理論研究と整合することを示した [71, 74, 96, 97, 98]。

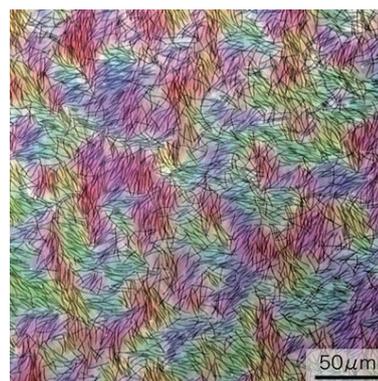


図 6.3.3: 局所的に向きの揃ったドメインが共存する状態。色はフィラメント状大腸菌の向きを示す。

フィラメントのパターン形成

フィラメントの作る集団運動は点要素が作るものと異なるパターンを形成する。生体内タンパク質である「キネシン・微小管」を用いて、平面上を運動するフィラメントが作る自己組織化と集団運動を観察した。低密度では微小管一本が自分自身に衝突しループを作る過程をとらえることが出来た。高密度では、微小管が束になり渦になる様子が現れた。[35, 40, 75, 81]

6.3.4 生命現象の物理

神経幹細胞の集団運動

マウスの神経幹細胞をプレート上に培養した際に現れるマクロな構造を観察し、その集団運動の特徴について調べた。双極的な形を持つ細胞が多数寄り集まると、形状と運動の相互作用の結果として、ネマチック液晶と似たパターンが現れる。我々は、神経幹細胞の培養系に固有な現象として、特定のチャージをもつ位相欠陥に細胞が集積することを見出した [42, 38, 78]。

シグナル伝達中の情報-熱力学

生体内のシグナル伝達は、生体システムの維持に重要な役割を果たす情報通信機構である。中でも、大腸菌 (*E. coli*) の走化性のシグナル伝達機構は、外界の刺激の変化に対する適応 (adaptation) を記述するシグナル伝達として、よく調べられている典型的なモデルである。

我々は、情報-熱力学第二法則を生体系にも適用可能なように一般化し、*E. coli* のシグナル伝達モデルに適用した [21, 32, 44, 55, 62, 88, 94, 103] その結果、生体内シグナル伝達における外界のノイズに対するロバストさが、輸送された情報量 (transfer entropy) で制限されるという普遍的な熱力学構造を発見し、情報-熱効率の観点から生体内シグナル伝達を解析した。

<受賞>

- [1] Kyogo Kawaguchi, Best poster award, Tokyo ATPase Workshop, June 4, 2014, Tokyo, Japan.
- [2] Yohei Nakayama, Poster award, 11th International Meeting on Thermomdiffusion, June 2-6, 2014, Bayonne, France.
- [3] 西口大貴, 第 59 回物性若手夏の学校 分科会最優秀賞, 2014 年 7 月 29-8 月 2 日, 静岡.
- [4] 伊藤創祐, 第 59 回物性若手夏の学校 ポスター賞, 2014 年 7 月 29-8 月 2 日, 静岡.
- [5] Kyogo Kawaguchi, Excellent Poster Prize, 6th iCeMS Retreat, Oct. 4, 2014, Miyazu, Japan.
- [6] Sakurako Tanida, Incentive Award for Poster Presentation, International Conference on Mathematical Modeling and Applications 2014 "Crowd Dynamics", Jan. 10-12, 2015, Tokyo, Japan.
- [7] Takaki Yamamoto, Best poster prize, International WE-Heraeus Physics School on "Model systems for understanding biological processes", Jan. 22-27, 2015, Bad Honnef, Germany.
- [8] 伊藤創祐, 平成 26 年度 東京大学大学院理学系研究科研究奨励賞, 2015 年 3 月.
- [9] 川口喬吾, 平成 26 年度 東京大学大学院理学系研究科研究奨励賞, 2015 年 3 月.

<報文>

(原著論文)

- [10] K. Kawaguchi, S. -i. Sasa and T. Sagawa: Nonequilibrium dissipation-free transport in F1-ATPase and the thermodynamic role of asymmetric allostery, *Biophysical Journal*, **106**, 2450-2457 (2014).
 - [11] I. S. S. Carrasco, K. A. Takeuchi, S. C. Ferreira and T. J. Oliveira: Interface fluctuations for deposition on enlarging flat substrates, *New J. Phys.*, **16**, 123057 (2014).
 - [12] T. Ohta and S. Yamanaka: Traveling bands in self-propelled soft particles, *Euro. Phys. J. Special Topic (D&D)*, **223**, 1279-1291 (2014).
 - [13] T. Ohta and S. Yamanaka: Discussion notes: Soliton-like behavior of traveling bands, *Euro. Phys. J. Special Topic (D&D)*, **223**, 1417-1418 (2014).
 - [14] T. Sakaue, K. Shitara and T. Ohta: Dynamics and electrorheology of sheared immiscible fluid mixtures, *Phys. Rev. E*, **89**, 052301(1-7) (2014).
 - [15] S. Yamanaka and T. Ohta: Collision dynamics of traveling bands in systems of deformable self-propelled particles, *Phys. Rev. E*, **90**, 042927(1-10) (2014).
 - [16] N. Shiraishi, S. Ito, K. Kawaguchi and T. Sagawa: Role of measurement-feedback separation in autonomous Maxwell's demons, *New J. Phys.*, **17**, 045012 (2015).
 - [17] Y. Nakayama and K. Kawaguchi: Invariance of steady-state thermodynamics between different scales of description, *Phys. Rev. E*, **91**, 012115 (2015).
 - [18] T. Yamamoto, M. Kuroda and M. Sano: Three-dimensional analysis of thermo-mechanically rotating cholesteric liquid crystal droplets under a temperature gradient, *Europhys. Lett.*, **109**, 46001 (2015).
 - [19] H. Shoji and T. Ohta: Computer simulations of three-dimensional Turing patterns in the Lengyel-Epstein model, *Phys. Rev. E*, **91**, 032913(1-11) (2015).
 - [20] H. Ebata and M. Sano: Swimming droplets driven by a surface wave, *Sci. Rep.*, **5**, 8546 (2015).
 - [21] S. Ito and T. Sagawa: Maxwell's demon in biochemical signal transduction, *Nature Communications*, accepted.
- (会議抄録)
- [22] K. A. Takeuchi: Experimental realization of Tracy-Widom distributions and beyond: KPZ interfaces in turbulent liquid crystal, *MSRI Publications* **65**, 495-507 (2014).
- (学位論文)
- [23] 伊藤 創祐: Information thermodynamics on causal networks and its application to biochemical signal transduction, 博士論文, 2015 年 3 月.

- [24] 川口喬吾: Design principles in the stochastic thermodynamics of molecular motors, 博士論文, 2015年3月.
- [25] 中山洋平: ゆらぐ世界における異なる記述の階層とエントロピー生成 (Different Scales of Description and Entropy Production in Stochastic World), 博士論文, 2015年3月.
- [26] 玉井敬一: チャネル流における時空間欠性状態への転移の統計的性質, 修士論文, 2015年3月.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [27] K. A. Takeuchi: Turbulent liquid crystals unveil universal fluctuation properties of growing interfaces, *Advances in Nonequilibrium Statistical Mechanics*, May 5 - July 4, 2014, Florence, Italy.
- [28] K. Kawaguchi, T. Torisawa and K. Furuta: Force induced switching model for cooperative molecular motors, *Tokyo ATPase Workshop*, Univ. Tokyo, June 2-4, 2014, Tokyo, Japan.
- [29] Y. Nakayama, R. Kita and M. Sano: Ludwig-Soret effect of colloidal particles in polymer solution, *11th International Meeting on Thermodiffusion*, June 2-6, 2014, Bayonne, France.
- [30] K. A. Takeuchi: KPZ-class interfaces in turbulent liquid crystal: beyond a “mere” confirmation, *Interface fluctuations and KPZ universality class - unifying mathematical, theoretical, and experimental approaches*, Aug. 20-23, 2014, Kyoto, Japan.
- [31] S. Ito and T. Sagawa: Information thermodynamics for coupled Brownian particles, *Interface fluctuations and KPZ universality class - unifying mathematical, theoretical, and experimental approaches*, Aug. 20-23, 2014, Kyoto, Japan.
- [32] S. Ito and T. Sagawa: Information thermodynamics reveals the robustness of biochemical signal transduction, *The 52nd Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan*, Sep. 25-27, 2014, Hokkaido, Japan.
- [33] K. Kawaguchi, T. Torisawa and K. Furuta: Design principles in cooperativity of molecular motors, *6th iCeMS Retreat*, Oct. 3-4, 2014, Miyazu, Japan.
- [34] M. Sano: Cell Mechanics: from single cell to multicellular dynamics, *UT and ENS Joint Workshop on Physics*, Dec. 8-10, 2014, Paris, France.
- [35] S. Tanida, K. Furuta, K. Nishikawa, H. Kojima and M. Sano: Pattern Formation of Microtubules, *International Conference on Mathematical Modeling and Applications 2014 “Crowd Dynamics”*, Jan. 10-12, 2015, Tokyo, Japan.
- [36] D. Nishiguchi and M. Sano: Effect of Aspect Ratio on Collective Behaviors: Spherical Colloids and Elongated Bacteria, *International Conference on Mathematical Modeling and Applications 2014 “Crowd Dynamics”*, Jan. 10-12, 2015, Tokyo, Japan.
- [37] D. Nishiguchi and M. Sano: Collective Behaviors of Spherical Janus Particles and Elongated Bacteria, *Kyoto Winter School for Statistical Mechanics: from non-equilibrium fluctuations to active matter*, Feb. 4-17, 2015, Kyoto University, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Japan.
- [38] K. Kawaguchi, R. Kageyama and M. Sano: Collective motion of neural stem cells, *Winter q-bio Meeting*, Feb. 17-20, 2015, Maui, Hawaii.
- [39] T. Yamamoto, M. Kuroda and M. Sano: The rotational motion of chiral liquid crystals under a temperature gradient, *International WE-Heraeus Physics School on “Model systems for understanding biological processes”*, Feb. 22-27, 2015, Bad Honnef, Germany.
- [40] S. Tanida, K. Furuta, K. Nishikawa, H. Kojima and M. Sano: Self-organization and Collective Motion of Active Filaments, *Physics of Structural and Dynamical Hierarchy in Soft Matter*, Mar. 16-18, 2015, Tokyo, Japan.
- [41] T. Yamamoto, M. Kuroda and M. Sano: The rotational motion of chiral liquid crystals under a temperature gradient, *Physics of Structural and Dynamical Hierarchy in Soft Matter*, Mar. 16-18, 2015, Tokyo, Japan.
- [42] K. Kawaguchi, R. Kageyama and M. Sano: Collective motion and active topological defects in neural stem cell culture, *Physics of Structural and Dynamical Hierarchy in Soft Matter*, Mar. 16-18, 2015, Tokyo, Japan.
- [43] D. Nishiguchi and M. Sano: Collective Motions and Nematic Ordering of filamentous *E. coli*, *Physics of Structural and Dynamical Hierarchy in Soft Matter*, Mar. 16-18, 2015, Tokyo, Japan.
- 招待講演
- [44] S. Ito: Information thermodynamics reveals the robustness of biochemical signal transduction, *Integrable systems, Bridging the gap between matter and life -Discussion with Prof. Albert Libchaber-*, June 6, 2014, Tokyo, Japan.
- [45] M. Sano: A simple force-motion relation for crawling cells, *Breaking Barrier from Physics to Biology (II)*, June 14-16, 2014, Xi’an, China.
- [46] K. A. Takeuchi: Covariant Lyapunov vectors capture the collective dynamics of large chaotic systems, *Dynamics Days Asia Pacific 08*, July 21-24, 2014, Chennai, India.

- [47] K. A. Takeuchi: Experimental evidence of KPZ growing interfaces and beyond, School on Non-linear Dynamics, Dynamical Transitions and Instabilities in Classical and Quantum Systems, July 14 - Aug. 1, 2014, Trieste, Italy.
- [48] M. Sano: From Nonequilibrium Physics to Active Matter, The 20th International Conference on DNA Computing and Molecular Programming, Sep. 22-25, 2014, Kyoto, Japan.
- [49] K. A. Takeuchi: Weak ergodicity breaking in KPZ-class interfaces, Fluctuation and Correlation in Stochastic Systems, Oct. 15, 2014, Tokyo, Japan.
- [50] M. Sano: Phase Transition in Nonequilibrium Systems, LMU-UT Workshop, Oct. 27-28, 2014, Munich, Germany.
- [51] M. Sano: Collective Dynamics of Active Particles Driven by a Surface Slip Flow, The 7th International Workshop on Advanced Materials Science-IWAMSN 2014, Nov. 2-6, 2014, Halong, Vietnam.
- [52] M. Sano: Universal Transition Routes to Turbulence in Simple and Complex Fluids, Vires Aquirit Eundo, UT and OIST Joint Symposium, Dec. 12-13, 2014, Okinawa, Japan.
- [53] M. Sano: Collective Motion of Self-Propelled Objects: From Molecule to Colloid, ICMMA 2014, 'Crowd Dynamics', Jan. 10-12, 2015, Meiji University, Tokyo, Japan.
- [54] M. Sano: Introductory talk: diversity and universality in active matter, Kyoto Winter School for Statistical Mechanics, Frontiers of Statistical Mechanics: From Non-equilibrium Fluctuations to Active Matter, Feb. 4-17, 2015, Kyoto, Japan.
- [55] S. Ito: Maxwell's demon in biochemical signal transduction with feedback loop, Kyoto Winter School for Statistical Mechanics, Focus Meeting, Feb. 16-17, 2015, Kyoto, Japan.
- [56] K. A. Takeuchi: Universal fluctuations of growing interfaces and characterization via sign renewals, Kyoto Winter School for Statistical Mechanics, Focus Meeting, Feb. 16-17, 2015, Kyoto, Japan.
- [57] M. Sano: Experimental Demonstration of Information-to-Energy Conversion in Small Fluctuating Systems, APS March Meeting, Invited Session: Thermodynamics and Information Processing in Biochemical Networks, Mar. 2-6, 2015, San Antonio, USA.
- [58] M. Sano: Universal Transition Routes to Turbulence in Simple and Complex Fluids, Physics of Structural and Dynamical Hierarchy in Soft Matter, Mar. 16-18, 2015, Komaba, Tokyo, Japan.
- (国内会議)
- 一般講演
- [59] 佐野雅己: 新学術領域研究の概要, 新学術領域「ゆらぎと構造」公募キックオフ研究会, 2014年4月26-27日, 京都大学理学部セミナーハウス.
- [60] 西口大貴, 佐野雅己: アスペクト比の異なる自己駆動粒子の集団運動の比較, 第13回関東ソフトマター研究会, 2014年8月19日, 首都大学東京.
- [61] 山本尚貴, 黒田真史, 佐野雅己: 温度勾配下で回転するカイラルな液晶液滴の共晶点顕微鏡による構造決定と定量評価, 第13回関東ソフトマター研究会, 2014年8月19日, 首都大学東京.
- [62] 伊藤創祐, 沙川貴大: 生体内シグナル伝達におけるMaxwellのデーモン, 新学術領域研究「ゆらぎと構造の協奏」第2回領域研究会, 2014年8月29-31日, 北海道大学.
- [63] 西口大貴, 佐野雅己: アスペクト比と集団運動? ヤナス粒子と細長い大腸菌?, 新学術領域研究「ゆらぎと構造の協奏」第2回領域研究会, 2014年8月29-31日, 北海道大学.
- [64] 玉井 敬一, 佐野 雅己: チャネル流における層流-乱流転移の実験的研究, 新学術領域研究「ゆらぎと構造の協奏」第2回領域研究会, 2014年8月29-31日, 北海道大学.
- [65] 山本尚貴, 黒田真史, 佐野雅己: 温度勾配下で回転するカイラルな液晶液滴のFCPMによる構造決定と定量評価, 新学術領域研究「ゆらぎと構造の協奏」第2回領域研究会, 2014年8月29-31日, 北海道大学.
- [66] 山本尚貴, 黒田真史, 佐野雅己: 温度勾配下でレーマン回転をおこなうコレステリック液晶液滴のFCPMによる構造決定と現象の定量評価, 日本物理学会 2014年秋季大会, 2014年9月7-10日, 中部大学.
- [67] 玉井 敬一, 佐野 雅己: チャネル流における層流-乱流転移の実験的研究, 日本物理学会 2014年秋季大会, 2014年9月7-10日, 中部大学.
- [68] 乙村浩太郎, 芝隼人, 佐野雅己: 非ブラウン粒子懸濁液の粘弾性と応力場の空間的構造, 日本物理学会 2014年秋季大会, 2014年9月7-10日, 中部大学.
- [69] 佐野 雅己: 領域レビュー「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8回物性科学領域横断研究会, 2014年11月21-22日, 大阪大学.
- [70] 佐野雅己: 牽引力顕微鏡とマイクロレオロジー手法の細胞計測への応用, 新学術領域「ゆらぎと構造」領域横断研究会「細胞力学と細胞運動の協奏」, 2014年12月19-20日, 九州大学.
- [71] 西口大貴, 佐野雅己: 細長い大腸菌の集団運動と個々の運動, 新学術領域「ゆらぎと構造」領域横断研究会「細胞力学と細胞運動の協奏」, 2014年12月19-20日, 九州大学.
- [72] 深井洋佑: Deterministic Spatio-temporal Chaos and Stochastic Fluctuating Interfaces, Winter School for Statistical Mechanics / Frontiers of Statistical Mechanics: From Non-equilibrium Fluctuations to Active Matter, 2015年2月4日-17日, 京都.
- [73] 佐野雅己: 自己駆動 Janus 粒子の相互作用と運動パターン, 新学術領域研究「ゆらぎと構造の協奏」研究会「アクティブ・マター研究の過去・現在・未来」, 2015年3月14-15日, 東北大学.

- [74] 西口大貴, 佐野雅己: 高アスペクト比の大腸菌の集団運動, 新学術領域研究「ゆらぎと構造の協奏」研究会「アクティブ・マター研究の過去・現在・未来」, 2015年3月14-15日, 東北大学.
- [75] 谷田桜子, 古田健也, 西川香里, 小嶋寛明, 佐野雅己: 微小管の自己組織化と集団運動, 新学術領域研究「ゆらぎと構造の協奏」研究会「アクティブ・マター研究の過去・現在・未来」, 2015年3月14-15日, 東北大学.
- [76] 伊藤創祐, 沙川貴大: 情報熱力学不等式の強弱によるヒエラルキー, 日本物理学会 2015年春季大会, 2015年3月21-24日, 早稲田大学.
- [77] 中山洋平: 特異摂動をもちいた環境自由度の消去による非線形 Langevin 方程式の導出, 日本物理学会 2015年年度大会, 2015年3月21-24日, 早稲田大学.
- [78] 川口喬吾, 影山龍一郎, 佐野雅己: 神経幹細胞の集団運動, 日本物理学会第70回年度大会, 2015年3月24日, 早稲田大学.
- [79] 乙村浩太郎, 佐野雅己: 非ブラウン粒子懸濁液における可逆不可逆転移と粘弾性の物理的起源, 日本物理学会第70回年度大会, 2015年3月21-24日, 早稲田大学.
- [80] 玉井 敬一, 佐野 雅己: チャネル流における時空間欠性状態への転移の非平衡相転移としての特徴づけ, 日本物理学会第70回年度大会, 2015年3月21-24日, 早稲田大学.
- [81] 谷田桜子, 古田健也, 西川香里, 小嶋寛明, 佐野雅己: フィラメントの集団運動におけるパターン形成, 日本物理学会第70回年度大会, 2015年3月21-24日, 早稲田大学.
- 招待講演
- [82] 竹内一将: 液晶の“量子渦”乱流が見せる非平衡臨界現象の世界, 2014年4月17-19日, 東京大学 物性研究所.
- [83] 伊藤創祐: 情報理論と小さな系の熱力学, 第一回若手勉強会「非平衡統計力学の基礎理論」, 2014年8月6-8日, 慶應義塾大学.
- [84] 竹内一将: ゆらぎと界面成長の普遍法則, 新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」第一回若手勉強会「非平衡統計力学の基礎理論」, 2014年8月6-8日, 慶應義塾大学.
- [85] 竹内一将: 液晶の「量子渦」と乱流, 日本物理学会 2014年秋季大会, 2014年9月7-10日, 中部大学.
- [86] 竹内一将: 液晶で探る、ゆらぎと界面成長の非平衡普遍法則, 第8回 物性科学領域横断研究会, 2014年11月21-22日, 大阪大学.
- [87] 佐野雅己: マクロ系における非平衡相転移, 東北大学大学院理学系研究科物理学専攻物性コロキウム, 2014年12月1日, 東北大学.
- [88] 伊藤創祐: シグナル伝達における Maxwell のデーモン, 定量生物学の会 第七回年会, 2015年1月11-12日, 九州大学.
- [89] M. Sano: Collective Motion in Active Suspension: From Molecule to Colloid, 公開シンポジウム「ソフトマターを基盤とするバイオ系の構築」, 2015年3月9日, 首都大学東京.
- [90] 竹内一将: 非平衡ゆらぎの KPZ 普遍クラス: 界面から絶縁体抵抗まで, 統計物理学懇談会(第3回), 2015年3月9-10日, 慶應義塾大学.
- (セミナー)
- [91] 中山洋平: 異なるスケールにおけるゆらぎ世界の熱力学 — 平衡熱力学から定常状態熱力学へ —, 慶応大学 矢上統計物理学セミナー, 2015年6月9日.
- [92] 竹内一将: 界面成長の普遍法則とランダム行列の不思議な関係: 液晶乱流実験を中心に, 島根大学 物性理論・素粒子論合同セミナー, 2014年6月18日.
- [93] 川口喬吾: Stochastic thermodynamics of molecular motors: design principles in energetics and cooperativity, 京都大学 基礎物理学研究所, 2014年7月7日.
- [94] 伊藤創祐: 大腸菌の走化性におけるシグナル伝達と情報の流れ, 東京大学 複雑生命動態研究教育拠点ミーティング, 2014年7月15日.
- [95] K. A. Takeuchi: Exploring universal out-of-equilibrium scaling laws with turbulent liquid crystal, University of Ljubljana, Soft Matter Group, July 17, 2014, Ljubljana, Slovenia.
- [96] D. Nishiguchi and M. Sano: Characterizing “Active Turbulence” with filamentous *E. coli* & Janus particles, ESPCI PMMH seminar, Sep. 25, 2014.
- [97] D. Nishiguchi and M. Sano: Characterizing “Active Turbulence” with filamentous *E. coli* & Janus particles, ENS de Lyon Bartolo Lab seminar, Sep. 29, 2014.
- [98] D. Nishiguchi and M. Sano: Characterizing “Active Turbulence” with filamentous *E. coli* & Janus particles, Universite Claude Bernard Lyon 1 ILM seminar, Oct. 2, 2014.
- [99] 伊藤創祐: ネットワーク上の情報熱力学: 情報熱力学の進展, 慶應義塾大学 矢上統計物理学セミナー, 2014年11月17日.
- [100] M. Sano: Cell Mechanics: from single cell to multi-cellular dynamics, iTHES Colloquium, Jan. 8, 2015, Wako, Japan.
- [101] M. Sano: Collective motion of active matter: bridging matter and living matter, Bio-Nano-Robo Seminar Series, LIMMS/CNRS-IIS, Jan. 15, 2015, Tokyo, Japan.
- [102] 伊藤創祐: ネットワーク上の情報熱力学: 古典系情報熱力学の一般論, 東京工業大学 笹本研究室セミナー, 2015年1月27日.
- [103] 伊藤創祐: フィードバックループのあるシグナル伝達中の情報熱力学, 東京大学 Kuroda Lab セミナー, 2015年3月13日.

<その他>

(講義等)

- [104] 佐野雅己：統計力学 I, 2014 年度夏学期。
 [105] 佐野雅己：研究倫理講義, 東京大学理学部物理学科, 大学院理学系研究科物理学専攻。
 [106] 佐野雅己：創発性とは何か-秩序と乱れを生み出す不安定性のメカニズム-, 東京大学 EMP 講義, 2014 年 6 月 28 日, 東京大学伊藤学術センター。
 [107] 佐野雅己：創発性とは何か-秩序と乱れを生み出す不安定性のメカニズム-, 東京大学 EMP 講義, 2014 年 11 月 22 日, 東京大学伊藤学術センター。
 [108] 佐野雅己：集中講義, 統計物理学特論「非平衡系の物理学：マクロ系とメソスコピック系」, 2014 年 12 月 1-2 日, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻, 仙台。

(アウトリーチ)

- [109] 佐野雅己：非平衡の世界への誘い, 2014 年度日本物理学会科学セミナー「非平衡の世界 —凝縮系から地震、経済、生命まで」, 2014 年 8 月 6 日-7 日, 東京大学駒場キャンパス。
 [110] 竹内一将：確率から生まれる自然法則 ～「統計物理学」が目指すもの～, 市川中学校・高等学校 土曜講座, 2014 年 11 月 1 日。

6.4 山本研究室

6.4.1 はじめに

【星・惑星系形成】 恒星および惑星系の形成は、宇宙における最も基本的な構造形成過程の 1 つであり、観測・理論両面から活発な研究が行われている。また、我々の太陽系の起源、生命の起源に直結するテーマでもある。本研究室では、銀河系および系外銀河における星・惑星系形成とそこでの物質進化を、電波観測によって研究している。

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

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

【動き出した ALMA (アルマ)】 ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)A は、チリの標高 5000 m のアタカマ高原に作られる 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、日本、北米、欧州による共同建設が進んでいる。2011 年 10 月から部分運用が始まっており、我々のグループでも成果が出つつある。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, H₂D⁺, HD₂⁺ などの基本的分子のスペクトル線がある。それらの観測により、星・惑星系形成における物質進化の根幹を捉えることができる。世界的には 2009 年に打ち上げられた Herschel 衛星によりテラヘルツ帯観測が進められた。本研究室では、それとは相補的に、チリに設置されている ASTE 10 m 望遠鏡による高分解能観測を目指しており、2011 年度には、これまでに開発してきたテラヘルツ帯受信機を搭載して試験観測を行った。本研究室は、1998 年から 2005 年まで、富士山頂に口径 1.2 m のサブミリ波望遠鏡を設置、運用した実績がある。この経験を発展させて、テラヘルツ分子観測を進めている。

6.4.2 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、HCOOCH₃ などの大型飽和有機分子が原始星近傍の 100 AU 程度の領域に豊富に見られる天体で、ホットコリノ天体と呼ばれる(へびつかい座の IRAS16293-2422 など)。もう一つの典型は、炭素鎖分子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。本研究室では、これらの点を中心に、ALMA などを用いて幅広い研究を進めている(図 6.4.1)。

【原始惑星系円盤外縁部で劇的な化学変化】 昨年度、ALMA を用いて、おうし座分子雲にある原始星 L1527 の高感度・高空間分解能観測を行い、原始星円盤が形成される様子を調べた。いくつかの分子のスペクトル線観測から、中心星から半径 100 AU の位置に回転落下円盤の遠心力バリアがあることを発見し、そこで劇的な学組成の変化が起こっていることを示した。遠心力バリアは原始星円盤形成の最前線なので、それを観測的に捉えたことは大きな意義がある。本年度は、ALMA 観測データの解析を進め、遠心力バリアを境にどのような分子組成の変化が起こっているかを詳しく調べた。その結果、CCH や c-C₃H₂

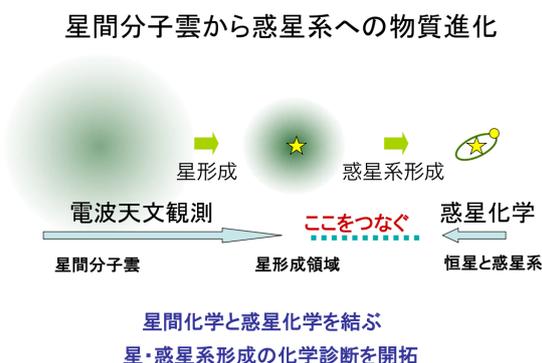


図 6.4.1: A schematic illustration of our goal

のような炭素鎖関連分子と CS は遠心力バリアの外側に主に存在していることが示された。逆に SO や CH₃OH は遠心力バリアの近傍で急激に増加し、その内側にまで存在している。一方、H₂CO は全体に広がって存在していることがわかった (図 6.4.2)。そこで、H₂CO に対する分子の存在量比を見積もったところ、遠心力バリアを境に存在量の大きな変化が確認された (図 6.4.3)。遠心力バリア近傍では弱い降着衝撃波が生じるため、ガス中に含まれる塵 (星間塵) 表層に凍りついていた SO や CH₃OH などが蒸発してくる。原始星円盤の赤道面では密度が非常に高く ($> 10^8 \text{ cm}^{-3}$) 温度も低い ($< 30 \text{ K}$) ので、遠心力バリアを通過した後は、炭素鎖関連分子などの不揮発性の分子は星間塵に凍りつく。円盤形成に伴ってこれほどまでの激しい分子組成変化がおこることは予想すらされていなかった。この天体については、ALMA によるさらに高空間分解能の観測が予定されており、今後の発展が期待される。

【低質量原始星 L1527 におけるアウトフロー】 CS ($J=5-4$) 輝線の高分解能観測 ($\sim 0''.7$) の結果、原始星から南北に伸びるほとんど edge-on のエンベロープ成分と、バタフライ状に広がる弱いアウトフロー成分が確認された。回転落下エンベロープガスのモデルと観測された速度場との比較から、このエンベロープの向きは、完全な edge-on からエンベロープの西側の面が手前に向くよう 5° 程度傾けた状態であることがわかった。またアウトフローの速度場は典型的な放物面モデルで説明された。この傾きの方向は、従来報告されていたものと反対であり、このことは、アウトフローの軸とエンベロープの回転軸が必ずしも平行でないこと、あるいはアウトフローの軸が歳差運動をしている可能性を示唆する。

【L1527 における $c\text{-C}_3\text{H}_2$ 分子の ^{13}C 同位体比異常】 野辺山 45 m 望遠鏡および IRAM30 m 望遠鏡を用いた L1527 に対する 1-3 mm 帯のラインサーベイ観測のデータを解析し、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$ 分子と 2 種類の ^{13}C 同位体の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比を求めた。その結果、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$ の同位体比は元素の同位体比 (60-70) より有意に高いことが明らかになった。C⁺ を起源として生成される分子は $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比が高くなることが理論的に予測さ

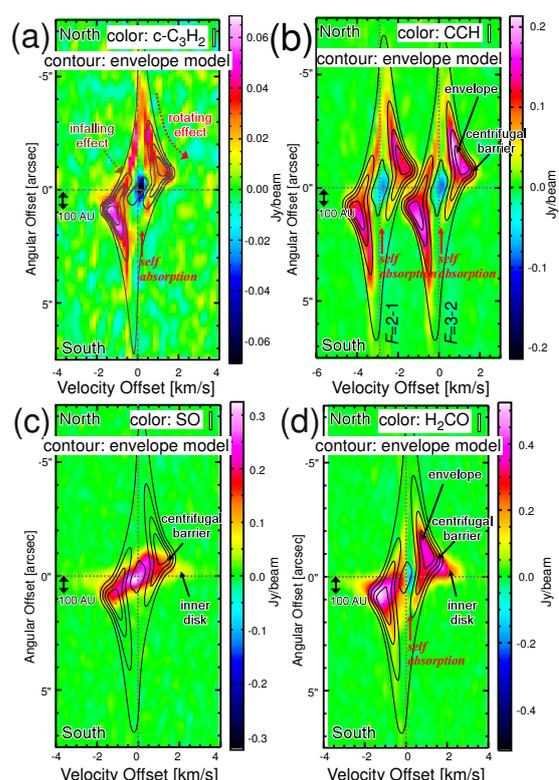


図 6.4.2: Position-velocity diagrams of $c\text{-C}_3\text{H}_2$, CCH, SO, and H₂CO observed toward L1527. Contours are intensities expected by the infalling-rotating envelope model. SO exists around the centrifugal barrier, while $c\text{-C}_3\text{H}_2$, CCH reside in the envelope. H₂CO exists in the overall region.

れており、この結果はそれを支持する。さらに、2つの同位体間で $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比が異なることを示した。この結果は、この分子が生成される反応過程の理解に強い制限をあたえるものである。

【L1527 における $c\text{-C}_3\text{D}$ の検出】 L1527 のラインサーベイ観測では、 $c\text{-C}_3\text{H}$ 分子が非常に強く検出され、関連分子である $c\text{-C}_3\text{H}_2$ や $l\text{-C}_3\text{H}$ に対する存在量比が他天体に比べ高いことがわかった。これは、WCCC の効果によるものと考えられる。それに伴い、 $c\text{-C}_3\text{H}$ の重水素化分子である $c\text{-C}_3\text{D}$ を分子雲で初めて検出した。 $c\text{-C}_3\text{H}_2$ および $l\text{-C}_3\text{H}$ の重水素化分子 $c\text{-C}_3\text{HD}$ 、 $c\text{-C}_3\text{D}_2$ および $l\text{-C}_3\text{D}$ の輝線も検出した。これらの分子種の D/H 比の関係は、WCCC での生成過程から予測されるものと矛盾しない。

【IRAS 16293-2422 における回転落下エンベロープ】 IRAS 16293-2422 は、へびつかい座にある Class 0 原始星連星 (Source A, B) である。この天体は、原始星付近の暖かい領域に飽和有機分子を多く含む典型的なホットコアノとして知られる。今回、天体の向きがより edge-on に近い Source A について、アーカイブデータの再解析を行った。解析に用いた輝線は、C³⁴S (SMA) と HCOOCH₃ (ALMA) である。再解

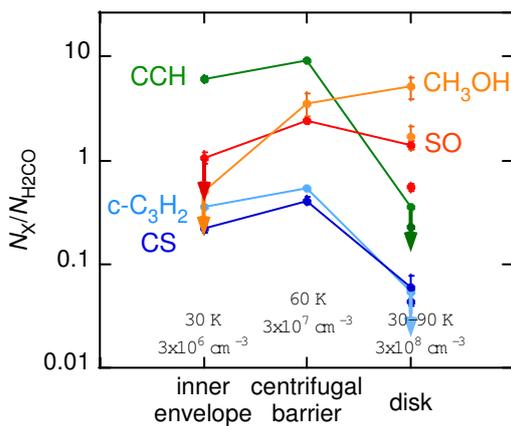


図 6.4.3: A Change in molecular abundances across the centrifugal barrier. Arrows represents upper limits.

析の結果、どちらの輝線でも北東-南西方向に伸びるエンベロップ成分が確認された。C³⁴S の速度構造は、L1527 と同様の回転落下エンベロップのモデルで再現されることがわかった。一方、HCOOCH₃ の分布は遠心力バリア付近に集中していることがわかった。このことは、この天体の特徴である飽和有機分子が、遠心力バリアでの降着衝撃波によって星間塵から蒸発している可能性を示唆する。

【ペルセウス座分子雲における原始星天体の分子組成の多様性の統計的研究】 低質量原始星天体の化学的多様性については、ホットコリノ天体と WCCC 天体の 2 つの極端なケースが見出されてきた。しかし、確実なホットコリノ天体は 5 個程度、WCCC 天体については 2 個であり、他の大多数の原始星の分子組成の特徴は明らかになっていない。そこで、ペルセウス座分子雲に含まれる原始星天体 37 個について、分子組成の特徴を調べる統計的研究を、野辺山 45 m 電波望遠鏡と IRAM 30 m 電波望遠鏡を用いてスタートした。予備的解析から、多様性の特徴が見えつつある。

【TMC-1 における大型飽和有機分子の検出】 飽和有機分子は星形成領域における特徴的な分子として知られている。近年の研究により、それらが星なしコアの星間塵上に相当量存在していることがわかってきた。低温分子雲における飽和有機分子の生成過程についての理解を深めるため、TMC-1 に対して CH₃OH のマッピング観測を行った。その結果、CH₃OH がコア周辺の低密度領域で豊富であることを見出した。そこで、CH₃OH のピーク強度位置で CH₃CHO および大型有機分子の観測を行った (図 6.4.4)。その結果、CH₃OCHO を TMC-1 において初検出し、CH₃OCH₃ を暫定的に検出した。これは、TMC-1 という若い進化段階にある星なしコアにおいて、既に星間塵上で大型飽和有機分子が生成されていることを示唆する重要な結果である。

【星形成領域における重水素濃縮度】 原始星形成に伴う重水素濃縮度の変化を確立する目的で、低質量原始星形成領域 L1551 IRS5, IRAS16293-2422 に対し

て重水素濃縮度の分布を観測した。原始星形成に伴う温度上昇のため、原始星近傍では重水素濃縮度が減少する。イオン種と中性分子種では減少速度が違い、中性分子種の場合の減少のタイムスケールは 10⁵ 年程度と予想される。観測では、この予想と整合する結果が得られた。

【大質量星形成領域 NGC 2264 ラインサーベイ】 NGC 2264 C 領域はオリオン星雲に次ぎ太陽系に近い大質量星形成領域であり、その中で最も重い CMM3 には力学年齢が 140-2000 年の分子流が付随しており、非常に若い段階の原始星であると考えられる。若い段階の大質量原始星の化学組成を調べるため、国立天文台野辺山 45m 鏡に搭載された T70 受信機を用いて、68-115 GHz 帯の分子輝線サーベイを実施した。観測の結果、265 本の輝線を検出し 35 種類の分子と 29 種類の同位体種を同定した。特に、C₄H、HC₅N、C₃S などの炭素鎖分子の輝線強度が相対的に強く、代表的な Hot Core である Orion KL とはかなり異なる化学組成を持つことがわかった。

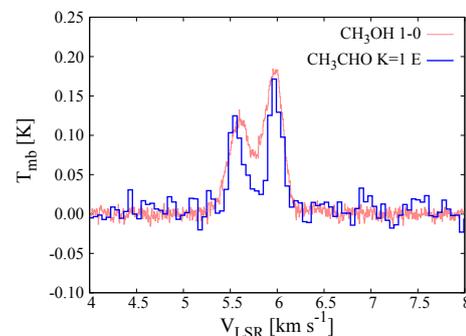


図 6.4.4: Spectra of CH₃OH and CH₃CHO observed toward TMC-1, showing a similar double peaked profile.

【HCL2 領域における OH 吸収線の解析】 おうし座の分子雲 HCL2 に対して、Effelsberg 100 m 望遠鏡を用いて OH 分子の基底状態遷移の観測を行った。この遷移は 1612 MHz, 1665 MHz, 1667 MHz, 1720 MHz の 4 本の超微細構造線からなり、それらのうち 1612 MHz の遷移が宇宙背景放射に対する吸収線として観測された。吸収線を説明するため、OH 分子の統計平衡計算を行ったところ、吸収を起こしている雲の運動温度は 50 K 程度であることが示された。また、1612 MHz 遷移は 40 K 程度以上で吸収線、40 K 程度以下で輝線となることがわかり、良い温度計となり得ることもわかった。HCL2 の東側の希薄な星間雲と HCL2 本体についてストリップスキャン観測で温度分布を調べたところ、いずれも雲の中心部分で温度が下がり、OH 分子の柱密度が上昇することがわかった。分子雲をとりまく希薄な星間雲の温度分布は、分子雲形成の理解につながる重要な知見であり、OH 分子の観測でその測定ができることを示したことは大きな意義がある。

6.4.3 系外銀河の分子組成

系外銀河における分子組成は主に活動銀河核や爆発的星形成領域をもつ中心核を観測対象として、中心核活動性と分子組成の関連がこれまで議論されてきた。ALMA 時代に突入した現在、系外銀河の円盤部分に存在する通常の分子雲においても様々な分子の検出が可能になりつつある。一方で、ALMA の空間分解能であっても、多くの系外銀河では数 pc を切る空間分解能で観測することは不可能である。1 pc 程度を超える系の分子組成を議論する場合、系内の分子雲コアの観測から得られた概念をそのまま適用することはできない。そのため、活動銀河核などを伴わない通常の分子雲の大きなスケールで観測される化学組成の持つ意味と起源を明らかにすることが、系外銀河における化学組成を議論する上で求められている。このような現状を踏まえ、本研究室では以下の研究を推進している。

【M51 の渦状腕における分子分布】近傍の円盤銀河 M51 の渦状腕に対して、CRAMA 干渉計を用いたイメージング観測を実施した。観測した領域は、IRAM 30 m を用いてラインサーベイを実施した 2 点を含む領域である。観測の結果、5–7" 程度の空間分解能で ^{13}CO 、 C^{18}O 、CN、CS、 CH_3OH 、HNC の分布を明らかにすることに成功した (図 6.4.5)。それぞれの分子の分布が異なることから、数 100 pc スケールでは渦状腕において化学組成に違いが生じることが明らかになった。一方で、星形成領域で存在量が顕著に増加する分子は見られないことから、このスケールの化学組成は星形成活動よりガスダイナミクスなどの影響を受けると考えられる。

【NGC 3627 における化学組成】棒渦巻銀河である NGC 3627 のバーエンドに対して、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて 3 mm 帯の 12 種の分子輝線 (CCH、HNC、HCN など) の観測を行った。観測したバーエンドは、渦状腕と比較して星形成効率が 5 倍高い領域であり、星形成活動が kpc スケールの分子ガス化学組成に及ぼす影響を探るのに適している。観測の結果、M51 の渦状腕と比較して CS や HCO^+ が増加している一方で、M51 では比較的強い輝線強度で検出できた HNC は検出されなかった。このような化学組成の違いの原因として、活発な星形成に伴うフィードバックの影響が考えられる。一方で、比較対象が NGC 3627 とは別の銀河であるため、重元素の組成の違いを反映している可能性も否定できない。そこで、単一鏡及び干渉計を用いた NGC 3627 の渦状腕での観測を計画している。

【大マゼラン雲におけるラインサーベイ】大マゼラン雲 (The Large Magellanic Cloud: LMC) は、近傍にある矮小不規則銀河であり、重元素量が我々の銀河系の半分程度と低いことで知られている。昨年度に引き続き、この銀河の中にある分子雲を対象に、オーストラリアの Mopra 22 m 望遠鏡を用いてラインサーベイ観測を行った。昨年度と合わせて、観測時間は 450 時間にのぼり、計 7 つの分子雲について高感度のデータを得ることができた。その結果、7 つの分子雲の化学組成は星形成段階によらず類似していること、LMC の分子雲では我々の銀河系の分子雲と比

べ、CCH 分子が多く、 CH_3OH 分子が少ないことを見出した。これは重元素量の少なさを反映した LMC の特徴であると考えられる。

【IC10 におけるラインサーベイ】上記の LMC の観測結果は、低重元素量銀河の分子雲における化学組成の質的特徴を浮き彫りにした。LMC で見られた CCH 分子が豊富で CH_3OH が少ないという特徴が低重元素量の銀河で一般に見られるものであるのか検証するため、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて、LMC よりもさらに重元素量の低い銀河である IC 10 の分子雲をラインサーベイ観測した。結果として、複数の分子の輝線を検出することができ、LMC で見られた特徴がこの銀河でも見られることがわかった。

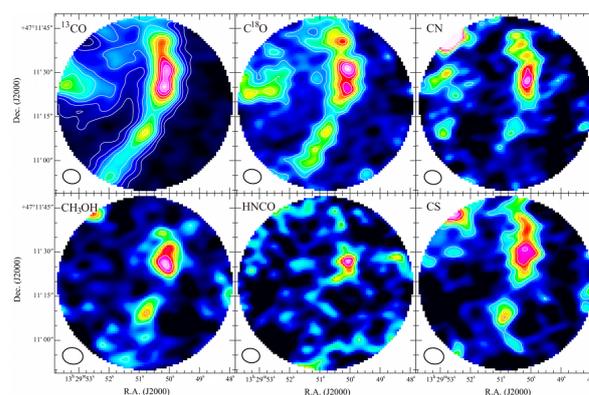


図 6.4.5: Molecular distributions in M51

【銀河系分子雲のマッピングラインサーベイ】系外銀河における分子ガスの化学組成と、銀河系の分子ガスの化学組成を比較するために、銀河系内の大質量形成領域 W51 に対してマッピングラインサーベイを Mopra 22 m 望遠鏡で行った。観測した領域全体 (50 pc × 50 pc) でスペクトルを平均すると星形成の影響は薄められ、広がった希薄な分子ガスの化学組成が優勢になる。その結果は M 51 などの系外銀河で観測されるスペクトルと類似することがわかった。同様に、銀河系内の大質量星形成領域 W3(OH) に対しても、野辺山 45 m 望遠鏡を用い、10 pc に相当する領域を 3 mm 帯の分子スペクトル線でマッピング観測した。現在、詳細な解析が進行中である。

6.4.4 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 (ヘテロダイミクス) の開発が不可欠である。そのための最も有力なデバイスが超伝導ホットエレクトロン・ボロメータ (HEB) ミキサ素子である。HEB ミキ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。

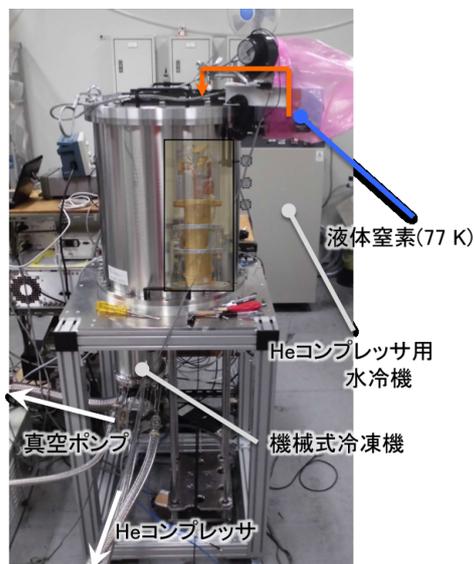


図 6.4.6: A test cryostat for evaluation of the THz HEB mixer receiver

【ASTE 搭載 THz 受信機の開発】 THz 帯には星間空間における化学反応の始点となるような基本的な原子・分子の輝線が存在する。それらの分子の観測は星間空間における化学反応の根幹を捉える上で基本的な重要性を持っている。THz 帯での高空間分解能観測を行うことを目指して、大口径地上望遠鏡搭載に向けた THz 帯受信機の開発を進めている。開発している受信機は ALMA カートリッジタイプで、900 GHz 帯と 1.5 THz 帯の 2 つの周波数帯を同時に観測できる。導波管型 HEB ミクサを使用しており、IF 帯域は 0.8-1.3 GHz である。HEB ミクサ素子は東京大学の研究室で開発・作成し、実験室で試験したミクサ雑音温度は 809 GHz で 390 K、1475 GHz で 490 K を達成している。1.5 THz 帯の性能は量子雑音の 7 倍程度であり、これは導波管型の HEB ミクサとしては世界最高の性能である。これまでの望遠鏡搭載実験を踏まえ、局部発振器の最終通倍器をカートリッジ内部に設置し、冷凍機の機械振動を排除できるように改良を行った。これにより、受信機の実出力安定性を向上させるとともに、運用時の負担軽減を計っている。カートリッジ冷却試験用デューワーを新たに導入し、実際の運用を想定した状況で性能評価を行っている（図 6.4.6）。一層の低雑音化、広 IF 帯域化を目指しての HEB ミクサ素子の改良を進めるとともに、光学系・導波管回路の改良による観測 RF 帯域の広帯域化の研究も進めている。

【THz-TDS による超伝導薄膜の評価】 HEB ミクサの心臓部である超伝導薄膜の物性を調べることは、その動作原理を理解し、検出性能を向上させるために重要である。本年度より、東大物性研の浅原彰文氏と末元徹教授との共同研究により、テラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS) を用いた超伝導薄膜の物性評価実験を開始した。当研究室で作製した NbTiN 薄膜 (30 nm) のテラヘルツ伝導特性 (0.2-2 THz) を転移温度近傍 (11 K) について測定し、Mattice-Bardeen モデル解析によって超伝導特性に関する情報を抽出した。

【準光学型 THz 帯 HEB ミクサの開発】 有限境界要素法による Singular ソフトウェアをもちいて、1.9 THz 準光学ツインスロットアンテナの周波数応答とビームパターンをシミュレーションし、設計パターンの改良を行った。機械式 4K 冷凍機の振動に伴って局部発振器からの入射パワーがゆらぎ、これが HEB ミクサの実出力変動を誘起する。この振動の影響を最小限に抑えるように GRASP シミュレータをもちいて光学伝送系の最適化を行った。この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。

<受賞>

- [1] 大屋瑠子, Poster Award, Revolution in Astronomy with ALMA - The 3rd Year, Tokyo International Forum Tokyo, December 8-11, 2014.

