

Department of Physics
School of Science
The University of Tokyo

Annual Report

2 0 1 1

平成23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

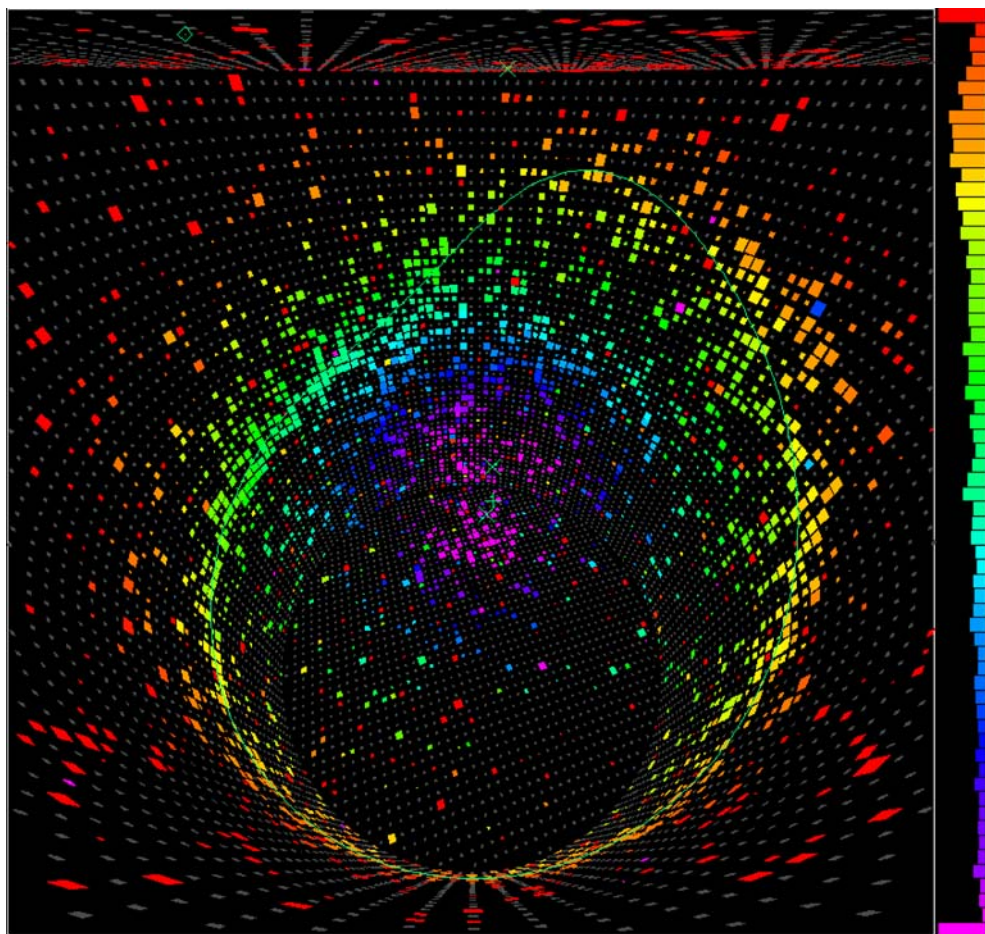


図 1: T2K 長基線ニュートリノ振動実験では、茨城県東海村の J-PARC 加速器から、295 km 離れた岐阜県飛騨市のスーパーカミオカンデ (SK) 検出器に向けてニュートリノビームをうち込み、ニュートリノの性質を研究している。図は、SK 検出器内部でニュートリノが反応した際に生成された粒子が純水中でリング状に放ったチェレンコフ光を、内壁一面に取り付けた 1 万本以上の 20 インチ光電子増倍管でとらえた様子を図示したもの。T2K 実験によって世界で初めて存在の兆候が得られた、ミューオン型のニュートリノが電子型のニュートリノに変化する新しいタイプの「ニュートリノ振動」の証拠となる反応事象の候補。四角のひとつひとつは光電子増倍管の位置を示し、四角の大きさは検出された光の量を、色はそれぞれの光電子増倍管に信号が検出された時間を表す。(相原研、横山研) / Candidate of an electron-type neutrino interaction observed by the T2K collaboration, indicating a new type of *neutrino oscillation*. In the T2K long baseline neutrino experiment, muon-type neutrinos are produced using a high energy proton beam at the J-PARC accelerator and detected by the Super-Kamiokande water Cherenkov detector 295 km away. The Cherenkov light from a particle produced by a neutrino interaction in water is detected by more than 10,000 photomultiplier tubes installed on the inner wall of the detector. The size and color of a box corresponds to the amount and timing of the light, respectively, detected by a photomultiplier tube. (Aihara lab., Yokoyama lab.)