<報文>

(原著論文)

- [2] Watanabe, Y., Sakai, N., Sorai, K., Yamamoto, S., "Spectral Line Survey toward Spiral Arm of M51 in the 3 mm and 2 mm Bands", *ApJ*, 788, 4 (2014).
- [3] Sakai, N., Oya, Y., Sakai, T., Watanabe, Y., Hirota, T., Ceccarelli, C., Kahane, C., Lopez-Sepulcre, A., Lefloch, B., Vastel, C., Bottinelli, S., Caux, E., Coutens, A., Aikawa, Y., Takakuwa, S., Ohashi, N., Yen, H.-W., & Yamamoto, S., "A Chemical View of Protostellar Disk Formation in L1527", *ApJ*, 791, L38 (2014).
- [4] Oya, Y., Sakai, N., Sakai, T., Watanabe, Y., Hirota, T., Lindberg, J.E., Bisschop, S.E., Jorgensen, J.K., van Dishoeck, E.F., & Yamamoto, S., "A Substellar-Mass Protostar and Its Outflow of IRAS15398-3359 Revealed by Subarcsecond Resolution Observations of H₂CO and CCH", *ApJ*, 795, 152 (2014).
- [5] Soma, T., Sakai, N., Watanabe, Y., and Yamamoto, S., "Methanol in the Starless Core, Taurus Molecular Cloud-1", *ApJ*, 802, 74 (2015).
- [6] Shiino, T., Furuya, R., Soma, T., Watanabe, Y., Sakai, T., Ling, J., Maezawa, H., Yamakura, T., Sakai, N., and Yamamoto, S., "Low-Noise 1.5 THz Waveguide-Type Hot-Electron Bolometer Mixers Using Relatively Thick NbTiN Superconducting Film", *JJAP*, 54, 033101 (2015).

(国内雑誌)

- [7] 山本 智、「もっと化学を」、日本天文学会 天文月報、Vol. 107, 620, 2014.

(学位論文)

- [8] 柴田大輝, "The Behavior of the Deuterated Species after Birth of Protostars" (博士論文)
 [9] 大屋瑠子, 「ALMA を用いた太陽型原始星のエンベロープおよびアウトフローの研究」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] Sakai, N., "A Drastic Chemical Change in Protostellar Disk Formation", The Early Phase of Star Formation, Ringberg, Germany, 2-6, Jun, 2014
 [11] Watanabe, Y., Sakai, N., Nishimura, Y., Sorai, K., & Yamamoto, S., "Chemical Compositions of Spiral Arm Clouds in M51", Behind the curtain of dust - the molecular view of activity in (U)LIRGs Sexten, Italy, 14 - 18, July, 2014

ポスター発表

【Revolution in Astronomy with ALMA - The 3rd Year, Tokyo, December 8-11, 2014】

- [12] Watanabe, Y., Sakai, N., Nishimura, Y., Sora, K., & Yamamoto, S., "Spectral Line Survey toward Spiral Arm of M51".
 [13] Lopez-Sepulcre, A., Taquet, V., Ceccarelli, C., Neri, R., Kahane, C., & Charnley, S.B., "Complex organics in the planet formation region of two solar-type protostars"
 [14] Soma, T., Sakai, N., Watanabe, Y., & Yamamoto, S., "Origin of Methanol in the Starless Core, Taurus Molecular Cloud-1".
 [15] Nishimura, Y., Shimonishi, T., Watanabe, Y., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., & Yamamoto, S., "Spectral Line Survey toward Quiescent Molecular Clouds in the Large Magellanic Cloud"
 [16] Oya, Y., Sakai, N., Sakai, T., Watanabe, Y., Yamamoto, S., Sakai, T., Hirota, T., Lindberg, J.E., Bisschop, S.E., Jørgensen, J.K., & van Dishoeck, E.F. "Submillimeter-Wave Observations toward the Low-Mass Protostar IRAS 15398-3359 at Sub-arcsecond Resolution".(Poster Award 受賞)
 [17] Ebisawa, Y., Inokuma, H., Watanabe, Y., Sakai, N., Menten, K.M., & Yamamoto, S., "Effects of Line Overlap in Statistical Equilibrium Calculations of OH".
 [18] Yoshida, K., Sakai, N., Tokudome, T., Watanabe, Y., Takano, S., Lefloch, B., & Yamamoto, S., "Abundance Anomaly of the ^{13}C Isotopic Species of $\text{c-C}_3\text{H}_2$ "

招待講演

- [19] Watanabe, Y., Sakai, N., Sorai, K. & Yamamoto, S., "Spectral Line Survey toward Spiral Arm of M51", Chemical Diagnostics in the ALMA/NOEMA Era - MPIA/ISM-SPP workshop 2014 The Max Planck Institute for Astronomy, Heidelberg, Germany, 21-23, July, 2014.
 [20] Sakai, N. & Yamamoto, S., "Chemical Evolution of Star-Forming Cores toward Protostellar/Planetary Disks", Workshop on Interstellar Matter 2014, Hokkaido University Sapporo, October 16 - 18, 2014.
 [21] Sakai, N., "Protostellar Disk Formation Traced by Chemistry", Revolution in Astronomy with ALMA - The 3rd Year, Tokyo International Forum Tokyo, December 8-11, 2014.
 [22] Sakai, N., "Chemical Evolution in Star and Planet Formation", 6th RSC-CSJ Joint Symposium on Advanced Measurements for Chemistry, Nihon University, Funabashi, March 27, 2015.

(国内会議)

一般講演

【天文学会 2014 年秋季年会、山形大学、2013 年 9 月 10 - 12 日】

- [23] Sakai, N. Oya, Y., Watanabe, Y., Yamamoto, S., Hirota, T., Aikawa, Y., Ohashi, N., Takakuwa, S., Yen, H-W., Ceccarelli, C., IPAG group members. "A Chemical View of Protostellar-Disk Formation in L1527" P115a
 [24] 西村優里、渡邊祥正、坂井南美、徂徠和夫、山本智、「M51 の渦状腕における 70 GHz 帯の輝線観測」、R11a
 [25] 渡邊祥正、坂井南美、山本智、酒井剛、廣田朋也、「若い大質量原始星 NGC 2264 CMM3 における 70 GHz 帯分子輝線サーベイ」、P105a
 [26] 大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、酒井剛、廣田朋也、「若い原始星に付随するエンベロープおよびアウトフローのモデル解析」、P116a
 [27] 海老澤勇治、猪熊宏士、坂井南美、前澤裕之、Karl Menten、山本智、「OH 分子の超微細構造遷移線における Line Overlap を含めた統計平衡計算」Q47b
 [28] 吉田健人、徳留智矢、坂井南美、渡邊祥正、山本智、高野秀路、NRO ラインサーベイメンバー、Bertrand Lefloch、ASAI メンバー、「NRO 45 m/IRAM 30 m を用いた L1527 ラインサーベイ」、P126b

【天文学会 2015 年春季年会、大阪大学、2014 年 3 月 18 - 21 日】

- [29] 渡邊祥正、坂井南美、徂徠和夫、山本智 「Multi Line Observation toward Spiral Arm of M51 with the CARMA」、R09a
 [30] 相馬達也、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「Detection of Complex Organic Molecules in Starless Core; TMC-1」、P116a

- [31] 西村優里、下西隆、渡邊祥正、坂井南美、相川祐理、河村晶子、山本智、「大マゼラン雲の分子雲に対する 3 mm 帯スペクトラルラインサーベイ II」、Q33a
- [32] 大屋瑤子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「ALMA によるおうし座 Class 0 原始星 L1527 の観測」、P129a
- [33] 海老澤勇治、猪熊宏士、坂井南美、前澤裕之、Karl Menten、山本智、「HCL2 領域における OH 吸収線と構造形成の関係の研究」、P114a
- [34] 吉田健人、坂井南美、西村優里、Lopez-Sepulcre, A.、渡邊祥正、Lefloch, B.、山本智、「低質量星形成領域 L1527 における $c\text{-C}_3\text{D}$ の検出」、P115a
- [35] 山本智、相馬達也、吉田健人、海老澤勇治、西村優里、渡邊祥正、椎野竜哉、大口脩、酒井剛、小嶋崇文、Gonzalez, A.、「ASTE 10 m 望遠鏡搭載 THz 受信機の開発」、V119c
(書籍)
- [36] 坂井南美、日本物理学会編「宇宙の物質はどのようにできたのか 素粒子から生命へ」日本評論社、第 6 章
(公開講演)
- [37] 坂井南美「生まれつつある原始惑星系円盤で劇的な化学変化」、科学ライブショー「ユニバース」、国立科学技術館、2014 年 4 月 5 日
- [38] 坂井南美「アルマ望遠鏡で挑む星の誕生と星間化学」、朝日カルチャーセンター「アルマ望遠鏡が解き明かす宇宙の謎」、横浜、2014 年 8 月 30 日

6.5 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。

6.5.1 レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展

本研究室では、レーザー光を用いた気体分子の配向制御技術の開発と配列あるいは配向した分子試料

を用いた応用実験を進めている。分子の向きが揃った試料を用いることが出来れば、従来、空間平均を取って議論しなければならなかった多くの実験を格段に明瞭な形で行うことが出来る。そればかりでなく、化学反応における配置効果を直接的に調べることができるのを始めとし、物理現象における分子軸や分子面とレーザー光の偏光方向との相関や分子軌道の対称性や非対称性の効果を直接調べることができるなど、全く新しい実験手法を提供できる。実際、配列した分子試料の有効性は、 I_2 分子中の多光子イオン化過程を、時間依存偏光パルスを用いて最適制御することに成功したり (T. Suzuki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 133005 (2004))、配列した分子中からの高次高調波発生実験において、電子のド・ブロイ波の打ち消しあいの干渉効果を観測することに成功したり (T. Kanai *et al.*, Nature (London) **435**, 470 (2005)) するなどの、本研究室の成果でも実証されている。

分子の配向制御については、静電場とレーザー電場の併用により、先に 1 次元的および 3 次元的な分子の配向が可能であることの原理実証実験に成功した。これらの実験は、分子の回転周期に比べてレーザー光のパルス幅が十分長い、いわゆる断熱領域で行われたものである。この場合、分子の配向度は、レーザー強度に追従して高くなり、レーザー強度が最大のとときに配向度も最大となる。一方、光電子の観測や高精度の分光実験では、高強度レーザー電場が存在しない状況で試料分子の配向を実現することが望まれる。本研究室では、静電場とレーザー電場の併用による手法が断熱領域で有効なことに着目し、分子の回転周期 T_{rot} に比べて立ち上がりのゆっくりしたパルスをピーク強度付近で急峻に遮断することにより、断熱領域での配向度と同等の配向度を高強度レーザー電場が存在しない状況下で実現する全く新しい手法を提案した (Y. Sugawara *et al.*, Phys. Rev. A **77**, 031403(R) (2008))。最近、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、分子の配向に寄与してい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。

最近、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、 $\text{C}_6\text{H}_5\text{I}$ 分子を用い、本手法の汎用性の実証も行った。一方、Even-Lavie valve を用いても、OCS や $\text{C}_6\text{H}_5\text{I}$ 分子の配向度は、0.01 のオー

ダーであり、劇的な配向度の増大を図ることは困難であることが明らかになった。この困難は、回転量子状態が Boltzmann 分布している thermal ensemble では、いわゆる right way に向く状態と wrong way に向く状態が混在していることに起因している。本研究室では、配向した分子試料を用いた分子内電子の立体ダイナミクス (electronic stereodynamics in molecules) に関する研究の推進を目指しており、配向度の高い分子試料の生成が不可欠である。そこで、初期回転量子状態を選別した試料に対し、静電場とレーザー電場を併用する手法や非共鳴 2 波長レーザー電場を用いる手法により高い配向度の実現を目指すこととした。そして、主として対称コマ分子の状態選別に適した六極集束器 (hexapole focuser) と主として非対称コマ分子の状態選別に適した分子偏向器 (molecular deflector) を組み込んだ実験装置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) (2015))。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、約 150 fs であった。分子が配列・配向している様子は、フェムト秒プローブパルスで生成された多価イオンからクーロン爆裂で生成されたフラグメントイオンを 2 次元イオン画像化法で観測した。配列度を $\langle \cos^2 \theta_{2D} \rangle$ (θ_{2D} はレーザー光の偏光方向と分子軸 (ここでは C-I 軸) のなす角 θ の 2 次元検出器面への射影) で評価すると、レーザー電場を遮断後に、5–10 ps 程度高い配列度を維持できることが明らかとなった。一方、観測されるフラグメントイオンのうち、検出器面の側面に観測されるものの割合 N_{up}/N_{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 次元配向制御の実現に世界で初めて成功した。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-ジプ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-ジプ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。

本年度は、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の実験を推進した。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 $\langle \cos^2 \theta_{2D} \rangle > \sim 0.1$ 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。この干渉計型の光路を用いれば、2 波長間の相対位相の測定結果を干渉計の一つのアームの反射ミラーの位置合わせにフィードバックすることにより、プラズマシャッター動作時の相対位相の揺らぎを補償する効果も期待できる。既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。

6.5.2 配列した分子中から発生する高次高調波の楕円率依存性

近年、配列した分子中から発生する高次高調波を観測することにより、分子軌道に関する情報を抽出する研究が大変注目されている。Itatani らは、非断熱的に配列させた N_2 分子を用い、分子の配列方向に対し様々な方向に偏光したプローブ光を照射して発生する高調波のスペクトルを観測し、Fourier slice theorem に基づいて、 N_2 分子の分子軌道を再構成して見せた (J. Itatani *et al.*, Nature (London) **432**, 867 (2004))。本研究室では先に、配列した分子中からの高次高調波発生実験において、特に CO_2 分子を試料とした場合、再結合過程における電子のド・ブロー波の量子干渉効果を世界で初めて観測することに成功した (T. Kanai *et al.*, Nature (London) **435**, 470 (2005))。観測された効果は、詳細な量子力学的計算でも再現されているが、直感的な描像として、 CO_2 分子の HOMO の対称性 (π_g) を決めている両端の O 原子近傍からトンネルイオン化した電子波束が再結合時に破壊的な干渉を起こす 2 中心干渉効果で説明できる。本成果は、一分子中で光の一周期以内で起こる電子のド・ブロー波の量子干渉効果という基礎物理学的な興味に加え、この量子干渉効果を用いることにより分子構造 (核間距離) を 1 フェムト秒オーダーの極限的短時間精度で決定できることから当該分野で大変注目された。

最近 Morishita らは、時間依存 Schrödinger 方程式を数値的に解くことによって得られる正確な再衝突電子波束を用いることにより、高次高調波スペクトルから原子や分子の構造に関する情報を抽出できる可能性を指摘した (T. Morishita *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 013903 (2008))。すなわち、高調波スペクトル $S(\omega)$ を運動エネルギーの関数である再衝突電子波束 $W(E)$ とイオン化の逆過程である光放射再結合断面積 $\sigma(\omega)$ を用いて $S(\omega) = W(E)\sigma(\omega)$ のように表すことができ、高調波スペクトル $S(\omega)$ を実験で観測し、数値計算から求められた正確な再衝突電子波束 $W(E)$ を用いることにより原子や分子の構造を反映した再結合断面積 $\sigma(\omega)$ を評価できると期待される。ここで注意すべきことは、電子波束が再衝突して (特にカットオフに近い) 高調波を発生するとき、レーザー電場強度がほぼゼロになっており、外部電場がないときの再衝突断面積 $\sigma(\omega)$ を評価できることである。このアプローチに従って、本研究室では電気通信大学量子・物質工学科の梅垣俊仁博士、森下亨博士、渡辺信一博士、および、カンザス州立大学物理学科の Anh-Thu Le 博士との共同研究において、希ガス原子 Ar, Kr, Xe 中からの高次高調波スペクトルを観測し、正確な再衝突電子波束 $W(E)$ を用いて再結合断面積 $\sigma(\omega)$ を評価するとともに、理論計

算から求められた $\sigma(\omega)$ と比較することによりその妥当性を検証した (S. Minemoto *et al.*, Phys. Rev. A **78**, 061402(R) (2008))。上記の考え方をさらに発展させることにより、原子分子に関するいわゆる「完全実験」の目的である全ての双極子行列要素の振幅と位相を決めることも可能になると期待される。直線分子については、配列した分子から発生する高次高調波の偏光特性を調べることにより、必要な情報を得ることができると考えられる。

特に、分子から発生する高次高調波の楕円率依存性は、最外殻軌道の形状や対称性の影響を強く受けることが知られている (T. Kanai *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 053002 (2007))。しかし、これまで高次高調波スペクトルの楕円率依存性を系統的に調べた例はない。分子軌道に関する詳細な情報を得るためには、多くの回数について系統的に調べることが重要である。そこで本研究室では、配列した N_2 、 O_2 、 CO_2 分子について高次高調波の楕円率依存性をイオン化ポテンシャル近傍の 9 次高調波からカットオフ近傍まで系統的に観測した。

分子を配列させるため、Ti:sapphire レーザーパルス (中心波長 ~ 800 nm、パルス幅 ~ 50 fs) の一部をポンプ光として試料分子に照射し、一定の遅延時間後、分子が配列した状態でプローブ光を照射して高次高調波を発生させた。ここで、 $\lambda/2$ 波長板と $\lambda/4$ 波長板の組み合わせによりプローブ光の楕円率を制御した。また、 $\lambda/2$ 波長板によりポンプ光の偏光方向を変え、配列した分子の分子軸と楕円偏光したプローブ光の長軸が平行または垂直になるようにした。発生した高次高調波スペクトルは、斜入射型真空紫外分光器と電子増倍管により観測した。

高次高調波の強度は、基本波の楕円率が大きくなるにしたがって、一般に単調に減少する。これは、高次高調波の発生メカニズムを説明する 3 ステップモデルに基づいて考えると、楕円率を大きくするほどレーザー電場中で電子波束の重心が横方向にずれ、再衝突する際に親イオンとの重なりが小さくなるためである。また、楕円率が同じであれば、高次の高調波ほどレーザー電場中で駆動される電子波束の重心のずれが大きくなるため、一般に楕円率依存性がより急激になる傾向がある。実際、希ガス (Kr) や N_2 分子 (最高被占軌道 HOMO の対称性が σ_g) を試料として測定すると、次数が高くなるにつれて楕円率依存性が急になる様子が観測された。また、 N_2 分子では、分子軸と楕円偏光した基本波の長軸が平行な時の方が、垂直な時よりも楕円率依存性がより急であった。これは、窒素分子の HOMO の形状を反映した結果であると考えられる。

それに対し、HOMO の対称性が π_g である O_2 分子や CO_2 分子では、3 ステップモデルから直感的には予測できない楕円率依存性が観測された。まず、プラトー領域の高調波について、配列した CO_2 分子の方向と楕円偏光したプローブ光の長軸方向が平行な時 (平行配置) と垂直な時 (垂直配置) で楕円率依存性を詳細に調べた。2007 年の PRL 論文 (T. Kanai *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 053002 (2007)) では、3 ステップモデルから予測される直感的な関係 (垂直配置の方が平行配置よりも楕円率の増大に伴う高調

波強度の減少が緩やかになる)が観測されたが、分子試料を配列するためのポンプ光とプローブ光の強度の組み合わせとして計6つの場合について調べたところ、強度の組み合わせにより、直感的な関係と逆の関係になることを初めて見出した。これは気体分子の配列状態や量子干渉効果が複雑に関与している結果と考えられる。一方、イオン化限界近傍の高調波では、3ステップモデルからの予想に反して直線偏光の時よりも楕円偏光の時に高調波強度が増大する現象が最近報告された(H. Soifer *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 143904 (2010))が、本研究室ではこの現象がプローブ光の強度に敏感であることを初めて見出した。これは、上記の現象にイオン化ポテンシャルや励起状態のダイナミック AC Stark シフトが関与していることを強く示唆するものである。

6.5.3 硫化カルボニル分子のトンネルイオン化における配向依存性

フェムト秒高強度レーザーパルスの照射による原子・分子のトンネルイオン化は、超短パルス高強度レーザー電場と原子・分子の相互作用における基礎過程であるとともに、近年「再衝突物理 (recollision physics)」として注目されているトンネルイオン化した電子が高強度レーザー電場中で高い運動エネルギーを得て親イオンに再衝突する際に発現する高次高調波発生、非段階的2重イオン化、高エネルギー電子の発生などの興味深い物理現象の第1ステップであることからその詳細な理解は極めて重要である。原子に対するトンネルイオン化確率は、Ammosov-Delone-Krainov (ADK) モデル (M. V. Ammosov *et al.*, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **91**, 2008 (1986) [Sov. Phys. JETP **64**, 1191 (1986)]) が成功を取っており、代表的な2原子分子については、分子軌道の対称性と漸近的な振る舞いを考慮して ADK モデルを拡張した MO-ADK モデル (X. M. Tong *et al.*, Phys. Rev. A **66**, 033402 (2002)) によりトンネルイオン化の配向依存性を予言することができる。しかし、3原子分子以上の大きな分子のトンネルイオン化の配向依存性を予言できる理論は確立されていない。

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。今年度は、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 $\text{OCS}^+ \rightarrow \text{S}^+ + \text{CO}$ (I)、 $\text{CO}^+ + \text{S}$ (II)、 $\text{CS}^+ + \text{O}$ (III)、及び $\text{O}^+ + \text{CS}$ (IV) の様に様々な解離の仕方を示す。今回、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、上記の解離チャン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) イオン化しやすいくことを見出した。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。これらの発見は、非対称極性分子のトンネルイオン化の配向依存性を予言する理論モデルの構築に資する極めて重要な知見である。

6.5.4 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

近年、高強度電子線源と加速器関連技術の進歩を背景として X 線自由電子レーザーの開発とその応用研究が世界的に注目されている。日本では、理化学研究所の X 線自由電子レーザー施設 SACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) が 2011 年 6 月 7 日 16 時 10 分に 1.2 Å の X 線レーザーの発振に成功し、現在では X 線レーザーパルスを利用した様々な応用研究に供されている。本研究室では、高エネルギー加速器研究機構の柳下明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。

本年度、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 $2p$ 光電子の回折像を観測した。配列した分子試料を用いて観測された光電子の回折像とランダム配向した分子試料を用いて観測されたそれとの間には光電子の角度分布に明瞭な違いが確認できた。また、配列した分子試料を用いて観測された光電子の回折像を、分子の角度分布を考慮に入れた理論計算により再現することに成功した。このことは、上記の「超高速光電子回折法」の原理実証に成功したことを意味する。現状では、マシンタイムの制約から分子試料の配列度の最適化が不十分のため、光電子の干渉縞の観測には至っておらず、分子構造の決定精度には限りがあるが、今後分子試料の配列度を高め、ポンプ-プローブ法の導入により分子の構造変化の超高速ダイナミクスを明らかにするなど「超高速光電子回折法」の確立を目指す予定である。本研究は、高エネルギー加速器研究機構の柳下明教授を始めとし、中嶋亨氏 (高エネルギー加速器研究機構、平成 27 年 4 月より高輝度光科学研究センター)、寺本高啓氏 (立命館大学)、赤木浩氏 (日本原子力研究開発機構)、藤川高志

氏(千葉大学)、間嶋拓也氏(京都大学)、小川奏氏(理化学研究所)、富樫格氏(高輝度光科学研究センター)、登野健介氏(高輝度光科学研究センター)、水流翔太氏(千葉大学)、和田健氏(高エネルギー加速器研究機構)、矢橋牧名氏(理化学研究所)との共同研究である。

6.5.5 配列した分子中から発生する第三高調波の偏光特性の時間発展の評価

近年の超短パルスレーザー技術の進歩により、Ti:sapphire レーザー増幅システムからの出力である中心波長 800 nm の近赤外領域での時間依存偏光パルスの発生と制御技術は本研究室でも既に開発済みであるが、紫外領域の時間依存偏光パルスの発生と制御技術は未開拓の課題である。配列した分子中から発生する第三高調波の偏光状態を時間分解して調べることは、配列した分子中からの第三高調波の発生メカニズムのより詳細な理解に繋がるであろうし、偏光状態の時間分解が一層困難な高次高調波の偏光状態を推察するための手掛かりが得られる可能性もある。また、レーザー電場のベクトルとしての性質を最大限生かすことのできる時間依存偏光パルスの発生と制御手法の波長域の拡大は工学的にも意義深い。そこで、一昨年度より配列した分子中から発生した第三高調波の時間依存偏光特性を評価するため、偏光分解干渉法の開発を進めている。この測定により、分子種に固有の分極率や超分極率、さらに分子座標系におけるそれらの空間的な成分を評価できると期待される。

その目的のため、これまでに、時間に依存する偏光を測定することができる干渉計を開発し、光学部品の固定法や干渉計の配置を改良することによって、最終的に紫外領域の超短パルスに対しても位相差で $\pi/20$ 以下、楕円偏光の楕円率で 0.1 以下の精度で評価できる安定性を達成できた。開発した干渉計を使用し、配列した二酸化炭素分子から発生する第三高調波の偏光状態を観測したところ、位相整合の効果を反映して媒質の圧力によって偏光状態が大きく変化することを明らかにした。

一方、配列した分子中から発生する第三高調波の発生メカニズムの詳細を解明し、強度や偏光状態を制御するためには圧力依存性を系統的に調べる必要がある。そこで、本年度は、試料セルと排気系を更新して圧力を精密・簡便・安定的に変えられるように改良した。同時に、連続的な観測を行えるようにデータ取得プログラムを最適化した。このシステムを用いて圧力依存性を調べたところ、第三高調波の楕円率は圧力とともに単調に増加するわけではなく、3ないし4段階ほどの異なる過程に分かれて変化することが分かった。圧力の絶対値に違いはあるが、同様な傾向は窒素分子や酸素分子でも見られ、配列した気体を媒質とした時の第三高調波発生における一般的な現象であることを示唆している。同様な現象はより高次の高調波についても起こりうると考えられ、媒質中における発生・伝播を含めて統一的に理解するためのシミュレーションコードを開発中である。

6.5.6 その他

ここで報告した研究成果は、研究室のメンバー全員と学部4年生の特別実験で本研究室に配属された飯田耀君、室谷悠太君(夏学期)、及び、夏沛宇君、長野晃士君(冬学期)の活躍によるものである。本年度は、活発な研究活動の結果、加藤康作君が、平成26年度日本分光学会年次講演会若手ポスター賞(共同研究者: 峰本紳一郎、酒見悠介、酒井広文)を受賞し、中川桂君が、平成26年度理学系研究科研究奨励賞(修士課程)を受賞した。おめでとう。理学系研究科研究奨励賞(修士課程)は本研究室では基盤晃久君(平成20年度)、加藤康作君(平成22年度)に続き、3人目の受賞となる。また、加藤康作君、酒見悠介君、文提會君の3名が博士(理学)の学位を取得し、中川桂君が修士(理学)の学位を取得した。

なお、今年度の研究活動のうち項目1-3は、科学研究費補助金の基盤研究(A)「配向した分子中から発生する高次高調波の物理過程の解明」(課題番号26247065、研究代表者: 酒井広文)に加え、文部科学省「光・量子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発 最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」、及び、「最先端研究基盤事業 コヒーレント光科学研究基盤の整備」からの支援も受けて行われた。また項目5は、主として科学研究費補助金の基盤研究(C)「配列した分子試料を用いた紫外パルス光源の高能化」(課題番号24560041、研究代表者: 峰本紳一郎)の支援を受けて行われた。ここに記して謝意を表す。

<受賞>

- [1] 加藤康作、平成26年度日本分光学会年次講演会若手ポスター賞(共同研究者: 峰本紳一郎、酒見悠介、酒井広文)、2014年5月28日。
- [2] 中川桂、平成26年度理学系研究科研究奨励賞(修士課程)、2015年3月24日。

<報文>

(原著論文)

- [3] Je Hoi Mun, Daisuke Takei, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Laser-field-free orientation of state-selected asymmetric top molecules," *Phys. Rev. A* **89**, 051402(R) (5 pages) (2014).
- [4] Kosaku Kato, Shinichirou Minemoto, Yusuke Sakemi, and Hirofumi Sakai, "Phase differences of near-threshold high-order harmonics generated in atoms and molecules," *Phys. Rev. A* **90**, 063403 (10 pages) (2014).

(学位論文)

- [5] Kosaku Kato, "Observation of the phase differences of near-threshold high-order harmonics generated in atoms and molecules," Doctor's thesis, September 2014.
- [6] Je Hoi Mun, "Laser-field-free and field-free orientation of state-selected molecules," Doctor's thesis, March 2015.

- [7] Yusuke Sakemi, “Studies on interactions of molecules with intense femtosecond laser pulses,” Doctor’s thesis, March 2015.
- [8] 中川桂, 「配列した分子中から発生する高次高調波の楕円率依存性」, 修士論文, 2015年3月.

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [9] Hirofumi Sakai, “Laser-field-free three-dimensional molecular orientation,” Stereodynamics 2014, St. Petersburg, Russia, August 18, 2014.

一般講演

- [10] Kosaku Kato, Shinichirou Minemoto, Yusuke Sakemi, and Hirofumi Sakai, “Observation of phase difference of near-threshold high-order harmonics generated in nitrogen molecules,” International Symposium on “The Forefront of Ultrafast Spectroscopy,” RIKEN (Wako Campus), Saitama, Japan, May 26, 2014.
- [11] Kyo Nakajima, Takahiro Teramoto, Shinichiro Minemoto, Shota Tsuru, Takashi Fujikawa, Takuya Majima, Hiroshi Akagi, Ken Wada, and Akira Yagishita, “Photoelectron diffraction from laser-aligned molecules with an x-ray free electron laser,” The 11th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, Sendai, Japan, October 7, 2014.
- [12] Yusuke Sakemi, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Orientation dependence in multi-channel dissociative ionizations of OCS molecules,” The 4th Ultrafast Dynamic Imaging of Matter (UDIM 2015), Grindelwald, Switzerland, March 11, 2015.
- [13] Daisuke Takei, Je Hoi Mun, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Laser-field-free three-dimensional molecular orientation,” The 4th Ultrafast Dynamic Imaging of Matter (UDIM 2015), Grindelwald, Switzerland, March 9–11, 2015.

(国内会議)

一般講演

- [14] 加藤康作, 峰本紳一郎, 酒見悠介, 酒井広文, 「イオン化閾値付近の高次高調波の位相差の測定」, 2014年第75回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 2014年9月19日.
- [15] 酒見悠介, 峰本紳一郎, 飯田耀, 酒井広文, 「硫化カルボニル分子のトンネルイオン化の配向依存性」, 2014年第75回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 2014年9月19日.
- [16] 文提會, 室谷悠太, 峰本紳一郎, 酒井広文, 「状態選別した分子の完全にフィールドフリーな条件下での配向制御」, 2014年第75回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 2014年9月19日.

- [17] 中嶋亨, 寺本高啓, 峰本紳一郎, 間嶋拓也, 赤木浩, 和田健, 柳下明, 「超高速光電子回折法の開発」, 第8回分子科学討論会, 広島大学東広島キャンパス, 2014年9月21日.
- [18] 中嶋亨, 寺本高啓, 赤木浩, 藤川高志, 間嶋拓也, 峰本紳一郎, 小川奏, 酒井広文, 富樫格, 登野健介, 水流翔太, 和田健, 矢橋牧名, 柳下明, 「X線自由電子レーザーによる配列分子の光電子回折」, 第28回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス, 2015年1月11日.
- [19] 文提會, 峰本紳一郎, 酒井広文, 「回転量子状態を選別した分子の完全にフィールドフリーな状況下での配向制御」, 一般社団法人レーザー学会学術講演会第35回年次大会, 東海大学高輪校舎, 2015年1月12日.
- [20] 酒見悠介, 峰本紳一郎, 長野晃士, 酒井広文, 「硫化カルボニル分子のトンネルイオン化確率の分子配向依存性」, 一般社団法人レーザー学会学術講演会第35回年次大会, 東海大学高輪校舎, 2015年1月12日.
- [21] 中川桂, 峰本紳一郎, 酒井広文, 「配列した分子から発生する高次高調波のイオン化限界近傍における楕円率依存性に対するレーザー強度の効果」, 一般社団法人レーザー学会学術講演会第35回年次大会, 東海大学高輪校舎, 2015年1月12日.
- [22] 中川桂, 峰本紳一郎, 酒井広文, 「配列した二酸化炭素分子から発生する高次高調波の楕円率依存性」, 2015年第62回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 2015年3月14日.
- [23] 酒見悠介, 峰本紳一郎, 長野晃士, 酒井広文, 「硫化カルボニル分子の多チャンネル解離性イオン化における角度依存性」, 2015年第62回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 2015年3月14日.
- [24] 文提會, 夏沛宇, 峰本紳一郎, 酒井広文, 「状態選別した分子のフィールドフリーな配列および配向制御」, 2015年第62回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 2015年3月14日.
- [25] 中嶋亨, 寺本高啓, 赤木浩, 藤川高志, 間嶋拓也, 峰本紳一郎, 小川奏, 酒井広文, 富樫格, 登野健介, 水流翔太, 和田健, 矢橋牧名, 柳下明, 「超高速光電子回折法の開発II」, 日本物理学会第70回年次大会 (2015年), 早稲田大学早稲田キャンパス, 2015年3月24日.

6.6 五神研究室

本研究室では、光と物質の物理学の新たな側面を探ることを狙い研究を進めている。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の実験を進め、これまでに報告された中で、最低温度の励起子気体を生成することに成功し、BECの直接的観測法を開発した。一方、従来の光物性研究の手法では捉えることが困難な、光励起された固体の電子励起状態を直接かつ精緻に観測するため、狭線幅レーザーを光源とする角度分解レーザー光電子分光法を開発した。また、微細加工技術を駆使して物質系の対称性を制御し、新たな光をコントロールする手法を開拓している。具体的には、キラル対称性をもつ人工ナノ構造、3回対称性をもつ系における角運動量保存則、ベクトル光波制御などに着目した研究を進めている。また、物理学教室における活動と工学系研究所附属光量子科学研究センターの活動を密接に連携させてすすめている。この連携のもとで、高強度パルス光によるコヒーレント軟 X 線を用いた新たな分光計測手法の開拓と実証、高効率高分解能角度分解レーザー光電子分光法の開発、フェルミオン冷却原子系の実験が本格的に始動した。昨年度に引き続き、文部科学省、最先端研究基盤事業「コヒーレント光科学研究基盤の整備」プログラムのもとで、理化学研究所との共同で高輝度高繰り返し率の新型コヒーレント光源（“フォトンリング”施設）の開発に取り組んだ。本年度に進めた研究を以下に紹介する。

6.6.1 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。そこで我々はこれまでに、水素原子様の Lyman 遷移を励起子についても観測することで、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実現したときに、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）を用いて、生成した単位時間あたりのパラ励起子密度に対して蓄積された密度を評価した。その結果、励起子間の 2 体の衝突による励起子の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 転移を観測することを試みた。不均一歪を印加することで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スペクトルから確認し、この温度で BEC 転移に必要な 10^9 個程度のパラ励起子を蓄積した。その結果、理想 Bose 粒子の 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、励起子が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、全励起子に体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。不均一歪の大きさや勾配を変化させ、様々な深さ・勾配のトラップポテンシャルを形成したところ、100 mK を下回る世界最低温度の励起子系を実現したこと、および低密度極限における励起子温度がポテンシャルの形状によって異なることを発見した。そこで印加された応力の関数として系統的に整理したところ、応力が大きいほど到達温度が低下することが分かった。励起子-音響フォノン相互作用による励起子の冷却ダイナミクスを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。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子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、サブケルビン温度でパラ励起子がトラップ中で蓄積される様子を詳細に観測し、寿命や拡散係数、移動度といったダイナミクスを決定する重要なパラメータの抽出に必要な情報を取得した [25, 13]。

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歪トラップした $1s$ パラ励起子の誘導吸収イメージを取得することに成功した [24]。また、このとき得られる誘導吸収スペクトルが印加応力に依存して変化することを見出し、これを理論的に取り扱うため $1s$ 準位だけでなく $2p$ 準位の印加応力依存性の導出

を進めた [41]。さらに、100mK 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、100mK の温度を実現しつつ誘導吸収イメージを取得することに成功した [49]。

冷却原子実験による新奇量子多体系の実現と原子核物理への応用

中性子星に存在する中性子物質は二成分フェルミ粒子系であり、特に希薄な領域では粒子間の相互作用は s 波散乱長で特徴付けられる。我々は希薄中性子物質と同じ温度領域と相互作用領域を同時に満たす極低温フェルミ原子気体を用いて状態方程式 (EOS) を決定し、原子核物理研究との融合を目指している。我々は既にフェルミ粒子である ${}^6\text{Li}$ 原子で超流動状態を実現し、小さな中性子星を得ている。中性子物質はゼロ温度極限に相当し、超流動密度が最大になる条件で測定を行えばよいが、フェルミ多体系の有限温度には臨界現象等の魅力的な物理が豊富に含まれているため、本研究では温度を含めた EOS の決定を目指している。我々は強相関フェルミ多体系の局所的な熱力学量を測定する為、局所的な密度、圧力、化学ポテンシャルの定量評価を実現した。また温度を測定する為、同位体である ${}^7\text{Li}$ 原子を温度計としてトラップに混ぜ、フェルミ多体系の温度測定の準備を進めた。今後 ${}^7\text{Li}$ 原子による温度評価の精度を向上し、温度を含めた BCS-BEC クロスオーバー全域の状態方程式の決定を目指す。成果として相互作用している粒子系の臨界現象とその熱力学関数の統一理解等が期待される。

ボソンとフェルミオンの同時トラップと、その混合系の冷却手順の最適化を行う過程で、我々はフェルミ超流動とボース凝縮が同時にトラップ中に存在する、ボース・フェルミ混合超流動の実現に成功した。図 6.6.1 はフェルミ粒子のクーパ対の重心運動量分布と、ボース粒子の運動量分布を示している。1938 年に ${}^4\text{He}$ (boson) の超流動が、1972 年に ${}^3\text{He}$ (fermion) の超流動が発見されて以来、それらの超流動を混合した系は未だ実現されておらず、この混合超流動は 2014 年に我々とパリのグループでほぼ同時期に実現された新規の量子多体系である。今後の展開として、 ${}^6\text{Li}$ と ${}^7\text{Li}$ 間のフェッシュバハ共鳴を用いる事により、ボース・フェルミ混合超流動体間の相互作用が制御可能になる。これにより相関や磁気不純物の物性探査が可能になり、これまで冷却原子系は不純物のない実験系と謳っていたが、これからは不純物による量子効果も系統的に探査可能な実験系と成り得る。

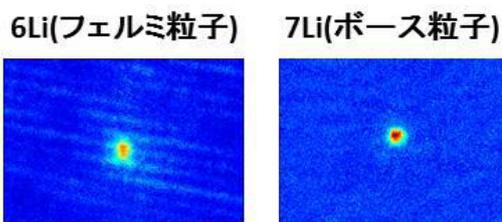


図 6.6.1: ${}^6\text{Li}$ 原子と ${}^7\text{Li}$ 原子を用いて実現した、ボース・フェルミ混合超流動を示す運動量分布の測定結果

6.6.2 非自明な光学現象の探索とその応用

プローブ光偏光変調を用いた高精度テラヘルツ偏光計測手法の開発

テラヘルツ波を用いた偏光計測は、非接触ホール測定や構造の異方性計測、生体分子のキラリティー検出など、様々な応用が期待されている。これまでのテラヘルツ偏光計測のほとんどは、テラヘルツ領域で動作する偏光子であるワイヤグリッドポライザー (WGP) を用いる手法が用いられている。この場合、偏光計測の精度は、WGP の消光比で制限されてしまうという問題がある。

我々はこれまでに、三回回転対称性を有する非線形光学結晶を用いたテラヘルツ発生において、励起光とテラヘルツ光の偏光状態の間に、非常にシンプルな選択側が成立することを見出している。今回我々は、このような三回回転対称性を有する非線形光学結晶をテラヘルツ波の検出結晶をして用い、なおかつテラヘルツ波検出のための赤外プローブ光に対して光弾性変調器を用いて周期的な偏光変調を施すことにより、WGP を用いない新たなテラヘルツ偏光検出手法を開発した [6]。実験系の模式図を図 6.6.2(a) に示す。

この手法は WGP を回転させる必要がないため、テラヘルツ波の各ベクトル成分を一回の遅延ステージのスキャンで測定することが可能である。実際に測定したテラヘルツ波のベクトル波形を図 6.6.2(b) に示す。この手法では、WGP の消光比や、配置の相対位置の差の問題が生じないため、高い精度での偏光計測が可能となる。図 6.6.2(c) に示すように、1 秒以下の積算時間で、0.1mrad の測定精度を実現することに成功した。現在、さらにこの測定精度を向上させる手法開発を進めるとともに、超高精度テラヘルツ偏光計測で新たに観測される物理現象の探索を進めている。

非線形光学結晶を用いたテラヘルツ広帯域光渦の発生

我々は、三回回転対称性を有する非線形光学結晶からのテラヘルツ放射は、入射光の偏光を ϕ 回転させると、放射される THz 波の強度は変わらずに偏光の向きが -2ϕ 変化するという特徴を有することを発

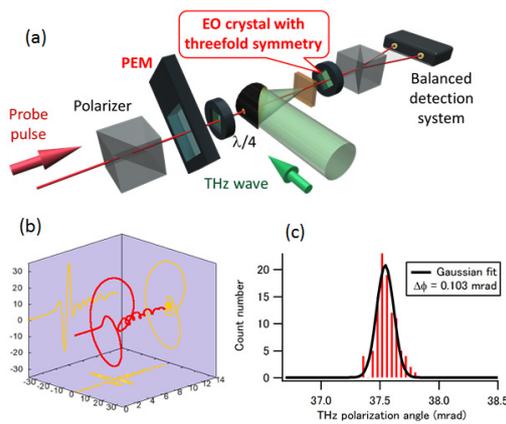


図 6.6.2: (a) 高感度テラヘルツ偏光計測の実験系の模式図 (b) 取得したテラヘルツ電場ベクトル波形の例 (c) 100 回の偏光計測結果のヒストグラム 測定時間は 660ms

見している。この特徴的な偏光依存性を利用して、結晶の向きが適切に選択された複数枚の GaP(111) 結晶を組み合わせたものを THz 発生用結晶として用いることにより、ビーム内で軸対称な偏光分布を有する広帯域ベクトルビームを THz 領域において発生させることに成功している。この広帯域なテラヘルツベクトルビームを、さらに波長板および偏光子を通すことによって、ビーム内で軸対称な位相分布を有する光渦に変換できることを見出し、実証することに成功した [4]。二次元 EO サンプリングの手法を用いて、集光点におけるビーム内の位相分布を測定したところ、確かに広い周波数領域で光渦が実現していることが明らかになった (図 6.6.3)。この光渦のトポロジカルチャージは、励起光の偏光方向を変えるだけで制御することが可能であり、テラヘルツビームを用いた新たな物質制御への応用が期待される。

6.6.3 新規コヒーレント光源開発と新しい分光手法開拓

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、とく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の解決に挑むことを計画している。本年度はまず、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た。運動エネルギーや放出角度の正確な把握を阻害する、光電子分光装置内の残留磁場を 0.13 マイクロテスラ以下に低減させ、また、電子レンズにおける電極の電位の微調整を行った。ピコ秒モード同期タンサファイア発振器の繰り返し周波数を高電子分光装置に合わせて適切に低下させ、その第四高調波を狭線幅の光電子励起用の

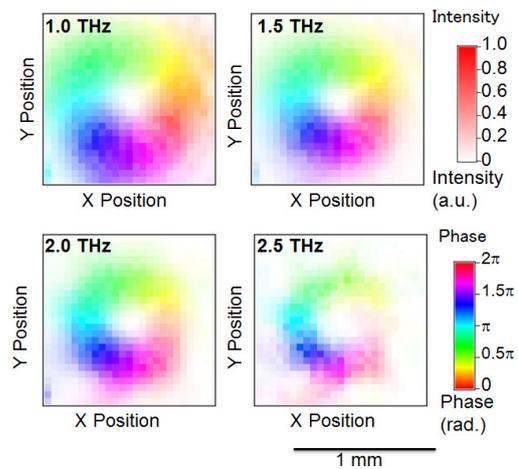


図 6.6.3: 生成したテラヘルツ光渦の強度および位相分布の測定結果

光源として使用し、6 ケルビンに冷却した多結晶の金を試験用試料として角度分解光電子分光を行うことで、完成した装置を評価した。その結果、金属界面のフェルミ縮退した電子状態を観測し、光電子分光のエネルギー分解能が約 12meV から 3.6meV に向上し、角度分解能が 0.47° から 0.33° (ただし同時測定可能範囲 ±15°) へ向上したことを確認した [52]。これは類似の装置として世界最良レベルの分解能である。

次に、同一のモード同期発振器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室温において行うことに成功し、その分散関係を観測できることを実証した。さらに、各種光電子アナライザの特性に合わせて最適な光電子放出用光源の繰り返し周波数を選択できるよう、光源技術開発をすすめた [45]。

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る「コヒーレント光科学研究基盤の整備 (H22 年度～H25 年度)」として、最先端のレーザー技術をベースと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がスタートした。本事業は東京大学と理化学研究所との連携の下に、高強度高安定高繰り返し極超短パルス光源およびテラヘルツから軟 X 線までの幅広い領域において高精度同期可能な高強度高繰り返し光源 (「フォトンリング」施設) の開発を進めることを目的とするものである。同時に、軟 X 線領域顕微画像計測装置、次

世代レーザー光電子分光装置、テラヘルツイメージング装置等の、新規光源の特性を引き出す計測装置を整備する。現在、繰り返し周波数 2.85MHz、共振器内パルスエネルギー 1mJ での超短パルス光源(中心波長 1032nm、パルス幅 520fs)のモードロック動作の確認に成功している。また、高度利用のための基盤技術の開拓を進め、テラヘルツイメージングの臨床医療応用や、電子励起過程の直接観察による太陽電池発電プロセスの解明など、新規光源の応用利用の推進を目指す。テラヘルツイメージングのキーデバイスとなるテラヘルツカメラの高感度化も進めており、その感度特性の詳細な評価手法を開発した。本事業は、工学系研究科附属光量子科学研究センターが中心になっているが、理学系研究科、工学系研究科、物性研究所に所属する本学の多数の教員の参加協力のもとで現在も進められている。

フォトンサイエンス研究機構

最先端光科学を通して既存の学術分野を横断する融合科学を創ることを目的とし、2013年10月より理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構が発足した。本機構には、光科学の最先端研究、産学連携、国際連携を担う3つの基幹部門を備え、光科学の最先端基礎研究とその応用を推進している。また、産学連携によるオープンイノベーションのモデルを実践し、知の探求にとどまらず、知の活用につなげる活動を行っている。さらに、世界からトップレベルの研究者や学生が集まる研究教育環境を整備し、基礎科学と産業を繋ぐオープンイノベーションプラットフォームを構築し、大学研究者・学生と企業人が同じ場所で活動できる環境を作り、知の“創造”と“活用”の融合による日本の産業の変革をリードすることを目指している。

この活動を進めるため、文部科学省の「革新的イノベーション創出プログラム」拠点のひとつとして、「コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点」を、本機構のもとに2013年に創設した。この事業では「個を活かす持続可能な社会」実現のため、最新のレーザー技術を駆使して、光を使ったものづくりの革新を目指すと共に、その技術を支えるための新しい光と物質の科学を創っている。

<受賞>

- [1] 小西邦昭: 平成 26 年度日本物理学会若手奨励賞受賞(領域 5), 2014 年

<報文>

(原著論文)

- [2] K. Konishi, T. Higuchi, J. Li, J. Larsson, S. Ishii, and M. Kuwata-Gonokami: Polarization-controlled circular second-harmonic generation from metal hole arrays with threefold rotational symmetry, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 135502 (2014).
- [3] N. Kanda, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami: All-photoinduced terahertz optical activity *Optics Letters* **39**, 11, 3274 (2014).

- [4] R. Imai, N. Kanda, T. Higuchi, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami: Generation of broadband terahertz vortex beams, *Optics Letters* **39**, 13, 3714 (2014).
- [5] K. Ikemiya, K. Konishi, E. Fujii, T. Kogure, M. Kuwata-Gonokami, and T. Hasegawa: Self-assembly and plasmon-enhanced ultrafast magnetization of Ag-Co hybrid nanoparticles, *Optical Materials Express* **4**, 8, 1564 (2014).
- [6] N. Nemoto, T. Higuchi, N. Kanda, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami: Highly precise and accurate terahertz polarization measurements based on electro-optic sampling with polarization modulation of probe pulses, *Optics Express* **22**, 15, 17915 (2014).
- [7] A. Amani Eilanlou, Y. Nabekawa, M. Kuwata-Gonokami, and K. Midorikawa: Femtosecond laser pulses in a Kerr lens mode-locked thin-disk ring oscillator with an intra-cavity peak power beyond 100MW, *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 082701 (2014).
- [8] T. Shimojima, Y. Suzuki, T. Sonobe, A. Nakamura, M. Sakano, J. Omachi, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, K. Ono, H. Kumigashira, A. E. Böhmer, F. Hardy, T. Wolf, C. Meingast, H. v. Löhneysen, H. Ikeda, and K. Ishizaka, Lifting of xz/yz orbital degeneracy at the structural transition in detwinned FeSe, *Phys. Rev. B* **90**, 121111(R) (2014).
- [9] P. A. Obraztsov, N. Kanda, K. Konishi, M. Kuwata-Gonokami, S. V. Garnov, A. N. Obraztsov, and Y. P. Svirko, Photon-drag-induced terahertz emission from graphene, *Phys. Rev. B* **90**, 241416(R) (2014).
- [10] S. V. Lobanov, T. Weiss, N. A. Gippius, S. G. Tikhodeev, V. D. Kulakovskii, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami, Polarization control of quantum dot emission by chiral photonic crystal slabs, *OPTICS LETTERS*, **40**, 7, 1528 (2015).

(修士論文)

- [11] 池町拓也: s 波相互作用する普遍的 Fermi 多体系の熱力学関数の実験的決定、(2015 年 3 月、東京大学大学院理学系研究科)
- [12] 石井俊太郎: 三重回転対称性を有する人工金属周期ナノ構造における非線形光学応答、(2015 年 3 月、東京大学大学院理学系研究科)
- [13] 鈴木博祐: サブケルビン領域における三次元トラップ中励起子の時空間分解分光、(2015 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

- [14] K. Yoshioka, Y. Morita, H. Suzuki, and M. Kuwata-Gonokami: Towards a stable Bose-Einstein condensate of trapped paraexcitons in Cu_2O at sub-100 mK temperatures, ISSCE-7 (The 7th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems, Hakone, (23, April, 2014) (invited)
- [15] M. Kuwata-Gonokami: Materials with Threefold Rotational Symmetry for Polarization Control of Light, The Fourth International Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics (NPO 2014), Polvijärvi, North Karelia, Finland, (30, July, 2014) (invited)
- [16] K. Konishi: Controlling circularly-polarized emission and second-harmonic generation with artificial nanostructures, The 6th IEEE International Nanoelectronics Conference, Hokkaido, Japan, (29, July, 2014) (invited)
- [17] K. Konishi and M. Kuwata-Gonokami: Polarization control of light by symmetry-controlled materials and metamaterials, Japan-Singapore International Workshop on Nanophotonics, Plasmonics and Metamaterials, Nanyang Technological University, Singapore (12, December, 2014) (invited)
- [18] K. Konishi and M. Kuwata-Gonokami: Terahertz polarization control with symmetry-controlled materials and metamaterials, Optical Terahertz Science & Technology Conference (OTST2015), San Diego, CA, USA (10, March, 2015) (invited)
- [19] K. Yoshioka: Excitons in Cu_2O : towards a stable Bose-Einstein condensate of bulk excitons at sub-Kelvin temperatures, International Winter School on the Physics of Indirect Excitons, Les Houches, France (18, March, 2015) (invited)
- 一般講演 (口頭)
- [20] N. Kanda, A. A. Eilanlou, T. Imahoko, T. Sumiyoshi, Y. Nabekawa, M. Kuwata-Gonokami, K. Midorikawa: High-Pulse-Energy Yb:YAG Thin Disk Kerr-Lens Mode-Locked Oscillator for Intracavity High Harmonic Generation, The 3rd Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'14), ALPS2-9, Yokohama, Japan, (23, April 2014)
- [21] R. Imai, N. Kanda, T. Higuchi, Z. Zheng, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami: Generation of Broadband THz vortex beam, Optical Manipulation Conference'14, OMC5-2, Yokohama, Japan, (24, April, 2014)
- [22] T. Ikemachi, A. Ito, M. Horikoshi, M. Koashi, M. Kuwata-Gonokami: Determination of the universal thermodynamic function of strongly interacting Fermi system, Workshop on the intersection of cold-atomic and nuclear physics, APCTP, Pohang, Korea, (12, May, 2014)
- [23] A. Ito, T. Ikemachi, M. Horikoshi, M. Koashi, M. Kuwata-Gonokami: High resolution absorption imaging for determination of the EOS, Workshop on the intersection of cold-atomic and nuclear physics, APCTP, Pohang, Korea, (12, May, 2014)
- [24] K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami: Mid-infrared absorption imaging of trapped paraexcitons in cuprous oxide, Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2014), San Jose, CA, USA (9, June, 2014)
- [25] H. Suzuki, Y. Morita, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami: Build-up dynamics of degenerate excitons luminescence at sub-K temperature in a trap in cuprous oxide, Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2014), San Jose, CA, USA (9, June, 2014)
- [26] N. Kanda, K. Konishi, N. Nemoto, K. Midorikawa, M. Kuwata-Gonokami: Real-time broadband spectroscopic terahertz imaging with diffraction grating and high-sensitivity terahertz camera, Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2014), San Jose, CA, USA (12, June, 2014)
- [27] S. Lobanov, T. Weiss, N. Gippius, S. Tikhodeev, V. Kulakovskii, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami: Emission of Quantum Dots from Waveguides with Chiral Spatially-Modulated Upper Part, 2014 IEEE Photonics Conference (IPC), Hyatt Regency La Jolla, San Diego, CA, USA (15, Oct., 2014)
- 一般講演 (ポスター)
- [28] Y. Morita, H. Suzuki, K. Yoshioka, and M. Kuwata-Gonokami, Kuwata-Gonokami: Systematic analysis of quantum degenerate excitons in Cu_2O using a dilution refrigerator, ISSCE-7 (The 7th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems, Hakone, (23, April, 2014) (poster)
- [29] H. Suzuki, Y. Morita, K. Yoshioka, and M. Kuwata-Gonokami: Dynamics of quantum degenerate excitons at sub-K temperature in cuprous oxide, ISSCE-7 (The 7th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems, Hakone, (23, April, 2014) (poster)
- [30] Y. Morita, H. Suzuki, K. Yoshioka and M. Kuwata-Gonokami: Luminescence and Lyman spectroscopy of excitons in Cu_2O using a dilution refrigerator, International Winter School on the Physics of Indirect Excitons, Les Houches, France (17, March, 2015) (poster)
- [31] H. Suzuki, Y. Morita, K. Yoshioka and M. Kuwata-Gonokami: Space- and time-resolved luminescence spectroscopy of trapped excitons at sub-K temperature in cuprous oxide, International Winter School on the Physics of Indirect Excitons, Les Houches, France (17, March, 2015) (poster)
- 国際会議主催

- [32] M. Kuwata-Gonokami: Bose-Einstein condensation of excitons in a bulk semiconductor crystal at dilution temperature, Workshop -Quantum phenomena in photo-controlled systems-, Koshiba Hall, The University of Tokyo, (26, April, 2014)
- (国内会議)
- 招待講演
- [33] 五神真: COI 拠点「コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点」の構想と展望第 20 回ナノ量子情報エレクトロニクスセミナー, 生産技術研究所, 東京大学, (2014/4/4)
- [34] 五神真: 対称性と偏光制御, 地域産学官連携科学技術振興事業費補助金「ナノ量子情報エレクトロニクス連携研究拠点」プロジェクト, 公開シンポジウム『ナノ量子情報エレクトロニクスの新展開』, 伊藤国際学術研究センター, 東京大学, (2014/5/20)
- [35] 五神真: Photon Science and Technology towards Laser Process Innovation, SCJsymposium2014, 大型レーザーによる高エネルギー密度科学研究の新展開, 学士会館, 東京大学, (2014/6/3)
- [36] 小西邦昭: テラヘルツベクトルビームと縦電磁場と物性への応用, 日本光学会年次学術講演会 (OPJ: Optics & Photonics Japan 2014)「偏光と渦とその応用」筑波大学東京キャンパス文京校舎, (2014/11/5)
- [37] 菅哲朗, 磯崎瑛宏, 根本夏紀, 神田夏輝, 小西邦昭, 高橋英俊, 五神真, 松本潔, 下山勲: 機械構造変形によるテラヘルツチューナブル MEMS スパイラルメタマテリアル, レーザー学会第 35 回 年次大会, 東海大学, (2015/01/12)
- [38] 五神真: レーザープロセッシングの革新に向けた光科学技術の展開, 第 82 回レーザー加工学会講演会, 産業技術総合研究所臨海副都心センター, (2015/01/13) (基調講演)
- [39] 五神真: イノベーションにおける産学連携, NEDO 2015/2/13: NEDO FORUM, イノベーションで拓く明るい未来 - NEDO 成果報告会 -, (2015/02/13)
- [40] 小西邦昭: 人工ナノ構造の対称性を活用した円偏光制御に関する研究, 日本物理学会第 70 回年次大会, 領域 5 若手奨励賞受賞記念講演, 早稲田大学 (2015/3/22)
- 一般講演
- [41] 吉岡孝高, 蔡恩美, 森田悠介, 鈴木博祐, 五神真: 亜酸化銅 1s パラ励起子の歪誘起トラップにおける 1s-2p 誘導吸収スペクトル, 日本物理学会 2014 秋季大会プログラム, 中部大学, (2014/9/8)
- [42] 池町拓也, 伊藤亜紀, 堀越宗一, 小芦雅斗, 五神真: s 波相互作用する Fermi 多体系の普遍的状態方程式の実験的決定, 日本物理学会 2014 秋季大会プログラム, (2014/9/9)
- [43] 伊藤亜紀, 池町拓也, 堀越宗一, 五神真, 小芦雅斗: 相互作用する Fermi 粒子系の密度ゆらぎ, 日本物理学会 2014 秋季大会プログラム, (2014/9/9)
- [44] 鈴木裕也, 下志万貴博, 園部竜也, 坂野昌人, 大間知潤子, 吉岡孝高, 五神真, 小野寛太, 組頭広志, A. Bohmer, T. Wolf, C. Meingast, H. v. Loehneysen, 池田浩章, 石坂香子: 角度分解光電子分光で見た FeSe の常伝導電子状態, 日本物理学会 2014 秋季大会プログラム, (2014/9/9)
- [45] 大間知潤子, 吉岡孝高, 五神真: 10ps チタンサファイア発振器の縦モード制御による超高繰り返し深紫外パルス列の強度安定化, 第 75 回応用物理学会秋学術講演会, 北海道大学, (2014/9/20)
- [46] 菅哲朗, 磯崎瑛宏, 神田夏輝, 根本夏紀, 小西邦昭, 五神真, 松本潔, 下山勲: MEMS 可変スパイラルメタマテリアルのテラヘルツ応答, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 神奈川県, (2015/3/13)
- [47] 神田 夏輝, アマニ イランル, 今鉢 友洋, 住吉 哲実, 鍋川 康夫, 五神 真, 緑川 克美: 4 共振器内高次高調波発生のためのリング型共振器 Yb:YAG Thin Disk モード同期レーザー, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 神奈川県, (2015/3/14)
- [48] 鈴木裕也, 下志万貴博, 園部竜也, 中村飛鳥, 坂野昌人, 大間知潤子, 吉岡孝高, 五神真, 小野寛太, 組頭広志, A. Bohmer, F. Hardy, T. Wolf, C. Meingast, H. v. L hneysen, 笠原成, 池田浩章, 芝内孝禎, 松田祐司, 石坂香子: 角度分解光電子分光で見た FeSe の常伝導電子状態 (2), 日本物理学会 第 70 回年次大会, 早稲田大学 (2015/3/21)
- [49] 森田悠介, 鈴木博祐, 吉岡孝高, 五神真: 希釈冷凍機を用いた亜酸化銅 1s パラ励起子の中赤外吸収分光, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 早稲田大学 (2015/3/21)
- [50] 樊星, 周健治, 稲田聡明, 山崎高幸, 難波俊雄, 浅井祥仁, 小林富雄, 吉岡孝高, 大間知潤子, 五神真: パルス磁石を用いた真空複屈折の探索, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 早稲田大学 (2015/3/21)
- [51] 平野大輔, 永久保祐紀, 大間知潤子, 吉岡孝高, 五神真: 波長可変高次高調波を用いた二重スリット干渉計による内殻遷移共鳴エネルギー近傍の位相敏感複素屈折率測定, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 早稲田大学 (2015/3/22)
- [52] 嵐田雄介, 平野大輔, 大間知潤子, 吉岡孝高, 坂野昌人, 石坂香子, 五神真: 高効率な時間分解測定へ向けた飛行時間型分析器を用いた角度分解レーザー光電子分光装置の開発, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 早稲田大学 (2015/3/23)
- ポスター
- [53] 根本夏紀, 樋口卓也, 神田夏輝: プローブ偏光変調型 - 電機光学サンプリング法によるテラヘルツ波の偏光計測, 地域産学官連携科学技術振興事業費補助金「ナノ量子情報エレクトロニクス連携研究拠点」プロジェクト, 『ナノ量子情報エレクトロニクスの新展開』 公開シンポジウム, 伊藤国際学術研究センター, 東京大学, (2014/5/19-20)
- (セミナー他)

- [54] 根本夏紀, 神田夏輝, 小西邦昭, 倉科晴次, 佐々木得人, 小田直樹, 五神真: テラヘルツカメラの高感度化とその感度スペクトル評価技術の開発, テラヘルツテクノロジーフォーラム・平成 26 年度第 2 回技術セミナー, 大阪産業大学梅田サテライトキャンパス, (2014/12/15)

6.7 安東研究室

本研究室では重力と相対論に関する実験的研究を進めている。その中でも、重力波検出は一貫して研究室の中心テーマとなっている。2010 年にスタートした大型低温重力波検出器 KAGRA の建設は順調に進んでいる。トンネルの掘削, 全長 6km におよぶ真空パイプの建造, 低温ミラーを収納するクライオスタットの製作が前年度までにほぼ完了し, 2014 年度からは本格的なインストールが開始されており, KAGRA の 2017 年からの本格的な重力波観測開始への期待が高まっている。また, 宇宙空間重力波アンテナ DECIGO 計画の基礎開発も行われている。独自の方式のねじれ型重力波検出器 TOBA に関しては, プロトタイプ機の開発が進められ, それを用いた観測運転と重力波信号探索も行われた。それらと並行して, われわれは重力波研究で必要とされる技術を用いた関連研究も進めている。低温 (4K) シリコン光共振器を用いた超高安定レーザー光源の開発は世界的にもユニークな研究である。片道光速の異方性検出や微小距離における重力法則の検証は基礎物理として重要である。また, 量子光学の手法を用いた光学実験は重力波検出器の高感度化を実現する可能性を秘めている。

6.7.1 大型重力波検出器 KAGRA

KAGRA (かぐら) は岐阜県神岡の地下サイトに一辺 3km の L 字型巨大レーザー干渉計を建設し, 宇宙からの重力波を検出しようとするプロジェクトである (図 6.7.1)。2010 年 10 月よりプロジェクトがス



図 6.7.1: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の概念図。

タートし, 2011 年 1 月 28 日には, それまで LCGT と呼ばれていたプロジェクト名に KAGRA という愛称がつけられた。現在, 装置の建設は順調に進んでおり, 2015 年には常温での運転が, 2017 年からは低温での重力波観測が可能になる予定である。これによって世界初の重力波検出をめざしている。当研究室では, 主干渉計光学系の設計などの主要部分の役割を担っており, それに関連した研究開発が進められている。

主干渉計制御系の設計開発

レーザー干渉計型重力波検出器では, 干渉計を構成する鏡を懸架し, 重力波によって伸び縮みする鏡間の距離をレーザー光を用いて測定することで重力波の検出を行う。この時, 距離変動に対する感度を最もいい状態に保つため, 検出された距離変動をキャンセルするように鏡の位置を制御することにより, その制御力から重力波の振幅を割り出すというを行う。また, 鏡の姿勢を高精度に制御しないと, 干渉計内に十分なレーザー光を往復させることができない。そのためレーザー干渉計型重力波検出器では, 干渉計制御が重要となる。

今年度は, 鏡の制御を行うためのアクチュエータの設計や, 鏡の姿勢をモニタするための光てこと呼ばれるセンサーの設計と評価, 制御系に用いるデジタルシステムと電気回路類の設計, 発注, 評価などを行った。また, こうしたアクチュエータやセンサー, 制御系からの雑音を評価するためのシミュレーションツールの開発を行った。KAGRA では, 鏡の制御のためのアクチュエータにはコイル-マグネットアクチュエータを用いる。鏡に磁石をつけ, そばにおいたコイルに流れる電流を調整することで鏡を動かすのである。このとき用いる磁石の強さは, 外部磁場の影響が無視できる程度に小さくしなければならない。また, コイルの巻き数が多すぎたり, コイルに流れる電流が大きすぎたりすると, 雑音電流により鏡を揺らしてしまうことになって雑音となる。一方, アクチュエータ効率が十分でない, 地面振動などによる鏡の揺れを十分に抑えることができない。これらの要求を満たすような磁石, コイル, 電圧電流変換回路の設計を行った。

また, 光てこの雑音や長期安定度の評価を国立天文台の TAMA 実験施設で行ったり, デジタルシステムの整備を KAGRA の建設が進められている岐阜県の神岡町で行った。さらに, 干渉計制御に用いる光検出器や光検出器からの信号を復調するための復調器, 制御フィルタ回路, デジタルシステムとアナログ回路のインターフェース回路などの製作を進めた。これら回路を繋ぐケーブルの選定や配線図の作成, ケーブルラックの検討なども行った。

入射光学系の設計開発

KAGRA では現在, 主干渉計へのレーザー光入射光学系の開発が急ピッチで進められている。入射光

学系は主に、周波数や強度が安定化されたレーザー光源、主干渉計の信号取得のための変調光学系、そして基本モード以外の空間モードを除去する入射モードクリーナーから構成されている。レーザー光源の周波数安定化には周波数参照共振器と入射モードクリーナーが用いられる。また、ビームジッターを低減し、RF 強度雑音を低減するプリモードクリーナーも入射光学系の構成物の一つである。こうした構成物の一つ一つを、主干渉計の目標感度が達成させられるような仕様で制作しなければならない。

今年度はこれらの設計と開発を東京大学宇宙線研究所の重力波グループなどと共に進めた。入射モードクリーナーは懸架された3枚の鏡から構成されているが、この鏡の懸架系の設計と開発は、国立天文台重力波推進室や新潟大学のグループと共に進めた。また、多重の制御ループが組み込まれる周波数安定化をモデリングするツールの開発を行った。

強度安定化と変調光学系に関しては、KAGRAの初期段階では単純化したものを用いる。しかし、最終段階では複雑なシステムとなるため、富山大学や新潟大学のグループと共同で検討を進めている。

6.7.2 宇宙空間レーザー干渉計

DECIGO は基線長 1000km のファブリペロー型レーザー干渉計を宇宙空間に建設するという野心的な計画である。これは、主に 10 Hz 以上で感度のある地上レーザー干渉計と、0.1 Hz 以下で感度のある NGO(LISA の後継計画) のような大型宇宙レーザー干渉計の中間にある周波数帯をターゲットとする検出器である。DECIGO は巨大ブラックホールの合体や、初期宇宙からの重力波などの観測を目指している。DECIGO は極めて技術的要求が高い計画であるため、数段階の技術実証実験を経てその実現を目指す。本研究室ではこれまでに世界初の宇宙空間重力波検出器である SWIM_{μν} 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。

2014 年度は、DECIGO の前段階となる Pre-DECIGO の検討を進めた。中性子星連星、中間質量ブラックホールの合体といった観測で得られる科学的成果の検討、また、その観測を行うためのミッション検討を進めた。

6.7.3 ねじれ型重力波検出器 TOBA

Torsion-bar Antenna (TOBA) とは、ねじれ振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。

Phase-II TOBA の開発

現在までに最初のプロトタイプによって原理検証・観測が行われてきたが、今後は感度向上の為、更なる技術検証が求められている。そこで次世代の TOBA として、テストマスの懸架システムや多方向同時観測などといった新たな技術を実証する Phase-II TOBA の開発を行った (図 6.7.2)。

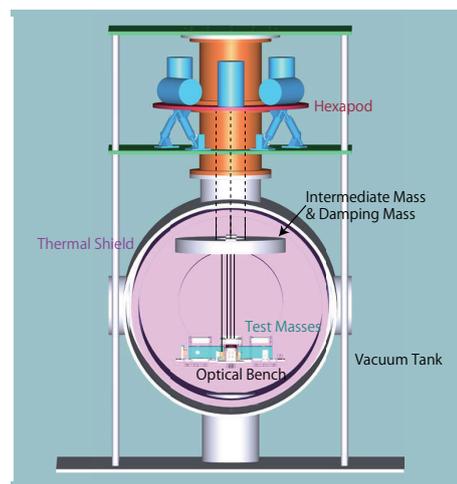


図 6.7.2: Phase-II TOBA の概念図

テストマスの懸架システムの開発では、能動防振系と受動防振系を組み合わせた防振系を組み込む事により、並進方向の地面振動からのカップリング雑音を評価・低減した。また、多方向同時観測では、水平方向だけではなく垂直方向の回転も同時にモニターする新手法を提案・導入する事により、1 台から 3 つの独立な重力波信号を同時に取得する事に成功した (図 6.7.2)。この多方向同時観測により、重力波の検出頻度が約 1.7 倍に向上する他、波源方向などといった重力波信号のパラメータをより少ない検出器で決定する事ができるようになる。これはより少ない検出器でも低周波重力波天文学を展開する可能性を広げるものである [1]。

6.7.4 中間質量ブラックホール連星の探査

開発した Phase-II TOBA を用いて中間質量ブラックホール連星の探査を行った。中間質量ブラックホール連星は、超巨大質量ブラックホールや銀河の形成過程を明らかにするうえで重要な重力波源として注目されている。

衝突以前の中間連星ブラックホール連星からの重力波は、これまで $100 M_{\odot}$ 以下の質量を持つものに対してしか探査されていなかったが、本研究では TOBA が干渉計型重力波検出器よりも低い周波数帯に感度を持つ特色を活かし、matched filtering と呼ばれる手法を用いて $200 M_{\odot}$ の質量を持つ中間質量ブラックホール連星からの重力波を初めて探査した。

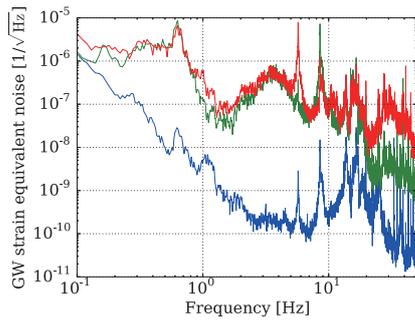


図 6.7.3: Phase-II TOBA で得られた感度。青線が水平方向の回転から得られた感度，赤・緑線がそれぞれ垂直方向の回転から得られた感度である。水平回転では，防振システムの導入により 10~100 Hz で約 100 倍の感度が向上した。

本研究では Phase-II TOBA を用いて 24 時間連続運転を行い，この観測中に重力波信号は検出されなかった。また，この観測中に 1.2×10^{-4} pc 以内では中間質量ブラックホール連星合体はおこらなかったという観測的制限値を世界で初めて設定した。

背景重力波探査

重力波のターゲットの一つに背景重力波があり，大きく分けて宇宙論的な重力波と分解不可能な点重力波源の和の 2 種類が考えられる。背景重力波からはインフレーションや相転移に関する情報を得ることができ，それはほぼ重力波によってしか得ることができないものである。これまでに背景重力波のエネルギー密度 Ω_{gw} に対する上限値は，100 Hz 以上の高周波数帯で干渉計型や共振型の重力波検出器によって，1 mHz–1 Hz の低周波数帯で TOBA や地球の地面振動によって，さらに低周波の 1 mHz 以下でドップラートラッキングやパルサータイミング，CMB などによって設定されてきた。しかし 1–100 Hz 帯では，特に干渉計型重力波検出器が地面振動の影響を大きく受けるために背景重力波探査はなされて来なかった。

今回は開発した TOBA を用いて 2014 年 12 月に 24 時間の観測運転を行い，そのデータから背景重力波に対して最も感度のよい周波数帯であった 1–3 Hz において背景重力波探査を行った。1 台の検出器からのデータのみを用いた探査のため，相関解析を行って重力波信号のみを抽出することはできず，仮にデータが全て重力波由来であっても成立する等号を含んだ上限値を設定した。その結果，1–3 Hz 背景重力波のエネルギー密度に対して，頻度論的な上限値として $\Omega_{\text{gw}} \leq 10^{18}$ ，ベイズ的な上限値として $\Omega_{\text{gw}} \leq 10^{20}$ の値を得た。今後の TOBA アップグレードによる感度向上，複数台の検出器を用いることによる相関解

析により，背景重力波に対してさらに厳しい上限値が得られるものと期待されている。

6.7.5 低温光共振器を用いた超高安定化レーザー光源

安東研究室では次世代の周波数標準として期待される光格子時計の性能を向上させるための周波数安定化光源の開発を行っている。本研究では低温重力波検出器の開発で培ったノウハウを活用し，単結晶シリコンで製作した光共振器を低温に冷却することによって，従来の周波数安定化の妨げとなっていた熱雑音を低減し，1 秒のアラン分散で 10^{-17} という非常に高い周波数安定度を実現する。これにより，光格子時計は 100-1000 秒という非常に短時間の積算時間で 10^{-18} の安定度が実現可能になる。

光共振器の防振

目標の安定度を達成するためには地面振動や冷凍機由来の振動による共振器の弾性変形を防ぐ必要がある。そのために我々はヘキサポッドステージと呼ばれる 6 本脚の除振台を製作した。ヘキサポッドの 6 本の脚には PZT が組み込まれており，速度センサーによって読み取ったヘキサポッドステージの振動をフィードバックすることにより能動的に振動を抑制する。

これまでに，並進 3 自由度の同時防振に成功しており，最もよい周波数帯においては 10 倍以上の防振比を得ることに成功している。

温度安定化

目標の安定度達成のためには光共振器の温度変動による共振器長変動を抑制する必要がある。冷凍機で冷却した光共振器は外気温の日周変動や季節変動によって大きく変動するがこれらは非常に長い時間スケールでの変動であるため，温度を能動的に安定化することによって抑制することができる。

冷凍機のコールドヘッドは温度安定化を行わない場合には 12 mK/day 程度の温度ドリフトが見られたが，温度安定化を施すことによって 0.1 mK/day 以下までドリフトを抑えることに成功している。

6.7.6 相対論・量子光学精密実験

巨視系における量子輻射圧変動の測定

これまで重たい物体の重ね合わせ状態が観測されていないのはなぜか。単なる技術的な問題に過ぎないのか，あるいは量子性を示さない根源的な機構が存在するのか。この問いに答えるべく，我々は重た

い物体の重ね合わせ状態を生成しその持続時間を測定することを目標とした研究を行っている。

持続時間検証のために用意する重ね合わせ状態は、光子と懸架鏡のエンタングルメント状態である。まず、振り子モードが基底状態まで冷却された懸架鏡を用意する。その懸架鏡から構成されるマイケルソン干渉計に単一光子を入射することで、光子の有無と、懸架鏡の基底/励起状態のエンタングルメント状態が生成される。

第一目標として懸架鏡の基底状態冷却を目指す、そのためには懸架鏡をレーザー光強度の量子的な揺らぎから生ずる反作用（量子輻射圧揺らぎ）で支配的に駆動しなければならない。特に、原理的な古典雑音である振り子の熱雑音よりも量子輻射圧揺らぎの方が強く働く懸架鏡の開発に取り組んだ。

鍵となったのは、熱雑音低減のための外部環境からの孤立と、量子輻射圧揺らぎ増大のためのレーザー光と懸架鏡の強力な結合を両立である。非常に細くエネルギー散逸の小さな $3\mu\text{m}$ のタングステンワイヤーで、 5mg の鏡を懸架した。さらに、この懸架鏡を一端として構成される光共振器を三角形とすることで回転方向に自律的安定な共振器を構築、高い共振器内パワーを実現した。入射レーザー光量を大きくしていくにつれて懸架鏡に加わる輻射圧が理論通り増大していく様子を測定し、量子輻射圧揺らぎと振り子内部の散逸に由来する熱雑音の信号雑音比が 1.4 ± 0.2 と推定された。

光リング共振器を用いた光速の等方性検証

アインシュタインの特殊相対性理論は Lorentz 不変性が宇宙の基本的な対称性であることを明らかにした。しかし、重力と他の相互作用を統一的に理解しようとする理論的な研究から、わずかに Lorentz 不変性が破れている可能性が示唆されている。特に光子の Lorentz 不変性の破れは光速の異方性に通じ、Michelson-Morley の時代から数々の異方性探査が行われてきた。我々は光速の行きと帰りの差、つまり片道光速の異方性に着目し、その探査実験を行っている。

光速の行きと帰りの差は、非対称な光リング共振器を用いて測定することができる。非対称性は光リング共振器の中にシリコンを入れ、光路の一部の屈折率を変えることで導入している。片道光速の異方性が存在すると、この光リング共振器の時計回りの共振周波数と反時計回りの共振周波数に差が生じる。この差をダブルパスという光学系構成により測定し、異方性の null 測定を行った。また、この測定を光リング共振器を回転させながら行うことで、異方性信号の変調を行う。

我々はこれまでに 1 年間に渡る異方性探査を行い、そのデータ解析を行うことで片道光速の異方性に 10^{-15} レベルの上限値をつけてきた。これは光子の Lorentz 不変性の破れのうち、奇パリティ成分としては世界最高精度での上限値となっている。

今年度はさらなる高い精度での検証を目指した、装置改良の検討を進めた。これまでの感度は装置の

回転に伴う振動によって制限されていたため、振動感度の低いモノリシック光学系を用いることや、より振動の少ないモーターを用いた安定な連続回転を行うことを検討している。これまでは信号取得や電源供給のためのワイヤがねじれてしまうことを防ぐため、回転と逆回転を交互に繰り返していた。連続回転を行うことで回転反転時の測定時間のロスが無くなるとともに、複数回の回転に渡るデータを解析に用いることで、雑音レベルを下げるができると考えている。

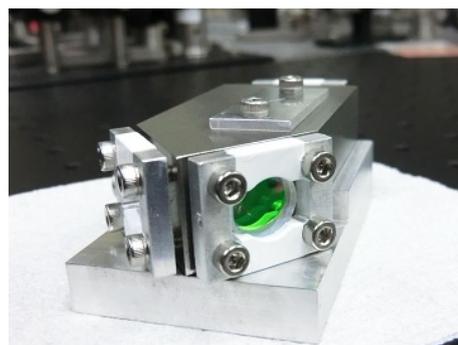


図 6.7.4: シリコンの入った非対称光リング共振器

光学浮上鏡を用いた量子測定

懸架した鏡のような機械系の振動状態をレーザー光を用いて測定したり、制御したりする機械光学系の研究が現在盛んに行われている。特に、プランク質量を超える巨視的な物体の基底状態を実現することや、ハイゼンベルグの不確定性関係で決まる標準量子限界を超える位置測定を行うことは、巨視的量子力学の検証に繋がるため、注目を浴びている。

しかし、巨視的な物体において量子力学的な測定を行うことは極めて難しい。それは標準量子限界に比べ、熱雑音が大きいためである。物体を支持するために懸架のような機械的な手法を用いると、機械的な散逸に伴って熱的揺動力が物体に加わってしまい、熱雑音となる。

我々は機械的な手法を用いずに物体を支持する、光学浮上の検討を行っている。光学浮上とは光の輻射圧のみによって鏡を支える方法である。光子の有効温度は環境に比べて十分高いため、この支持方法では熱雑音となる散逸が存在しないことになる。今年度は 1.6mg の浮上鏡の製作と装置設計を進めるとともに、ねじれ振り子を用いた基礎実験を行った。

十分な浮上力を得るためには浮上鏡は mg 程度以下の軽さでなければならないが、この製作は困難を極める。そのため、ねじれ振り子の端に鏡をつけることで、有効質量を軽くし、この鏡を用いて Fabry-Perot 共振器を作ることによって光学浮上に向けた技術開発を行っている。今年度はこの Fabry-Perot 共振器の制御には成功したが、制御が安定ではなく、ねじれ振り子の運動状態を十分に変化させることができ

なかった。アクチュエータの改良やねじれ振り子の改良が必要なことがわかった。

<報文>

(原著論文)

- [1] K. Eda, A. Shoda, Y. Itoh, M. Ando: Improving parameter estimation accuracy with torsion-bar Antennas, *Phys. Rev. D*, 90, 064039 (2014).
- [2] M. Adier, F. Aguilar, T. Akutsu, M.A. Arain, M. Ando *et al.*: Progress and challenges in advanced ground-based gravitational-wave detectors *General Relativity and Gravitation*, 46, 1749 (2014).
- [3] K. Nakamura, M. Ando: Torsion-bar antenna in the proper reference frame with rotation, *Phys. Rev. D*, 89, 064008 (2014).
- [4] A. Shoda, M. Ando, K. Ishidoshiro, K. Okada, W. Kokuyama, Y. Aso, K. Tsubono: Search for a stochastic gravitational-wave background using a pair of torsion-bar antennas, *Phys. Rev. D*, 89, 027101 (2014).
- [5] Nobuyuki Matsumoto, Yuta Michimura, Yoichi Aso, Kimio Tsubono: Optically trapped mirror for reaching the standard quantum limit, *Opt. Express* 22, 12915 (2014).

(学位論文)

- [6] 正田亜八香: Development of a High-Angular-Resolution Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observation, 博士論文, 2015年3月.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [7] A. Shoda: TOBA experience and future plans, 2015, E-GRAAL kickoff meeting (March 2015, Paris, France).
- [8] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: New iKAGRA Configuration, 11th KAGRA Face to Face Meeting (Feb 2015, Tokyo).

招待講演

- [9] Nobuyuki Matsumoto: Development of the 5-mg suspended mirror driven by measurement-induced back-action, Workshop on Hierarchy of Quantum Mechanics (Feb. 25, 2015, Okazaki Conference Center, Aichi).
- [10] Nobuyuki Matsumoto, Kentaro Komori: Development of 5-mg suspended mirror driven by measurement-induced back-action, Workshop on Hierarchy of Quantum Mechanics (February 23rd, 2015, Institute for Molecular Science, Aichi).

- [11] Masaki Ando: Recent News from KAGRA, PAC37, The 37th Program Advisory Committee Meeting (January 28th, 2015, Hanford, USA).
- [12] Masaki Ando: DECIGO: Space Gravitational-wave Antenna, RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics (August 3rd, 2014, Matsumoto).
- [13] A. Shoda: Torsion-bar Antenna for low-frequency gravitational wave detection, GWADW (May 2014, Takayama, Japan).
- [14] Masaki Ando: DECIGO and DECIGO Pathfinder, 10th International LISA Symposium (May 19th, 2014, Florida, USA).