序

平成 23 年度（2011 年 4 月-2012 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、櫻井博儀教授（原子核実験：理化学研究所より）、高木英典教授（物性実験：新領域創成科学研究科より）、角田直文助教（原子核理論：採用）、中山和則助教（素粒子理論：採用）、また新しい制度としてリサーチ・アドミニストレータとして山野真裕博士が着任されました。また、初田哲夫教授（理化学研究所：主任研究員）、佐々木勝一助教（東北大学理学研究科：准教授）、齊藤圭司助教（慶應義塾大学理工学部：准教授）、高坂洋史助教（新領域創成科学研究科：配置換）が転出されました。

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。小林孝嘉名誉教授がフンボルト賞、第 64 回日本化学会賞を受賞されました。平野哲文兼任准教授が第 1 回 Zimanyi Nuclear Theory Medal を受賞、また宮下精二教授が フランス ベルサイユ大学の名誉博士号 “Docteur Honoris Causa” を授与、大塚孝治教授が GENCO 賞を受賞されました。

若い方々では、吉岡孝高氏（五神研助教）、竹内一将氏（佐野研助教）、渡邊紳一氏（元島野研助教/現在は慶應義塾大学物理学科准教授）、榎戸輝揚氏（元牧島研/現在は日本学術振興会海外特別研究員スタンフォード大学）、石徹白晃治氏（元坪野研/現在は高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所）が日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。川口由紀さん（上田研助教）が井上リサーチアワードを受賞、松永隆佑氏（島野研助教）、竹内一将氏（佐野研助教）、山本直紀氏（元初田研/現在は Institute for Nuclear Theory, University of Washington）が井上研究奨励賞を受賞されました。橋本直君（早野研 D1）が J-PARC ハドロン実験ユーザー会 最優秀修士論文 受賞、山口洋平君（駒宮研 D1）が高エネルギー物理学研究者会議 第 1 回測定器開発・優秀修士論文賞 受賞、中島正道君（内田研 D3）が European Materials Research Society (EMRS), Best Oral Award 受賞、河内太一君（初田研 D2）がヨーロッパ物理学会金賞（原子核物理学に関するエリーチェ夏の学校での最優秀講演）受賞、宮崎彬君（浅井研 D1）が NEW TALENT AWARD for an original presentation in Experimental Physics & Isidor Rabi DIPLOMA 及び First Place outstanding student paper, 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves を受賞されました。また、渡辺優君（上田研）、野村昂亮君（大塚研）が平成 23 年度理学系研究科研究奨励賞（博士課程）を、櫻井壮希君（中澤・牧島研）、早田智也君（初田研）、渡辺悠樹君（青木研）が同（修士課程）を受賞しました。教室では若手のサポートの増強に努めています。平成 20 年度に開始された博士課程研究遂行協力制度およびグローバル COE プログラム「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」、2010 年 3 月から始まった研究者海外派遣基金助成金（組織的な若手研究者等海外派遣プログラム）「物理学における国際的に自立した研究者育成プログラム」によって修士課程生を含む大学院生の海外派遣が行われ、また今年度からはリーディング大学院「Advanced Leading Graduate Course for Photon Science (ALPS)」として博士コース一貫教育で広く社会へのキャリアパスをめざした制度も始まりました。