(国内会議)

一般講演

- [15] 安東 正樹, DECIGO WG: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (59): DECIGO/DPF の概要, 日本物理学会 第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学).
- [16] 道村唯太, 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 中野雅之, 山元一広, 辰巳大輔, 阿久津智忠, 安東正樹, 齊藤高大, 加川智大, 我妻一博, 和泉究, 新井宏二, 山本博章, KAGRA Collaboration: 重力波望遠鏡 KAGRA の主干渉計制御設計, 日本物理学会 第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学).
- [17] 正田亜八香, 桑原祐也, 枝和成, 麻生洋一, 道村雄太, 安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器 (Phase-II TOBA) の開発 (4), 日本物理学会 2015 年春季大会 (2015 年 3 月 早稲田大学).
- [18] 牛場崇文, 大前宣昭, 正田亜八香, 麻生洋一: 低温シリコン光共振器を用いた狭線幅光源の開発 IV, 日本物理学会 第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学).
- [19] 桑原祐也, 正田亜八香, 枝和成, 道村唯太, 安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器 (Phase-II TOBA) を用いた背景重力波探査, 日本物理学会 第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学).
- [20] 小森健太郎, 松本伸之: 重力デコヒーレンス検証に向けた量子輻射圧揺らぎで駆動される巨視的振り子の開発, 日本物理学会 第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21 日, 早稲田大学).
- [21] 安東 正樹: DECIGO / DPF, CRC 将来計画タウンミーティング (2015 年 1 月 24 日, 東京大学宇宙線研究所).
- [22] 安東 正樹: DECIGO のロードマップ, DECIGO ワークショップ (2014 年 10 月 25 日, 京都大学).
- [23] 安東 正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (55): DECIGO/DPF の概要, 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 19 日, 佐賀大学).
- [24] 桑原祐也, 正田亜八香, 枝和成, 小森健太郎, 麻生洋一, 安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器 (Phase-II TOBA) の開発 (2), 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 21 日, 佐賀大学).

- [25] 道村唯太, Matthew Mewes, 松本伸之, 麻生洋一, 安東正樹: 光リング共振器による高次ローレンツ不変性検証, 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月, 佐賀大学).
- [26] 正田亜八香, 桑原祐也, 枝和成, 小森健太郎, 麻生洋一, 安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器 (Phase-II TOBA) の開発 (3), 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月, 佐賀大学).
- [27] 牛場崇文, 大前宣昭, 正田亜八香, 麻生洋一: 低温シリコン光共振器を用いた狭線幅光源の開発 III, 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月, 佐賀大学).
- [28] 安東 正樹: DECIGO/DPF CRC タウンミーティング (2014 年 7 月 12 日, 名古屋大学).

招待講演

- [29] 安東 正樹: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA とレーザー干渉計技術, 第 62 回 応用物理学会 春季学術講演会 (2015 年 3 月 12 日, 東海大学).
- [30] 安東 正樹: 重力波の観測, コンパクト連星合体からの重力波・電磁波放射とその周辺領域 (2015 年 2 月 14 日, 京都大学).
- [31] 安東 正樹: アインシュタインの宿題と重力波で探る宇宙, 一般相対性理論白寿記念シンポジウム (2014 年 9 月 27 日, 慶応大学).
- [32] 安東 正樹: レーザー干渉計による原始重力波観測原始重力波シンポジウム 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 19 日, 佐賀大学).
- [33] 安東 正樹: 重力波でさぐる宇宙, 第 3 回 自然科学研究機構 機構長プレス懇談会 (2014 年 4 月 11 日, 虎ノ門 SQUARE, 東京).

(セミナー)

- [34] Masaki Ando: Recent Situations of DECIGO and DECIGO Pathfinder, NAOJ GW Seminar (July 10th, 2014, NAOJ, Mitaka).
- [35] 安東 正樹: 重力波望遠鏡でさぐる宇宙の姿, 平成 26 年度 物理学教室ガイダンス・オープンラボ (2013 年 5 月 30 日, 東京大学).

局所的神経刺激と神経活動可視化の同時適用による運動神経細胞の機能解析 (松永光幸、高坂洋史、能瀬聡直)

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のが、脳機能の基本であると考えられているが、その実体はほとんど謎のままである。一体、どのような回路の中を、どのようにインパルスが伝わるにより高度な情報処理が可能になるのか？また、複雑な神経回路が正確に形成されるための設計図は私達の遺伝子にどのように記述されているのか？当研究室では、ショウジョウバエ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、バイオイメーキ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る手法を用いて、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出す。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)の発達により、神経細胞の活動を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。

動物の洗練された運動は、神経回路内における情報の正確な伝播によって出力される。歩行や遊泳などの精巧なパターンやリズムを生起する神経回路は、主に介在神経細胞によって構成され、その最終出力が運動神経細胞(MNs)であるという描像が主流だった。しかし、興味深いことに、ヒルやマウスなどで、MNsは効果器へ出力するだけでなく、同時に中枢回路へ直接シナプス入力を与えることが示唆されている。本研究ではMNsが中枢へ与えるシナプス入力の役割を解明することを目的として、ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動系を用いて、MNsの機能解析を進めた。ショウジョウバエ幼虫は尾端から頭端へかけて連続的に筋収縮を伝播することで前進する(ぜん動運動)。ぜん動運動に対応して、腹部神経節内では尾側から頭側へかけて各神経分節内のMNsの活動が連続的に伝播する(“伝播波”)。本研究では活動イメージングとオプトジェネティクスをMNsに同時適用することで、MNsの活動抑制による、中枢内活動伝播ダイナミクスの変化を観測した。

まず、MNsの活動抑制が伝播波の生成に与える影響について解析を進めた。オプトジェネティクスを用いてMNsの活動を局所的に抑制すると伝播波の生成が抑えられた。このことから、MNsは中枢内に出力を与えていること、またその出力はぜん動運動の頻度を変化させることが示唆された。続いて、MN間が中枢内で電気シナプスによって連絡しているかを調べた。光刺激によって特定の神経分節内のMNsの膜電位を過分極させると、隣接する神経分節内のMNsの膜電位も過分極を示した。このことは、電気シナプスを介して、閾値以下の膜電位変動が、隣接する神経分節内のMNsへと伝播したことを示唆している。

MNsの局所的活動抑制によって引き起こされた伝播波の生成抑制は、MNs間での電気シナプスの有無によって説明されるかを調べるために、今後はRNA干渉法を用いてMNs特異的に電気シナプスの発現を阻害させて、ぜん動運動の波の生成頻度を測定する。

電気生理学による幼虫運動回路の解析 (高木俊輔、高坂洋史、能瀬聡直)

神経活動の実態は細胞膜を一過的に通過する電流、それに伴う電位の変化である。これら重要なパラメータを測定する方法にパッチクランプ法がある。パッチクランプ法は、微小なガラス電極の先端を細胞表面に密着させることで、微小ガラス電極を介して細胞内の電位や細胞膜を通過する電流を測定する手法である。我々はパッチクランプ法に光遺伝学を組み合わせ、光によって特定のニューロン集団の活動をコントロールしながら、単一のニューロンの電氣的活動を測定し、ニューロン同士のつながりを調べている。我々は特に、PMSIと名付けた介在ニューロンに注目し、PMSIの活動をオプトジェネティクス

によって亢進させた際の、運動ニューロンの活動を調べた。介在ニューロンはニューロン同士をつなぐニューロンであり、運動回路の構成要素として重要であるが、その多くが未同定である。PMSIは当研究室で同定した介在ニューロンであり、運動ニューロンと密接な接着をし、運動ニューロンの上流で抑制的に機能していることが示唆されていた。今回、我々はPMSIが運動ニューロンに抑制性のシグナルを入力している直接的な証拠を得るためPMSIにChannel rhodopsin 2(ChR2)を発現させた幼虫を用い、運動ニューロンにパッチクランプを行い、電気記録を取得した。ChR2は青色光感受性の陽イオンチャネルで、青色光照射によってChR2を発現する細胞は陽イオンが細胞内に流入し、活動が亢進する。実験の結果、PMSIの活動亢進によって、運動ニューロンのスパイク発火率が激減することを見出した。さらに、glutamate-gated chloride channelの阻害剤である picrotoxin を用い、同様の実験を行ったところ、PMSIの活動亢進による運動ニューロンのスパイク発火率の減少は見られなくなった。これらの結果を合わせてPMSIから運動ニューロンへの入力、運動ニューロンのglutamate-gated chloride channelを開き、運動ニューロンを抑制していることを見出した。さらに、我々は電位感受性Na channelの阻害剤であるTTXを投与しても光刺激によるPMSIから運動ニューロンへの抑制信号が送られることを見出した。この事実は少なくとも一部のPMSIが運動ニューロンとシナプスを形成している直接的な証拠となる。

一方で、我々はぜん動運動という定型運動の一つのサイクルにおける単一の運動ニューロンの挙動を調べるため、パッチクランプ法による電気記録と同時に、カルシウムイメージングによる腹部神経節内の運動ニューロン全体の活動の様子を記録した。カルシウムイメージングでは、幼虫のぜん動運動に対応する、運動ニューロンの活動の伝播が蛍光強度の変化として観測できる。その結果、ぜん動運動に伴う運動ニューロンの一過的な膜電位上昇及び、活動電位列が観測された。一方で、カルシウム上昇を伴わない膜電位上昇も観測され、また、前向きや後ろ向きなど異なるぜん動運動毎に異なる電位上昇の様子が観測された。これらの結果から、今後、運動ニューロンの膜電位変化を記述するパラメータはそれぞれ実際の行動のどの部分に反映されているのかを調べていく予定である。

本研究は、東京薬科大学生命科学部の森本高子博士、理化学研究所の風間北斗博士との共同研究である。

神経細胞集団のカルシウムイメージングデータの定量解析 (尹永扱、高坂洋史、能瀬聡直)

本研究では、ショウジョウバエ幼虫をモデルとし、複数の活動パターンが現れる神経回路の時系列ダイナミクスについて調べる。ショウジョウバエ幼虫は様々な運動をし、それに応じて、腹部神経節、特に運動神経は、多様な活動パターンを示す。一方、回路を構成する個々のシナプスの伝達過程は定型的

であるため、神経回路の局所的部分だけに注目しても巨視的な観点からのパターンの違いについて調べることは困難である。そこで我々は、カルシウムセンサータンパク質GCaMP6fを発現させた神経回路が発する蛍光シグナルを、圧電素子によって焦点面位置を高速に変化させながら共焦点顕微鏡とEMCCDカメラによって経時的に撮影することにより、立体空間に含まれている多数(数百個程度)の神経細胞の活動を取得した。

取得した時系列画像から多数の神経細胞の活動を解析するには、神経細胞の位置をカルシウムイメージングの動画の中から同定する必要がある。客観的かつ効率よく同定するために、GCaMP6fの蛍光の動画から細胞の位置を自動的に抽出する試みをした。しかし、多数の細胞にGCaMP6fを発現させた個体では樹状突起の部分が絡み合っているため、それらを分離するのは困難である。そのため、細胞体を検出することにしたが、GCaMP6fの画像の情報だけから計算機によって細胞体の位置を決めるのは困難であった。

それを解決するため、GCaMP6fに加え細胞核局在マーカ mCherry-NLS を発現させた個体を撮影し、mCherry たんぱく質からの赤色蛍光をもとに細胞の位置を決める手法を構築した。その結果、GCaMP6fの蛍光のみから計算機によって細胞同定を行った結果より精度をあげることができた。

得られた細胞体の位置情報を使いGCaMP6fからの蛍光の時系列を基に、蛍光強度ピークを自動的に取得するようにした。すべての細胞のピーク情報から、回路の状態一例えば運動神経の動画であれば、蠕動運動の方向一を自動的に分けた。さらに、分けられた各々の状態のグループから、個々の細胞の活動のタイミングを統計的に決めることができた。確認のため、運動神経が含まれた個体に上記の手法を適用した結果、腹部神経節の背側の運動神経の活動がクラスターを形成していることが分かった。これは、筋肉への投射パターンからも予測される結果である。

今後は、運動神経のみならず、介在神経も含まれている動画に対して、今回の手法をもとに解析をしていく予定である。本研究は、京都大学情報研究科の石井信博士、中江健博士との共同研究である。

介在ニューロン活動操作・運動パターン観察による運動回路の機能解剖 (宮本道人、二木佐和子、高木優、松永光幸、高坂洋史、能瀬聡直)

ショウジョウバエ幼虫ぜん動運動の方向制御に関わるニューロンの同定を目標とした研究を行った。まず、比較的少数の介在ニューロンに発現しているGal4システムを探索し、カルシウムイメージングにおいて後退ぜん動運動時特異的な活動パターンが見られる介在ニューロンを複数発見した。その中の一つ、NIK68S-Gal4 発現ニューロンにおけるB5ニューロンについての研究を報告する。B5は各神経節の両側で対になった介在ニューロンで、後退ぜん動運動と同期して頭側から尾側にかけて伝播する波状の活動を示す。B5の機能を解析するため、オプトジェネティ

クスを用いて、NIK68S-Gal4 発現ニューロンの活動を亢進させたところ、後退ではなく回転の表現型が得られた。これはおそらくNIK68S-Gal4 発現ニューロンが B5 に加え、回転を誘発するニューロンを含むからであると推測された。そこで、B5 ニューロンの活動を特異的に亢進させるために、単離した中枢神経系において B5 を含む微小領域で局所的にレーザー光を照射した。ここでは Gal4 発現ニューロン群に光感受性陽イオンチャンネル Channelrhodopsin2 を発現し、運動ニューロン群にカルシウム感受性赤色蛍光タンパク質 RGECO1 を発現し、波長 580nm 付近の光で運動ニューロン群の活動をイメージしながら、490nm 付近のレーザーを B5 の細胞体付近に照射した。その結果、490nm レーザー照射直後に運動ニューロン群の後退伝播活動波が観察され、B5 ニューロンの活動亢進が後退ぜん動運動の誘発に十分であることが示唆された。今後は遺伝学的に B5 特異的に遺伝子発現を誘導して活動亢進を行うほか、B5 の上流・下流のニューロンについても、コネクトーム等の方法を用いて解析することを予定している。

7.1.2 運動出力ダイナミクスの回路機構

動物が適切な運動出力を生み出すには、適切な神経回路が構築される必要がある。神経回路は多数の神経細胞のネットワークから構成され、さらに個々の神経細胞は複数のチャンネル遺伝子を発現している。このようなチャンネルと細胞の多体系である神経回路がいかんして調和のとれた運動出力を生み出すのかは不明な点が多い。我々は、神経回路の胚発生や運動関連チャンネル遺伝子の同定、及び運動ダイナミクスの細胞レベルでの定量化を進めることによって、運動出力ダイナミクスの回路機構の解明を進めている。

ショウジョウバエを用いた、胚期の神経回路の協調的活動の発達機構の研究 (川崎達平、能瀬聡直)

神経回路の発達機構を調べることはすなわち、脳の神経ネットワークの設計図を調べることであり、神経回路の動作機構の解明に繋がることが期待できる。我々は胚発生後期のショウジョウバエ胚において、解剖して Ca²⁺イメージングを行い、筋肉、運動神経細胞、GABA 作動性神経細胞、コリン作動性神経細胞、そして神経回路全体における、詳細な活動パターンの発達の様子を観察し、胚発生における器官の発達段階を基準にして比較した。その結果、これら全ての神経細胞群で、腹部神経節 (以下 VNC) において、始めは散発的に活動していた神経細胞群が徐々に同時に活動している部分を広げていき、VNC 全体としての波状の活動に統合されていく様子を観察できた。この統合は、運動神経細胞群、コリン作動性神経細胞群、GABA 作動性神経細胞群の順に見られ、その後、VNC 全体としての活動に発展していくことが明らかになった。

運動神経回路の発達に関わっていると考えられるいくつかの神経伝達物質やシナプスに関わるタンパク質において、それらの変異体における運動神経回路の活動の発達を解析した。その結果、電気シナプスを構成するタンパク質である innexin の変異体において、感覚入力がないときに胚期から孵化直後の個体で運動神経回路の活動に異常が見られたことから、胚期の運動神経回路の発達に電気シナプスを介した神経活動が関わっている可能性が示唆された。

今後は、観察条件を整えるなどしてより詳細な神経活動の時間発展を明らかにする予定である。また、今年度解析した細胞群以外の神経細胞についても胚期における神経回路活動の発達を解析すると共に、神経回路活動の操作を行って、運動神経回路発達における役割について探る予定である。

ショウジョウバエ幼虫をモデルとした運動パターン制御を担う受容体遺伝子の探索 (圓尾仁志、高坂洋史、能瀬聡直)

動物は、多数の神経細胞同士が神経伝達物質と呼ばれる化学物質の放出と受容を通して相互作用することで、神経回路全体として適切な運動パターンが生成される。生体内には様々な伝達物質があり、それを特異的に受け取る多数の受容体が存在するが、これらの受容体の活動がどのように運動パターンの生成に結びついているのかは明らかになっていない。本研究では、運動神経細胞特異的に Gal4 を発現するシステムを利用し、RNA 干渉法 (RNAi) によってショウジョウバエゲノム上で同定されている受容体遺伝子の機能を網羅的に阻害し運動出力を定量・比較することで、運動パターン生成に関与する受容体遺伝子の探索を行った。約 100 系統ある受容体遺伝子の RNAi 系統のスクリーニング実験により、ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動の速度に影響を与える受容体遺伝子を複数同定した。速度変化の機構を明らかにするために、高倍率顕微鏡を用いて運動の時空間的な活動パターンを調べたところ、ぜん動運動の頻度や、周期に変化がみられた。以上の結果より、今後は、カルシウムイメージングや電位イメージングを用いて、これらの候補受容体遺伝子を阻害した運動神経細胞の時空間的な活動パターンを調べ、運動出力のメカニズムを詳細に解析する。また、二つの受容体が協働的に活動して幼虫の運動パターンを制御している可能性も考えられるため、double-RNA 干渉法を用いて新たな受容体遺伝子の探索を行う予定である。

時系列蛍光画像からのショウジョウバエ幼虫の運動ダイナミクス抽出 (李康秀、高坂洋史、能瀬聡直)

動物は、複数の筋肉細胞が協調して収縮することにより、ある一定の運動パターンをとることが知られている。そして、その運動が様々な条件下でどのように変化するのかを定量的にみることは、動物の

神経回路がいかにして行動を制御しているのかを理解する上で重要である。我々は、ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動をモデルとして、運動パターンをその運動要素集団のダイナミクスとして定量化することを試みた。

まず各体節の一部分のみに蛍光タンパク質を発現させたショウジョウバエ幼虫を用い、自由行動中の蛍光画像を取得した。その時系列画像から計算機によって体節ごとのダイナミクスを追跡する方法を開発した。その結果、ショウジョウバエ幼虫の各体節におけるダイナミクスの、距離や速度の時間変化を求めることができた。得られたダイナミクスの速度の時間変化をシグモイド関数の重ね合わせでフィッティングすることにより、定量解析をおこなった。その結果、運動を表現する特徴的なパラメータを複数抽出することに成功した。

今後は、より長時間ショウジョウバエ幼虫を追跡する測定方法を確立し、数百個体といったようなショウジョウバエ幼虫のビッグデータを効率的に解析する手法を確立する予定である。また、神経活動を担うチャネルタンパク質の発現を RNAi で阻害させたときや温度を変化させたときに、それらに対応してショウジョウバエ幼虫の各体節のダイナミクスがどのように変化するかを、フィッティングしたシグモイド関数のパラメータを比較して定量的に解析する予定である。

7.1.3 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、及びコネクティ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。

ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動を制御する新規介在神経細胞群の探索（長谷川恵理、能瀬聡直）

動物の様々な運動は、運動神経細胞が適切なパターンとタイミングで活動することによって制御されている。この運動神経細胞のリズム生成には興奮性の入力が必要であるが、それらの機能については不明な点が多い。本研究では、ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動をモデルとして、運動神経細胞に興奮性の入力を与える介在神経細胞の機能の解明を進めている。本年度は、昨年度までに同定した W neuron の解析に加え、運動神経細胞に直接入力を与える新規介在神経細胞の探索も行った。

W neuron は、幼虫の腹部神経節の各体節に存在し、ぜん動運動に関連した波状の活動を示す神経細胞

である。W neuron の活動を強制的に亢進させると筋収縮が誘導されること、また、W neuron と運動神経細胞との間にシナプス結合が示唆されていることから、W neuron は運動神経細胞を直接興奮させることで運動神経細胞の波状の活動を制御していると考えられる。

運動神経細胞は W neuron 以外にも多数の興奮性介在神経細胞による入力を受けていると考えられる。そこで、運動神経細胞に直接シナプス結合を形成している介在神経細胞群を体系的に得るために、米国 Janelia Farm Research Campus 研究所の Dr. Albert Cardona らが所有しているショウジョウバエ幼虫中枢神経系の電子顕微鏡写真データを用いた。RP5 運動神経細胞は複数の筋肉を制御しており、筋収縮の制御に重要であると考えられるため、RP5 運動神経細胞と直接シナプス結合している神経細胞の再構築を進めている。少なくとも約 25 種類の局所ニューロンと 20 種類の投射ニューロンが RP5 運動神経細胞に直接シナプス結合を形成していることがわかった。これらのうち約半数の神経細胞は興奮性であると予想されている。今後は、RP5 運動神経細胞にシナプス結合している神経細胞の再構築をさらに進めるとともに、これらの神経細胞で特異的に発現している Gal4 系統を用いて、個々の神経細胞の機能解析を進めていく予定である。本研究は、米国 Janelia Farm Research Campus 研究所の Dr. Albert Cardona 及び Dr. James Truman との共同研究である。

コネクティクスと機能解析を用いたショウジョウバエ幼虫の行動切り替え制御回路の分析（高木 優、二木佐和子、能瀬聡直）

動物は、複数の定型的運動を外部環境の変化や内的要請に応じて切り替えながら生命を維持する。本研究では、この運動の切り替えを担う介在神経細胞群を同定し、それらが織り成す機能的な神経回路を明らかにしようとしている。より具体的には、ショウジョウバエ幼虫の前進ぜん動運動と後退ぜん動運動の切り替えに着目し、解析を進めている。

まず我々は、ショウジョウバエの中枢神経系にある一部のニューロン群の活動をカルシウムイオンブローブタンパク質によって可視化し（カルシウムイメージング法）、定型的運動を反映した運動神経の活動パターンと相関して発火するような介在神経を探索した。この実験を経て、我々は前進ぜん動運動、後退ぜん動運動、およびこれらの切り替わりと相関して発火する介在神経群を複数同定した。このうち、ある介在神経（F1 介在神経）は前進のぜん動運動と同期して振動的に発火することを見出した。また、別の介在神経（T1 介在神経）は、前進・後退の切り替わりと同期して発火し、またぜん動運動の波が抑制されたときに強く発火することを見出した。この T1 介在神経と aCC 運動神経の活動パターンの相関を見ると、T1 介在神経の活動タイミングは、左右それぞれの体側に存在する aCC 運動神経の非対称な活動と同期していることを見出した。運動神経の左右非対称な活動は方向転換運動を反映している可能性があ

り、T1 介在神経がこの運動と相関していることが示唆される。

次に、我々は連続電子顕微鏡画像を用いたショウジョウバエ幼虫の中樞神経系のコネクトームを構築するプロジェクトへ参入し、T1 介在神経の再構築を行った。この作業を経て、T1 介在神経は上述の F1 介在神経と相互にシナプス結合を有することを見出した。さらに、T1 介在神経の下流にあるニューロンは多くが前運動神経細胞であることが明らかになりつつあり、T1 介在神経が運動回路に深く関与した介在神経であることが示唆されている。

今後は、光遺伝学を用いて T1 介在神経や F1 介在神経を特異的に活性化させた場合の行動の表現型から、これらの介在神経の機能を明らかにしつつ、コネクトミクスを用いてこれらの介在神経が構成する局所的神経回路を明らかにすることが目標となる。本研究は、米国ハーワードヒューズ医学研究所ジャンネリアリサーチキャンパスの Albert Cardona 博士および同 Richard D. Fetter 博士との共同研究である。

<報文>

(原著論文)

- [1] Kohsaka, H., Takasu, E., Morimoto, T. and Nose, A.: A group of segmental premotor interneurons regulates the speed of axial locomotion in *Drosophila* larvae. *Current Biology*, Volume 24, Issue 22, p2632-2642, (2014).

(学位論文)

- [2] 宮本道人：介在ニューロン活動操作・運動パターン観察による運動回路の機能解剖（修士論文）
 [3] 丸田祥樹：ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動に同期して活動する新規グルタミン酸作動性介在神経細胞の同定と機能解析（修士論文、新領域創成科学研究科）
 [4] 坂巻裕美：ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動を興奮性に制御する介在神経細胞の新規同定（修士論文、新領域創成科学研究科）

(著書)

- [5] Kohsaka, H. and Nose, A. *Optogenetics in Drosophila*. (a book chapter in "Optogenetics"), Springer Verlag (2015)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [6] Kohsaka, K., Takasu, E. and Nose, A.: Speed of axial locomotion is regulated by local inhibitory interneurons in *Drosophila* larvae., ICN2014, 2014.7.28-8.1, Sapporo
 [7] Kohsaka, K., Takasu, E. and Nose, A.: Speed of axial locomotion is regulated by local inhibitory interneurons in *Drosophila* larvae., Neurofly2014, 2014.10.5-9, Crete, Greece

- [8] Thoma, V., Knapek, S., Arai, S., Hartl, M., Kohsaka, H. and Tanimoto, H.: Functional dissociation in sugar receptor neurons between and within taste organs of *Drosophila*., Neurofly2014, 2014.10.5-9, Crete, Greece

招待講演

- [9] 高坂洋史：“Optogenetic dissection of *Drosophila* larval locomotion.” Developmental Neurobiology Course 2014, 沖縄科学技術大学院大学 Okinawa Institute of Science and Technology 2014.7.13, Okinawa
 [10] Nose, A. : Functional dissection of the central circuits that regulate *Drosophila* larval locomotion., ESF-EMBO Flies, worms and robots: combining perspectives on minibrains and behaviours, 2014.11.11, Sant Feliu, Spain

(国内会議)

一般講演

- [11] Matsunaga, T., Kohsaka, H., Nose, A.: Simultaneous application of optogenetics and Ca²⁺ imaging revealed a role for motoneuronal activity in motor pattern generation., 第 11 回日本ショウジョウバエ研究会 (JDRC11), 2014.6.4-6 金沢
 [12] Hasegawa, E. and Nose, A.: Search for cholinergic interneurons that regulate larval locomotion., 第 11 回日本ショウジョウバエ研究会 (JDRC11), 2014.6.4-6 金沢
 [13] 板倉由季、高坂洋史、能瀬聡直：ショウジョウバエ幼虫の蠕動運動を制御する神経回路内の介在神経細胞の同定と機能解析、第 8 回 Motor Control 研究会, 2014.8.7-9 筑波
 [14] Hasegawa, E. and Nose, A.: Search for cholinergic interneurons that regulate larval locomotion., 第 8 回 Motor Control 研究会, 2014.8.7-9 筑波
 [15] Hasegawa, E. and Nose, A.: Search for cholinergic interneurons that regulate larval locomotion., 第 37 回日本神経科学大会, 2014.9.11-13 横浜
 [16] Kawasaki, T., Niki, S. and Nose, A.: Emergence of coordinated activity in the motor circuits of *Drosophila* embryos., 第 37 回日本神経科学大会, 2014.9.11-13 横浜
 [17] Yoon, Y., Nakae, K., Kohsaka, H., Ishii, S. and Nose, A.: Statistical analysis of global spontaneous activity of central neurons in *Drosophila* larvae., 第 37 回日本神経科学大会, 2014.9.11-13, 横浜
 [18] 宮本道人、松永光幸、高坂洋史、能瀬聡直「運動回路の機能単位配線を探る：一細胞活動操作・多細胞活動測定の生体内同時適用」、新学術領域研究「メゾスコピック神経回路から探る脳の情報処理基盤」平成 26 年度第 1 回領域会議, 2014.9.29-30, 静岡
 [19] Miyamoto, D., Matsunaga, T., Kohsaka, H. and Nose, A.: Exploring functional units of motor circuit wiring; simultaneous application of single-cell

activity manipulations and multi-cellular activity measurements in vivo., 第 37 回日本分子生物学会年会, 2014.11.25-27, 横浜

- [20] Niki, S., Takagi, S., Miyamoto, D. and Nose, A.: Search for interneurons involved in directional control of larval locomotion in *Drosophila*., 第 37 回日本分子生物学会年会, 2014.11.25-27, 横浜
- [21] 能瀬聡直: 時空間パターンを生み出すメゾ回路の作動原理の解明, 2014.12.11, 新学術領域研究「メゾ神経回路」領域成果報告会, 2014.12.11, 東京

招待講演

- [22] 能瀬聡直: 運動制御の基本原理解を模る: モデル動物の神経回路の作動からロボティクスへ, 第 8 回 Motor Control 研究会, 2014.8.8, 筑波

(講義等)

- [23] 能瀬聡直, 横浜市立大学大学院生命医科学研究科 神経科学序説, 2014.7.8, 横浜
- [24] 高坂洋史, Optogenetic in *Drosophila* lab rotations in Developmental Neurobiology Course 2014, 沖縄科学技術大学院大学 Okinawa Institute of Science and Technology 2014.7.12-13, Okinawa
- [25] 能瀬聡直, 理学系研究科 クラスタ講義, 2014.7.25, 本郷

(セミナー)

- [26] 高坂洋史, ショウジョウバエ幼虫を用いた運動速度制御回路の遺伝学的研究, 筑波大学下田臨海実験センター, 2014.10.22, 下田
- [27] Kohsaka, H.: A group of premotor interneurons, PMSI/looper/A02, regulate speed of *Drosophila* larval locomotion, LIG seminar, Janalia Research Campus, 2015.2.24, USA

7.2 樋口研究室

我々は、精製分子、培養細胞やマウス体内で起こる生命現象を 1 分子あるいは 1 粒子レベルで解明することをやっている。今年度は、分子モーターに関してダイニンの運動の根源であるパワーストローク距離測定、ミオシン集合体の高精度測定及び得られた結果をもとにモデル化を行った。培養細胞に関しては、膜タンパク質が細胞内に取り込まれる過程の運動を三次元的に追跡を行った。マウスに関しては、マウスを傷つけることなく非侵襲下にて耳介腫瘍内のがん細胞をコントラストよくイメージングすることができた。またがん細胞の中でも抗がん剤に対して耐性をもったがん幹細胞が、紫外線に対してどのくらいの耐性を持つのかを調べたところ、他のがん細胞より紫外線にも耐性を持つことがあきらかとなった。

7.2.1 ヒト細胞質ダイニンのパワーストローク測定

細胞質ダイニンは微小管上を主に歩幅 8.2nm で二足歩行し、細胞内物質輸送等に関わる重要なモータータンパク質である。ダイニンは大きな構造変化を伴うことで微小管上を運動し、力を発生すると考えられており、この運動を引き起こす原因となる構造変化をパワーストロークと呼ぶ。パワーストロークは ATP 加水分解産物の放出時に発生すると考えられているものの、ダイニンが微小管に結合した生理的な条件下でパワーストロークの距離を測定した研究はない。そこで、本研究ではダイニンのパワーストロークを測定するために、低 ATP 濃度条件下でダイニンが微小管と結合状態で単量体ダイニン 1 分子が運動する距離を、光ピンセットを用いて測定した。実験では、まず、変異キネシンを結合したビーズ 2 つを 1064nm レーザーでトラップし、トラップされたビーズを極性微小管の両端に結合させた。次に微小管を、カバーガラス上に固定したビーズに結合した単量体ダイニンと相互作用し、532nm レーザーでビーズと微小管の蛍光像を確認した。ダイニンは微小管と結合すると、ダイニンの弾性率が加算され、トラップビーズの変位の標準偏差は小さくなることを利用して、ダイニンが微小管と結合する領域 (数十ミリ秒) を指定した。トラップされたビーズの変位の測定結果から、ダイニンのパワーストローク発生に伴い運動する距離に補正算出し、ガウシアン分布でフィッティングした。本研究で得られたダイニンのパワーストローク距離から、二量体ダイニンの歩行運動モデルを推定した。

7.2.2 ミオシン集合体の力・変位測定およびシミュレーション解析

ミオシンフィラメントにアクチン線維を相互作用させて、ミオシン分子集合体の発する力を解析すると、30pN 前後の大きな力を発生していることがわかった。さらにステップ状に変化する力波形が観測され、特に高負荷におけるステップ状の力発生は、ミオシン 1 分子では不可能であり、複数の分子が同期して力発生する協同的な特性を示唆する結果である。そこでシミュレーションモデルを構築し、ミオシン分子間の力発生が同期するメカニズムについて検討した。実験データを再現するようにパラメータを推定した結果、低負荷から高負荷にかけて同期して力発生するミオシン分子数が増加する特性がみえてきた。力発生の同期現象を起こす因子として、負荷依存的に力発生状態の遷移率が変化する特性が重要であることがわかった。またパワーストロークとよばれる構造変化による力発生が 2 段階あると、1 段階の場合に比べ同期する確率が上がることも判明したこのシミュレーションモデルをもとに、サルコメア構造内でのアクチンの変位を予測した。その結果、等尺性収縮 (サルコメア長一定) においてでも、その内部にあるアクチンは揺らいでいることが予測された。

7.2.3 ミオシン集合体内の1分子の運動のイメージング

1分子計測においては、ミオシン1分子の動態を直接とらえるためにミオシン制御軽鎖を大腸菌で発現させたビオチンタグ入り制御軽鎖と入れ替え、そこにアビジンコーティングした金コロイド粒子 (Φ 20-30nm) を結合させ、その散乱像を高速度カメラで撮影した (10000 フレーム/秒)。また同時にミオシンフィラメントの発した力を計測するため、NEM処理したミオシンをコーティングしたビーズ (Φ 400nm) をアクチン片端に結合させて、光ピンセットでビーズをトラップすることにより、ミオシンと相互作用中の力を計測した。この計測からミオシンフィラメントの発する力とそのフィラメント上にある1分子の動態を同時にとらえることに初めて成功した。

7.2.4 PAR-1のエンドサイトーシス過程の3次元イメージング

培養細胞を用いたがん化に関連する研究成果を報告する。がん化を誘発する膜タンパク質 PAR-1 (Protease activated receptor 1) を過剰発現した培養細胞内がどのようにして、膜タンパク質を細胞内に取り込むのかその過程の追跡をおこなった。PAR-1 は、スロンピンや MMP1 といった分解酵素によって、アミノ酸の一部が切断されることで活性化し、これに伴い G タンパク質系のカスケードが活性化して細胞運動能を亢進し、転移を起こすことが知られている。我々は、細胞膜上の PAR-1 のエンドサイトーシス速度とスロンピンによるカスケードの活性化とに関連があるかをしらべるために、3次元的位置検出を行った。PAR-1 に対するモノクローナル抗体 (権田, 樋口 J. Biol.Chem 2010) に量子ドットを結合して、PAR-1 の位置を検出した。量子ドット-抗体複合体を細胞と反応させてから、約2時間後には、細胞上の量子ドットの半数が細胞内に取り込まれることが判明した。さらに詳しく調べるために、3次元的位置を数 nm 精度で検出できる装置を用いて、PAR-1 がどのようにエンドサイトーシスするのかを明らかにした (図 7.2.1)。約 150 秒の位置追跡によって、エンドサイトーシスする PAR1, 膜表面上を動くだけの PAR1 そして、膜の中から外に向かうエンドサイトーシスとは逆方向の運動が見られた。膜の中から外に向かう PAR-1 は、一度エンドサイトーシスした小胞が舞い戻ってきたのか、あるいは、リサイクリングの途中を見ているのかのいずれであろうと考えている。

7.2.5 非侵襲がん細胞の観察

がん組織・細胞の非侵襲 in vivo イメージングに關する現在作成中の論文に追加するデータを得るために2つの実験を行った。1つは、MDA-MB-231細胞

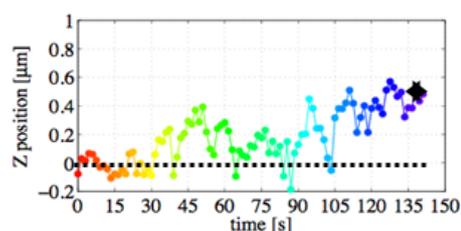


図 7.2.1: 細胞内にエンドサイトーシスされた PAR-1-量子ドットの深さ方向に変位する経過

の GFP-tub. と Wild Type を 9:1 で混合し、がん組織の蛍光タンパクのバックグラウンドを抑え in vivo イメージングを行い、これまで以上に鮮明な in vivo がん細胞像を得る研究で2つ目はヌードマウスの耳介の腫瘍形成率が低いが、例数が少なく SKID マウスとの間に有意差がみられないことから、例数を増やす実験である。MDA-MB-231 細胞の GFP-tub. と Wild Type を 9:1 で混合し、マウス耳介に接種した結果背景光の低くコントラストの高い細胞イメージングができた。また、ヌードマウスの耳介の腫瘍形成率についての実験では、これまで 4×10^6 cells の接種細胞数では腫瘍の形成がみられなかったが、 5.0×10^6 cells 以上の細胞を接種すると、腫瘍が形成することが新たに明らかとなった。

7.2.6 がん幹細胞の紫外線耐久性

近年、がん細胞の中でもがん幹細胞は抗がん剤耐性や放射線耐性を示すため、抗がん剤治療が十分にがんを撲滅できない主要因となっている。我々は、脳の悪性腫瘍からライン化された細胞 (Brain tumor stem cells, BTSCs) の紫外線に対する耐性を調べた。がん幹細胞と幹細胞ではない腫瘍細胞 U87 に紫外線 (280nm) 10 分照射した後に、幹細胞に結合した量子ドット-EGFR の細胞膜上の運動を追跡した。その結果、がん幹細胞の EGFR の膜上の運動は、照射前とほとんど変化しなかった。それに対して、幹細胞ではない U87 では、膜上の運動は大きく阻害された (遅くなった)。これらのことから、がん幹細胞が、紫外線に対する耐性があることが明らかとなった。がん幹細胞耐性について調べるもう一つの方法として、赤色 (700nm) の蛍光を発するとともに、活性酸素を発生する蛍光色素 IR700 を利用した。この IR700 に対する抗体を結合した。この IR700 と抗体との複合体をがん幹細胞と反応をさせた後、赤色 (645nm) で照射を行った結果、5分程度の照射によって、がん幹細胞がネクローシスを起こすことがあきらかとなった。この方法を用いれば、選択的にターゲットとする細胞を死滅させることができると期待される。

<報文>

(原著論文)

- [1] Ryoma Nakao, Kenji Kikushima, Hideo Higuchi, Nozomu Obana, Nobuhiko Nomura, Bai DongYing, Makoto Ohnishi, and Hidenobu Senpuku. Novel Approach for Purification and Selective Capture of Membrane Vesicles of Periodontopathic Bacteria, *Porphyromonas gingivalis*. PLoS One. May; 9:e95137 (2014)
- [2] Ichimura T., T. Jin, H. Fujita, H. Higuchi and T.M. Watanabe. Nano-scale measurement of biomolecules by optical microscopy and semiconductor nanoparticles. *Frontiers in Physiology*. 00273 (2014).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [3] Motoshi Kaya : Intermolecular cooperativity of skeletal myosins in myofilaments. Gordon Research Conference (Muscle & Molecular Motors), Mount Snow Resort West Dover, VT USA (July6-11, 2014)
- [4] Hideo Higuchi, Kenji Kikushima and Sayaka Kita Noninvasive in vivo imaging of neutrophil and tumor in mouse auricles. A3 Foresight Symposium on Nanomedicine, Sendai (2014.9.2)
- [5] Hideo Higuchi, Kenji Kikushima and Sayaka Kita. Noninvasive in vivo imaging of neutrophil and tumor in mouse auricles. 8th Internal Symposium on Nanomedicine, Matsushima (2014.12.7)

一般講演

- [6] Motoshi Kaya: Intermolecular cooperativity of skeletal myosins in myofilaments. Gordon Research Conference (Muscle & Molecular Motors), Mount Snow Resort West Dover, VT USA (July6-11, 2014)
- [7] Sayaka Kita and Hideo Higuchi: Noninvasive in vivo imaging of tumor cells in mouse auricles. The Nito Conference, Niseko, Hokkaido, (7/15-18, 2014)
- [8] Hideo Higuchi: Single molecule biophysics towards "in vivo". Cooperation in Physics Workshop: Todai-LMU (Munich, Germany) (2014.10.27)
- [9] Sayaka Kita and Hideo Higuchi: Novel mouse xenograft model for noninvasive in vivo imaging of human tumor cell and tissue in the auricle. The American Society for Cell Biology, Philadelphia, Pennsylvania, USA, (12/6-10, 2014)
- [10] Motoshi Kaya, Yoshiaki Tani, Takumi Washi, Toshiaki Hisada and Hideo Higuchi: Intermolecular cooperativity of skeletal myosins enhances force output in myofilaments. The 59th Annual Meeting of the Biophysical Society, Baltimore MD, USA (Feb 7-11, 2015)

(国内会議)

招待講演

- [11] 樋口秀男 「細胞内の分子ダイナミクス」 サブコースシンポジウム 生物物理の新展開、東大 (2014.4.25)
- [12] 樋口 秀男 「階層を上る 1 分子モータータンパク質」 東北大学応用物理学専攻セミナー、仙台 (2014.7.14)
- [13] 茅 元司: 1 分子計測技術を用いて効率的な筋収縮の仕組みを紐解く. 第 87 回日本生化学会大会シンポジウム「次世代型筋研究の夜明け」国立京都国際会館 (2014. 10.15-18)
- [14] 茅 元司: 1 分子顕微鏡を用いて見えてきた筋肉の効率的な収縮メカニズム. 日本光学会年次学術講演会シンポジウム「バイオフィotonicsの展望」筑波大学東京キャンパス文京校舎 (2014.11.5-7)

一般講演

- [15] 樋口 秀男, 喜多 清, 菊島健児, 権田幸祐, 多田大内 「生体内の分子イメージング」 新学術領域ナノメディシン分子科学シンポジウム、東工大 (2014.4.22)
- [16] 菊島健児, 樋口秀男: 蛍光量子ドットを用いた細胞内高速小胞輸送機構解明, ナノ学会第 12 回大会、京都 (2014.5.22-24)
- [17] 木下慶美, 神原丈敏, 池田諭史, 茅元司, 樋口秀男 : ヒト細胞質ダイニンのパワーストローク測定, ナノ学会第 12 回大会、京都 (2014.5.22-24)
- [18] 宇理須恒雄, 樋口秀男 (組織委員) 分子研研究会「細胞核内反応の分子科学」、岡崎 (2014.9.27)
- [19] 茅元司, 谷芳明, 小林琢也, 樋口秀男: ミオシンフィラメント上における骨格筋ミオシン分子間の協同性, 第 52 回生物物理学会、札幌 (2014.9.25-27)
- [20] 菊島健児, 樋口秀男: 蛍光量子ドットを用いた細胞内高速小胞輸送機構の解明, 第 52 回生物物理学会、札幌 (2014.9.25-27)
- [21] 佐久間守仁, 喜多清, 樋口秀男: 量子ドットを用いた脳がん幹細胞表面の膜たんぱく質の運動解析, 第 52 回生物物理学会、札幌 (2014.9.25-27)
- [22] 木下慶美, 神原丈敏, 池田諭史, 茅元司, 樋口秀男: ヒト細胞質ダイニンのパワーストローク測定, 第 52 回生物物理学会、札幌 (2014.9.25-27)
- [23] Seohyun Lee, 茅元司, 樋口秀男: Trafficking of membrane protein PAR-1 carried by endocytotic vesicles in cancer cells, 第 52 回生物物理学会、札幌 (2014.9.25-27)
- [24] 菊島健児, 中尾龍馬, 樋口秀男 : Imaging of Porphyromonas gingivalis infection using quantum dots 日本免疫学会 京都 (2014.12.10-12)
- [25] 喜多清, 樋口秀男: Novel mouse xenograft model for noninvasive in vivo imaging of human tumor cell and tissue in the auricle. 第 120 回日本解剖学会, 神戸、(2015.3.21-23)
- [26] 菊島健児, 中尾龍馬, 樋口秀男 高速原子間力顕微鏡を用いた大腸菌からの外膜ヴェシクル放出の観察、日本細菌学会総会、岐阜 (2015.3.26-28)
- [27] 茅 元司 鷲尾巧 久田俊明 樋口秀男 「骨格筋ミオシンの協同的な力発生メカニズム」生体運動合同班会議 東京 (2015.1.7-9)

- [28] Lee Seohyun、茅 元司、樋口秀男 「がん細胞膜表面の PAR-1 輸送解析」生体運動合同班会議 東京 (2015.1.7-9)
- [29] 佐伯喜美子、樋口秀男：生物物理学実験の改良、日本物理学会 第70回年次大会、早稲田大学 (2015.3)

<その他>

(著書)

- [30] 茅元司「2章 筋肉ミオシン」化学同人「1分子生物学」石渡信一，原田慶恵編 (2014.10)
- [31] 樋口秀男，多田隈尚史 分担執筆 「12章 細胞内での運動」化学同人「1分子生物学」石渡信一，原田慶恵編 (2014.10)