平成 23 年度は、東日本大震災、とくに福島の問題で、サイエンスの立場とは何かが問われる機会になりました。物理学教室でも原子核関連の早野龍五先生、大塚孝治先生など、地道でかつ理学の立場からの情報発信をされ、しっかりとした信頼を確立されつつあります。今後はこれまで以上に社会に対し、基礎研究のおもしろさや重要性をアピールして行きたいと思っています。教室をとりまく情勢は、厳しさを増しております。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、高木英典教授、谷口耕治講師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。

2012 年 5 月 1 日
物理学専攻専攻長・教室主任
宮下精二

目次

I	研究室別 2011 年度 研究活動報告	9
1	原子核・素粒子理論	11
1.1	原子核理論（大塚・初田）研究室	11
1.2	素粒子論研究室（諸井・柳田・松尾・浜口）	28
1.2.1	現象論	28
1.2.2	弦理論	30
2	原子核・素粒子実験	35
2.1	原子核実験グループ【早野・櫻井】	35
2.1.1	反物質の研究（早野研究室）	35
2.1.2	CERN の ISOLDE における不安定フランシウム同位体のレーザー分光（早野研究室）	36
2.1.3	K 中間子原子の精密分光（早野研究室）	36
2.1.4	反 K 中間子原子核の研究（早野研究室）	37
2.1.5	深く束縛された π 中間子原子の精密分光（早野研究室）	38
2.1.6	η' 原子核の研究（早野研究室）	38
2.1.7	ミュオニウム生成標的の研究（早野研究室）	39
2.1.8	崩壊分光法による核構造研究（櫻井研究室）	39
2.1.9	インベーム γ 核分光法による核構造研究（櫻井研究室）	39
2.1.10	欠損質量法による核構造研究（櫻井研究室）	40
2.2	駒宮研究室	45
2.2.1	電子・陽電子リニアコライダー ILC 計画	45
2.2.2	UCN 実験	46
2.2.3	LHC での物理解析	47
2.2.4	BES 実験	48
2.3	蓑輪 研究室	51
2.3.1	PANDA – 原子炉ニュートリノモニター	51
2.3.2	Sumico, アクシオンヘリオスコープ実験	52
2.3.3	Hidden photon 探索実験について	52
2.3.4	安価な食物放射能測定器の開発	53
2.4	相原・横山研究室	56
2.4.1	Belle 実験	56
2.4.2	Belle II 実験	56
2.4.3	HSC ダークエネルギー研究	57
2.4.4	T2K 長基線ニュートリノ振動実験	58
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計画	59
2.4.6	次世代水チェレンコフ検出器のためのハイブリッド光検出器開発	60
2.4.7	短基線ニュートリノ振動探索	61
2.5	浅井研究室	65
2.5.1	LHC・ATLAS 実験での研究	65
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	67

3	物性理論	76
3.1	青木研究室	76
3.1.1	超伝導	76
3.1.2	磁性、スピン・ホール効果	77
3.1.3	トポロジカル系	77
3.1.4	非平衡・非線形現象	79
3.1.5	その他	79
3.2	宮下研究室	83
3.2.1	相転移協力現象の研究	83
3.2.2	量子統計力学の研究	85
3.3	小形研究室	89
3.3.1	高温超伝導の理論	89
3.3.2	鉄砒素系超伝導体に関する理論	89
3.3.3	有機導体に関する理論	90
3.3.4	超伝導体の理論	91
3.3.5	ディラック電子系	91
3.3.6	重い電子系および近藤効果	93
3.4	常行研究室	97
3.4.1	シミュレーション手法の開発	97
3.4.2	第一原理電子状態計算の応用	98
4	物性実験	103
4.1	藤森研究室	103
4.1.1	高温超伝導	103
4.1.2	強相関界面・スピントロニクス	104
4.2	内田研究室	110
4.2.1	2011 年度の研究その 1	110
4.2.2	高温超伝導体の擬ギャップ相	110
4.2.3	鉄化合物高温超伝導体の出現	112
4.2.4	T_c は上がるか?	113
4.3	長谷川研究室	117
4.3.1	表面電子輸送	117
4.3.2	表面ナノ構造	118
4.3.3	新しい装置・手法の開発	119
4.4	福山研究室	123
4.4.1	グラファイト上 2 次元 ^3He の量子相図	123
4.4.2	低密度 2 次元固体 ^4He の実現	124
4.4.3	極低温 LEED の設計	125
4.4.4	グラフェンへのバンドギャップ誘起	125
4.4.5	超伝導ナノ粒子の STM/S 観測	127
4.5	岡本 研究室	129
4.5.1	劈開表面に形成された 2 次元電子系	129
4.5.2	金属超薄膜の超伝導	130
4.5.3	強相関 2 次元電子系	130
4.6	島野研究室	133
4.6.1	半導体高密度電子正孔系	133
4.6.2	有機導体	134
4.6.3	超伝導体の超高速光・テラヘルツ波制御	134
4.7	高木研究室	137
4.7.1	超伝導機構の解明と開拓	137

4.7.2	スピン軌道相互作用誘起の新奇電子相の開拓	137
4.7.3	幾何学的フラストレーション格子上的電荷液体	138
4.7.4	巨大電子エントロピーの設計と熱電変換技術への応用	138
5	一般物理理論	142
5.1	宇宙理論研究室 (須藤)	142
5.1.1	観測的宇宙論	142
5.1.2	系外惑星	144
5.2	村尾研究室	148
5.2.1	エンタングルメント理論	148
5.2.2	分散型量子情報処理	149
5.2.3	量子計算アルゴリズム	150
5.2.4	量子測定	150
5.2.5	量子力学基礎論	151
5.2.6	強い非局所相関を記述する確率モデル (一般確率論)	151
5.3	上田研究室	154
5.3.1	冷却原子気体	154
5.3.2	量子論および統計力学と情報理論の融合	155
5.3.3	量子測定の誤差における不確定性関係の情報論的解析	155
6	一般物理実験	159
6.1	牧島研究室 + 中澤研究室	159
6.1.1	科学衛星の運用と稼働状況 [123]	159
6.1.2	質量降着するブラックホール [49]	159
6.1.3	中性子星とその磁場 [50, 42]	160
6.1.4	銀河系および銀河団の研究	161
6.1.5	ASTRO-H 衛星計画	163
6.2	高瀬研究室	172
6.2.1	TST-2 実験	172
6.2.2	共同研究	174
6.3	坪野研究室	179
6.3.1	大型レーザー干渉計重力波検出器 KAGRA の建設	179
6.3.2	宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO	180
6.3.3	ねじれ振り子型重力波検出器, TOBA	181
6.3.4	低温光共振器を用いた超高安定レーザー光源の開発	181
6.3.5	非古典光を用いたレーザー干渉計の高感度化	182
6.3.6	極小距離領域における重力法則の検証	182
6.3.7	空間等方性の研究	182
6.4	佐野・原田研究室	186
6.4.1	巨視的非平衡系の物理	186
6.4.2	小さな非平衡系の物理	189
6.4.3	生命現象の物理	190
6.5	山本研究室	195
6.5.1	はじめに	195
6.5.2	星形成の観測研究	195
6.5.3	系外銀河の化学組成	198
6.5.4	テラヘルツ帯観測技術の開拓	198
6.6	酒井広文 研究室	201
6.6.1	レーザー光を用いた分子配向制御技術の進展	201