(社会活動関連)

- [32] 喜多清 小学校5年生への理科の講義 (ガン研究の紹介と発生についてとキャリア教育も兼ねて) つくばみらい市立 小絹小学校 約100名 (2014.7.14)
- [33] 樋口秀男 高校生に対する講義「傷を治す白血球と分子の活躍」沼津西高校生約90名、東大 (2014.10.20)

8 技術部門

(佐伯、八幡、柏葉、南野、大塚、* 南城、* 千葉)

* 技術補佐員

技術部門では、実験装置試作室業務、安全衛生業務、IT 関連業務、学生実験、学生実習、研究支援などの業務を行っている。技術部門の担当教員(福山、長谷川、吉田、岡本)とで月に1度の物理技術室ミーティングを行った。また、試作室担当の地惑専攻教員のゲラー教授、化学専攻教員の長谷川教授も加え試作室ミーティングを4回行った。

8.1 実験装置試作室

(大塚、南城、千葉)

8.1.1 利用状況

2014年4月から2015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(450件)
- 設計及び部品等の問い合わせ(外注を含む)
- 外注発注(126件)
- 他教室から作業依頼及び問い合わせ
主な依頼者(五月祭、素粒子センター、ビックバン国際センター、生物科学専攻寺島研、地球惑星科学専攻 船森研、吉川研、田中研、村上研、飯塚、並木、日屋根、清水、小暮、桜庭、化学 長谷川研、山内研、岩崎研、鍵研、佃研、合田研、近松、福村、佐藤、廣瀬、小澤、松尾研スペクトル化学研究センター、地殻化学実験施設、超高速強光子場科学研究センター)分析化学無機化学実験

8.1.2 工作実習

物理、地球惑星科学及び化学の大学院1年生を対象として、6月19日、6月25日、6月26日、6月27日まで下記の内容で工作講習会を行った。

- 参加人員:19名(物理16名、化学2名、地惑1名)

● 実習内容

1. 測定器(ノギス)の使い方
2. ねじの種類
3. シャーリング(切断機)の使用方法
4. 安全衛生上の注意事項、旋盤、フライス盤、シャーリング(切断機)、の使用方法の概略

<報文>

(原著論文)

- [1] 2014年度技術部報告集(東京大学大学院理学系研究科理学部技術部、2015年3月)。

8.2 技術室

(佐伯、八幡、南野)

8.2.1 安全衛生

(八幡)

- 理学系環境安全管理室員として労働安全に関する業務を行った。
- 理学系防災連絡会のメンバーとして、コアとなる防災WGに参加した。

8.2.2 IT 関連業務

(南野)

- 専攻サーバー運用管理
ウェブサーバーを学外のホスティングサービスに切り替え、物理学専攻ウェブサイトを更新した。
物理学専攻メールアカウント、メーリングリストの管理を行った。
教務データベースシステムの改修に向けて、物理教務係と連携しシステム解析や業務分析を行った。
- 理学系研究科情報システムチームでの業務
各専攻・施設のサブネット管理に携わり、理学系認証システムのユーザ管理や情報コンセント、DNS、ACLの設定変更を担当した。
- 教室ICT設備関連業務
物理教務係と連携し教室ICT設備のユーザガイドを整備し、座席数などの教室情報と合わせてウェブサイトに掲載した。

- ヘルプデスク業務
教員や研究員、学生のネットワーク関連のトラブルや相談の対応及び、月例の教授会でのヘルプデスクを行った。

8.2.3 学生実験

- 物理学実験 I、II (佐伯)
グループ編成、スケジュールリング
- 物理学実験 I (八幡)
3年生夏学期の物理学実験 I の「エレクトロニクス I」を技術指導した。
- 物理学実験 II
3年生冬学期の物理学実験 II の「生物物理学」を指導した。(佐伯)
3年生冬学期の物理学実験 II の「パルス技術」を指導した。(八幡)
- 物理学実験機器更新 (佐伯、八幡)
「真空技術」の機器更新を行った。老朽化していた油拡散ポンプと油回転ポンプの排気セットをターボ分子ポンプと油回転ポンプの排気セットに更新した。

8.2.4 研究支援

(八幡)

昨年度に引き続き、大学院生向けの Field Programmable Gate Array (FPGA) 講習会 (3 日間) を実施した。

- 全参加人数 20 名
- 実習内容
講義: FPGA の仕組み、応用範囲
実習: FPGA を使ったデジタル回路の基礎、IP(ライブラリー)を使った回路設計、広帯域・多チャンネルの Mixed Signal オシロスコープを使った信号観測

8.2.5 全学技術研修

(八幡)

東京大学の教室系技術職員を対象として、7月23日から7月25日まで、デジタルエレクトロニクス研修(中級 コース)として、先の FPGA 講習会と同じ内容で実施した。

- 参加人数 6 名

8.2.6 各種委員会

- 全学高圧ガスワーキンググループ (八幡)
- 総合技術本部 技術職員研修企画委員会 (佐伯)
- 全学技術発表会実行委員会 (佐伯)
- 寒剤管理連絡担当者 (八幡)
- 理学系研究科・理学部 技術委員会 (佐伯)
- 理学系研究科・理学部 運営委員会 (佐伯)
- 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)
- 理学系研究科・理学部 技術部ウェブサイト改訂ワーキンググループ (南野、佐伯)

<報文>

(原著論文)

- [1] 2014 年度技術部報告集 (東京大学大学院理学系研究科・理学部技術部、2015 年 3 月)。

<学術講演>

(国内会議)

一般講演

- [2] 八幡和志: FPGA を使った実験装置開発サポート、平成 26 年度北海道大学総合技術研究会 (北海道大学、2014 年 9 月)。
- [3] 南野真容子: Moodle を用いたメディアコンテンツ共有サイトの構築、平成 26 年度北海道大学総合技術研究会 (北海道大学、2014 年 9 月)。
- [4] 佐伯喜美子: 生物物理学学生実験の実験内容の改訂、平成 26 年度 北海道大学総合技術研究会 (北海道大学、2014 年 9 月)。
- [5] 八幡和志: 学生実験用アナログ回路教材の開発 (I)、日本物理学会 秋季大会 (中京大学、2014 年 9 月)。
- [6] 南野真容子: 物理学専攻サーバーの更新 -仮想化及びシステム更新-、第 29 回東京大学大学院理学系研究科・理学部 技術部シンポジウム (東京大学、2014 年 11 月)。
- [7] 佐伯喜美子: 真空技術学生実験の装置更新、第 29 回理学系研究科・理学部 技術部シンポジウム (東京大学、2014 年 11 月)。
- [8] 渡辺綾子、南野真容子、幸塚久典、佐伯喜美子: 技術部ウェブサイトの改訂、第 29 回理学系研究科・理学部 技術部シンポジウム (東京大学、2014 年 11 月)。

- [9] 黒岩真弓、栄慎也、佐伯喜美子、半澤明範、福田裕子、坂下春、鳥越裕介、渡辺綾子、吉田英人、野谷昭男、菅沼諭、吉田薫：学生実験担当技術職員の交流（学外編）、第29回理学系研究科・理学部 技術部シンポジウム（東京大学、2014年11月）.
 - [10] 栄慎也、渡辺綾子、福田裕子、野谷昭男、菅沼諭、吉田薫、坂下春、鳥越裕介、佐伯喜美子、半澤明範、黒岩真弓、吉田英人：学生実験担当技術職員の交流（学内編）、第29回理学系研究科・理学部 技術部シンポジウム（東京大学、2014年11月）.
 - [11] 佐伯喜美子：蛍光タンパク質を題材とした実験と分子構造を比較した学生実験の検討、第26回生物学技術研究会（岡崎コンファレンスセンター、2015年2月）.
 - [12] 八幡和志：学生実験用アナログ回路教材の開発（II）、日本物理学会 第70回年次大会（早稲田大学、2015年3月）.
 - [13] 南野真容子：遠隔講義対応型リアルタイムコミュニケーションシステムの開発I、日本物理学会 第70回年次大会（早稲田大学、2015年3月）.
 - [14] 佐伯喜美子、樋口秀男：生物物理学実験の改良、日本物理学会 第70回年次大会（早稲田大学、2015年3月）.
- （セミナー）
- [15] 八幡和志：FPGAの教材開発、平成26年度工学系技術センター技術部研修（北海道大学、2014年11月）.

II

Summary of group activities in 2014

1 Theoretical Nuclear Physics Group

Subjects: Structure and reactions of unstable nuclei, Monte Carlo Shell Model, Shell Evolution, Mean Field Calculations, Quantum Chaos
Curved spacetime, QCD phase diagram, Lattice simulation

Member: Takaharu Otsuka, Kenji Fukushima, Takashi Abe and Arata Yamamoto

In the nuclear theory group, a wide variety of subjects are studied. The subjects are divided into two major categories: Nuclear Structure Physics and Theoretical Hadron Physics.

Nuclear Structure Physics

In the Nuclear Structure group (T. Otsuka and T. Abe), quantum many-body problems for atomic nuclei, issues on nuclear forces and their combinations are studied theoretically from many angles. The subjects studied include

- (i) structure of unstable exotic nuclei, with particular emphasis on the shell evolution,
- (ii) shell model calculations including Monte Carlo Shell Model,
- (iii) collective properties and Interacting Boson Model,
- (iv) reactions between heavy nuclei,
- (v) other topics such as dilute neutron system, quantum chaos, etc.

The structure of unstable nuclei is the major focus of our interests, with current intense interest on novel relations between the evolution of nuclear shell structure (called shell evolution for brevity) and characteristic features of nuclear forces, for example, tensor force, three-body force, etc. Phenomena due to this evolution include the disappearance of conventional magic numbers and appearance of new ones. We have published pioneering papers on the shell evolution in recent years. The new magic number 34 in an exotic nucleus ^{54}Ca was confirmed experimentally for the first time in 2013 and was reported in Nature.

The structure of such unstable nuclei has been calculated by Monte Carlo Shell Model, for instance to Ni isotopes. Their applications have been made in collaborations with experimentalists internationally spread, *e.g.*, [1, 2]. Collaborations with many groups produce various interesting results, for instance [3, 4, 5, 6, 7].

The Monte Carlo Shell Model has been improved with further developments, and we have carried out a number of calculations on the K computer.

The mean-field based formulation of the Interacting Boson Model has been developed by this group, and is now studied in somewhere else.

We are studying on dilute neutron systems, time-dependent phenomena like fusion and multi-nucleon transfer reactions in heavy-ion collisions.

Theoretical Hadron Physics

In Theoretical Hadron Physics group (K. Fukushima and A. Yamamoto), many-body problems of quarks and gluons are studied theoretically on the basis of the quantum chromodynamics (QCD). The subjects studied include quark-gluon plasma in relativistic heavy-ion collisions, particle production mechanism, lattice gauge simulations, matter under extreme conditions, neutron stars, etc.

Highlights in research activities of this year are listed below:

1. Real-time stochastic quantization [9]
2. Chiral condensate in curved spacetimes [11]
3. Lattice QCD in curved spacetimes [14]
4. Topological structure of QCD vacuum [23]

References

- [1] F. Flavigny et al., “Characterization of the low-lying 0^+ and 2^+ states in ^{68}Ni via beta decay of the low-spin ^{68}Co isomer”, *Phys. Rev. C* **91**, 034301, (2015).
- [2] C. J. Chiara et al., “Identification of deformed intruder states in semi-magic ^{70}Ni ”, *Phys. Rev. C* **91**, 044309 (2015).
- [3] P. Doornenbal et al., “Rotational level structure of sodium isotopes inside the “island of inversion””, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2014**, 053D01 (2014).
- [4] N. Kobayashi et al., “Observation of a p-Wave One-Neutron Halo Configuration in ^{37}Mg ”, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 242501 (2014).
- [5] A. Sanetullaev et al., “Neutron spectroscopic factors of ^{55}Ni hole-states from (p, d) transfer reactions”, *Phys. Lett. B* **736**, 137 (2014).
- [6] H. Watanabe et al., “Monopole-Driven Shell Evolution below the Doubly Magic Nucleus ^{132}Sn Explored with the Long-Lived Isomer in ^{126}Pd ”, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 042502 (2014).
- [7] T. Nakamura et al., “Deformation-Driven p -Wave Halos at the Drip Line: ^{31}Ne ”, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 142501 (2014).
- [8] K. Fukushima, “Spectral representation of the particle production out of equilibrium - Schwinger mechanism in pulsed electric fields”, *New J. Phys.* **16**, 073031 (2014).
- [9] K. Fukushima and T. Hayata, “Schwinger mechanism with stochastic quantization”, *Phys. Lett. B* **735**, 371 (2014).
- [10] R. Anzaki, K. Fukushima, Y. Hidaka and T. Oka, “Restricted phase-space approximation in real-time stochastic quantization”, *Annals of Phys.* **353**, 107 (2015).
- [11] A. Flachi and K. Fukushima, “Chiral Mass-Gap in Curved Space”, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 091102 (2014).
- [12] K. Fukushima, “Hadron resonance gas and mean-field nuclear matter for baryon number fluctuations”, *Phys.Rev.C* (in press).
- [13] A. Flachi, K. Fukushima and V. Vitagliano, “Geometrically induced magnetic catalysis and critical dimensions”, *Phys.Rev.Lett.* (in press).
- [14] A. Yamamoto, “Lattice QCD in curved spacetimes”, *Phys. Rev. D* **90**, 054510 (2014).
- [15] T. Kanazawa and A. Yamamoto, “Asymptotically free lattice gauge theory in five dimensions”, *Phys. Rev. D* **91**, 074508 (2015).
- [16] T. Hayata and A. Yamamoto, “Inhomogeneous Polyakov loop induced by inhomogeneous chiral condensates”, *Phys. Lett. B*, in press (2015).
- [17] S. Benic, D. Horvatic, D. Kekez and D. Klabucar, “A $U_A(1)$ symmetry restoration scenario supported by the generalized Witten-Veneziano relation and its analytic solution”, *Phys. Lett. B* **738**, 113 (2014).
- [18] N. Yasutake, R. Lastowiecki, S. Benic, D. Blaschke, T. Maruyama and T. Tatsumi, “Finite-size effects at the hadron-quark transition and heavy hybrid stars”, *Phys. Rev. C* **89**, 065803 (2014).
- [19] S. Benic, “Heavy hybrid stars from multi-quark interactions”, *Eur. Phys. J. A* **50** 111, (2014).
- [20] B. Radovic and S. Benic, “Electroweak breaking and Dark Matter from the common scale”, *Phys. Lett. B* **732**, 91 (2014).
- [21] S. Benic, D. Horvatic and J. Klaric, “Recovering the chiral critical end-point via delocalization of quark interactions”, *Phys. Rev. D* **89**, 054025 (2014).
- [22] S. Benic, D. Blaschke, G. A. Contrera and D. Horvatic, “Medium induced Lorentz symmetry breaking effects in nonlocal PNJL models”, *Phys. Rev.D* **89**, 016007 (2014).
- [23] K. Mameda, “QCD θ -vacua from the chiral limit to the quenched limit”, *Nucl. Phys B* **889**, 712 (2014).

2 Theoretical Particle and High Energy Physics Group

Research Subjects: The Unification of Elementary Particles & Fundamental Interactions

Members: Takeo Moroi, Koichi Hamaguchi, Yutaka Matsuo, Yuji Tachikawa
Motoi Endo, Teruhiko Kawano, Kazunori Nakayama, Tatsuma Nishioka

The main research interests at our group are in string theory, quantum field theory and unification theories. String theory, supersymmetric field theories, and conformal field theories are analyzed relating to the fundamental problems of interactions. In the field of high energy phenomenology, supersymmetric unified theories are extensively studied and cosmological problems are also investigated.

We list the main subjects of our researches below.

1. High Energy Phenomenology
 - 1.1 SUSY Phenomenology [6, 7, 8, 2]
 - 1.2 Collider Phenomenology [1, 23, 24, 25]
 - 1.3 Anomalous magnetic moment
 - 1.4 Cosmic-ray [3, 5, 11, 12, 13]
 - 1.5 Gravitational waves [4, 22]
 - 1.6 Scalar dynamics [9, 10, 21, 26]
 - 1.7 Baryogenesis [20]
 - 1.8 Inflation models [14, 15, 18, 19, 16, 17, 27, 28, 29, 30]
2. Superstring Theory and Formal Aspects of Quantum Field Theories
 - 2.1 Formulation of M5-branes [32]
 - 2.2 Dualities and Integrable systems [31, 33]
 - 2.3 Quantum field theories and entanglement entropies [34, 35, 36, 37]
 2. 4d Super Yang-Mills theory [39]
 - 2.2 5d Super Yang-Mills theory [38, 40]
 2. 6d superconformal field theories [41, 42]
 2. Supersymmetric quantum field theories in general [43, 44]

References

- [1] M. Endo and Y. Yamamoto, JHEP **1406**, 126 (2014) [arXiv:1403.6610 [hep-ph]].
- [2] K. Hamaguchi, M. Ibe, T. T. Yanagida and N. Yokozaki, Phys. Rev. D **90** (2014) 1, 015027 [arXiv:1403.1398 [hep-ph]].
- [3] Y. Ema, R. Jinno and T. Moroi, Phys. Lett. B **733**, 120 (2014) [arXiv:1312.3501 [hep-ph]].
- [4] R. Jinno, T. Moroi and T. Takahashi, JCAP **1412**, no. 12, 006 (2014) [arXiv:1406.1666 [astro-ph.CO]].
- [5] Y. Ema, R. Jinno and T. Moroi, JHEP **1410**, 150 (2014) [arXiv:1408.1745 [hep-ph]].
- [6] M. Endo, T. Kitahara and T. Yoshinaga, JHEP **1404**, 139 (2014) [arXiv:1401.3748 [hep-ph]].
- [7] K. Ishikawa, T. Kitahara and M. Takimoto, Phys. Rev. Lett. **113**, no. 13, 131801 (2014) [arXiv:1405.7371 [hep-ph]].
- [8] K. Ishikawa, T. Kitahara and M. Takimoto, Phys. Rev. D **91**, no. 5, 055004 (2015) [arXiv:1410.5432 [hep-ph]].
- [9] K. Mukaida, K. Nakayama and M. Takimoto, JCAP **1406**, 013 (2014) [arXiv:1401.5821 [hep-ph]].
- [10] K. Mukaida, K. Nakayama and M. Takimoto, Phys. Rev. D **89**, no. 12, 123515 (2014) [arXiv:1402.1856 [astro-ph.CO]].
- [11] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B **735**, 338 (2014) [arXiv:1403.1733 [hep-ph]].
- [12] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B **734**, 178 (2014) [arXiv:1403.7390 [hep-ph]].

- [13] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B **737**, 311 (2014) [arXiv:1405.4670 [hep-ph]].
- [14] K. Nakayama and F. Takahashi, Phys. Lett. B **734**, 96 (2014) [arXiv:1403.4132 [hep-ph]].
- [15] K. Mukaida and K. Nakayama, JCAP **1408**, 062 (2014) [arXiv:1404.1880 [hep-ph]].
- [16] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B **734**, 358 (2014) [arXiv:1404.2472 [hep-ph]].
- [17] H. Murayama, K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B **738**, 196 (2014) [arXiv:1404.3857 [hep-ph]].
- [18] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, JHEP **1409**, 014 (2014) [arXiv:1406.4265 [hep-ph]].
- [19] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B **737**, 151 (2014) [arXiv:1407.7082 [hep-ph]].
- [20] T. Higaki, K. Nakayama, K. Saikawa, T. Takahashi and M. Yamaguchi, Phys. Rev. D **90**, no. 4, 045001 (2014) [arXiv:1404.5796 [hep-ph]].
- [21] T. Moroi, K. Mukaida, K. Nakayama and M. Takimoto, JHEP **1411**, 151 (2014) [arXiv:1407.7465 [hep-ph]].
- [22] S. Kuroyanagi, K. Nakayama and J. Yokoyama, PTEP **2015**, no. 1, 013E02 (2015) [arXiv:1410.6618 [astro-ph.CO]].
- [23] M. Endo, K. Hamaguchi, K. Ishikawa and M. Stoll, Phys. Rev. D **90** (2014) 5, 055027 [arXiv:1405.2677 [hep-ph]].
- [24] M. Stoll, JHEP04(2015)111 [arXiv:1410.4637 [hep-ph]].
- [25] M. Endo and Y. Takaesu, Phys. Lett. B **743**, 228 (2015) [arXiv:1407.6882 [hep-ph]].
- [26] K. Mukaida and M. Takimoto, JCAP **1408**, 051 (2014) [arXiv:1405.3233 [hep-ph]].
- [27] K. Hamaguchi, T. Moroi and T. Terada, Phys. Lett. B **733** (2014) 305 [arXiv:1403.7521 [hep-ph]].
- [28] S. V. Ketov and T. Terada, Phys. Lett. B **736** (2014) 272 [arXiv:1406.0252 [hep-th]].
- [29] S. V. Ketov and T. Terada, JHEP **1412** (2014) 062 [arXiv:1408.6524 [hep-th]].
- [30] T. Terada, Y. Watanabe, Y. Yamada and J. Yokoyama, JHEP **1502** (2015) 105 [arXiv:1411.6746 [hep-ph]].
- [31] Y. Matsuo, C. Rim and H. Zhang, JHEP **1409**, 028 (2014) [arXiv:1405.3141 [hep-th]].
- [32] P. M. Ho and Y. Matsuo, JHEP **1412**, 154 (2014) [arXiv:1409.4060 [hep-th]].
- [33] S. Nakamura, F. Okazawa and Y. Matsuo, PTEP, no. 3, 033B01 (2015) [arXiv:1411.4222 [hep-th]].
- [34] N. Hama, T. Nishioka and T. Ugajin, JHEP **1412** (2014) 048 [arXiv:1410.2206 [hep-th]].
- [35] T. Kawano, Y. Nakaguchi and T. Nishioka, JHEP **1412**, 161 (2014) [arXiv:1410.5973 [hep-th]].
- [36] Y. Nakaguchi and T. Nishioka, JHEP **1504**, 072 (2015) [arXiv:1501.01293 [hep-th]].
- [37] K. Ohmori and Y. Tachikawa, Journal of Statistical Physics, in press. arXiv:1406.4167 [hep-th].
- [38] H. Hayashi, Y. Tachikawa and K. Yonekura, JHEP **1502** (2015) 089 [arXiv:1410.6868 [hep-th]].
- [39] Y. Tachikawa, JHEP **1503** (2015) 035 [arXiv:1412.2830 [hep-th]].
- [40] Y. Tachikawa, PTEP **2015** 4, 043B06 [arXiv:1501.01031 [hep-th]].
- [41] K. Ohmori, H. Shimizu and Y. Tachikawa, JHEP **1408**, 002 (2014) [arXiv:1404.3887 [hep-th]].
- [42] K. Ohmori, H. Shimizu, Y. Tachikawa and K. Yonekura, PTEP **2014**, no. 10, 103B07 (2014) [arXiv:1408.5572 [hep-th]].
- [43] Y. Tachikawa, J. Phys. Conf. Ser. **597** (2015) 1, 012005.
- [44] Y. Tachikawa, Lect. Notes Phys. **890** 2014 [arXiv:1312.2684 [hep-th]].

3 Hayano Group

Research Subjects: Precision spectroscopy of exotic atoms and nuclei

Member: Ryugo S. Hayano and Takatoshi Suzuki

1) Antimatter study at CERN's antiproton decelerator

Laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms Metastable antiprotonic helium atom ($\bar{p}\text{He}^+$) is three-body Rydberg atom, which consists of a helium nucleus surrounded by a ground state electron and an antiproton with large principal ($n \sim 38$) and orbital ($\ell \sim n + 1 \sim 38$) quantum numbers.

The antiproton-to-electron mass ratio ($M_{\bar{p}}/m_e$) can be derived by comparing the experimental atomic transition frequencies of antiprotonic helium atoms measured by high-precision laser spectroscopy, with three-body QED calculations by the group of V.I. Korobov, L. Hillico, and J.-P. Karr. The agreement of this value and proton-to-electron mass ratio with a precision of 1.3×10^{-9} is one of the verification of the CPT symmetry. In order to reduce systematic uncertainties caused by the particle masses and various QED and finite nuclear-size effects, it is important to measure many transitions precisely.

In 2014, systematic uncertainty studies of two transitions in $(n, \ell) = (36, 34) \rightarrow (37, 33)$ and $(34, 32) \rightarrow (33, 31)$ were carried out using single-photon laser spectroscopy. The result was carefully analyzed together with existing 13 transition frequencies. The preliminary experimental transition frequencies are decided with a precision of around 2.5×10^{-9} .

The more precise $M_{\bar{p}}/m_e$ value will be published during 2015.

\bar{p} -nucleus annihilation cross section at ultra-low energies Normally, an antiproton is absorbed by a nucleus and annihilates with a surface nucleon. The cross sections, called annihilation cross sections, has been measured in order to study the interactions between them. In 2012, we performed an experiment with antiproton beam of 5.3 MeV/c, and identified the signal of its annihilation for the first time in that energy region.

We are planning to measure the cross section in a momentum region of 100 MeV/c. In that region, annihilation cross sections of antineutron on some nucleus show unexpected enhancement, and we can understand this behaviors by comparing to these data to the one of antiprotons. In 2015, we are going to measure the cross sections with carbon and aluminum target. In 2014, we made a proposal of the experiment and submitted it to the program advisory committee. In that proposal we performed Monte-Carlo simulations in order to estimate the backgrounds, determined the experimental setup, and showed the feasibility of the experiment. The proposal was accepted and we are going to perform the experiment in the end of 2015.

2) Spectroscopy of pionic atoms in inverse kinematics

We are planning a spectroscopy of pionic atoms with unstable nuclei to investigate the density dependence of restoration of chiral symmetry breaking. In the experiment, missing mass spectroscopy of inverse kinematics of ($d, {}^3\text{He}$) reaction will be performed with a setup using a deuterium gas active-target MWDC (Multi Wire Drift Chamber) and silicon detectors.

In this year, we fabricated a prototype of the deuterium gas MWDC and studied its performance. Honeycomb structure of 6 mm wire geometry was adopted for the prototype and it consisted of 10 planes. As the first step, the detector was tested with H_2 gas instead of D_2 gas. An α source and a silicon strip detector were installed inside the detector and gas gain and position resolution were evaluated. In the measurement, the position resolution was estimated to be 100–300 μm for each plane, which was good enough for the experiment. However, position dependence of gas gain was observed and we could not achieved enough gas gain due to a discharge in specific cells. We will improve the situation by separating high voltage for each cell.

3) Study of η' mesic nuclei

η' meson has a large mass of 958 MeV/c². This is understood by the $U_A(1)$ anomaly effect, and the strength of this effect on the η' mass may be related to spontaneous breaking of chiral symmetry. In the nuclear medium, due to partial restoration of chiral symmetry, the η' mass may be reduced. In this case, an attraction between an η' and a nucleus is induced, and η' meson-nucleus bound states (η' mesic nuclei) may exist.

In 2014, we performed a missing-mass spectroscopy experiment to search for η' mesic nuclei at GSI. A 2.5 GeV proton beam impinged onto a carbon target to potentially produce the η' mesic nuclei in the $^{12}\text{C}(p,d)$ reaction. The momentum of the ejectile deuteron was measured by FRS to obtain the missing-mass of the reaction. The analysis of the accumulated data is in progress.

4 Sakurai Group

Research Subjects: Nuclear structure and dynamics of exotic nuclei

Member: Hiroyoshi Sakurai and Megumi Niikura

Exotic nuclei located far from the stability line are new objectives for nuclear many-body problems. Our group explores exotic structures and dynamics in the nuclei that have never been investigated before, such as those with largely imbalanced proton and neutron numbers, hence to discover new phenomena and exotic properties in unstable nuclei. Our experimental programs utilize fast radioactive isotope (RI) beams available at RI Beam Factory (RIBF) at RIKEN. RIBF is a leading facility where RI beam intensities are the highest in the world. We maximize RIBF utilization to access nuclei very far from the β -stability line as well as to exploit new types of experiments and new methods of spectroscopy via new ideas and detector developments.

Research subjects to be covered by our group are followings.

Half-lives measurement in the vicinity of doubly-magic ^{78}Ni

The half-lives of 20 neutron-rich nuclei with $Z = 27-30$ have been measured at RIBF, including five new half-lives of $^{76,77}\text{Co}$, $^{79,80}\text{Ni}$ and ^{81}Cu . In addition, the half-lives of $^{73-75}\text{Co}$, $^{74-78}\text{Ni}$, $^{78-80}\text{Cu}$, and $^{80-82}\text{Zn}$ were determined with higher precision than previous works. Based on these new results, a systematic study of the β -decay half-lives has been carried out, which suggests a sizable magicity for both the proton number $Z = 28$ and the neutron number $N = 50$ in ^{78}Ni .

In-beam γ -ray spectroscopy on ^{78}Ni

In May 2015, the in-beam γ -ray spectroscopy experiment named as SEASTAR to investigate the excited states of ^{78}Ni by measuring the de-excitation γ -rays after the $^{79}\text{Cu}(p,2p)^{78}\text{Ni}$ reaction was conducted at RIBF. The secondary beam ^{79}Cu impinged onto a 10-cm-thick liquid hydrogen target with recoil proton tracking system MINOS surrounded by NaI(Tl) γ -ray detection array DALI2. Although the analysis is still on going, we succeeded in observing an indication of de-excitation γ -rays of ^{78}Ni in the spectrum.

Deformed halo structure in ^{31}Ne and ^{37}Mg

The inclusive cross-sections and parallel momentum distribution of single-neutron removal from the very neutron-rich nuclei in an "island of inversion", ^{31}Ne and ^{37}Mg , on Pb and C targets have been measured at RIBF. A combined analysis of these distinct nuclear- and Coulomb-dominated reaction data shows that the both ^{31}Ne and ^{37}Mg ground states have small separation energy and an appreciable p -wave neutron single-particle strength. We confirm that ^{31}Ne and ^{37}Mg are the heaviest deformed p -wave halo nuclei identified to date.

Neutron single-particles states in ^{35}Mg populated by one-neutron knockout reaction

The in-beam γ -ray spectroscopy experiment of ^{35}Mg was performed at RIBF via an one-neutron knockout reaction to clarify the neutron single-particle configuration in ^{36}Mg . The γ -ray energy spectrum of ^{35}Mg and the exclusive one-neutron removal cross-sections were obtained. The level structure and single-particle nature of the excited states are discussed by comparison with several theoretical model calculations.

Exotic cluster structure in ^{16}C

An invariant mass spectroscopy was performed aiming at search for α -cluster states in ^{16}C populated by α -inelastic scattering at 200 MeV/ u . The excitation energies of ^{16}C are reconstructed from invariant mass of $^{16}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{Be} + ^4\text{He}$ decay channel by measuring their four momenta with the SAMURAI spectrometer. Candidates of α -cluster states near the decay threshold energy are found in an excitation energy spectrum.

Missing mass spectroscopy beyond proton drip-line nucleus

The neutron transfer reactions on a radioactive ^{10}C secondary beam were applied to study the nuclear structure of beyond the proton drip-line nucleus, ^8C . The recoiling particles of the (p, t) reaction were identified by the Dubna telescope consisting of the double-sided strip silicon detector followed by the CsI scintillators. The excitation energy of ^8C was deduced via missing mass method and the differential cross-sections for ground and excited states of ^8C were measured for the first time.

5 Wimmer Group

Research Subjects: Nuclear structure and reactions, shape coexistence in exotic nuclei

Member: K. 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.

Experimental studies are performed at world-leading laboratories, such as the RIBF, RIKEN, the NSCL in the USA or the TRIUMF facility in Canada. Employing different experimental techniques, like knockout and transfer reactions, we will obtain new information on the single-particle wave function composition of exotic nuclei. Complementary studies of Coulomb excitation will result in measures of the collective properties. A combination of different experimental approaches leads to a deeper understanding of the structure of exotic nuclei and allows us to track the evolution of nuclear shell structure towards the drip-lines.

6 Komamiya group

Research Subjects: (1) Preparation for the accelerator and an experiment for the International linear e^+e^- collider ILC, including the beam focus study at ATF2 of KEK using a nano-meter beam size monitor (Shintake Monitor), and research and development of the electromagnetic calorimeter for an ILC experiment; (2) Higgs boson and supersymmetric particle searches with the ATLAS detector at the LHC pp collider; (3) Experiments to study gravitational quantum effects and to search for new short range forces using ultra-cold and cold neutron beams.

Members: Sachio Komamiya, Yoshio Kamiya, Daniel Jeans

We particle physicists are entering an exciting period in which a new paradigm of the field will be opened at the TeV energy scale, triggered by the recent discovery of a Higgs Boson at LHC. The details of the observed Higgs Boson and other new particles will be studied in the 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 August 2004 it was internationally agreed to use a superconducting RF system as the main linac technology. The Technical Design Report was completed and published in 2013. Since then, ILC design and hardware development have been passed to the Linear Collider Collaboration (LCC) lead by Lyn Evans. The Linear Collider Board (LCB), chaired by Sachio Komamiya, is the oversight

body of LCC. We are working on ILC accelerator related hardware development, especially on the final focus system. We are developing the Shintake beam size monitor at the ATF2, a test accelerator system for ILC located at KEK. The Shintake beam size monitor recently measured the world record beam size of 44 nm. We are also studying possible physics scenarios and the large detector concept (ILD) for an experiment at ILC. Since autumn 2012 a staff scientist from UK who is an expert on the silicon electromagnetic calorimeter has joined our group. Since then hardware and simulation studies of silicon-tungsten sandwich electromagnetic calorimeters for ILC detector have been extensively performed.

2) ATLAS experiment at LHC: The epoch of the new paradigm for particle physics is being opened by the experiments at LHC. In July 2012, a Higgs Boson was discovered by the ATLAS and CMS experiments at LHC. We call this the “2012 July Revolution”. Our students have been analysing ATLAS data to elucidate the properties of the Higgs Boson. Other students are performing searches for supersymmetric partners of the gluon and partners of electroweak gauge bosons and Higgs bosons. Some of these results have already been 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 forces using beams of ultra-cold neutrons (UCN): A detector to measure gravitational bound states of UCNs has been developed. We decided to use CCDs to measure the position of UCNs. The CCD is covered by a layer of ^{10}B to convert neutrons into charged nuclear fragments. The UCNs pass through a neutron guide of height 100 μm in which they form bound states due to their interaction with the earth’s gravity, modulating their vertical distribution. In 2008 we tested our neutron detector at ILL Grenoble, where a first test experiment was subsequently performed in 2009. We significantly improved our detector system and performed a full experiment in 2011; the data analysis was completed in 2012. The observed modulations in the UCNs’ vertical distribution are in good agreement with the predictions of quantum mechanics, as calculated using the Wigner function. This is the first observation of gravitationally bound states of UCNs with sub-micron spatial resolution. This result was published in PRL. In 2013 we have started a new experiment to search for new short range forces using cold neutron beams scattered off Xe atoms. The experiment was performed in HANARO, KAERI, Korea in 2014. A new world record of the limit on short range forces was established by this experiment and will soon be published in PRL.

7 Minowa-Group

Research Subjects: Experimental Particle Physics without Accelerators

Member: MINOWA, Makoto and INOUE, Yoshizumi

Various kinds of astro-/non-accelerator/low-energy particle physics experiments have been performed and are newly being planned in our research group.

Sumico, Tokyo Axion Helioscope, withdrew from the Lab. in March, 2015. Its first result was published in 1998, 7 years before CAST of CERN. We sincerely thank her for her work in state-of-the-art science over the years.

We developed a segmented reactor-antineutrino detector made of plastic scintillators for application as a tool in nuclear safeguards inspection and performed mostly unmanned field operations at Ohi Power Station in Fukui, Japan with a 360-kg prototype called PANDA36. PANDA is an acronym for plastic anti-neutrino detector array. At a position outside the reactor building, we measured the difference in reactor antineutrino flux above the ground when the reactor was active and inactive. This was the world’s first aboveground antineutrino detection of a nuclear reactor.

Unexpected gamma ray bursts were detected with the PANDA36 detector during the operation at the power plant reactor. The largest burst lasted for 180 s and the detection rate amounted to $5.5 \times 10^2/\text{s}$ at its peak. The energy spectrum is continuous and extends upto 10–15 MeV. The bursts are most probably due to electromagnetic showers of relativistic electrons created in thunder clouds. Indeed, we found thunder cloud activities at the time of the bursts in the meteorological data. The detailed mechanisms of the burst generation is under the study.

A larger prototype PANDA64 of 640 kg mass is now ready and was deployed at the Norikura Observatory, located at 2,770 m above sea level, of Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo. We observed 12 long duration gamma-ray bursts during the measurement from July through September, 2014.

The bursts observed at Norikura are similar to those observed at Ohi Power Station at sea level, but energy and rate are quite different. While energy is higher at Norikura than at Ohi, rate is lower at Norikura than at Ohi to the contrary. It might probably be due to lower air density at Norikura.

We just started a construction of an ultimate 100-module detector, PANDA100 and waiting for the power plant reactor to go online.

The existence of the hidden sector photons and other hidden sector particles are predicted by extensions of the Standard Model, notably the ones based on the string theory. The hidden sector photon is one of the candidates for the cold dark matter of the Universe. It would be converted into an ordinary photon at a surface of conductive material with a conversion probability depending on its mixing parameter with the ordinary photon. There have been an idea to use a spherical mirror to focus thus generated photons onto a photon sensor to enhance the detection efficiency of the hidden sector photon detector.

We tried to realize this kind of hidden photon search experiments in two wavelength bands. Hidden sector photons of \sim eV mass have been searched for using an optical concave mirror of 50cm diameter and a photon counting PMT. On the other hand, a dish antenna of 2.2m diameter for Ku-band microwave reception has been used to search for hidden sector photons of lower mass in the range of $\sim 50\mu\text{eV}$.

No signal was found in either of the search and upper limits to the mixing parameter χ were set at $\chi < 6 \times 10^{-12}$ and $\chi < 2 \times 10^{-12}$ for the hidden photon mass $m_{\gamma'} = 3.1 \pm 1.2\text{eV}$ and $m_{\gamma'} \simeq 50\mu\text{eV}$, respectively.

8 Aihara & Yokoyama Group

Research Subjects: (1) Study of CP -violation and search for physics beyond the Standard Model in the B meson and the τ lepton systems (Belle); (2) Search for physics beyond the Standard Model at Super B Factory (Belle II); (3) Dark energy survey at Subaru telescope (Hyper Suprime-Cam); (4) Search for proton decays (Super-Kamiokande); (5) Long baseline neutrino oscillation experiment (T2K); (6) R&D for the next generation neutrino and nucleon decay experiment (Hyper-Kamiokande); (7) R&D of new generation photodetectors.

Members: H. Aihara, M. Yokoyama, Y. Onuki, and D. Epifanov

1. Search for new physics at KEK B -factory: Belle experiment

One of the major research activities in our group has been a study of CP -violation and a search for physics beyond the Standard Model in the B meson and the τ lepton systems using the KEK B -factory (KEKB). This past year, we continued a study of Michel parameters of the τ lepton, which is sensitive to physics beyond the Standard Model. Using ~ 900 million $\tau^+\tau^-$ pairs recorded with the Belle detector, we intend to significantly improve the precision of measurement over previous measurements. We also established analysis for an improvement of CP violating parameter, ϕ_3 , using $B^- \rightarrow D^*K^-$ decays in addition to already analyzed $B^- \rightarrow DK^-$ mode.

2. Physics at luminosity frontier: Belle II experiment

The SuperKEKB project started in 2010. The upgraded accelerator, SuperKEKB, will have 40 times more luminosity than KEKB. The Belle detector is also being upgraded as Belle II detector with cutting-edge technology. One of key elements for the success of Belle II will be its Silicon Vertex Detector (SVD) to precisely measure the decay points of B mesons. Our group is responsible for the construction of outer layers of Belle II SVD. This year we established the electrical quality assurance procedures of Belle II SVD ladders. The R&D for the upgrade of the Belle II electromagnetic calorimeter was also carried out.

3. Study of Dark Energy with Subaru telescope: Hyper Suprime-Cam

As an observational cosmology project, we have been involved in building a 1.2 Giga pixel CCD camera (Hyper Suprime-Cam) mounted on the prime focus of the Subaru telescope. With this wide-field camera, we plan to conduct extensive wide-field deep survey to investigate weak lensing. This data will be used to develop 3-D mass mapping of the universe. It, in turn, will be used to study Dark Energy. This year, we developed a novel method of measuring the cluster lensing distortion profiles, and adopted it to Suprime-Cam data. We will continue to study dark matter and dark energy with the data from wide-field survey started last year.

4. Search for proton decays: Super-Kamiokande

Proton decay is the only way to directly probe the Grand Unified Theory, which is an attractive candidate for a model of physics beyond the Standard Model. We have started a study to enhance the sensitivity to proton decay at Super-Kamiokande with an improved event reconstruction.

5. Study of neutrino oscillation with accelerator neutrino beam: T2K experiment

T2K is a long baseline neutrino experiment using J-PARC accelerator complex and Super-Kamiokande, 295 km away. By combining both muon-type and electron-type neutrino interaction events observed at Super-Kamiokande detector, we placed the world best constraint on the neutrino mixing angle θ_{23} , and the first-ever constraint on the CP asymmetry parameter in the lepton sector. This year T2K has started to take data with anti-neutrino enhanced beam, which will give a direct test of the CP symmetry in the lepton sector when combined with neutrino-mode data.

In order to improve the systematic uncertainty from neutrino-nucleus interaction cross section, we have designed a new experiment at J-PARC neutrino beam facility. The experiment, named WAGASCI, was approved as a test experiment at J-PARC. This year, we finalized the design of the detector and developed new scintillator and photosensor (MPPC).

6. Next generation large water Cherenkov detector: Hyper-Kamiokande project

In order to pursue the study of neutrino properties beyond T2K, we propose the next generation water Cherenkov detector, Hyper-Kamiokande (Hyper-K). One of the main goals of Hyper-K is the search for CP violation in the leptonic sector using accelerator neutrino and anti-neutrino beams. The sensitivity to the CP violating phase is studied with full simulation by our group. It is shown that with Hyper-K and J-PARC accelerator, CP violation can be observed after five years of experiment for a large part of possible parameter space. The sensitivity to proton decay lifetime, which is expected to be an order of magnitude better than current Super-K sensitivity, is also studied in our group.

As a candidate of photosensor for Hyper-K, we have been developing hybrid photodetector (HPD) combining a large-format phototube technology and avalanche diode as the photo-electron multiplier. This year, we continued the evaluation of HPD in a large water Cherenkov detector using a 200-ton water tank at Kamioka. Also, we measured the performance of high quantum efficiency 50 cm diameter photomultipliers with an improved dynode structure.

9 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 and Supersymmetry.
 - Higgs: Discovery of Higgs Boson
 - SUSY: We have excluded the light SUSY particles (gluino and squark) whose masses are lighter than 1.1 and 1.8TeV, 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:
 - Precise measurement Search HFS of the positronium.
 - Developing high power (>500W) stable sub THz RF source
 - Axion searches using Spring 8
 - $\gamma\gamma$ scatter Using FEL Xray.

10 Aoki Group

Subject: Theoretical condensed-matter physics

Members: Hideo Aoki, Naoto Tsuji

Our main interests are many-body and topological effects in electron and cold-atom systems, i.e., **superconductivity, magnetism and topological phenomena**, for which we envisage a **materials design** and novel **non-equilibrium** phenomena should be realised. Studies in the 2014 academic year include:

- **Superconductivity**
 - High-Tc cuprates: material- and pressure-dependence [1,2]
 - Electron-phonon systems: supersolid and quantum critical point [3]
 - Organic and carbon-based superconductors [1]
 - Fermion and boson systems on flat-band systems
- **Topological systems**
 - Topological Mott insulator designed for cold atoms [4]
 - Topological and chiral properties of graphene and silicene [5-7]
 - Graphene quantum dot
- **Non-equilibrium phenomena**
 - Non-equilibrium dynamical mean field and dynamical cluster theories[8,9]
 - Floquet topological insulator
 - Relaxation in electron-phonon systems [10]
 - Nonequilibrium quantum spin systems[11]
 - Higgs modes in superconductors [12]

[1] H. Aoki and T. Kariyado: Pressure effects and orbital characters in cuprate and carbon-based superconductors, *J. Superconductivity and Novel Magnetism* **27**, 995 (2014).