6.6.2	電子・イオン多重同時計測運動量画像分光装置の開発	202
6.6.3	搬送波包絡位相を制御したフェムト秒パルスを用いた原子分子中からの高次高調波発生	203
6.6.4	配列した分子中から発生する第3高調波の偏光特性	203
6.6.5	その他	205
6.7	五神研究室	207
6.7.1	光励起された物質系の巨視的量子現象の探索	207
6.7.2	非自明な光学現象の探索とその応用	208
6.7.3	新規コヒーレント光源開発と新しい分光手法開拓	209
7	生物物理	214
7.1	能瀬研究室	214
7.1.1	運動パターン生成の基盤となる神経細胞及び遺伝子の同定と機能解析	214
7.1.2	神経回路の活動ダイナミクス	216
7.1.3	回路構造と神経機能の発生機構	217
7.2	樋口研究室	220
7.2.1	高輝度 QD 集合体の作製と精製	220
7.2.2	筋フィラメント内ミオシン分子のステップ計測	220
7.2.3	Hetero 頭部ダイニンの歩行メカニズム	220
7.2.4	組換えヒト細胞質ダイニンの力・変位測定	221
7.2.5	非侵襲 in vivo がん細胞・白血球のイメージング	221
7.2.6	マウス骨格筋構造の in vivo イメージングの開発	222
8	技術部門	225
8.1	実験装置試作室 (大塚、柏葉、南城、阿部)	225
8.2	安全衛生 (佐伯)	225
8.3	IT 関連業務 (南野)	225
8.4	学生実験 (八幡、佐伯、南野)	226
8.5	各種委員会	226
II	Summary of group activities in 2011	227
1	Theoretical Nuclear Physics Group	229
2	Theoretical Particle and High Energy Physics Group	230
3	Hayano Group	232
4	Sakurai Group	235
5	Komamiya group	235
6	Minowa-Group	236
7	Aihara/Yokoyama Group	237
8	Asai group	238
9	Aoki Group	239
10	Miyashita Group	240
10.1	Cooperative Phenomena and Phase Transition	240
10.2	Quantum Statistical Mechanics	241
11	Ogata Group	243
12	Tsuneyuki Group	244
13	Fujimori Group	244
14	Uchida Group	245
15	Hasegawa Group	246
16	Fukuyama Group	247
17	Okamoto Group	249
18	Shimano Group	249

19	Takagi Group	250
20	Theoretical Astrophysics Group	251
21	Murao Group	253
22	Ueda Group	254
	22.1 Quantum States of Ultracold Atoms	255
	22.2 Quantum Information, Quantum Measurement, and Information thermodynamics	256
23	Makishima Group & Nakazawa Group	256
24	Takase Group	257
25	Tsubono Group	258
26	Sano Harada Group	259
27	Yamamoto Group	261
28	Sakai (Hirofumi) Group	262
29	Gonokami Group	263
30	Nose Group	264
31	Higuchi Group	265

III 2011 年度 物理学教室全般に関する報告

269

9	学部講義概要	271
1	2 年生 冬学期	271
	1.1 電磁気学 I : 駒宮幸男	271
	1.2 解析力学・量子力学 I : 常行 真司、上田正仁	271
	1.3 物理実験学 : 藤森 淳, 酒井 広文	272
	1.4 物理数学 I : 小形正男	272
	1.5 物理数学 II : 浜口幸一	273
2	3 年生 夏学期	273
	2.1 電磁気学 II : 高瀬 雄一	273
	2.2 量子力学 II : 初田 哲男	273
	2.3 現代実験物理学 I : (前半) 江尻 晶 (後半) 福山 寛	274
	2.4 流体力学 : 佐野 雅己	274
	2.5 統計力学 I : 宮下 精二	275
3	3 年生 冬学期	275
	3.1 物理数学 III : 松尾 泰	275
	3.2 量子力学 III : 大塚 孝治	275
	3.3 固体物理学 I : 島野 亮	276
	3.4 現代実験物理学 II : 早野龍五, 横山 将志	276
	3.5 電磁気学 III : 蓑輪 眞	277
	3.6 生物物理学 : 樋口秀男、能瀬聡直	277
	3.7 統計力学 II : 青木 秀夫	277
4	4 年生 夏学期	278
	4.1 場の量子論 I : 諸井 健夫	278
	4.2 サブアトム物理学 : 早野龍五	278
	4.3 宇宙物理学 : 須藤 靖	278
	4.4 プラズマ物理学 : 牧島 一夫	279
	4.5 固体物理学 I : 内田 慎一	279
	4.6 量子光学 : 五神 真	279
5	4 年生 冬学期	279
	5.1 現代物理学入門 : 村尾 美緒、溝川貴司	279
	5.2 素粒子物理学 : 浅井祥仁	280
	5.3 生物物理学特論 : 樋口 秀男 北尾彰朗 野口博司	280