[2] H. Sakakibara, K. Suzuki, H. Usui, S. Miyao, I. Maruyama, K. Kusakabe, R. Arita, H. Aoki, and K. Kuroki: Orbital mixture effect on the Fermi surface-Tc correlation in the cuprate superconductors — bilayer vs single layer, *Phys. Rev. B* **89**, 224505 (2014).

- [3] Y. Murakami, P. Werner, N. Tsuji and H. Aoki: Supersolid phase accompanied by a quantum critical point in the intermediate coupling regime of the Holstein model, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 266404 (2014).
- [4] S. Kitamura, N. Tsuji and H. Aoki: An interaction-driven topological insulator in fermionic cold atoms on an optical lattice: A design with a density functional formalism, arXiv:1411.3345.
- [5] Hideo Aoki and Mildred S. Dresselhaus (eds.): *Physics of Graphene* (Springer-Verlag, 2014).
- [6] H. Aoki and Y. Hatsugai: Polarization as a topological quantum number in graphene, *Phys. Rev. B* **90**, 045206 (2014).
- [7] Y. Hatsugai, K. Shiraishi and H. Aoki: Flat bands in Weaire-Thorpe model and silicene, *New J. Phys.* **17**, 025009 (2015).
- [8] H. Aoki, N. Tsuji, M. Eckstein, M. Kollar, T. Oka and P. Werner: Nonequilibrium dynamical mean-field theory and its applications, *Rev. Mod. Phys.* **86**, 779 (2014).
- [9] N. Tsuji, P. Barmettler, H. Aoki and P. Werner: Nonequilibrium dynamical cluster theory, *Phys. Rev. B* **90**, 075117 (2014).
- [10] Y. Murakami, P. Werner, N. Tsuji and H. Aoki: Interaction quench in the Holstein model — Thermalization crossover from electron- to phonon-dominated relaxation, *Phys. Rev. B* **91**, 045128 (2015).
- [11] S. Takayoshi, H. Aoki and T. Oka: Many-body Floquet theory of laser-induced phase transition in quantum magnets, *Phys. Rev. B* **90**, 085150 (2014).
- [12] R. Matsunaga, N. Tsuji, H. Fujita, A. Sugioka, K. Makise, Y. Uzawa, H. Terai, Z. Wang, H. Aoki, and R. Shimano: Light-induced collective pseudospin precession resonating with Higgs mode in a superconductor, *Science* **345**, 1145 (2014); N. Tsuji and H. Aoki: Theory of Anderson pseudospin resonance with Higgs mode in a superconductor, arXiv:1404.2711.

11 Miyashita Group

Research Subjects: Statistical Mechanics, Phase Transitions, Quantum Spin systems,
Quantum Dynamics, Non-equilibrium Phenomena

Member: Seiji Miyashita and Takashi Mori

Quantum dynamics of many-body systems

Quantum dynamics under time dependence field is one of the most important subjects in our group. In these years, we have studied properties of quantum systems in periodically driven systems. Last year, we have obtained new insights for the distribution of the states under driving force. We found that under some condition stationary state of a system driven by periodic external field is given by a canonical distribution of Floquet quasi-eigenstates.[1] We also found that there exists a metastable long-lived state in the relaxation process of a system with driving force.[2]

We also studied quantum dynamics of magnetization under sweeping field in a uniaxial magnetic systems, where we found that the classical spinodal type dynamics is characterized by singular change of gaps at avoided-level crossings. The adiabatic motion in the classical system corresponds to the perfect non-adiabatic transition in quantum system. Moreover, we found a characteristic beating of the spin-amplitude after the critical point. Dependence of the period of the oscillation on the parameters is clarified. [24, 44]

Quantum response to the external field is also interesting problem. We studied topics of the electron spin resonance (ESR). We analyzed very detailed experimental observations on the single molecular magnet V_{15} and clarified the nature of anisotropy of the system.[3] We also study the ESR of the antiferromagnet on the kagome lattice.[4] Moreover, we have proposed a new scheme of the numerical method for ESR by making use of the Wiener-Khinchin relation.[40]

Cooperative Phenomena and Phase Transitions

Phase transitions and critical phenomena are also important subjects of our group. We have studied various types of ordering phenomena of systems with large fluctuation. In the last year, we studied the following topics of phase transitions.

We studied nature of phase transition of an Ising model on the so-called small-world network. It is known that the system exhibits a phase transition of the mean-field universality class. We confirmed

this property. We found that the system does not show metastability below the critical temperature. The infinite-range (Husimi-Temperley) model has the mean-field type phase transition and the model also shows the thermodynamically metastable state and exhibits the spinodal transition as a dynamical phase transition. We characterized its deterministic relaxation curve.[14] We also have studied phase transitions in systems with bistable local electric states, such as the spin-crossover, Jahn-Teller system, and martensite systems. They attract interests as seminal candidates of the so-called functional material because the bistable states can be switched by the temperature, pressure, magnetic field, and photo-irradiation. We studied phase transitions in a system with various types of short-range interactions. In particular, we studied the ANNNI model which seems realized in a material: $[\text{FeH}_2\text{L}^{2-\text{Me}}](\text{ClO}_4)_2$. [26] We also studied the effective long range interaction due to difference of local bistable structures of unit cell of the lattice. We clarified dependence of nucleation on shape of the system.[8] We also found that critical property of antiferromagnet on the triangular lattice with next nearest neighbor interaction (Mekata model) is changed by the elastic interaction.[25, 45] We studied fundamental properties of statistical mechanism for the long-range interacting model.[12] We also studied mechanisms of coercive force of real magnets, joining to the project 'The Elements Strategy Initiative Center for Magnetic Materials'. We have formulated the temperature effect in the LLG (Landau-Lifshitz-Gilbert) equation, and we studied the stability of the metastable magnetic structure at finite temperatures.[9, 30, 31, 32] Quantum phase transition of an itinerant ferromagnetism is studied, too. In the model, the system exhibits both the Mott singlet and Nagaoka ferromagnetic state under a continuous control of the electron density profile.[10]

Stochastic process

Duncl process is a diffusion process replacing the thermal kernel by the so-called Duncl operator. One of the Duncl process is Brownian motion of particles interacting with long range force. We have studied dynamics of the distribution of the particles from a view point of the intertwining operator. We found characteristics of the relation from a given initial state to the stationary state.[11]

12 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, organic conductors, Dirac electron systems in solids, topological materials, and magnetic systems such as chiral magnets with spin-orbit interactions. The followings are the current topics in our group.

- High- T_c superconductivity
 - High- T_c superconductivity as a doped Mott insulator studied in the Hubbard model.
 - Flux states in high- T_c superconductivity.
- Dirac electron systems in solids
 - Spin-Hall effects and large diamagnetism in Dirac fermion systems.[1,2]
 - Meissner effects in the superconducting states in Dirac electron systems.[3]
 - Anomalous Hall effects in Dirac systems.
- Organic conductors
 - Effect of tilting on the magnetoconductivity of Dirac electrons in organic compounds.[4]
 - Zero-energy localized state induced by impurity in Dirac electron system of organic conductor.[5]
- Theories on topological materials
 - Effects of long-range Coulomb interaction in the surface states of topological insulators.[6]
 - Definitions of spin current in quantum transport equations.
 - Relationship between fractal and quantum Hall coefficients.
- Theories on heavy fermion systems and multi-band electron systems
 - Quasiparticles in f^2 -configuration.
 - Charge Kondo effect.
 - Spin Hall effects in the multi-orbital systems with parity violation.[7]

- Chiral magnets and spin-orbit interaction

Effective model and Dzyloshinskii-Moriya interaction for chiral magnet.[8]

Superexchange interactions from the j-j coupling.[9]

Dynamics of chiral solitons and antiferromagnetic domain walls.

- [1] Y. Fuseya, M. Ogata, and H. Fukuyama: (invited review article) J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 012001-1-22 (2015). “Transport Phenomena and Diamagnetism of Dirac Electrons in Bismuth”
- [2] Y. Fuseya, M. Ogata, and H. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 074702-1-11 (2014). “Spin-Hall Effect and Diamagnetism of Anisotropic Dirac Electrons in Solids”
- [3] T. Mizoguchi and M. Ogata: submitted to J. Phys. Soc. Jpn. “Meissner effect of Dirac electron in superconducting state”
- [4] I. Proskurin, M. Ogata, and Y. Suzumura: to appear in Phys. Rev. B. “Longitudinal conductivity of massless fermions with tilted Dirac cone in magnetic field”
- [5] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: in preparation. “Localized State of Massless Dirac Fermions in Quasi-Two-Dimensional Organic Conductor α -(BEDT-TTF)₂I₃ Induced by Singlet Defect”
- [6] N. Okuma and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 034710-1-4 (2015). “Long-Range Coulomb Interaction Effects on the Surface Dirac Electron System of a Three-Dimensional Topological Insulator”
- [7] T. Mizoguchi and N. Arakawa: submitted to Phys. Rev. B. “Controlling spin Hall effect by using a band anticrossing and nonmagnetic impurity scattering”
- [8] H. Matsuura, T. Shishidou, and M. Kishine: in preparation. “Derivation of Dzyloshinskii-Moriya Interaction on Metallic Chiral Magnet CrNb₃S₆”
- [9] H. Matsuura and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 063701-1-4 (2014). “A Poorman’s Derivation of Quantum Compass-Heisenberg Interaction: Superexchange Interaction in J-J Coupling Scheme”

13 Tsuneyuki Group

Research Subjects: Theoretical Condensed-Matter Physics

Member: Shinji Tsuneyuki and Ryosuke Akashi

Computer simulations from first principles enable us to investigate properties and behavior of materials beyond the limitation of experiments, or rather to predict them before experiments. Our main subject is to develop and apply such techniques of computational physics to investigate basic problems in condensed matter physics, especially focusing on prediction of material properties under extreme conditions like ultra-high pressure or at surfaces where experimental data are limited. Our principal tool is molecular dynamics (MD) and first-principles electronic structure calculation based on the density functional theory (DFT), while we are also developing new methods that go beyond the limitation of classical MD and DFT for study of electronic, structural and dynamical properties of materials.

One of the important achievements in FY2014 is the development of a scheme for calculating lattice thermal conductivity of materials from first principles. In the simulation of thermal physics, where spatiotemporal fluctuation of the atomic structure is so large, we need careful modeling and long-time/large-scale simulation of the atomic motion to get statistically meaningful results. This is a hard requirement for first-principles simulations, firstly because the computational cost of the electronic structure calculation usually scales as N^3 with N being the number of electrons, and secondly because it is essentially impossible to parallelize the dynamical simulation due to causality. In order to overcome the difficulty, we have developed an efficient scheme of modeling anharmonic interaction between atoms from first principles, with which we succeeded in accurate calculation of thermal conductivity in cluding cubic SrTiO₃ dynamically stabilized at high temperature.

We are also developing various schemes for first-principles simulation and are applying them to the study of structural, electronic and thermal properties of materials. Our research subjects in FY2014 were as follows:

- New methods of first-principles calculation of material properties

- A scheme for calculating lattice thermal conductivity of materials from first principles
- First-principles wavefunction theory for solids based on the transcorrelated method and its connection to the diffusion Monte Carlo method
- A new method for electronic structure calculation of large systems based on a divide and conquer method
- A new efficient method to find potential energy minima in configuration space
- Applications of first-principles calculation
 - Superconductivity in compressed H₂S
 - Superconductivity in YNi₂B₂C
 - Interfaces in Nd₂Fe₁₄B sintered magnet
 - Magnetic properties of ϵ -Fe₂O₃
 - Theoretical design of perovskite-type oxy-hydrides

14 Todo Group

Research Subjects: Novel state and critical phenomena in strongly correlated systems,
 Development of new simulation algorithms for quantum many body systems,
 Development of open-source software for next-generation parallel simulation

Member: Synge Todo and Hidemaro Suwa

We study novel phases and critical phenomena in strongly correlated many-body systems, such as quantum magnets and Bose-Hubbard model, by using the state-of-the-art computational physics techniques like the quantum 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

Quantum Monte Carlo level spectroscopy: we have formulated a convergent sequence for the energy gap estimation in the worldline quantum Monte Carlo method. Our estimation will be unbiased in the low-temperature limit and also the error bar is correctly estimated in general. The level spectroscopy from quantum Monte Carlo data is developed as an application of the unbiased gap estimation. From the spectral analysis, we precisely determine the Kosterlitz-Thouless quantum phase-transition point of the spin-Peierls model.

Analysis of quantum phases and quantum phase transitions by local Z_N Berry phase: we have developed a new quantum Monte Carlo technique for calculating the overlap of two wave functions (including phase factor), and applied it to the local Z_N Berry phase that is a topological order parameter for low-dimensional quantum magnets.

Critical phenomena of long-range interacting spin model: using the $O(N)$ cluster algorithm, we have precisely studied the critical exponents and critical amplitudes of the long-range interacting spin model on the square lattice, and established the non-trivial dependence of the critical exponents on the exponent of interaction σ .

Quantum phase transition of $SU(N)$ J - Q model: by using the parallelized loop cluster algorithm for the $SU(N)$ J - Q model, which is proposed as a candidate that exhibits the deconfined critical phenomena, we have studied its critical phenomena and found a systematic drift of the critical exponents as the system size increases. We have investigated the finite-temperature phase transition of the J - Q models on square and honeycomb lattices precisely.

Development of new simulation algorithms for quantum many body systems

Tensor-network algorithms: we have applied the PEPS and corner transfer matrix renormalization group technique to the J_1 - J_2 Heisenberg antiferromagnet. We have developed the analysis method based on the convergence of imaginary time evolution of tensors.

Irreversible Markov chain Monte Carlo: we have developed a novel geometric approach that can construct an irreversible kernel with minimum rejection rate for the Markov chain Monte Carlo. It is demonstrated that the auto-correlation time of the Markov chain is greatly reduced by our proposed method.

Simulation method for systems with strong spatial anisotropy: we have developed a generic method that can automatically optimize the aspect ratio of the system by the combination of the quantum Monte Carlo method and the machine learning technique, and applied to the two-dimensional Bose-Hubbard model with dynamical exponent $z > 1$.

Development of open-source software for next-generation parallel simulation

We have developed various open-source software packages: simulation software package for quantum lattice models “ALPS” (<http://alps.comp-phys.org>), loop algorithm quantum Monte Carlo method “ALPS/looper” (<http://wistaria.comp-phys.org/alps-looper>), balance condition library “BCL” (<https://github.com/cmsi/bcl>), cluster algorithm Monte Carlo method “Cluster-MC” (<https://github.com/wistaria/cluster-mc>), collection of install scripts of MateriApps applications “MateriApps Installer” (<https://github.com/wistaria/MateriAppsInstaller>), portal site for materials science simulation “MateriApps” (<http://ma.cms-initiative.jp>), Live USB Linux system “MateriApps LIVE!” (<http://cmsi.github.io/MateriAppsLive>), parallel exact diagonalization package “Rokko” (<https://github.com/t-sakashita/rokko>), etc.

15 Katsura Group

Research Subjects: Condensed Matter Theory and Statistical Physics

Member: Hosho Katsura

In our group, we study various aspects of condensed matter and statistical physics. In particular, our research focuses on strongly correlated many-body systems which would give rise to a variety of quantum phases. We study theoretically these systems, with the aim of predicting novel quantum phenomena that have no counterpart in weakly-interacting systems. We are currently interested in (i) topological phases of matter, (ii) magnetism in the Bose/Fermi Hubbard model, and (iii) quantum entanglement in exactly solvable systems. In addition, we are also interested in the mathematical aspects of the study of the above mentioned fields. Our research projects conducted in FY 2014 are the following:

- Strongly correlated systems
 - Topological order in interacting Kitaev/Majorana chains [1]
 - RVB ground states of the Hubbard model on Δ chains
 - Magnetism in the spin-1 & spin-2 Bose-Hubbard models
 - Thermal Hall effect of magnons in insulating magnets
- Solvable/Integrable systems
 - Composite kink solutions of coupled nonlinear Klein-Gordon equations [2]
 - Integrable matrix product operators related to the spin-1/2 Heisenberg chain [3]
 - Sine-square deformation and supersymmetric quantum mechanics

[1] Hosho Katsura, Masahiro Takahashi, and Dirk Schuricht, in preparation.

[2] Hosho Katsura, Phys. Rev. D, **89**, 085019 (2014).

[3] Hosho Katsura, J. Stat. Mech., P01006 (2015).

16 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 using high-energy spectroscopic techniques such as angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) and soft x-ray magnetic circular dichroism (XMCD) using synchrotron radiation. We investigate the mechanisms of high-temperature superconductivity [1], metal-insulator transitions [2], giant magnetoresistance, and spin/charge/orbital ordering in strongly correlated systems such as transition-metal compounds, ferromagnetic semiconductors [3], and their interfaces.

[1] T. Yoshida, S. Ideta, T. Shimojima, W. Malaeb, H. Suzuki, I. Nishi, A. Fujimori, S. Shin, Y. Nakashima, H. Anzai, M. Arita, A. Ino, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Ono, S. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima, Y. Matsuda, M. Nakajima, S. Uchida, Y. Tomioka, T. Ito, K. Kihou, C.H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, H. Ikeda, and R. Arita: Anisotropy of the superconducting gap in the iron-based superconductor $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, *Sci. Rep.* **4**, 7292–1-6 (2014).

[2] G. Shibata, K. Yoshimatsu, E. Sakai, V. R. Singh, V. K. Verma, K. Ishigami, T. Harano, T. Kadono, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Sawa, H. Kumigashira, M. Oshima, T. Koide, and A. Fujimori: Thickness-dependent ferromagnetic metal to paramagnetic insulator transition in $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ thin film studied by x-ray magnetic circular dichroism, *Phys. Rev. B* **89**, 235123–1-5 (2014).

[3] H. Suzuki, K. Zhao, G. Shibata, Y. Takahashi, S. Sakamoto, K. Yoshimatsu, B. J. Chen, H. Kumigashira, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D. J. Huang, C. T. Chen, Bo Gu, S. Maekawa, Y. J. Uemura, C. Q. Jin, and A. Fujimori: Photoemission and x-ray absorption studies of the isostructural to Fe-based superconductors diluted magnetic semiconductor $\text{Ba}_{1-x}\text{Kx}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mn}_y)_2\text{As}_2$, *Phys. Rev. B* **91**, 140401(R)–1-5 (2015).

17 Hasegawa Group

Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics

Members: Shuji HASEGAWA, Akari TAKAYAMA, and Ryota AKIYAMA

Surfaces of materials are platforms of our research where rich physics is expected due to the low-dimensionality and symmetry breakdown. (1) Electronic/spin/mass transports, (2) atomic/electronic structures, (3) phase transitions, (4) electronic excitations, (5) spin states and magnetism, and (6) epitaxial growths of coherent atomic/molecular layers/wires on surfaces, topological surfaces, and nano-scale phases such as surface superstructures, ultra-thin films such as graphene and silicene. We use various kinds of ultrahigh vacuum experimental techniques, electron diffraction, scanning electron microscopy, scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy, *in-situ* four-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-four-point probes, and surface magneto-optical Kerr effect measurements. Main results in this year are as follows.

(1) Surface electronic/spin transport:

- Detection of superconductivity in giant Rashba spin-split surface states
- Detection of spin Hall effect on $\text{Bi}_2\text{Se}_3(111)$ surface by using *in situ* FIB-fabrication and four-tip STM
- Detection of circular dichroism in photocurrent due to spin-split surface states
- Detection of Quasi-one-dimensional electronic transport on $\text{Si}(110)\text{-}2\times 5\text{-Au}$ surface
- Detection of Surface-bulk coherent transport in Bi ultrathin films

(2) Surface phases, ultra-thin films, and phase transitions:

- Detection of semimetal-to-semiconductor transition in Bi ultrathin film
- Detection of magnetic proximity effect at topological insulator/magnetic material interface

(3) Construction of new apparatuses:

- Low-temperature strong-magnetic-field scanning tunneling potentiometry
- Spin-dependent scattering of He ion beam by Bi ultrathin films
- Improvements in a combined UHV system of focused ion beam, four-tip STM, SEM and RHEED-MBE

- [1] M. Aitani, T. Hirahara, S. Ichinokura, M. Hanaduka, D. Y. Shin, S. Hasegawa: *In situ Magnetotransport Measurements of Ultrathin Bi films: Evidence for a Surface-Bulk Coherent Transport*, Phys. Rev. Lett. **113**, 206802 (Nov, 2014).
- [2] T. Shirasawa, M. Sugiki, T. Hirahara, M. Aitani, T. Shirai, S. Hasegawa, and T. Takahashi: *Structure and transport properties of Cu doped Bi₂Se₃ films*, Phys. Rev. B **89**, 195311 (May, 2014).
- [3] T. Shirai, T. Shirasawa, T. Hirahara, N. Fukui, T. Takahashi, and S. Hasegawa: *Structure Determination of Multilayer Silicene Grown on Ag(111) films by Electron Diffraction: Evidence for Ag Segregation at the Surface*, Phys. Rev. B **89**, 241403(R) (Jun, 2014).
- [4] N. Fukui, R. Hobara, T. Hirahara, Y. Miyatake, H. Mizuno, T. Sasaki, T. Nagamura, and S. Hasegawa: *In-situ Micro-fabrication and Measurements of Bi₂Se₃ Ultrathin Films in a Multi-chamber System having Focus Ion Beam, Molecular Beam Epitaxy, and Four-Tip Scanning Tunneling Microscope*, e-J. Surf. Sci. Nanotech. **12**, 423 (Oct, 2014).
- [5] R. Sakamoto, T. Kambe, T. Kusamoto, T. Pal, N. Fukui, T. Shimojima, Z. Wang, T. Hirahara, K. Ishizaka, S. Hasegawa, F. Liu, and H. Nishihara: *Redox control and high conductivity of nickel bis(dithiolene) complex π -nanosheet, a candidate of the first organic topological insulator*, J. Am. Chem. Soc. **136** (41), 14357 (Sep, 2014).
- [6] S. Ichinokura, T. Hirahara, S. Hasegawa, O. Sakai and T.T. Suzuki: *Electron-spin dependent ⁴He⁺ ion scattering on Bi surfaces*, Radiation Effects and Defects in Solids **169** (12), 1003 (Nov, 2014).
- [7] T.T. Suzuki, O. Sakai, S. Ichinokura, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Target element dependent spin-orbit coupling in polarized ⁴He⁺ ion scattering*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms (Dec, 2014) DOI:10.1016/j.nimb.2014.11.055.
- [8] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, and T. Takahashi: *Rashba effect of bismuth thin film on silicon studied by spin-resolved ARPES*, Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena (Nov, 2014 online).
- [9] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, T. Oguchi, and T. Takahashi, *One-Dimensional Edge States with Giant Spin Splitting in a Bismuth Thin Film*, Phys. Rev. Lett. **114**, 066402 (Feb, 2015).

18 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) quantum phases with strong correlations and frustration in two dimensional (2D) helium three (³He), four (⁴He) and their mixture, (ii) novel phenomena related to graphene, monatomic sheet of carbon atoms. We are investigating these phenomena at ultra-low temperatures down to 50 μ K, using various experimental techniques such as NMR, calorimetry, torsional oscillator, scanning tunneling microscopy and spectroscopy (STM/S), and electronic transport measurement, *etc.*

1. Quantum Spin Liquid state in two dimensional ³He:

Quantum spin liquid (QSL) is a state where the spins at each lattice site are not frozen even at $T = 0$. Two dimensional ³He is one of a promising candidate which shows the QSL state as magnetic ground state because of following characters. (1) Impurity-free 2D solid can be obtained on an atomically flat substrate. (2) ³He atom forms triangular lattice with strong geometrical frustrations. (3) The interaction (J_p) between ³He 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 ^3He solid prepared on graphite, which is preplated by bilayer of HD ($^3\text{He}/\text{HD}/\text{HD}/\text{gr}$) and studying its heat capacity in wide temperature range of $0.35 < T < 90$ mK. Since the areal density of 2D HD is smaller than that of ^3He and ^4He , one can obtain larger $|J_P|$ for 2D ^3He on bilayer HD than on ^3He and ^4He . The T -dependence of the heat capacity for $^3\text{He}/\text{HD}/\text{HD}/\text{gr}$ shows a single broad peak at $T \approx 20$ mK different from the double peak feature for $^3\text{He}/^4\text{He}/\text{gr}$ and $^3\text{He}/^3\text{He}/\text{gr}$. In addition, the heat capacity is found to change depending on $T^{2/3}$ in wide temperature range of $0.35 < T < 7$ mK. This T -dependence is surprising because it is different from other candidates for QSL such as 2D ^3He on either ^3He or ^4He and materials with frustrated electron spin system, which show $C \propto T$. 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. However, graphene itself is not proper enough to apply to electronic devices because of its linear energy dispersion crossing at the Dirac point, i.e. the charge neutrality point. It is one of the important subjects to study, how to induce a band gap in graphene. So far, many possibilities are proposed and, among them, we are focusing on a mechanism to break the chiral symmetry of graphene by decorating with atoms/molecules. For example, it is theoretically expected that the band gap can be induced when atoms are adsorbed on graphene to form $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})\text{R}30^\circ$ structure. To verify this possibility, we use Kr atom as an adsorbate, because Kr atom is confirmed to form $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})\text{R}30^\circ$ structure on the surface of graphite by our STM measurement.

The gate-voltage (V_g) dependence of the resistance of graphene, which is prepared on the surface of SiO_2/Si by exfoliating graphite, was studied with various areal densities of Kr and at various temperatures down to 1.6 K. However, no change had been observed. This is possibly because the modification by adsorbates is hindered due to the substrate. One can easily expect that the charges are transferred from the substrate, and the roughness of the substrate can also change the electronic transport property of graphene. It is also observed in our STM measurements that Kr atoms slip in between graphene and the substrate in the case of graphene synthesised on SiC.

Therefore, we prepared graphene which is free from the substrate. The V_g -dependence of graphene resistance show two peaks, which can be clearly assigned to the peak for free-standing graphene and for graphene supported by substrate. The effect of adsorbate is expected to be observed by using such free-standing graphene.

The other important topic to study in graphene research is the spin polarized state expected at zigzag edges of graphene. 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. We had confirmed such state experimentally by STM/S at a monatomic step edge of graphite. Moreover, 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 nano-ribbon between two zigzag edges (zigzag nanoribbon) through anti-ferromagnetic interaction between edges.

To obtain such zigzag edges, we tried hydrogen-plasma etching of graphite surfaces. By exposing graphite to hydrogen-plasma under high temperatures, hexagonal pits with monatomic depth are found to be created. The size and the density of the pit can be controlled by tuning the excitation power to produce plasma, temperature and time duration of the process. Moreover, and most importantly, the edges of the pit are found to be aligned to the zigzag direction. Therefore, one can obtain zigzag nanoribbon in between two hexagonal pits, where the spin polarized zigzag edge state can be expected to observe by STM/S measurement.

19 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.

In 2014, adsorbate-induced quantum Hall system at the cleaved InSb surfaces is investigated in magnetic fields up to 14 T using low-temperature scanning tunneling microscopy and spectroscopy combined with transport measurements. We show that an enhanced Zeeman splitting in the Shubnikov-de Haas oscillations is explained by an exchange enhancement of spin splitting and potential disorder, both of which are obtained from the spatially averaged density of states (DOS). Moreover, the Altshuler–Aronov correlation gap is observed in the spatially averaged DOS at 0 T.

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.

In 2014, in order to perform tunneling spectroscopy measurements, several layers of Sb were used for superconducting one-atomic-layer Pb films as a capping layer. The superconducting transition was observed after the thermal annealing in the air at 300 K. In the next step, the formation of a tunneling barrier is necessary for the tunneling spectroscopy measurement.

20 Shimano Group

Research Subjects: Optical and Terahertz Spectroscopy of Condensed Matter

Member: Ryo Shimano and Ryusuke Matsunaga

We study light-matter interactions and many body quantum correlations in solids. In order to investigate the role of electron and/or spin correlations in the excited states as well as the ground states, we focus on the low energy electromagnetic responses, in particular in the terahertz (THz) (1THz~4meV) frequency range where quasi-particle excitations and various collective excitations exist. The research summary in this year is as follows.

1. **High density electron-hole system in semiconductors:** We have investigated high density excitation phenomena in an indirect gap semiconductor Ge, and in a direct gap semiconductor GaAs. In Ge, we have observed that the exciton 1s-2p energy hardly changes upon the exciton Mott transition. Combined with the previous results in Si, we concluded that the robust exciton correlation against the screening is a generic character in photoexcited electron-hole (e-h) systems in semiconductors. In GaAs, we have investigated the exciton Mott transition caused by the resonant excitation of excitons.

We found that, even in the high density regime where the mean distance between e-h pairs approaches the exciton Bohr radius, the optical conductivity spectrum of the photoexcited e-h system significantly deviates from that of Drude model, indicating a strong excitonic correlation in the e-h metallic phase.

2. **Higgs amplitude mode in a BCS superconductor $\text{Nb}_{1-x}\text{Ti}_x\text{N}$** : We investigated the Higgs amplitude mode in *s*-wave BCS superconductor $\text{Nb}_{1-x}\text{Ti}_x\text{N}$ under the intense irradiation of terahertz pulse. We found that when the pump frequency is tuned below the superconducting gap 2Δ , the order parameter oscillates at the twice of the incident frequency. When the pump frequency ω matches with Δ , the amplitude of the order parameter oscillation significantly enhances, resulting in an efficient third harmonic generation from the superconducting film samples. The observed phenomena are well described by the Anderson's pseudospin model, and the results are interpreted as the indication of nonlinear resonant coupling between the Higgs mode and the radiation field.
3. **Nonlinear Faraday effect in graphene**: We extended our recent observation of quantum Faraday effect in graphene into the nonlinear optics regime. Faraday rotation angle is largely suppressed, when the incident electric field exceeds a critical value. The results are accounted for by the dynamical reduction of effective magnetic field which phenomenon is expected to occur in the 2-dimensional electron system with Lorentz-invariance.

References

- [1] Ryusuke Matsunaga, Naoto Tsuji, Hiroyuki Fujita, Arata Sugioka, Kazumasa Makise, Yoshinori Uzawa, Hirofumi Terai, Zhen Wang, Hideo Aoki, and Ryo Shimano: Light-induced collective pseudospin precession resonating with Higgs mode in a superconductor, *Science*. **345**, 1145 (2014).
- [2] Fumiya Sekiguchi and Ryo Shimano: Excitonic correlation in the Mott crossover regime in Ge, *Phys. Rev. B* **91**, 155202 (2015).

21 Takagi-Kitagawa Group

Research Subjects: Physics of Correlated Electron Systems

Member: Hidenori Takagi, Kentaro Kitagawa, Daigoro Hirai

We are exploring new compounds with transition metal elements in which novel, exotic and/or functional electronic phases are realized. Our main targets in FY2014 included, 5d complex Ir oxides with interplay of electron correlations and strong spin orbit coupling, anti-perovskites with Dirac electrons and layered Ta_2NiSe_5 with excitonic ground states.

Possible realization of Kiteev spin liquid state in $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$:

We discovered a new iridium oxide $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ which comprises edge-sharing network of IrO_6 octahedra in the three dimensions. Each Ir^{4+} ion has 3 bonds to the neighboring Ir^{4+} ions which are rotated by 120 degrees. $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ undergoes a magnetic ordering at 38 K and its positive Weiss temperature $\theta_W \sim 40$ K indicates the predominance of ferromagnetic interaction. The proximity to a ferromagnetic state and the presence of large fluctuation suggest that the ground state of $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ is close to Kitaev spin liquid. Under a high pressure of 2 GPa, we discovered that the ferromagnetic moment suddenly disappears, suggestive of the emergence of some kind of liquid state.

**Fabrication of (111)-oriented $\text{Ca}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{IrO}_3/\text{SrTiO}_3$ superlattice;
a designed playground for honeycomb physics:**

We fabricated (111)-oriented superlattice structures with alternating $2m$ -layers ($m = 1, 2,$ and 3) of $\text{Ca}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{IrO}_3$ perovskite and two layers of SrTiO_3 perovskite on $\text{SrTiO}_3(111)$

substrate. In the case of $m = 1$ bilayer film, Ir sub-lattice is a buckled honeycomb, where a topological state may be anticipated. The successful growth of superlattice structure on atomic level along [111] direction was clearly demonstrated by the superlattice reflections in x-ray diffraction patterns and by the atomically-resolved transmission electron microscope image. The ground states of the superlattice films were found to be a magnetic insulator, which may suggest the importance of electron correlations in Ir perovskite in addition to much discussed topological effect.

Excitonic Insulator Transition in a Zero-Gap Semiconductor Ta₂NiSe₅:

Excitonic insulator is a long conjectured correlated electron phase of narrow gap semiconductors and semimetals, driven by weakly screened Coulomb interaction between electrons and holes. While having been proposed more than 50 years ago, conclusive experimental evidence for its existence remains yet elusive. A key candidate compound is a layered transition metal selenide Ta₂NiSe₅, which has an almost zero one-electron band gap E_G and hosts a putative excitonic insulator phase below $T_c = 326$ K. Optical, transport and thermodynamic data on Ta₂NiSe₅ demonstrated the opening of an excitation gap $2\Delta E \sim 0.3$ eV below T_c which yields $2\Delta E/k_B T_c \sim 12$ and is comparable to an estimate of exciton binding energy E_B of a few tenth eV. E_G was controlled by chemical and physical pressures. Suppression of T_c was observed both by decreasing or increasing E_G , indicative of a dome-like behaviour of $T_c - E_G$ relation. These results are fully consistent with that an excitonic insulator is realized below $T_c = 326$ K in a zero-gap semiconductor Ta₂NiSe₅.

22 Theoretical Astrophysics Group

Research Subjects: Observational Cosmology, Extrasolar Planets, First Star Formation

Member: Yasushi Suto, Naoki Yoshida, Takashi Hosokawa, & 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 planet and star formation.

“Observational Cosmology” attempts to understand the evolution of the universe on the basis of the observational data in various wavebands. The proper interpretation of the recent and future data provided by COBE, ASCA, the Hubble telescope, SUBARU, and large-scale galaxy survey projects is quite important both in improving our understanding of the present universe and in determining several basic parameters of the universe which are crucial in predicting the evolutionary behavior of the universe in the past and in the future. Our current interests include nonlinear gravitational evolution of cosmological fluctuations, formation and evolution of proto-galaxies and proto-clusters, X-ray luminosity and temperature functions of clusters of galaxies, hydrodynamical simulations of galaxies and the origin of the Hubble sequence, thermal history of the universe and reionization, prediction of anisotropies in the cosmic microwave background radiation, statistical description of the evolution of mass functions of gravitationally bound objects, and statistics of gravitationally lensed quasars.

Astronomical observations utilizing large ground-based telescopes discovered distant galaxies and quasars that were in place when the Universe was less than one billion years old. We can probe directly, although not completely, the evolution of the cosmic structure all the way from the present-day to such an early epoch. Shortly after the cosmological recombination epoch when hydrogen atoms were formed, the cosmic background radiation shifted to infrared, and then the universe would have appeared completely dark to human eyes. A long time had to pass until the first stars were born, which illuminate the universe once again and terminate the cosmic Dark Ages. We study the formation of the first stars and blackholes in the universe. The first stars are thought to be the first sources of light, and also the first sources of heavy

elements that enable the formation of ordinary stellar populations, planets, and ultimately, the emergence of life. We perform supercomputer simulations of structure formation in the early universe. Direct and indirect observational signatures are explored considering future radio and infrared telescopes.

Does a second earth exist somewhere in the universe? This naive question has been very popular only in science fictions, but is now regarded as a decent scientific goal in the modern astronomy. Since the first discovery of a gas giant planet around a Sun-like star in 1995, more than a few thousands candidates of exoplanets have been reported as of May 2013. While most of the confirmed planets turned out to be gas giants, the number of rocky planet candidates is steadily increasing. Therefore the answer to the above question is supposed to be affirmative. Our group is approaching that exciting new field of exoplanet researches through the spin-orbit misalignment statistics of the Rossiter-MacLaughlin effect, simulations of planet-planet scattering and tidal evolution of the angular momentum of the planetary system, photometric and spectroscopic mapping of a surface of a second earth and detection of possible biomarker of habitable planets.

Let us summarize this report by presenting recent titles of the PhD and Master's theses in our group;

2014

- Stacking image analysis of SDSS galaxies in far-infrared and its implications for the Galactic extinction map
- Probing Cosmic Dark Matter and Dark Energy with Weak Gravitational Lensing Statistics
- Statistics of Submillimeter Line Emitters in Cosmological Simulation
- Characterization of a planetary system PTFO 8-8695 from the variability of its transit lightcurve induced by the nodal precession
- Neutrino-heating mechanism of core-collapse supernovae explosions
- Formation of Super-Massive Stars and Super-Massive Black Holes in the Early Universe

2013

- Giant primordial gas clouds and massive blackholes in the early universe
- Characterization of Multi-transiting Planetary Systems with Transit Timing Variations

2012

- Exploring the Landscape of Habitable Exoplanets via Their Disk-integrated Colors and Spectra: Indications for Future Direct Imaging Observations
- Toward a precise measurement of weak lensing signals through CMB experiments and galaxy imaging surveys: A theoretical development and its cosmological implications
- Measurements of Spin-Orbit Angles for Transiting Systems: Toward an Understanding of the Migration History of Exoplanets
- Modeling Redshift-Space Clustering of the SDSS Luminous Red Galaxies with Cosmological N-body Simulations: Implications for a Test of Gravity
- Probing the nature of dark matter by gravitational lensing observations
- The Formation and Evolution of Hot-Jupiter: Planet-Planet Scattering Followed by Tidal Dissipation
- Supernova Explosions in the Early Universe
- Validity of Hydrostatic Equilibrium in Mass Estimates of Simulated Galaxy Clusters

2011

- The Implication of the anomaly in the SFD Galactic extinction map on Far-infrared emission of galaxies

2010

- Precise measurement of number-count distribution function of SDSS galaxies

2009

- The Central Engine of Gamma-Ray Bursts and Core-Collapse Supernovae Probed with Neutrino and Gravitational Wave Emissions
- Numerical Studies on Galaxy Clustering for Upcoming Wide and Deep Surveys: Baryon Acoustic Oscillations and Primordial Non-Gaussianity
- Toward a precise measurement of neutrino mass through nonlinear galaxy power spectrum based on perturbation theory
- Toward Remote Sensing of Extrasolar Earth-like Planets
- Improved Modeling of the Rossiter-McLaughlin Effect for Transiting Exoplanetary Systems
- Forecasting constraints on cosmological parameters with CMB-galaxy lensing cross-correlations

23 Murao Group

Research Subjects: Quantum Information Theory

Member: Mio Murao and Akihito Soeda

Quantum information processing seeks to perform tasks which are impossible or not effective with the use of conventional classical information, by using quantum information described by quantum mechanical states. Quantum computation, quantum cryptography, and quantum communication have been proposed and this new field of quantum information processing has developed rapidly especially over the last two decades.

In this year, our group consisted of two faculty members, Mio Murao (Associate Professor [full professor since Jan. 2015]), Akihito Soeda (Assistant Professor), two postdoctoral fellows – Fabian Furrer (JSPS foreign postdoctoral fellow) and Shojun Nakayama –, a visiting Ph.D student Adel Sohbi, and 8 graduate students, Eyuri Wakakuwa (D3), Seiseki Akibue (D2), Kotaro Kato (D1), Jisho Miyazaki (D1), Yuki Mori (M2), Atsushi Shimbo (M2), Ryosuke Sakai (M1), and Hayata Yamasaki (M1). We investigate several aspects of theoretical quantum information. Our projects worked in the academic year of 2014 were the following:

- Causality, parallelizability, and nonlocality in quantum computation
 - Parallelizability of the adiabatic gate teleportation and implementability of the dynamics of the time-reversed Hamiltonian by K. Nakago, S. Nakayama, and M. Murao in collaboration with M. Hajdušek at Singapore University of Technology and Design
 - Causal order and parallelizability of measurement-based quantum computation by J. Miyazaki and M. Murao in collaboration with M. Hajdušek at Singapore University of Technology and Design
 - Globalness of separable maps characterized by classical correlations without globally causal structure by S. Akibue and M. Murao in collaboration with M. Owari and G. Kato at NTT Communication Science Laboratories
- Distributed quantum computation
 - Resource compression for LOCC implementations of bipartite unitary gates by E. Wakakuwa, A. Soeda, and M. Murao

- Entanglement convertibility of multipartite quantum states and an operational interpretation of the Kraus-Cirac number of two-qubit unitaries by A. Soeda, S. Akibue, and M. Murao
- Implementability of unitary operations over the butterfly, grail and cluster networks with free classical communication by S. Akibue and M. Murao
- Encoding classical information onto quantum state by local operations by A. Shimbo, A. Soeda, and M. Murao
- An efficient preparation of a multipartite entangled state on a quantum network by H. Yamasaki, A. Soeda, and M. Murao
- Description of composite quantum systems in a topos theoretic approach by J. Miyazaki, A. Soeda, and M. Murao
- Entanglement theory
 - Markovianizing cost of tripartite quantum states by E. Wakakuwa, A. Soeda, and M. Murao
 - Entanglement theory for anyonic systems by K. Kato and M. Murao in collaboration with F. Furrer at NTT Basic Research Laboratories
 - Numerical analysis of the geometric measure of entanglement by Y. Mori, A. Soeda, and M. Murao
- Quantum algorithms
 - Implementation of projective measurement of energy by S. Nakayama, A. Soeda, and M. Murao
 - Quantum algorithms for simulation of imaginary-time dynamics by R. Sakai, A. Soeda, and M. Murao
- Continuous variable quantum cryptography by F. Furrer in collaboration with: J. Duhme, T. Franz and R.F. Werner at Leibniz University Hannover; C. Pacher at Austrian Institute of Technology; and T. Eberle, V. Haendchen and R. Schnabel at Albert Einstein Institute Hannover

Please refer our webpage: <http://www.eve.phys.s.u-tokyo.ac.jp/indexe.htm>. The publication list for the year is available at the end of the Japanese version of the group research summary.

24 Ueda Group

Research Subjects: Bose-Einstein condensation, fermionic superfluidity, cold molecules, measurement theory, quantum information, information thermodynamics

Member: Masahito Ueda and Shunsuke Furukawa

With recent advances in nanoscience, it has become possible to precisely measure and control atoms, molecules, and photons at the level of a single quantum. We are interested in theoretically studying emergent quantum many-body problems in such highly controllable systems and developing nanoscale thermodynamics and statistical physics that lay the foundations of such problems. Our particular focuses in recent years include many-body physics of ultracold atomic gases and unification of quantum and statistical physics and information theory. Atomic gases which are cooled down to nearly zero temperature by laser cooling techniques offer unique opportunities for studying macroscopic quantum phenomena such as a Bose-Einstein condensation (BEC) in controlled manners. Unprecedented controllability of such gases also enables us to simulate phenomena analogous to condensed matter and astronomical physics, to investigate their universal properties, and to explore unknown quantum many-body physics. In our recent works, we have studied topological excitations and correlation effects in spinor BECs, BCS-BEC crossover and Efimov physics under the control of an atomic interaction strength, quantum Hall states in synthetic gauge fields, and thermalization of isolated quantum systems. We are also interested in relating fundamental concepts of quantum and statistical physics with information theory and exploring interdisciplinary fields that unify physics and information. In particular, we have recently worked on generalizations of the second law of thermodynamics and fluctuation theorems and the formulation of the dynamics of state reduction in light of information flow under measurements and feedback controls. We list our main research subjects in FY2014 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms
 - Phase diagram of two-component Bose gases in antiparallel magnetic fields [1]
 - Quantum mass acquisition in spinor Bose-Einstein condensates [4]
 - Onset of a limit cycle and universal three-body parameter in Efimov physics [5]
- Quantum Information, Quantum Measurement, and Foundation of Statistical Mechanics
 - Nonequilibrium equalities in absolutely irreversible processes [2]
 - General achievable bound of extractable work under feedback control [3]
 - The second law of thermodynamics under unitary evolution and external operations [6]
 - Relative-entropy conservation law in quantum measurement [7]

[1] S. Furukawa and M. Ueda, Phys. Rev. A **90**, 033602 (2014).