5.4	固体物理学 II : 岡本 徹	280
5.5	原子核物理学 : 櫻井博儀	281
5.6	物性物理学特論 (大学院「表面物理学」共通) : 長谷川修司, 小森文夫、	281
5.7	電子回路論 : 坪野 公夫	281
5.8	化学物理学 : 山本 智	282
10	各賞受賞者紹介	283
1	小林孝嘉 名誉教授 : フンボルト賞 (Humboldt Research Award)	283
2	小林孝嘉 名誉教授 : 第 64 回日本化学会賞	283
3	大塚孝治教授 : GENCO 会員賞	283
4	宮下精二教授 : フランスベルサイユ大学名誉博士号 Docteur Honoris Causa	284
5	初田哲男教授 : 第 17 回 日本物理学会論文賞	284
6	平野哲文客員准教授 : 第 1 回 Zimanyi Nuclear Theory Medal : 日本表面科学会第 15 回学会賞	284
7	川口由紀 助教 (上田研) : 第 4 回井上リサーチアワード	284
8	松永隆佑 助教 (島野研) : 第 28 回井上研究奨励賞	285
9	竹内一将 助教 (佐野研) : 第 28 回井上研究奨励賞	285
10	吉岡孝高 助教 (五神研) : 第 6 回日本物理学会若手奨励賞	285
11	竹内一将 助教 (佐野研) : 第 6 回日本物理学会若手奨励賞	286
12	渡邊紳一氏 (元島野研) : 第 6 回日本物理学会若手奨励賞	286
13	榎戸輝揚氏 (元牧島・中澤研) : 第 6 回日本物理学会若手奨励賞	286
14	石徹白晃治氏 (元坪野研) : 第 6 回日本物理学会若手奨励賞	286
15	山本直希氏 (元初田研) : 第 28 回 井上研究奨励賞	287
16	河内太一氏 (初田研) : ヨーロッパ物理学会金賞 (原子核物理学に関するエリーチェ夏の学校での最優秀講演賞) (博士)	287
17	中島正道氏 (内田研) European Materials Research Society (EMRS), Best Oral Award) (博士)	287
18	宮崎彬氏 (浅井研) NEW TALENT AWARD for an original presentation in Experimental Physics & Isidor Rabi DIPLOMA (博士)	287
19	宮崎彬氏 (浅井研) First Place outstanding student paper, 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (博士)	288
20	渡辺優氏 (上田研) : 平成 23 年度 理学系研究科研究奨励賞 (博士)	288
21	山口洋平氏 (駒宮研) : 高エネルギー物理学研究者会議 第 1 回測定器開発・優秀修士論文賞 (博士)	288
22	橋本直氏 (早野研) : J-PARC ハドロン実験ユーザー会 最優秀修士論文賞 (博士)	289
23	野村昴亮氏 (大塚研) : 平成 23 年度 理学系研究科研究奨励賞 (博士)	289
24	櫻井壮希氏 (中澤・牧島研) : 平成 23 年度 理学系研究科研究奨励賞 (修士)	289
25	早田智也氏 (初田研) : 平成 23 年度 理学系研究科研究奨励賞 (修士)	290
26	渡辺悠樹氏 (青木研) : 平成 23 年度 理学系研究科研究奨励賞 (修士)	290
11	人事異動	291
12	役務分担	292
13	教室談話会	294
14	物理学教室コロキウム	295
15	金曜ランチトーク	296