[2] Y. Murashita, K. Funo, and M. Ueda, Phys. Rev. E **90**, 042110 (2014).

[3] Y. Ashida, K. Funo, Y. Murashita, and M. Ueda, Phys. Rev. E **90**, 052125 (2014).

[4] N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **113**, 230401 (2014).

[5] Y. Horinouchi and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **114**, 025301 (2015). Editors' Suggestion.

[6] T. N. Ikeda, N. Sakumichi, A. Polkovnikov, and M. Ueda, Annals of Physics **354**, 338 (2015).

[7] Y. Kuramochi and M. Ueda, Phys. Rev. A **91**, 032110 (2015).

25 Makishima Group & Nakazawa Group

Research Subjects: High Energy Astrophysics with Energetic Photons using Scientific Satellites, Development of Cosmic X-Ray/ γ -Ray Instruments

Member: Kazuo Makishima, Kazuhiro Nakazawa

Using space-borne instruments such as *Suzaku* and *MAXI*, we study cosmic high-energy phenomena in the X-ray and γ -ray frequencies. We have been deeply involved in the development of the Hard X-ray Detector (HXD) onboard *Suzaku* (now in orbit), and are developing new instruments for its follow-up mission, *ASTRO-H*, to be launched in late JFY 2015.

Neutron Stars (NSs) and Super-Nova Remnants (SNRs): We conduct *Suzaku* studies of NSs with various magnetic field strengths, B . Our research targets include X-ray bursters with $B < 10^9$ G, canonical pulsars with $B \sim 10^{12}$ G exhibiting electron cyclotron resonances, long-period pulsars possibly with $B \sim 10^{13}$ G [3], and “magnetars” supposed to have $B = 10^{14-15}$ G. Through an apparent age discrepancy between a magnetar and an SNR associated to it, we reinforced the view that magnetars are indeed losing its magnetic energy [4]. From one magnetar, free precession was detected, and was interpreted as evidence for NS deformation by very high toroidal magnetic fields reaching 10^{16} G [1]. Mass accretion geometry to weakly magnetized ($B < 10^9$ G) neutron star is also studied in detail (e.g. [2]).

Mass Accreting Black Holes: Mass accretion onto black holes provides an efficient way of X-ray production. In active galactic nuclei (massive black holes), our new variability-assisted spectroscopy technique revealed that the primary X-ray emission in fact consists of two distinct components, digging into the geometry of their “central engines”. We are also studying sources with luminosity too large as a well known “stellar mass” black hole ($\sim 10 M_{\odot}$), trying to look for ones with intermediate mass (100-1000 M_{\odot}).

Clusters of Galaxies: Cosmic large scale structure is evolving via gravity. Cluster of galaxies is located at their hub, forming the largest self-gravitating objects in the universe. We found an excellent example of merging cluster at its early merger phase, very near to our galaxy. It shows clear shock signature, expanding out to Virial radius in almost linear geometry [5]. It provides us the clue to understand poorly known mechanisms of energy dissipation within the vast hot plasma, and is a good target for *ASTRO-H*.

GROWTH (Gamma-Ray Observation of Winter Thunder clouds) experiment: This is a semi-automated gamma-ray experiment placed at Kasiwazaki, Niigata, to watch for bursts of gamma-rays from

winter thunderclouds. In the 2014 winter season, we commissioned a new detector with moderate angular resolution. Thanks to its large stopping power and “bad” weather in this season, we obtained 8 new events. Compared to 12 events detected in past 8 years, the event rate was very high. Detailed analysis is on-going.

Future Instrumentation: In collaboration with many domestic and foreign groups, we are developing a successor to *Suzaku*, *ASTRO-H*. The satellite will conduct hard X-ray imaging observations, high-resolution X-ray spectroscopy, and low-energy gamma-ray observations. We contribute to the development of two on-board instruments, the Hard X-ray Imager and the Soft Gamma-ray Detectors, both made of Si/CdTe semiconductor detector and BGO scintillators. This year we achieved important milestone: finished developing the flight-detectors and handed them over to the satellite. Pre-launch satellite system level verification will continue through out the year 2015, followed by the lunch using H-IIA rocket.

1. Makishima, K., Enoto, T., Hiraga, J.S., Nakano, T., Nakazawa, K., Sakurai, A., Sasano, M. & Murakami, H.: “Possible Evidence for Free Precession of a Strongly Magnetized Neutron Star in the Magnetar 4U 0142+61”, *Phys. Rev. Lett.* **112**, id.171102 (2014)
2. Zhang, Z., Makishima, K., Sakurai, S., Sasano, M., & Ono, K.: “Probing the Accretion Scheme of the Dipping X-ray Binary 4U 1915-05 with Suzaku” , *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, id.120 (2014)
3. Sasano, M., Makishima, K., Sakurai, S., Zhang, Z. & Enoto, T.: “Suzaku View of the Neutron Star in the Dipping Source 4U 1822–37”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **66**, id.35 (2014)
4. Nakano, T., Murakami, H., Makishima, K., Hiraga, J.S., Uchiyama, H., Kaneda, H., Enoto, T., : “Suzaku studies of the supernova remnant CTB 109 hosting the magnetar 1E 2259+586”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **67**, id.912 pp.
5. Kato, Y., Nakazawa, K., Gu, L., Akahori, T., Takizawa, M., Fujita, Y., & Makishima, K., : “Discovery of a nearby early-phase major cluster merger CIZA J1358.9-4750”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **67**, in press (2015)

26 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

We perform experiments on the TST-2 spherical tokamak at the Kashiwa Campus in order to develop physics understanding and technology to realize nuclear fusion power. The current focus of our group is the study of non-inductive plasma start-up using the lower hybrid wave (LHW) on TST-2. We also collaborate with other fusion experiments in Japan and abroad, including JT-60SA, LHD, LATE, QUEST, Alcator C-Mod (US), and MAST (UK).

In FY2014, non-inductive plasma start-up experiments were performed using the capacitively coupled combline (CCC) antenna on TST-2. The antenna was developed in collaboration with General Atomics (US). Plasma current ramp-up up to 18 kA has been achieved so far. It was also found that the achieved maximum plasma current was strongly correlated with the toroidal magnetic field. It is probably necessary to increase the toroidal field coil power supply for further current ramp-up. COMSOL was used to perform full-wave modeling of the LHW antenna and to optimise the limiter location. The launched spectrum of the parallel index of refraction (n_{\parallel}) was shown to improve if the limiter was extended radially by 30 mm.

The radial profile of the hard X-ray emitted by lower hybrid driven fast electrons was observed using a 5-channel NaI scintillator array. Copper impurity was observed in correlation with the LHW power injection which was likely from the CCC antenna current straps made out of copper. Substantial plasma flow was expected in plasmas started up non-inductively when fast electrons are present. CIII radiation was observed on TST-2 and LATE. The observed toroidal flow was 1 km/s and 5 km/s, respectively, which was much smaller than the expected value of several tens of km/s. It was found in these experiments that the ion orbit loss may also be significant, which may have canceled the radial electric field generated by fast electron loss.

A ray-tracing code GENRAY was used to investigate the optimum poloidal launch angle of the LHW. The top-launch was found to be favorable for the TST-2 geometry due to strong upshift of n_{\parallel} . We are now developing a top-launch antenna in collaboration with General Atomics.

Inductively formed TST-2 plasmas were studied using a probe capable of measuring the fluctuations of flow, electric and magnetic fields simultaneously. It was confirmed that the background electric field and the flow measured by the probe satisfy the equilibrium condition.

Pressure anisotropy during internal reconnection events (IREs) were measured using a double-pass Thomson scattering system. Anisotropic temperature was observed after the IRE crash.

A Rogowski probe was used to measure the local current density in the edge plasma. The effect of the sheath inside the probe is being investigated numerically and experimentally. The probe was also installed in UTST to measure current sheet during magnetic reconnection.

A multi-pass Thomson scattering system is being developed to measure electron temperature and density in low density plasmas created by LHW. Ten round trips of a laser pulse were observed after optimization of the optical system. With the present efficiency of the optical system, the improvement in S/N was found to be around 30%.

As a collaboration, Thomson scattering of RF driven steady-state plasmas is being developed on the QUEST spherical tokamak at Kyushu University. This fiscal year, a laser pulse timing system was developed to improve the time resolution of the system.

ICRF (ion cyclotron range of frequencies) waves in LHD plasmas were measured using a microwave reflectometer. The system was extended for two microwave frequencies. Full-wave simulation of ICRF waves was also performed using AORSA developed at Oak Ridge National Laboratory (US). Quantitative analysis of reflectometer measurements will be performed.

A new RF magnetic probe was continued to be developed for measurements of LHW at 4.6 GHz on Alcator C-Mod at MIT. Full-wave modeling of the probe was performed using COMSOL, and the probe geometry was determined so that there is no resonance close to 4.6 GHz. The fabricated probe was tested by measuring the wave magnetic field in a waveguide. It was confirmed that the frequency response was flat around 4.6 GHz. The LHW measurement will be performed using this probe in the next fiscal year.

27 Sano Group

Research Subjects: Physics of out-of-equilibrium systems and living matter

Member: Masaki Sano, Kazumasa Takeuchi

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) macroscopic systems, in which non-equilibrium fluctuations overwhelm the thermal effects, (ii) microscopic systems, in which non-equilibrium and thermal fluctuations have comparable effects, (iii) active matters, as characteristic phenomena in far-from-equilibrium systems, (iv) biological systems, as important instances where non-equilibrium dynamics takes the essential role. More specifically, our current research topics include:

1. Macroscopic systems out of equilibrium
 - (1) Universality in turbulent transition
 - (2) Universal fluctuations of growing interfaces probed in turbulent liquid crystal [2]
 - (3) Initial condition dependency of the universality in growing interfaces of turbulent liquid crystal
 - (4) Lehmann effect of cholesteric liquid crystal as thermo-mechanical coupling by temperature gradient [9]
 - (5) Reversible-irreversible transition in low-Reynolds fluid with non-Brownian particles and its rheology
2. Microscopic systems out of equilibrium
 - (1) Stochastic thermodynamics in out-of-equilibrium systems [1, 8]
 - (2) Information thermodynamics of small systems [7]

3. Active matters
 - (1) Self-propelled liquid droplets [11]
 - (2) Collective motion and nematic ordering of self-propelled particles
 - (3) Collective motion and pattern formation of microtubules as self-propelled filaments
4. Biological systems
 - (1) Collective motion of neural stem cells
 - (2) Information thermodynamics on causal networks and its application to biochemical signal transduction [12].

References

- [1] K. Kawaguchi, S. -i. Sasa and T. Sagawa: Nonequilibrium dissipation-free transport in F1-ATPase and the thermodynamic role of asymmetric allostereism, *Biophysical Journal*, **106**, 2450-2457, (2014).
- [2] I. S. S. Carrasco, K. A. Takeuchi, S. C. Ferreira and T. J. Oliveira: Interface fluctuations for deposition on enlarging flat substrates, *New J. Phys.*, **16**, 123057 (2014).
- [3] T. Ohta and S. Yamanaka: Traveling bands in self-propelled soft particles, *Euro. Phys. J. Special Topic (D&D)*, **223**, 1279-1291 (2014).
- [4] T. Ohta and S. Yamanaka: Discussion notes: Soliton-like behavior of traveling bands, *Euro. Phys. J. Special Topic (D&D)*, **223**, 1417-1418 (2014).
- [5] T. Sakaue, K. Shitara and T. Ohta: Dynamics and electrorheology of sheared immiscible fluid mixtures, *Phys. Rev. E*, **89**, 052301(1-7) (2014).
- [6] S. Yamanaka and T. Ohta: Collision dynamics of traveling bands in systems of deformable self-propelled particles, *Phys. Rev. E*, **90**, 042927(1-10) (2014).
- [7] N. Shiraishi, S. Ito, K. Kawaguchi and T. Sagawa: Role of measurement-feedback separation in autonomous Maxwell's demons, *New J. Phys.*, **17**, 045012 (2015).
- [8] Y. Nakayama and K. Kawaguchi: Invariance of steady-state thermodynamics between different scales of description, *Phys. Rev. E*, **91**, 012115 (2015).
- [9] T. Yamamoto, M. Kuroda and M. Sano: Three-dimensional analysis of thermo-mechanically rotating cholesteric liquid crystal droplets under a temperature gradient, *Europhys. Lett.*, **109**, 46001 (2015).
- [10] H. Shoji and T. Ohta: Computer simulations of three-dimensional Turing patterns in the Lengyel-Epstein model, *Phys. Rev. E*, **91**, 032913(1-11) (2015).
- [11] H. Ebata and M. Sano: Swimming droplets driven by a surface wave, *Sci. Rep.*, **5**, 8546 (2015).
- [12] S. Ito and T. Sagawa: Maxwell's demon in biochemical signal transduction, *Nature Communications*, accepted.

28 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, Nami Sakai, and Yoshimasa Watanabe

Molecular clouds are birthplaces of new stars and planetary systems, which are being studied extensively as an important target of astronomy and astrophysics. Although the main constituent of molecular clouds is a hydrogen molecule, various atoms and molecules also exist as minor components. The chemical composition of these minor species reflects formation and evolution of molecular clouds as well as star formation processes. It therefore tells us how each star has been formed. We are studying star formation processes from such a astrochemical viewpoint.

Since the temperature of a molecular cloud is as low as 10 K, an only way to explore its physical structure and chemical composition is to observe the radio wave emitted from atoms, molecules, and dust particles. In particular, there exist a number of atomic and molecular lines in the millimeter to terahertz region, and we are observing them with various large radio telescopes including ALMA.

We are conducting a line survey of low-mass star forming regions with Nobeyama 45 m telescope and ASTE 10 m telescope, aiming at detailed understanding of chemical evolution from protostellar disks to protoplanetary disks. In the course of this effort, we have recently established a new chemistry occurring in the vicinity of a newly born star, which is called Warm Carbon Chain Chemistry (WCCC). In WCCC, carbon-chain molecules are produced by gas phase reactions of CH_4 which is evaporated from ice mantles. This has recently been confirmed by our detection of CH_3D in one of the WCCC sources, L1527. Existence of WCCC clearly indicates a chemical diversity of low-mass star forming regions, which would probably reflect a variety of star formation. We are now studying how such chemical diversity is brought into protoplanetary disks by using ALMA. In L1527, we have found that carbon-chain molecules only exist in an infalling-rotating envelope outside the centrifugal barrier ($r = 100$ AU), while SO preferentially exists around the centrifugal barrier. Hence, chemical compositions drastically changes across the centrifugal barrier of the infalling gas. Further analyses are in progress.

In parallel to such observational studies, we are developing a hot electron bolometer mixer (HEB mixer) for the future terahertz astronomy. We are fabricating the phonon cooled HEB mixer using NbTiN and NbN in our laboratory. Our NbTiN mixer shows the noise temperature of 470 K at 1.5 THz, which corresponds 7 times the quantum noise. This is the best performance at 1.5 THz in spite of the use of the wave-guide mount. Furthermore, we successfully realized the waveguide-type NbN HEB mixer by using the NbN/AlN film deposited on the quartz wafer. The 0.8/1.5 THz dual-band HEB mixer receiver was assembled, and was installed on the ASTE 10 m telescope for astronomical observations. The first commissioning run was performed in September to October, 2011. We successfully observed Moon and Jupiter in the 0.9 THz continuum emission, and the Orion A molecular cloud in the ^{13}CO $J = 8 - 7$ line emission. We are expecting the scientific run from 2015.

[1] Shiino, T., Shiba, S., Sakai, N., Yamakura, T., Jiang, L., Uzawa, Y., Maezawa, H., and Yamamoto, S., Improvement of the Critical Temperature of Superconducting NbTiN and NbN Thin Films Using the AlN Buffer Layer, *Supercond. Sci. Technol.* **23**, 045004 (2010).

[2] Watanabe, Y., Sakai, N., Lindberg, J.E., Jorgensen, J.K., Bisschop, S.E., and Yamamoto, S., “An Unbiased Spectral Line Survey toward R CrA IRS7B in the 345 GHz Window with ASTE” , *ApJ*, **745**, 126 (2012).

[3] Sakai, N. and Yamamoto, S., “Warm Carbon-Chain Chemistry” , *Chemical Reviews*, **113**, 8981 (2014).

[4] Sakai, N. et al., “Change in the Chemical Composition of Infalling Gas Forming a Disk around a Protostar” , *Nature*, **507**, 78, 2014.

29 Sakai (Hirofumi) Group

Research Subjects: Experimental studies of atomic, molecular, and optical physics

Member: Hirofumi Sakai and Shinichirou Minemoto

Our research interests are as follows: (1) Manipulation of neutral molecules based on the interaction between a strong nonresonant laser field and induced dipole moments of the molecules. (2) High-intensity laser physics typified by high-order nonlinear processes (ex. multiphoton ionization and high-order harmonic generation). (3) Ultrafast phenomena in atoms and molecules in the attosecond time scale. (4) Controlling quantum processes in atoms and molecules using shaped ultrafast laser fields. A part of our recent research activities is as follows:

(1) Laser-field-free orientation of state-selected asymmetric top molecules [1]

With combined electrostatic and shaped laser fields with a slow turn on and rapid turn off, laser-field-free orientation of asymmetric top iodobenzene molecules with higher degrees of orientation has been achieved for the first time. In order to further increase the degrees of orientation, state-selected molecules are used as a sample. It is confirmed that higher degrees of orientation is maintained in the laser-field-free condition for 5–10 ps, which is long enough to study femtosecond-attosecond dynamics in molecules, after the rapid turn off of the laser pulse. The observation of the slow dephasing time of 5–10 ps ensures future prospects in molecular orientation techniques. This accomplishment means not only that a unique molecular sample

has become available in various applications but also that the present technique can be used as a new spectroscopic technique to investigate ultrafast rotational dynamics of molecules.

(2) Phase differences of near-threshold high-order harmonics generated in atoms and molecules [2]

We present the observations of the phase differences $\Delta\phi_{\text{HH}}^{(2n)}$ between adjacent high-order harmonics generated from Ar and N₂ at the near-threshold region. The $\Delta\phi_{\text{HH}}^{(2n)}$'s are extracted from the photoelectron signals resulting from two-color two-photon ionization of rare-gas atoms, which are produced by high-order harmonics to be measured and a part of the fundamental pulse for probing. An analysis method is employed to remove the inevitable modulations in high-order harmonic intensities based on the underlying mechanism of the production of photoelectrons. We find a significant difference in the $\Delta\phi_{\text{HH}}^{(2n)}$ at the nearest-threshold order between Ar and N₂. This difference cannot be reproduced by the model calculation by using the saddle-point method within the strong-field approximation. To elucidate the origin of the difference between the $\Delta\phi_{\text{HH}}^{(2n)}$ for Ar and that for N₂, we note the fact that the phase difference $\Delta\phi_{\text{HH}}^{(2n)}$ contains information both on the recombination time t_r of the freed electron and on the phase of the recombination dipole moment d^* . With the help of some numerical calculations, we discuss the effect of the potential created by the parent ion on t_r and d^* which are neglected in the strong-field approximation.

- [1] Je Hoi Mun, Daisuke Takei, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Laser-field-free orientation of state-selected asymmetric top molecules," *Physical Review A* **89**, 051402(R) (5 pages) (2014).
- [2] Kosaku Kato, Shinichirou Minemoto, Yusuke Sakemi, and Hirofumi Sakai, "Phase differences of near-threshold high-order harmonics generated in atoms and molecules," *Physical Review A* **90**, 063403 (10 pages) (2014).

30 Gonokami 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, Kosuke Yoshioka

We are trying to explore new aspects of many-body quantum systems and their exotic quantum optical effects through designed light-matter interactions. Our current target consists of a wide variety of matter, including excitons and electron-hole ensemble in semiconductors, antiferromagnetic magnons and ultracold atomic gases. In particular, we have been investigating the Bose-Einstein condensation phase of excitons, which is considered the ground state of 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. As the Director of the Photon Science Center, within the Graduate School of Engineering, 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 two years ago. 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:

- (a) Systematic study of the Bose-Einstein condensation transition of excitons using a dilution refrigerator
 - (b) 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:
 - (a) Development of highly precise and accurate terahertz polarization measurement method
 - (b) Generation of broadband terahertz vortex beams
 3. Development of novel coherent light sources and spectroscopic methods:
 - (a) Laser-based angle resolved photoemission spectroscopy
 - (b) "Photon ring" project
 - (c) Institute for Photon Science Technology

References

- [1] Z. Zheng, N. Kanda, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami: Efficient coupling of propagating broadband terahertz radial beams to metal wires, *Optics Express*, **21**, 10642 (2013).
- [2] T. Kan, A. Isozaki, N. Kanda, N. Nemoto, K. Konishi, M. Kuwata-Gonokami, K. Matsumoto, and I. Shimoyama: Spiral metamaterial for active tuning of optical activity, *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 221906 (2013).
- [3] T. Higuchi, M. Kuwata-Gonokami: Microscopic origin of magnetic linear dichroism in the antiferromagnetic insulator MnF_2 , *Phys. Rev. B*, **87**, 224405 (2013).
- [4] J. Omachi, T. Suzuki, K. Kato, N. Naka, K. Yoshioka, and M. Kuwata-Gonokami: Observation of excitonic N-body bound states: Polyexcitons in diamond, *Phys. Rev. Lett.*, **111**, 026402 (2013).
- [5] K. Yoshioka, Y. Morita, K. Fukuoka, and M. Kuwata-Gonokami: Generation of ultracold paraexcitons in cuprous oxide: A path toward a stable Bose-Einstein condensate, *Phys. Rev. B*, **88**, 041201(R) (2013). Editors' Suggestion
- [6] M. Sato, T. Higuchi, N. Kanda, K. Konishi, K. Yoshioka, T. Suzuki, K. Misawa, and M. Kuwata-Gonokami: Terahertz polarization pulse shaping with arbitrary field control, *Nature Photonics*, **7**, 724 (2013). Selected for the issue cover
- [7] Y. Hazama, N. Naka, M. Kuwata-Gonokami, K. Tanaka: Resonant creation of indirect excitons in diamond at the phonon-assisted absorption edge, *Web of Science*, **104**, 47012 (2013).
- [8] K. Kitano, N. Ishii, N. Kanda, Y. Matsumoto, T. Kanai, M. Kuwata-Gonokami, J. Itatani: Orientation of jet-cooled polar molecules with an intense single-cycle THz pulse, *Phys. Rev. A*, **88**, 061405 (2013).
- [9] P. A. Obraztsov, T. Kaplas, S. V. Garnov, M. Kuwata-Gonokami, A. N. Obraztsov, Y. P. Svirko: All-optical control of ultrafast photocurrents in unbiased grapheme, *SCIENTIFIC REPORTS*, **4**, 4007 (2013)
- [10] K. Yoshioka, K. Miyashita, and M. Kuwata-Gonokami: Selective generation of ultracold high-density 1s orthoexcitons in Cu_2O with phase-modulated pulse using acousto-optic programmable filter, *Optics Express* **22**, 3261 (2014)
- [11] P. A. Obraztsov, T. Kaplas, S. V. Garnov, M. Kuwata-Gonokami, A. N. Obraztsov, Y. P. Svirko: All-optical control of ultrafast photocurrents in unbiased grapheme, *SCIENTIFIC REPORTS* **4**, 4007 (2014)
- [12] K. Konishi, T. Higuchi, J. Li, J. Larsson, S. Ishii, and M. Kuwata-Gonokami: Polarization-controlled circular second-harmonic generation from metal hole arrays with threefold rotational symmetry, *Phys. Rev. Lett.*, **112**, 135502 (2014)

31 Ando Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Gravitational Wave, Laser Interferometer

Member: Masaki Ando and Yuta Michimura

The detection of gravitational waves is expected 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; 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 detectors with sufficient sensitivity to catch possible gravitational waves.

In 2010, a new science project, KAGRA (former LCGT) was approved and funded by the Leading-edge Research Infrastructure Program of the Japanese government. 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.

We summarize the subjects being studied in our group.

- Construction of the KAGRA gravitational wave detector
 - Optical design of the interferometer
 - Alignment control
 - Parametric instability
- Space laser interferometer, DECIGO
- Development of TOBA (Torsion Bar Antenna)
 - A new type sensor for TOBA
 - Design of next generation TOBA
- Development of the ultra stable laser source
 - Optical system
 - Vibration isolation of cavity
 - Cryogenics for cavity
- High sensitive laser interferometer using non-classical light
- Study of space isotropy

Reference

- [1] K. Eda, A. Shoda, Y. Itoh, M. Ando: Improving parameter estimation accuracy with torsion-bar antennas, *Phys. Rev. D*, 90, 064039 (2014).
- [2] M. Adier, F. Aguilar, T. Akutsu, M.A. Arain, M. Ando *et al.*: Progress and challenges in advanced ground-based gravitational-wave detectors *General Relativity and Gravitation*, 46, 1749 (2014).
- [3] K. Nakamura, M. Ando: Torsion-bar antenna in the proper reference frame with rotation, *Phys. Rev. D*, 89, 064008 (2014).
- [4] A. Shoda, M.Ando, K. Ishidoshiro, K. Okada, W. Kokuyama, Y. Aso, K. Tsubono: Search for a stochastic gravitational-wave background using a pair of torsion-bar antennas, *Phys. Rev. D*, 89, 027101 (2014).

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. Premotor Interneurons controlling Locomotion Speed

Animals control the speed of motion to meet behavioral demands. Yet, the underlying neuronal mechanisms remain poorly understood. In this study, we showed that a class of segmentally arrayed local interneurons (period-positive median segmental interneurons, or PMSIs) regulates the speed of peristaltic locomotion in *Drosophila* larvae. PMSIs form glutamatergic synapses on motor neurons and, when optogenetically activated, inhibited motor activity, indicating that they are inhibitory premotor interneurons. Calcium imaging showed that PMSIs are rhythmically active during peristalsis with a short time delay in relation to motor neurons. Optogenetic silencing of these neurons elongated the duration of motor bursting and greatly reduced the speed of larval locomotion. These results suggest that PMSIs control the speed of axial locomotion by limiting, via inhibition, the duration of motor outputs in each segment. Similar mechanisms are found in the regulation of mammalian limb locomotion, suggesting that common strategies may be used to control the speed of animal movements in a diversity of species.

2. Neural Circuits Modulating the Larval Turning Behavior

Serotonin (5-HT) is known to modulate motor outputs in a variety of animal behaviors. However, the downstream neural pathways of 5-HT remain poorly understood. We studied the role of 5-HT in directional change, or turning, behavior of fruit fly (*Drosophila*) larvae. We analyzed light- and touch-induced turning and found that turning is a combination of three components: bending, retreating, and rearing. Serotonin transmission suppresses rearing; when we inhibited 5-HT neurons with Shibire or Kir2.1, rearing increased without affecting the occurrence of bending or retreating. We identified a class of abdominal neurons called the abdominal LK neurons (ABLKs), which express the 5-HT_{1B} receptor and the neuropeptide leucokinin, as downstream targets of 5-HT that are involved in the control of turning. Increased rearing was observed when neural transmission or leucokinin synthesis was inhibited in these cells. Forced activation of ABLKs also increased rearing, suggesting that an appropriate level of ABLK activity is critical for the control of turning. Calcium imaging revealed that ABLKs show periodic activation with an interval of ~15 s. The activity level of ABLKs increased and decreased in response to a 5-HT agonist and antagonist, respectively. Our results suggest that 5-HT modulates larval turning by regulating the activity level of downstream ABLK neurons and secretion of the neuropeptide leucokinin.

References

- [1] Kohsaka, H., Takasu, E., Morimoto, T. and Nose, A.: A group of segmental premotor interneurons regulates the speed of axial locomotion in *Drosophila* larvae. *Current Biology*, Volume 24, Issue 22, p2632-2642, (2014).
- [2] Okusawa, S., Kohsaka, H. and Nose, A.: Serotonin and downstream leucokinin neurons modulate larval turning behavior in *Drosophila*. *J Neurosci*. 34, 2544-2558 (2014).
- [3] Kohsaka, H. and Nose, A. Optogenetics in *Drosophila*. (a book chapter in *Optogeneticsh*), Springer Verlag (2015)

33 Higuchi Group

Research Subjects: Motor proteins in in vitro, cells and mice

Member: Hideo Higuchi and Motoshi Kaya

Noninvasive in vivo imaging of tumor cells in mouse auricles We developed methods of preparing xenograft model and imaging GFP-expressing cells to observe noninvasively cells in mouse auricles. In the previous studies, we imaged invasively the tumor exposed by dissection of skin and epithelium. By the dissection, blood flow was blocked, resulting in lack of supply of oxygen and nutrient. We, however, concern if homeostasis of their cells is maintained to elucidate biological phenomenon in imaging under ischemic condition. Therefore, we developed new noninvasive imaging methods. We selected the ear auricle of mouse

for observation of tumor cells because of very thin (about 150-200 μm) and limited hypodermal tissue. We have developed a novel xenograft model which has tumor in auricle. SCID mice of 8-12 weeks old were used in our experiments. And then the tumor and cells in auricle were noninvasively imaged by spinning disk confocal (CSU) system equipped with automatic positioning stage, piezo actuator for objective and an EMCCD camera. We imaged GFP fluorescence in the MDA-MB-321-GFP-tub cells in tumor of ear auricle without injuring mice. The individual two cells in tumor were distinguished faintly with bright background of tumor fluorescence. We also took a montage view of tumor cover wide area (3x2 mm). The shape of a tumor appeared faintly at the depth $\geq 40\mu\text{m}$, suggesting the shape is background of a tumor located deeper. There are several bright spots in the diameter of $\sim 20\mu\text{m}$ in the enlarged image, indicating those are single cells. We could successfully perform real time observation of GFP fluorescence in the breast cancer cells in noninvasive condition by a CSU system.

Selective removal of cancer stem cells Protease activated receptor 1 (PAR-1), has been known to be one of the most essential membrane protein that mediates intracellular signals promoting cell motility, which is closely related to cancer metastasis. Since the machinery of vesicles carrying this PAR-1 proteins plays a key role in signal transfer, we imaged the trafficking of PAR-1 carrying vesicles, mainly focused on the moment of endocytosis, to analyze the movement of activated PAR-1 after internalization. Our triple-view method consisting of dual-focus fluorescence and phase contrast optics, enabled us to track endocytotic vesicles in 3-dimension. Also, using confocal microscopy, we were able to diagnose the characteristic movements of PAR-1 proteins with respect to their relative position in a cell.

Three dimensional tracking of endocytosis Neutrophils play an essential role in the innate immune response. We developed a new non-invasive technique for the in vivo imaging of neutrophils labeled with quantum dots, up to 100 μm below the skin surface of mice. The quantum dots were endocytosed into vesicles in the neutrophils, allowing us to track the vesicles at 12.5 msec/frame with 15-24 nm accuracy. Most intriguingly, the vesicles containing quantum dots were transported at higher speed than the in vitro velocity of a molecular motor such as kinesin or dynein. This is the first report in which non-invasive techniques have been used to visualize the internal dynamics of neutrophils. In this symposium, I'll report recent progress in the molecular mechanism of the vesicle transport in the neutrophil.

Determination of Power Stroke Distance Driven by Human Cytoplasmic Dynein Cytoplasmic dynein is a motor protein moving along microtubules toward the minus-end dominantly with 8.2nm step, and plays an important role in cellular processes. Dynein's conformational change, called 'power stroke', is assumed to generate driving forces moving along the microtubule. However, it has not been clarified the mechanism of how the power stroke contributes to individual steps. Thus, we measured the power stroke distance of single-headed dynein using optical tweezers. Results showed that the power stroke distance is less than 8.2nm, implying the following scenario; the attached head goes on power stroke, while the other head detaches, undergoes diffusive search and rebinds to the next site on microtubule.

III

2014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 冬学期

1.1.1 電磁気学I：早野 龍五

1. 特殊相対性理論

- 1.1 ニュートン力学とガリレイの相対性
- 1.2 ガリレイの相対性と電磁気
- 1.3 光速
- 1.4 ローレンツ変換
- 1.5 ローレンツ変換のいくつかの帰結
- 1.6 ユークリッド空間とミンコフスキー空間
- 1.7 4元速度
- 1.8 エネルギー運動量ベクトル
- 1.9 4元加速度と4元力
- 1.10 ローレンツ力

2. SI 単位系

- 2.1 SI 単位系と秒の定義の変遷
- 2.2 m の定義の変遷
- 2.3 kg 原器の問題点
- 2.4 kg 原器の廃止に向けて

3. 静電場

- 3.1 自然界の4つの力
- 3.2 クーロンの法則
- 3.3 重ね合わせの原理
- 3.4 保存力
- 3.5 電場、電気力線
- 3.6 Gauss の法則
- 3.7 静電エネルギー
- 3.8 Maxwell の応力
- 3.9 静電ポテンシャル
- 3.10 Laplace 方程式と Earnshaw の定理
- 3.11 Poisson 方程式

4. 静電場中の導体

- 4.1 導体
- 4.2 導体表面の電場
- 4.3 鏡映法

4.4 静電容量

- 4.5 平行平板コンデンサー
- 4.6 静電エネルギー
- 4.7 電流・電流密度
- 4.8 電荷の保存
- 4.9 電気伝導度
- 4.10 ジュール熱
- 4.11 キルヒホッフの法則と直流回路

5. 静磁場

- 5.1 磁気単極子は存在しない
- 5.2 ローレンツ力
- 5.3 直線電流が作る磁場
- 5.4 2本の平行な直線電流に働く力
- 5.5 磁場の発散と回転
- 5.6 アンペールの法則
- 5.7 ベクトルポテンシャル
- 5.8 ゲージ
- 5.9 ビオ・サバールの法則
- 5.10 磁気エネルギー

6. 時間とともに変化する電磁場

- 6.1 磁場中を運動する導体棒
- 6.2 誘導電流
- 6.3 ファラデーの法則
- 6.4 インダクタンス
- 6.5 変位電流
- 6.6 Maxwell 方程式
- 6.7 真空中の Maxwell 方程式の解
- 6.8 ポインティングベクトル
- 6.9 電磁波の運動量

7. Maxwell 方程式の相対論的共変性

- 7.1 共変ベクトルと反変ベクトル
- 7.2 ローレンツ共変性とは
- 7.3 電磁テンソル

- 7.4 電磁テンソルのローレンツ変換
- 7.5 Maxwell 方程式の相対論的共変性
- 7.6 電磁テンソルとローレンツ力
- 8. 物質中の電磁場
 - 8.1 誘電体と分極
 - 8.2 電束密度、誘電率、分極率
 - 8.3 物質中の静電場の法則
 - 8.4 電場と電束密度の境界条件
 - 8.5 磁性体
 - 8.6 物質中の静磁場の法則
 - 8.7 物質中の Maxwell 方程式
 - 8.8 誘電体中の電磁波

1.1.2 解析力学/量子力学 I : 吉田 直紀, 村尾 美緒

1. 解析力学

- 1.1 ニュートンの法則からラグランジュ形式へ
- 1.2 ラグランジュ方程式とその応用
- 1.3 最小作用の原理
- 1.4 対称性と保存則
- 1.5 ハミルトン形式と正準変換
- 1.6 ハミルトン-ヤコビの偏微分方程式

2. 量子力学 I

- 2.1 量子力学の導入と波動関数
- 2.2 シュレディンガー方程式と定常状態
- 2.3 矩形ポテンシャルとトンネル効果
- 2.4 調和振動子と不確定性原理
- 2.5 ヒルベルト空間と状態ベクトル
- 2.6 ハミルトニアン動力学と量子測定

1.1.3 物理実験学 : 福山 寛, 山本 智

自然科学の最先端は日々進化し、融合し続けている。その発展の礎には物理学の法則とそれを利用した新しい実験技術や装置の開発がある。物理学は実証科学であり、新しい物理概念は実験で検証される必要がある。また多くの物理法則が実験から見出されてきた。ここでは、物理学の発展に寄与した歴史的な実験から最先端の実験も紹介しつつ、物理実験に必要な基礎知識(単位、実験技術、誤差論、レポート作成法など)を講義する。

1. 序論

- 1.1 物理実験の魅力(歴史的実験から最先端実験まで)

2. 単位

- 2.1 SI 基本単位の定義
- 2.2 各種の常用単位系とその変換

3. 基礎物理定数と標準

- 3.1 基礎物理定数(プランク定数、ボルツマン定数など)
- 3.2 標準(時間、質量、電流、電圧、電気抵抗)

4. 基礎的な実験技術

- 4.1 実験(真空、低温、磁場)
- 4.2 実験環境と安全(実験室実験、フィールド実験、飛行体実験など)
- 4.3 測定法(電氣的・磁氣的・熱的物性測定、X線回折、分光測定など)
- 4.4 試料作成(単結晶、薄膜、ナノ構造など)

5. 誤差論

- 5.1 実験誤差
- 5.2 確率統計
- 5.3 実験データの解析

6. 実験レポートや論文の作成法と研究倫理

- 6.1 レポート・論文の目的と構成
- 6.2 研究倫理

期末試験の成績と出席点で評価する(中間レポートを併用する場合がある)。

1.1.4 物理数学 I : 常行 真司

1. 複素関数の性質

複素平面、複素関数、リーマン面、初等関数と収束半径、対数関数とべき乗関数、無限乗積

2. 複素関数の微分と正則性

コーシー・リーマンの関係式、調和関数

3. 複素積分定義と性質、コーシーの積分定理

4. コーシーの積分公式とその応用

コーシーの積分公式、テーラー展開、ローラン展開、特異点と留数、解析接続、 δ 関数と主値積分

5. 等角写像

6. ガンマ関数

ガンマ関数、スターリングの公式、漸近展開

7. フーリエ級数とフーリエ変換の基礎

固有関数展開、フーリエ級数、フーリエ変換、ラプラス変換

1.1.5 物理数学 II : 立川 裕二

1. 偏微分方程式とフーリエ変換

1.1 偏微分方程式

1.2 熱伝導方程式

1.3 波動方程式

1.4 ポアソン方程式

1.5 ラプラシアンと特殊関数

2. 特殊関数

2.1 直交関数系/直交多項式としての特殊関数

2.2 ベッセル関数

2.3 直交多項式 (ルジャンドル、ラゲール、エルミート)

2.4 球面調和関数

3. 回転対称性

3.1 回転群と角運動量

3.2 回転群と球面調和関数

3.3 回転群と四元数

1.2 3年生 夏学期

1.2.1 電磁気学 II : 島野 亮

1. 電磁場の基本法則

1.1 真空中の Maxwell 方程式

1.2 微視場と巨視場

1.3 分極と磁化

1.4 連続媒体中の Maxwell 方程式

1.5 電磁場とポテンシャル

2. 静電場

2.1 静電場の方程式

2.2 境界値問題とグリーン関数の方法

2.3 極座標における境界値問題

2.4 誘電体

3. 静磁場と定常電流

3.1 静磁場の方程式とアンペールの法則

3.2 境界値問題

3.3 磁性体

4. 電磁波

4.1 真空中と物質中の電磁波

4.2 電磁波の伝搬

4.3 電磁波の性質

4.4 電磁波のエネルギーと運動量

1.2.2 量子力学 II : 浜口 幸一

0. はじめに

1. 角運動量

1.1 軌道角運動量

1.2 角運動量演算子の固有状態

1.3 角運動量の固有状態を座標表示すると球面調和関数

1.4 角運動量の合成と Clebsch-Gordan 係数

1.5 スピン

1.6 $s=1/2$ のとき:パウリ行列

2. 球対称ポテンシャル内での粒子

2.1 この章でやること

2.2 球対称ポテンシャルのとき、ハミルトニアンと角運動量は可換

2.3 動径方向

2.4 水素原子

3. スピンと磁気モーメント

3.1 一様磁場中のループ電流

3.2 角運動量と磁気モーメント

3.3 LS 結合

3.4 これまでの話を全部合わせると・・・

3.5 一様磁場中のスピン

4. 様々な近似法

- 4.1 摂動論 (定常状態)
- 4.2 摂動論 (時間発展)
- 4.3 準古典近似 (WKB 近似)

5. 対称性と保存則

- 5.1 運動量 p は並進、角運動量 L は回転の生成子

5.2 ユニタリー演算子とエルミート演算子

- 5.3 対称性と保存則
- 5.4 保存量
- 5.5 対称性

6. オマケ**1.2.3 現代実験物理学 I : (前半) 溝川 貴司, (後半) 長谷川 修司**

4 学期の「物理実験学」に引き続いて、主として物性物理学に関連する実験手法について、「物理実験 I」および「物理実験 II」で行う実験を中心に、物理的な原理や歴史的な背景とともに最近の話題も含めて概説する。

1. 低温

- 1.1 低温技術
- 1.2 超流動
- 1.3 超伝導

2. 真空

- 2.1 真空技術
- 2.2 電子線
- 2.3 その他の粒子線

3. 電気と光

- 3.1 電気回路
- 3.2 電磁波の発生と計測
- 3.3 磁場の発生と計測

4. X 線

- 4.1 X 線の発見
- 4.2 特性 X 線と連続 X 線
- 4.3 Moseley の法則
- 4.4 Thomson 散乱と Compton 散乱
- 4.5 X 線回折結晶学
- 4.6 X 線研究の拡がり
- 4.7 C T
- 4.8 リソグラフィ
- 4.9 宇宙 X 線

5. 電子

- 5.1 粒子性と波動性
- 5.2 電子回折と顕微鏡
- 5.3 Aharonov-Bohm 効果
- 5.4 トンネル効果と走査トンネル顕微鏡
- 5.5 スピン

1.2.4 流体力学 : 江尻 晶

これまで学習した古典力学, ベクトル解析, 複素関数, 偏微分方程式を踏まえつつ, 流体の基礎的な扱い方を講義する。また, 電磁気学との関連性, さまざまな応用についても触れる。

1. 様々な流体**2. 流体の基礎方程式**

- 2.1 流体を特徴づける量
- 2.2 連続の式
- 2.3 力と運動方程式
- 2.4 粒子の方程式から流体の方程式へ
- 2.5 渦度と渦度方程式

3. 関数による流れの表現

- 3.1 ポテンシャル流
- 3.2 複素速度ポテンシャル式

3.2 揚力**3. 粘性流**

- 3.1 レイノルズ数
- 3.2 ストークス近似
- 3.3 一様等方乱流とコルモゴロフ則
- 3.4 フラクタルによる乱流の表現

4. 水波

- 4.1 長い波
- 4.2 表面波
- 4.3 表面張力波

5. 不安定性波

- 5.1 安定・不安定
- 5.2 ケルビン・ヘルムホルツ不安定性
- 5.3 レイリー・テイラー不安定性

1.2.5 統計力学 I : 佐野 雅己

1. 熱力学再考
 - 1.1 熱力学第二法則
 - 1.2 熱力学関数と変分原理
2. 統計力学の基礎と適用
 - 2.1 統計力学の原理
 - 2.2 ミクロカノニカル分布
 - 2.3 カノニカル分布
 - 2.4 グランドカノニカル分布
 - 2.5 理想気体 (単原子分子、2原子分子)
 - 2.6 物性への適用 (磁性、固体の比熱、高分子鎖とゴム弾性、生物物理)
3. 量子統計力学
 - 3.1 量子統計の考え方
 - 3.2 理想フェルミ気体
 - 3.3 理想ボース気体
 - 3.4 縮退したフェルミ気体
 - 3.5 量子統計の適用 (固体の比熱、黒体輻射)
 - 3.6 ボース・アインシュタイン凝縮

1.3 3年生 冬学期

1.3.1 物理数学 III: 上田 正仁

1. 群論の基礎
2. 表現論
3. リー群の基礎
4. リー群と多様体
5. ルートとウエイト
6. 微分形式
7. ベクトル解析の諸公式の導出
8. 多様体上の積分
9. 閉形式と完全微分
10. 微分形式の応用

1.3.2 量子力学 III : 福嶋 健二

1. 多粒子系の量子論
 - 1.1 同種 2 粒子系
 - 1.2 同種多粒子系
 - 1.3 第二量子化
 - 1.4 Hartree-Fock 近似
 - 1.5 電磁場との相互作用
2. 散乱問題
 - 2.1 波束とポテンシャル散乱
 - 2.2 中心力ポテンシャルと部分波展開
 - 2.3 Lippmann-Schwinger 方程式と Born 近似
 - 2.4 Eikonal 近似
 - 2.5 光子の吸収・放出
3. 場の量子論入門
 - 3.1 Wigner 関数の性質
 - 3.2 Schwinger-Keldysh 形式

1.3.3 固体物理学 I : 岡本 徹

1. 原子構造
 - 1.1 水素原子
 - 1.2 多原子分子
 - 1.3 イオン化エネルギー
2. 結晶の結合力
 - 2.1 イオン結合
 - 2.2 共有結合
 - 2.3 金属結合
 - 2.4 ファンデルワールス結合
3. 結晶構造
 - 3.1 空間格子と単位胞
 - 3.2 空間格子の分類
 - 3.3 代表的な結晶構造
4. 逆格子

- 4.1 逆格子の求め方
- 4.2 X線回折
- 4.3 ブリルアン域
- 5. 結晶中の電子
 - 5.1 ブロウホ状態
 - 5.2 ポテンシャルが小さい場合
 - 5.3 エネルギーバンド
 - 5.4 束縛が強い場合
- 6. 電子の運動
 - 6.1 電子の速度
 - 6.2 運動方程式
 - 6.3 有効質量
- 6.4 磁場中の運動
- 7. 金属中の伝導電子
 - 7.1 比熱
 - 7.2 電気伝導と散乱機構
 - 7.3 ボルツマン方程式と輸送係数
- 8. 半導体
 - 8.1 電子と正孔
 - 8.2 不純物ドーピング
 - 8.3 pn 接合
 - 8.4 量子ホール効果
 - 8.5 メゾスコピック系

1.3.4 現代実験物理学 II : 安東 正樹, 中澤 知洋

- 1. 素粒子実験イントロダクション
 - 1.1 物理実験学
 - 1.2 現代実験物理学の基本
 - 1.2.1 実験技術の共通性
 - 1.2.2 典型的な検出器システム
- 2. 素粒子実験概要
 - 2.1 物質の階層性
 - 2.2 素粒子の標準モデル
 - 2.3 素粒子実験の技法
 - 2.3.1 全体像
 - 2.3.2 高エネルギー粒子の入手 (放射線源・宇宙線・粒子加速器)
 - 2.3.3 事象 (イベント) の考え方
- 3. 素粒子実験の基本
 - 3.1 単位系
 - 3.2 基礎的な物理量とスケール
 - 3.3 断面積
- 4. 素粒子・原子核・宇宙物理の検出器/観測装置
 - 4.1 素粒子実験
 - 4.2 宇宙実験 (宇宙を観測する装置)
- 5. 荷電粒子/講師の相互作用と検出器
 - 5.1 粒子と光子の検出の基礎
 - 5.2 荷電粒子の相互作用
 - 5.2.1 イオン化損失の基本
 - 5.2.2 ベーテブロッホの式
 - 5.2.3 Bragg 曲線と飛程
 - 5.2.4 電子の場合
 - 5.2.5 放射損失
 - 5.2.6 チェレンコフ放射
- 5.3 高エネルギー荷電粒子の検出器
 - 5.3.1 代表的な荷電粒子検出器
 - 5.3.2 プラスチックシンチレータ
 - 5.3.3 ガス検出器
 - 5.3.4 半導体検出器
 - 5.3.5 粒子弁別
- 5.4 光子と物質の相互作用 (光電吸収、コンプトン散乱、電子対生成)
- 5.5 高エネルギー光子の検出器
 - 5.5.1 無機シンチレータ
 - 5.5.2 半導体検出器
 - 5.5.3 電子対生成 GeV 光子検出器
 - 5.5.4 大気チェレンコフ TeV 検出器
- 6. 物理実験における統計的データ解析
 - 6.1 物理実験と統計学
 - 6.2 基本的な統計量・確率分布
 - 6.3 統計モデルの応用
 - 6.4 パラメータ推定
 - 6.5 仮説検定
 - 6.6 モンテカルロ法とベイズ統計
- 7. 精密計測実験とデータ解析

1.3.5 電磁気学 III : 櫻井 博儀

- 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-ヴィーヘルトのポテンシャル

3.2 運動する荷電粒子の作る電磁波

3.3 制動放射

3.4 点電荷による電磁波の散乱

3.5 チェレンコフ放射

4. 電磁波の伝播

4.1 導波管

4.2 空洞共振器

4.3 電磁波の回折

5. 電磁場の角運動量**1.3.6 生物物理学：樋口 秀男, 能瀬 聡直**

生物物理学は物理学的な観点や手法を用い、生命現象の基本原則を究明することを目指す研究領域であり、その対象は、蛋白質や核酸などの分子レベルから脳・神経系の機能などの高次の生命現象まで多岐にわたっている。本講義では、その基礎的な概念、手法を解説するとともに、最近のトピックスについても紹介する。以下のような内容を予定している。

1. 生物物理学とは

2. 遺伝情報の流れ

3. 蛋白質の構造と機能

4. 細胞内タンパク質のダイナミクス

5. 遺伝子操作技術

6. ゲノム科学とバイオインフォマティクス

7. バイオイメーjing、生体分子計測

8. 脳・神経系の生物物理

1.3.7 統計力学 II：小形 正男**1. 相転移現象**

1.0 イントロダクション

1.1 気体-液体相転移

1.2 相転移：対称性の自発的破れ

1.3 スピン系の統計力学

1.4 平均場近似

1.5 イジングモデル

1.6 ランダウの2次相転移理論

1.7 スケーリング理論

1.8 くりこみ群の基礎

2. 非平衡統計力学

2.1 応答関数とゆらぎ

2.2 線形応答理論

2.3 種々の輸送係数

2.4 ブラウン運動とアインシュタインの関係式

2.5 ランダム・ウォーク

2.6 拡散方程式

2.7 境界のある場合の拡散方程式

2.8 ランジュバン方程式

1.4 4年生 夏学期**1.4.1 場の量子論 I：松尾 泰****1. 相対論的量子力学**

1.1 Lorentz 変換とその表現

1.2 Klein-Gordon 方程式

1.3 Dirac 方程式

1.4 対称性と保存量：Noether の定理

1.5 第二量子化とその必然性

2. 場の量子化

2.1 場の正準量子化

2.2 Klein-Gordon, Dirac 場の量子化

2.3 電磁場の量子化

2.4 S 行列

2.5 相互作用描像

2.6 Feynman 則

1.4.2 サブアトム物理学：駒宮 幸男

1. 素粒子・原子核物理学の基礎

- 1.1 物質の構造
- 1.2 素粒子の種類と相互作用
- 1.3 自然単位
- 1.4 相対論的力学
- 1.5 相互作用とファインマンダイアグラム
- 1.6 ハドロンの種類
- 1.5 相互作用と寿命

2. 粒子の物質中での相互作用

- 2.1 荷電粒子
- 2.2 光子
- 2.3 電磁シャワー
- 2.4 原子核反応

3. 粒子検出器

- 3.1 ガスチェンバー
- 3.2 光学的検出器
- 3.3 半導体測定器
- 3.4 測定器のアセンブリ

4. 原子核の基礎

- 4.1 原子核の束縛エネルギー

4.2 シェルモデル

- 4.3 原子核の崩壊
- 4.4 宇宙初期の元素合成
- 4.5 星での元素合成

5. 内部量子数に対する変換

- 5.1 パリティ
- 5.2 荷電変換

6. 電磁相互作用

- 6.1 ゲージ変換

7. 弱い相互作用

- 7.1 電磁相互作用との類似点
- 7.2 パリティの破れ
- 7.3 ニュートリノ
- 7.4 素粒子の世代
- 7.5 小林・益川モデル

8. 対称性の自発的破れ

- 8.1 対称性の自発的破れと質量の起源
- 8.2 大局的ゲージ対称性
- 8.2 ヒッグス機構
- 8.2 LHC でのヒッグス粒子の発見

1.4.3 一般相対論：須藤 靖

1. 重力の世界

- 1.1 ニュートン重力の普遍性
- 1.2 物理学の方法論
- 1.3 講義の構成

2. 4次元時空とシュワルツシルド計量

- 2.1 線素と計量
- 2.2 シュワルツシルド時空の性質
- 2.3 GPS とシュワルツシルド時空

3. 一般相対性原理とその数学的表現

- 3.1 特殊相対論の限界: 慣性系とは? 重力は“力”か?
- 3.2 一般相対論の概念構成
- 3.3 物理量の表現: ベクトル
- 3.4 ベクトルの基底と成分
- 3.5 基底変換と座標変換
- 3.6 ベクトルの微分
- 3.7 接続係数の変換則
- 3.8 物理量の表現: 双対ベクトル
- 3.9 物理量の表現: テンソル

3.10 まとめ: 物理量とテンソル

4. 測地線の方程式

- 4.1 重力場のもとでの粒子の運動方程式
- 4.2 ニュートン理論との対応

5. 重力場の方程式

- 5.1 マッハの原理と重力場の方程式
- 5.2 エネルギー運動量テンソル
- 5.3 アインシュタイン方程式への道
- 5.4 ニュートン理論との対応
- 5.5 宇宙定数
- 5.6 変分原理による定式化
- 5.7 重力場: アインシュタイン-ヒルベルト作用
- 5.8 物質場: エネルギー運動量テンソル

6. シュワルツシルド時空とブラックホール

- 6.1 球対称重力場の計量
- 6.2 シュワルツシルド解導出の概略
- 6.3 シュワルツシルド解
- 6.4 シュワルツシルド計量

- 6.5 ブラックホールは観測できるか? エディントン光度
- 6.6 天文学的ブラックホール
- 6.7 一般相対論の検証
- 7. 相対論的宇宙モデル
 - 7.1 宇宙原理と宇宙の一様等方性
 - 7.2 ロバートソン・ウォーカー計量
 - 7.3 アインシュタイン方程式からフリードマン方程式へ
- 7.4 宇宙の状態方程式
- 7.5 アインシュタイン・ドジッター宇宙モデル
- 7.6 フリードマン宇宙モデル
- 7.7 宇宙論パラメータ
- 7.8 宇宙の膨張則と宇宙の未来
- 7.9 宇宙定数とダークエネルギー
- 7.10 インフレーションシナリオ

1.4.4 宇宙物理学: 牧島 一夫

- 1. 宇宙を理解する基礎
 - 1.1 多体系と自己重力系
 - 1.2 電磁放射と光子ガスの熱力学
- 2. 星とその物理学
 - 2.1 自己重力系としての星とその熱力学
 - 2.2 主系列星のパラメータ・スケーリング
 - 2.3 星内部の原子核反応
 - 2.4 星の進化と終末
- 3. フェルミオンの縮退圧で支えられた星
 - 3.1 電子縮退と白色わい星
 - 3.2 核子縮退と中性子星
- 4. ビッグバン宇宙論
 - 4.1 膨張宇宙の記述
 - 4.2 膨張宇宙の力学と宇宙論パラメータ
 - 4.3 物質の起源と宇宙の熱史
 - 4.4 膨張宇宙における軽元素の合成
 - 4.5 宇宙の「晴れ上がり」と天体形成

1.4.5 プラズマ物理学: 高瀬 雄一

- 0. プラズマとは?
 - 3.1 完全電離と非完全電離プラズマ
 - 3.2 完全電離プラズマ中の衝突
 - 3.3 プラズマの拡散
- 1. 単一荷電粒子の運動
 - 1.1 一様電磁場中の粒子ドリフト
 - 1.2 非一様磁場中の粒子ドリフト
 - 1.3 時間変化する電磁場中の粒子ドリフト
 - 1.4 マッピング
- 2. 流体としてのプラズマ
 - 2.1 プラズマの流体方程式
 - 2.2 流体方程式と粒子ドリフトの関係
 - 2.3 一流体電磁流体力学
 - 2.4 電磁流体力学的平衡
- 3. プラズマ中の衝突過程
 - 4. 流体プラズマ中の波動
 - 4.1 非等方分散媒体中の小振幅波動
 - 4.2 磁場のないプラズマ中の波動
 - 4.3 磁場のあるプラズマ中の波動
 - 5. 流体プラズマの不安定性
- 6. プラズマの運動論
 - 6.1 ヴラソフ方程式
 - 6.2 プラズマ波動の運動論的效果
 - 6.3 速度空間不安定性と非線形理論

1.4.6 固体物理学 II: 高木 英典

- 1. 金属と半導体 (復習)
 - 1.1 バンド構造
 - 1.2 金属のフェルミ面
- 2. 格子振動

- 2.1 フォノン
- 2.3 デバイ模型
- 2.3 比熱と熱伝導
- 3. 電子相関と磁性
- 3.1 電子相関
- 3.2 反磁性と常磁性
- 3.3 磁気秩序
- 3.4 磁気デバイス

- 4. 超伝導
- 4.1 超伝導現象概観
- 4.2 電子格子相互作用とクーパー対
- 4.3 BCS 理論
- 4.4 量子磁束
- 3. 低次元電子系の量子現象
- 5.1 量子ホール効果
- 5.3 電荷密度波

1.4.7 量子光学：酒井 広文

1. 原子と放射の相互作用

- 1.1 時間に依存する Schrödinger 方程式
- 1.2 相互作用ハミルトニアン
- 1.3 遷移速度
- 1.4 B 係数の表式
- 1.5 光学 Bloch 方程式
- 1.6 Rabi 振動
- 1.7 放射広がり
- 1.8 飽和広がり
- 1.9 放射減衰を伴う Rabi 振動
- 1.10 衝突広がり
- 1.11 Doppler 広がり
- 1.12 合成吸収線の形状

2. 電磁場の量子化

- 2.1 古典電磁場のポテンシャル論
- 2.2 Coulomb ゲージ
- 2.3 自由古典場
- 2.4 量子力学的調和振動子
- 2.5 場の量子化
- 2.6 場の交換の性質
- 2.7 零点エネルギー
- 2.8 モード位相演算子

2.9 単一モード個数状態の物理的性質

- 2.10 コヒーレント光子状態
- 2.11 単一モードコヒーレント状態の物理的性質

3. 量子化した場と原子との相互作用

- 3.1 原子の多極モーメント
- 3.2 多極相互作用ハミルトニアン
- 3.3 電気双極子近似
- 3.4 原子ハミルトニアンの第2量子化
- 3.5 光子の吸収速度と放出速度

4. レーザーの基礎

- 4.1 光共振器のモード
- 4.2 光共振器の安定性
- 4.3 発振条件
- 4.4 波動方程式に基づくレーザー理論
- 4.5 定常状態におけるレーザー発振
- 4.6 各種のレーザー
- 4.6.1 3準位レーザーと4準位レーザー
- 4.6.2 固体レーザー
- 4.6.3 気体レーザー
- 4.6.4 色素レーザー
- 4.6.5 半導体レーザー

1.4.8 生物物理学特論：豊島 近, 新井 宗仁, 樋口 秀男

1. 蛋白質の生物物理学

- 1.1 生体内のタンパク質機能とは。
- 1.2 蛋白質や生体膜とはどのようなものか。そこで働いている原理は何か。
- 1.3 蛋白質はイオンをどのように見分け、使い分けるか
- 1.4 蛋白質はどのようにして反応を触媒するか — 酵素反応の構造生物学
- 1.5 蛋白質はエネルギーをどのように変換し、利用するか
- 1.6 蛋白質はどのようにして立体構造を形成するのか

1.7 蛋白質の構造と機能を予測する

1.8 蛋白質のダイナミクスと機能発現

1.9 蛋白質と病気の関わり

1.10 蛋白質の進化とデザイン

1.11 蛋白質 1 分子の機能をいかに測定し、理解するか。

1.12 細胞内蛋白質機能をイメージングしてわかること。

1.13 個体内蛋白質の役割の多様性

1.4.9 統計力学特論：宮下 精二

1. 相転移と臨界現象

2. 平均場理論

3. くりこみ群とスケーリング

4. 厳密解

5. いろいろなタイプの相転移

6. 非平衡現象

1.5 4年生 冬学期

1.5.1 化学物理学：藤森 淳

1. 原子の電子状態

1.1 一電子状態

1.2 多電子原子

1.3 周期律

2. 分子の電子状態

2.1 水素分子・二原子分子

2.2 ベンゼン等の分子

2.3 金属錯体

1.5.2 素粒子物理学：横山 将志

1. 標準模型以前の素粒子物理

2. ゲージ理論と対称性の自発的破れ

3. ワインバーグ-サラムモデル

4. GWS モデルの実験的検証

5. クォークとその混合

6. 強い相互作用と QCD

7. 標準模型を超えて

1.5.3 場の量子論 II：諸井 健夫

本講義では、場の量子論 I で学ぶ相対論的場の理論の基礎的知識を前提として、以下の事項について解説する。

1. 経路積分による場の量子化

2. ゲージ場の量子化

3. 輻射補正

1.5.4 原子核物理学：大塚孝治

1. 原子核のスケールと単位

2. 原子核の大きさや密度

3. 原子核の質量と結合エネルギー

4. フェルミガス模型

5. 平均ポテンシャル

6. 調和振動子ポテンシャル

7. 殻構造

8. シェルモデル、アイソスピンと核力

9. 原子核の形

10. 原子核の崩壊と放射線

11. エキゾチックな原子核

1.5.5 固体物理学 III : 青木 秀夫

- | | |
|---------------------|----------------|
| 1. 序 | 3.1 電子相関 |
| 2. 超伝導の基礎 | 3.2 超伝導の電子機構 |
| 2.1 超伝導とは何か | 4. 他の物質における超伝導 |
| 2.2 超伝導の基本的性質 | 5. 整数量子ホール効果 |
| 2.3 従来型超伝導 — 背景と現象論 | 6. 分数量子ホール効果 |
| 2.4 従来型超伝導 — BCS 理論 | 7. 展望 |
| 3. 高温超伝導 | |

1.5.6 電子回路論 : 勝本 信吾

- | | |
|---------------------|-------------------------|
| 1. 電子回路序論 | 3.5 電場効果トランジスタ |
| 1.1 「電子回路論」という講義 | 4. 過渡応答と分布定数回路 |
| 1.2 電子回路とは | 4.1 過渡応答 |
| 1.3 2端子素子 | 4.2 分布定数回路 |
| 1.4 回路図 | 4.3 伝送路の伝播現象 |
| 1.5 抵抗器 | 4.4 S 行列 (S パラメタ) |
| 1.6 キャパシタ | 4.5 シュレディンガー方程式と LC 伝送路 |
| 1.7 インダクタ | 4.6 非線形 LC 伝送路と戸田格子 |
| 2. 線形回路序論 | 5. 信号, 雑音, 波形解析 |
| 2.1 線形システムと電子回路 | 5.1 ゆらぎ |
| 2.2 各種電源 | 5.2 増幅器の雑音 |
| 2.3 回路網 | 5.3 EMI(EMC) |
| 2.4 共鳴現象と共鳴回路 | 5.4 変調とアナログ信号伝送 |
| 2.5 エネルギー散逸と電力 | 5.5 離散化信号 |
| 2.6 クラマース-クローニッヒの関係 | 6. デジタル信号とデジタル回路 |
| 2.7 4端子 (2端子対) 回路 | 6.1 デジタル信号序論 |
| 2.8 端子対回路の諸定理 | 6.2 論理ゲート |
| 2.9 インピダンスの整合 | 6.3 論理ゲートの実装 |
| 3. 増幅回路 | 6.4 論理演算の回路化と単純化 |
| 3.1 増幅度 (利得) | 6.5 A-D/D-A コンバータ |
| 3.2 周波数特性とボード線図 | 6.6 デジタルフィルター |
| 3.3 OP アンプ | 6.7 ハードウェア記述言語: HDL |
| 3.4 トランジスタ | |

1.5.7 現代物理学入門: 浅井 祥仁, 藤堂 眞治

- | | |
|--------------------------|-----------------------|
| 1. 素粒子物理最前線 (担当: 浅井) | 1.5 超対称性粒子と時空 |
| 1.1 エネルギーフロンティア素粒子研究と運動学 | 1.6 超対称性粒子の探し方 |
| 1.2 最先端の検出器技術 | 1.7 余剰次元 |
| 1.3 ヒッグス場の役割 | 2. 計算統計物理最前線 (担当: 藤堂) |
| 1.4 ヒッグス粒子の見つけ方 | 2.1 スーパーコンピュータと計算物理 |

- 2.2 乱択アルゴリズムとモンテカルロ法
- 2.3 相転移、臨界現象、くりこみ群
- 2.4 マルコフ連鎖モンテカルロ法の発展

- 2.5 量子多体系に対する計算手法
- 2.6 低次元磁性体におけるトポロジカル状態とBEC
- 2.7 計算物質科学のソフトウェア

1.5.8 先端物理数学：大栗 博司

物理学に使われる現代数学の手法、特に幾何学的方法を学ぶ。

2 各賞受賞者紹介

2.1 佐藤勝彦 名誉教授

— 文化功労者 —

名誉教授の佐藤勝彦先生が2014年度の文化功労者の顕彰を受けました。佐藤先生は、素粒子物理学を天体物理学・宇宙論に応用し、さまざまな新現象を発見した世界的な先駆者です。まず、電弱統一理論に基づき、重力崩壊型超新星爆発においてニュートリノが10秒間程度中心部に閉じ込められて、超新星爆発の駆動に重要な役割を果たすことを示したニュートリノトラッピング理論を提唱され、これは後に超新星1987Aの観測によって実証されました。そして、素粒子物理学の予言するさまざまな新粒子の性質を、天体物理学・宇宙論によって制限できることを世界で初めて示し、ニュートリノ質量や世代数に対する宇宙論的制限を与えました。さらに、相互作用の大統一理論に基づき、真空の相転移が宇宙初期に起こり、その結果宇宙が何十桁も指数関数的に膨張することを示し、ビッグバン宇宙論をインフレーション宇宙論へと発展させました。さらに、この相転移の進行にともなって、宇宙が自己相似的に多重発生することを示しました。これは「唯一絶対の宇宙」という古典的な宇宙観を、「多種多様な宇宙の中でのわれわれの宇宙」という考え方に変更することを迫った、画期的なものです。

2.2 牧島一夫 教授

— 日本学士院賞 —

牧島一夫教授が、日本学士院賞を受賞されました。牧島先生の受賞は「X線観測による中性子星の強磁場の研究」によるものです。半径10kmあまり、つまり山手線の範囲ほどの中に、太陽一個分の重さが閉じ込められている中性子星は、重力で圧縮された核物質の塊りです。これがどのような性質を持っているのか、牧島先生は宇宙X線観測の立場から研究されてきました。中性子星は、星の最期の大爆発の中で生まれます。親星の何もかもを圧縮して誕生する中で、磁場もまた激しく圧縮され、 $10^8 \sim 10^{12}$ Tにも達する場合があります。ここに周囲からガスが落ちてくると、磁場の力で磁極に集中して降り積もり、中性子星の表面に衝突して激しく加熱し、強いX線を出します。このX線に現れる特徴的な波長を用いて中性子星の表面磁場を測る技法は、牧島先生が世界を先導してこられました。この磁場は、超伝導電流で作られるのか、核物質のスピンで作られるのか、観測データが足りずまだ決着していません。牧島先生はこの問題に取り組み続け、最近では中性子星の自転に現れる「自由歳差運動」の観測から、その形状の歪みを捉えることに成功しました。これは、中性子星の内部に隠された磁場を推定する全く新しい技法で、これまでの不可能を可能にしたすばらしいアイデアです。

2.3 立川裕二 准教授

— Hermann-Weyl 賞、西宮湯川記念賞 —

立川裕二准教授が2014年のヘルマン・ワイル賞 (Hermann Weyl Prize) および第29回西宮湯川記念賞を受賞しました。今回の受賞は、超対称な場の量子論の分野への貢献が評価されたものです。Alday-Gaiotto-Tachikawa予想により、数学および量子物理学に進歩をもたらしたことが評価されました。立川氏はWeyl賞の受賞に際し「今後もWeylの名前を汚さぬよう精進したいと思います。」と述べています。

2.4 桂法称准教授

— 日本物理学会若手奨励賞 —

桂法称准教授が、マルチフェロイクス系における磁性と強誘電性の結合に関する顕著な研究業績により、日本物理学会若手奨励賞（領域8）を受賞しました。桂氏は、近年実験的に発見された、磁気秩序と強誘電性が共存し、かつそれらの間に巨大な結合が存在するマルチフェロイクスと呼ばれる物質群に対して、微視的な理論を構築し、これらの系において磁気秩序に由来する強誘電性が発現していることを明らかにしました。この理論により、サイクロイド型らせん秩序と呼ばれる磁気秩序が実現している場合に自発分極が現れる可能性が指摘されましたが、その後多くのマルチフェロイクス系でこの機構により強誘電性が発現していることが実験的に明らかになっており、新たなマルチフェロイクスを探索するためのひとつの指針として、現在も注目を集めています。

2.5 辻直人助教 (青木研)

— 日本物理学会若手奨励賞 —

最近、電子系や冷却原子系における非平衡の物理への興味が高まっていて、重要な分野を作りつつあります。他方、強相関電子系はいうまでもなく物性物理学の中心的なテーマの一つです。辻氏は、強相関系を非平衡にした場合（たとえば強いレーザー光を当てた場合）の物理に興味をもちました。平衡で既に大変な強相関の問題を非平衡で扱うのはチャレンジングで、だからこそ面白い問題の宝庫の分野ですが、辻氏は、まず理論的枠組みとして、強相関を扱う動的平均場理論 (DMFT) に、強いレーザー光 (ac 外場) を扱える Floquet 法を合体させるという方法 (Floquet-DMFT) を初めて構築して非平衡を調べる道を拓きました。辻氏は、これを実際に用いて、非平衡・非線形に特有な現象として、負の光学伝導度や非線形光学効果を見出しました。非平衡と一口にいても、定常状態と過渡現象がありますが、前者に対しては、系に散逸をもたらす熱浴との結合を考え、これと非平衡 DMFT を組み合わせることにより非平衡定常状態を扱うというのが辻氏のフォーマリズムです。辻氏はさらに過渡現象について、強相関系を非平衡化した後のダイナミクス（時間発展）を調べ、平衡での相転移境界とは別のところに「非熱的 (nonthermal) 相境界」が存在することを明らかにしました。このような非平衡の仕事は、彼の最も最近の「超伝導体における Higgs モードと第三高調波の共鳴的発生」の仕事にもつながるなど、統計物理学や光物性も含んだ今後の様々な発展の萌芽となることが期待されます。

2.6 松永隆佑助教 (島野研)

— 日本物理学会若手奨励賞 —

超伝導体の秩序パラメーターの振幅の振動（ヒッグスモード）は、アンダーソンによって約 50 年前にその存在が指摘され、その後多くの理論的研究がなされてきたが実験で明確に観測した例がなかった。松永隆佑氏は、最先端のレーザー分光技術を駆使し、s 波超伝導体でテラヘルツ光のモノサイクルパルス照射のもとでヒッグスモードが現れることを発見した。さらに、単色テラヘルツ光照射による系統的な実験で、光とは結合しないと考えられていたヒッグスモードが非線形領域では結合することを発見し、その共鳴において高効率の第 3 高調波が発生することを見出した。この研究は、量子凝縮相の非平衡ダイナミクス、超伝導体の光制御、集団励起による非線形光学の新たな研究展開として、さらに領域を越えた高い波及効果がある研究として高く評価されました。

2.7 小西邦昭助教 (理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構)

— 日本物理学会若手奨励賞 —

小西邦昭助教は、光の波長よりも小さなスケールの人工ナノ構造の光学応答について、対称性の与える効果に着目し、新たな原理に基づいた円偏光制御手法の開発と、メカニズム解明を進めてきた。円偏光制御を実現するためには、光学応答の等方性を保ちつつ円偏光選択性を生じさせる必要があり、ナノ構造の対称性を適切に選択する必要がある。小西氏は、鏡映対称性を有しない単位構造が周期的に配列された人工キラルナ

ノ周期構造の共鳴効果を活用することによって、誘電体のみで構成された人工ナノ構造で巨大旋光性が発現することを見出し、さらに、構造による真空場変調の効果によって、量子ドットからの発光を円偏光化することに成功した。また、人工ナノ構造の非線形光学応答において、構造に三重回転対称性を導入することにより、第二次高調波発生 (SHG) の円偏光状態を自在に制御することが可能であることを実証し、構造の回転対称性と SHG の偏光選択則との関係を導いた。これらの結果は、これまでに結晶や分子で知られていた構造の対称性と偏光の関係性が、人工ナノ構造の線形及び非線形光学応答でも成立すること示しており、人工ナノ構造の新たな設計指針を与えるものである。

2.8 高山あかり助教 (長谷川研)

— 第7回井上リサーチアワード、日本物理学会若手奨励賞、日本表面科学会講演奨励賞 —

長谷川研の高山助教は、「多探針 STM を用いた 1 次元 Rashba 効果およびトポロジカルエッジ状態の研究」に対して標記アワード公益財団法人井上科学振興財団 (2015 年 2 月) を受賞した。高山博士は、今まで行ってきたラシュバ効果を示す物質表面やトポロジカル絶縁体の表面において現れるスピン分裂した電子状態の研究を発展させ、スピン分裂した表面電子状態におけるスピン偏極電流やスピン流 (電流を伴わない角運動量のみの流れ) の検出を目指す研究を提案した。とくに、2 次元系の端面に現れる 1 次元系を対象とし、その端面に沿った電気伝導を測定し、Rashba 効果も含めた 1 次元状態の性質を明らかにしていく。また、2015 年 3 月の日本物理学会における「スピン分解光電子分光による V 族半金属薄膜におけるラシュバ効果の研究」で標記の賞を受賞した。自らが開発した超高分解能スピン・角度分解光電子分光装置を用いて、ラシュバ効果を示す物質表面やトポロジカル絶縁体の表面において現れるスピン分裂した電子状態の研究を行い、ラシュバ効果の異方性、表面状態とバルク状態の混成、フェルミ面の形状とスピン偏極率の関係などを実験的に明らかにしたことが評価された。また、公益社団法人日本表面科学会の学術講演会 (2014 年 11 月) において、「Bi 薄膜におけるエッジ構造のスピン分解 ARPES」と題する講演に対して新進研究者部門講演奨励賞を受賞した。Bi 結晶表面の原子ステップに沿って存在するエッジ状態を初めて光電子分光法で検出し、その分散とスピン構造を明らかにした研究が評価された。

2.9 加藤康作氏 (酒井広文研、現 大阪大学)

— 平成 26 年度日本分光学会年次講演会若手ポスター賞 —

加藤康作氏 (2014 年度に博士 (理学) の学位取得、現在大阪大学レーザーエネルギー学研究センター特任研究員) が、平成 26 年度日本分光学会年次講演会若手ポスター賞 (共同研究者: 峰本紳一郎、酒見悠介、酒井広文) を受賞しました。加藤氏らは、分子軌道イメージングの高度化に資する研究を精力的に進め、顕著な成果を挙げました。まず、高次高調波の強度スペクトルと位相スペクトルを同一条件下で測定可能な装置の開発を行いました。開発した装置を用い、強光子場近似を越えてクーロン電場の影響が強く反映されるため、原子・分子軌道の超高速イメージングへの応用の観点から注目されているイオン化ポテンシャル近傍の高調波に着目してデータを取得しました。その結果、サイドバンド次数 12 次の高調波については、Ar 中から発生する高調波の位相差の方が N_2 分子中からのそれよりも有意に大きいことを初めて見出すなど、実際に強光子場近似では説明のできない複数の新たな知見を得ることに成功しました。これら一連の成果が高く評価されたものです。

2.10 一ノ倉聖氏 (長谷川研)

— Travel Award at the 7th International Symposium on Surface Science、平成 26 年度講演奨励賞 (スチューデント部門) —

長谷川研の博士課程 2 年生一ノ倉さんは、標記国際会議および公益社団法人日本表面科学会の学術講演会 (いずれも 2014 年 11 月) において、「Bi 表面におけるスピン依存イオン散乱」の研究発表で標記 2 つの賞を受賞した。スピン偏極したヘリウムイオンビームがビスマス結晶表面から散乱される際、スピン軌道相互作用によってスピン依存の強度非対称性を持つことを明らかにした研究が評価された。

2.11 平成 26 年度 理学部・理学系研究科奨励賞

以下の方々が受賞が、平成 26 年度 理学部・理学系研究科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) 伊藤 創祐君、杉浦 祥君、白崎 正人君、川口 喬吾君
- 理学系研究科 研究奨励賞 (修士課程) 石垣 真史君、内田 悠介君、中川 桂君、村下 湧音君
- 理学部 学修奨励賞榎本 雄太郎君、真野 智之君、山田 昌彦君

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]

山本 新	助教 (福嶋研)	H26/4/1	採用	理化学研究所基礎科学特別研究員
諏訪 秀磨	助教 (藤堂研)	H26/4/1	採用	ボストン大学 (学振海外特別研究員)
高山 あかり	助教 (長谷川研)	H26/4/1	採用	東北大学 (学振海外特別研究員)
桂 法称	准教授	H26/4/1	採用	学習院大学理学部准教授
高江洲義太郎	特任研究員 (諸井研)	H26/4/1	採用	韓国ニュートリノ研究センターリサーチフェロー
上西 慧理子	特任研究員 (上田研)	H26/4/1	採用	
Andraus Robayo				
Sergio Andres	特任研究員 (宮下研)	H26/4/1	採用	
フィルソン 和子	学術支援職員 (第二事務分室)	H26/4/1	採用	
道村 唯太	助教 (安東研)	H26/7/1	採用	
芝田 悟朗	助教 (藤森研)	H26/7/1	採用	
Lopez Sepulcre Ana	特任研究員 (山本研)	H26/8/1	採用	フランス国立科学研究センター 技術者
西岡 辰磨	助教 (立川研)	H26/9/1	採用	プリンストン高等研究所 (学振海外特別研究員)
明石 遼介	助教 (常行研)	H26/9/1	採用	理化学研究所 特別研究員
Kathrin Wimmer	講師	H26/10/1	採用	中央ミシガン大学 アシスタントプロフェッサー
Benic Sanjin	特任研究員 (福嶋研)	H26/11/7	採用	ザグレブ大学 リサーチ ティーチングアシスタント
秋山 了太	助教 (長谷川研)	H26/12/1	採用	筑波大学数理物質系助教
玉井 文	学術支援職員 (第二事務分室)	H27/2/1	採用	
北川 健太郎	講師	H27/3/16	採用	高知大学理学部講師
森田 悠介	助教 (五神研)	H27/3/16	採用	

[物理学教室から移られた方々]

大栗 真宗	助教 (須藤研)	H26/5/16	所属変更	附属ビッグバン宇宙国際研究センター
平原 徹	助教 (長谷川研)	H26/5/31	辞職	東京工業大学大学院理工学研究科准教授
竜野 秀行	特任研究員 (早野研)	H26/5/31	任期満了退職	高エネルギー加速器研究機構 協力研究員
岡崎 浩三	助教 (藤森研)	H26/6/30	辞職	物性研究所特任准教授
中村 祥子	特任研究員 (福山研)	H26/7/15	辞職	低温センター特任助教
杉山 尚徳	特任研究員 (吉田研)	H26/10/31	辞職	カブリ数物連携宇宙研究機構特別研究員
菅原 美和	学術支援職員 (第一事務分室)	H26/12/31	辞職	
Mohakudo Sasmita	特任研究員 (宮下研)	H27/1/15	辞職	IIT
平井 大悟郎	特任研究員 (高木研)	H27/1/31	辞職	物性研究所助教
和田 由美子	学術支援職員 (第二事務分室)	H27/1/31	辞職	
牧島 一夫	教授	H27/3/31	定年退職	
坂井 南美	助教 (山本研)	H27/3/31	辞職	理化学研究所 准主任研究員
竹内 一将	助教 (佐野研)	H27/3/31	辞職	東京工業大学大学院理工学研究科准教授
辻 直人	特任助教 (青木研)	H27/3/31	辞職	理化学研究所 研究員
石上 啓介	特任研究員 (藤森研)	H27/3/31	辞職	
喜多 清	特任研究員 (樋口研)	H27/3/31	辞職	
菊島 健児	特任研究員 (樋口研)	H27/3/31	辞職	
只野 央将	特任研究員 (常行研)	H27/3/31	辞職	工学系研究科物理工学専攻 特任研究員
戸部 美香	物理教務	H27/3/31	配置換え	教育・学生支援部 専門職員
内村 奈緒美	物理図書	H27/3/31	配置換え	東洋文化研究所・図書チーム係長
横山 和子	事務補佐員 (就職資料室)	H27/3/31	任期満了退職	
千葉 三代治	試作室	H27/3/31	任期満了退職	

4 役務分担

役務	担当教員	技術職員・事務職員
専攻長・学科長	佐野	熊崎、戸部、田寄
幹事	須藤、上田、宮下	
専攻主任	藤森	
専攻副主任	蓑輪	
常置委員	高木、諸井	
優先配置	村尾	
教務	小形、長谷川（大学院）、松尾、中澤、濱口	（含4ターム制担当）
学生実験	長谷川、浅井、岡本、山本	佐伯、八幡
就職	櫻井	横山
奨学金	青木	
博士課程学生支援制度	濱口	
部屋割	駒宮	熊崎、朝倉
安全衛生	岡本	八幡
放射線	浅井	
管理技術室	福山（統括、試作室）	大塚、柏葉
（技術室会議メンバー）	長谷川（学生実験）	佐伯、八幡
	岡本（安全衛生・低温）、	八幡
	吉田（IT関連）、藤堂	南野
図書	宮下、松尾、中澤、酒井	内村
コロキウム	須藤、樋口、青木、櫻井	小林、田寄
年次報告	安東、山野	横山、八幡
記録係	立川、福嶋、藤堂、（桂）、（高木研講師）	
物品供用官	早野	
事務分室	第一：山本、第二：大塚	
理交会	諸井	熊崎
親睦会	福嶋	
進学指導	専攻長、駒宮、上田、能瀬、（桂）	物理教務
進振委員	酒井	
ホームページ、IT	吉田、藤堂、早野	南野
オープンキャンパス	高木	
リーディング大学院	五神、高木、吉田、横山、（常行）	物理事務、物理教務
アーカイブ室	専攻長、宮下、牧島	
駒場対策	吉田、村尾、小形（教務）	
	進学指導委員（専攻長、駒宮、上田、能瀬、（長谷川））	

5 教室談話会

- 2014年4月7日(月) 17:00–18:30
近藤 猛氏 (東京大学物性研究所)
角度分解光電子分光で解き明かす酸化物高温超伝導体における2種類のエネルギーギャップ
- 2014年4月22日(火) 16:30–18:30
宇宙マイクロ波背景輻射温度ゆらぎのBモード偏光検出の意味
横山 順一氏 (ビッグバン宇宙国際研究センター)
「CMB 偏光による原始重力波の発見と宇宙論」
羽澄 昌史氏 (高エネルギー加速器研究機構)
「CMB 偏光観測の最前線– 実験家の視点から」
佐藤 勝彦氏 (自然科学研究機構)
「インフレーション理論– 観測的実証への期待」
- 2014年10月7日(火) 16:30–18:30
Prof. Franz X. Kärtner
(Center for Free-Electron Laser Science, DESY,
and University of Hamburg, and Massachusetts Institute of Technology)
An Orchestra of Light: Sub-Cycle Optical Waveform Synthesis and Controlled Electron Emission
- 2014年10月24日(金) 16:30–18:00
今井 申明氏 (東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター)
中性子過剰な不安定核の内部を見る
- 2014年10月30日(木) 16:30–18:00
Prof. Stefan Ballmer (Syracuse University)
The Dawn of Gravitational-Wave Astronomy
- 2014年11月14日(金) 16:30–18:00
Dr. Kathrin Wimmer (Lecturer, Department of Physics, University of Tokyo)
Tracking the Evolution of the Nuclear Shell Structure
- 2014年12月18日(木) 16:30–18:00
上村 想太郎氏 (生物科学専攻)
細胞の定義化に向けた1分子光計測

5. 教室談話会

- 2015年1月13日(火) 16:30–18:00
岡田 真人氏 (新領域創成科学研究科)
視覚認知へのデータ駆動的アプローチ
- 2015年1月19日(月) 17:30–19:00
村川 智氏 (東京大学 低温センター)
トポロジカル超流動 ～超流動 $^3\text{He-B}$ 相のマヨラナ表面状態
- 2015年1月23日(金) 16:30–18:00 Sir Martin Wood Prize Lecture
林 将光氏 (独立行政法人物質・材料研究機構 主任研究員)
磁性ナノ構造における有効磁界計測とスピントルクによる 磁化ダイナミクスの研究
- 2015年3月10日(火) 16:30–18:00
牧島 一夫教授 (最終講義)
宇宙で見る物理、物理で見る宇宙

6 物理学教室コロキウム

- 2014年4月18日(金) 16:30-18:00
Prof. Z.-X. Shen (Stanford University)
High-Temperature Superconductivity: Insights from Einstein's Electrons
- 2014年5月9日(金) 16:30-18:00
金子 邦彦氏 (総合文化研究科)
普遍生物学: 生きていることの動的状態論
- 2014年6月13日(金) 16:30-18:00
桂 法称氏 (物理学専攻)
量子多体系の基底状態、ギャップ、励起状態
- 2014年6月20日(金) 16:30-18:00
藤堂 眞治氏 (物理学専攻)
サイコロを振って科学する
- 2014年7月4日(金) 16:30-18:00
吉田 滋氏 (千葉大学)
高エネルギーニュートリノ天文学の幕開け
- 2014年10月17日(金) 16:30-18:00
大橋 隆哉氏 (首都大学東京)
ASTRO-H衛星で拓く宇宙X線観測の最前線
- 2014年10月31日(金) 16:30-18:00
William J. Munro氏 (NTT 物性科学基礎研究所)
Secrets in the development of the quantum computer
- 2014年11月7日(金) 16:30-18:00
難波 啓一氏 (大阪大学)
生体超分子モーターの構造と動作メカニズム
- 2014年11月28日(金) 16:30-18:00
飯嶋 徹氏 (名古屋大学)
エキゾチックなハドロンを探す

- 2015年2月13日(金) 16:30-18:00
森井 政宏氏 (ハーバード大学)
ダークマターの探索：直接検出と LHC 実験

7 金曜ランチトーク

- 2014年4月4日 牧島一夫
「巨大な銀河たちも、低きに流れていた」
- 2014年4月11日 小形正男
「ディラック、ビスマス、マックスウェル+久保」
- 2014年4月25日 能瀬聡直
「Untangling neural nets」
- 2014年5月2日 長谷川修司
「韓流 自己流 スピン流」
- 2014年5月9日 相原博昭
「Precision measurement of the weak decays of the 3rd generation lepton at B factory」
- 2014年5月23日 濱口幸一
「Higgs 発見後の Supersymmetry (と muon g-2)」
- 2014年6月6日 宮下精二
「Phase transitions in non-equilibrium quantum systems」
- 2014年6月20日 村尾美緒
「量子計算機を用いて物理をしらべる」
- 2014年9月5日 中澤知洋
「打ち上げ迫る宇宙 X 線衛星 ASTRO-H」
- 2014年9月12日 五神真
「フォトンサイエンス@五神研の展開」
- 2014年9月26日 駒宮幸男
「ILC 以外の話題 -超冷中性子の重力場中での量子化の測定-」
- 2014年10月3日 諸井健夫
「Symmetry in Physical Laws — Parity and Charge Conjugation —」
- 2014年10月17日 櫻井博儀
「Life and Magic of Nuclei」

- 2014年10月31日 高山あかり
「High-Resolution Spin-Resolved Photoemission Spectrometer and the Rashba Effect in Bismuth Thin Films」
- 2014年11月14日 辻直人
「Anderson pseudospin resonance and Higgs mode in superconductors」
- 2015年1月9日 竹内一将
「KPZ Universality Class - the "Ising class" for non-equilibrium systems?」
- 2015年1月16日 大栗真宗
「"Way too bright" supernova」
- 2015年1月30日 芝田悟朗
「Magnetic anisotropy in thin films」
- 2015年2月13日 川野輝彦
「"6-dim SUSY N=(2,0) theory, 5-dim SUSY Yang-Mills Theory, and 2-dim q-deformed Yang Mills Theory"」
- 2015年2月20日 峰本紳一郎
「Challenge to the direct observation of ultrafast nuclear wavepacket dynamics of molecules with SACLA XFEL pulses」
- 2015年3月20日 松永隆佑
「Higgs amplitude mode in superconductors revealed by terahertz spectroscopy」
- 2015年3月27日 横山順一
「Gravitational Waves and Cosmology」

2014年度 年次研究報告

2015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 佐 野 雅 己

編 集 立 川 裕 二、八 幡 和 志