I

研究室別 2011 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・初田）研究室

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が、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不安定核とは、陽子数と中性子数がアンバランスなものである。そのため様々な特異な量子的な性質を示すことが分かってきた。未知の性質や現象に満ち溢れたフロンティアでもある。その例として、魔法数があげられる。原子の場合と同じように原子核でも（陽子或は中性子の数としての）魔法数があり、構造上決定的な役割を果たす。魔法数は1949年のメイヤー・イェンゼンの論文以来、安定核では2, 8, 20, 50, 82, 126 という決まった数であった。しかし、不安定核の殻構造（一粒子軌道エネルギーのパターン）は陽子や中性子の数によって変わり（殻進化と言う）、不安定核での魔法数は安定核のそれとは異なることが最近判明しつつある。その原因は核力のスピン・アイソスピン依存性、特にテンソル力のそれによるものが大きい、ということも2005年頃から分かってきた。これは我々の研究室から発信された予言であり、その影響する範囲の広さとインパクトの大きさから世界の原子核研究に明確な指針を与えてきた。それを受けて、2010年1月にPhys. Rev. Lett.に掲載された論文は特に重要な2%に入る論文としてViewpoint 紹介論文に選ばれた。この研究成果は今後の核構造論研究の方向性を左右し、進める原動力となり、世界各地でそれに関する実験が多く行われている。[5, 10, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48]

核子の間には2体力だけでなく、3体力も働く。テンソル力に加えて、3体力が不安定核の殻構造、魔法数、ドリップライン（存在限界）に特徴的な効果を及ぼすことをやはり我々のグループが見つけた。藤田・宮沢3体力は50年前からその存在が知られている。バリオンの一つであるデルタ粒子に核子が転換されるプロセスに起因するものである。この3体力が多体系に及ぼす効果はほとんど研究されて来なかった。我々は、その力の効果の中に、強いモノポール斥力があることを発見した。その定量的な評価は伝統的な π 中間子-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「再発見」されており、極めて複雑な核力の理解を高める研究活動を始めている。[38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48]

不安定核に関しては、束縛されてはいないが、低い励起エネルギーを持ち、束縛状態と強く結合している核子の状態の理論的扱いの研究を進め、不安定な中性子過剰酸素同位体などに応用している。特に、上述の殻構造の変化が、正エネルギーの連続状態で起こるとどのようになるか、従来のものとは異なる「連続状態に結合した殻模型 (Continuum-Coupled Shell Model)」を提唱し、又、ガモフ殻模型なども用いて研究している。重イオン反応による、多核子移行反応により放出される中性子のエネルギー分布などから議論を進めている。[44]

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、最近では中性子数が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、通常の間では二重殻原子核のはずの ^{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。[38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48] 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。[6, 8]

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。

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、その論文が出版された。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ますます明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。今年度は、回転運動において、フェルミオン多体系とボソン多体系の間で系を回転させた時の応答が異なることに注目し、エネルギーに関してはこの応答を摂動1次で等しくする項を導入することを提案した。それはいわゆるLL項と呼ばれるものであり、これによりきれいな回転バンドを見せる強く変形した原子核に対しても相互作用するボソン模型を導出できることが初めて示された。[12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]

核子多体系おしおの反応や、時間とともに自発的に変化する状態を扱うために時間依存ハートリーフォック法を展開、発展させる研究を行なっている。最近、エネルギーの高い反応での荷電平衡化の抑制現象を一般的な観点から理論的に見つけたが、その論文が出版された。また、ウランと鉛というような巨大な原子核おしおの反応を計算してあらたな現象を探索している。

さらに、ボースアインシュタイン凝縮や量子カオスなどの量子多体問題も独自の観点から研究している。原子核の回転運動に対する独自の視点からの研究成果も発表した。[7]

核力の有効相互作用におけるテンソル力

テンソル力が核構造に与える影響は、不安定核において特に重要になることが知られている。本研究では、核力の有効相互作用において、テンソル力の成分が元の核力とほとんど変わらない事を定量的に

示した。本研究は昨年度から続くものであり、今年度は、この内容を論文にまとめたものが、Physical Review Cに掲載された。[10, 26]

非縮退模型空間における有効相互作用の導出

重イオンビームを代表とする新しい実験技術の開発に伴い、多くの中性子過剰核の性質を、実験的に観測することが可能となった。そして、理論的には、そのような未知の原子核に対して、現状の現象論的な方法が適用出来なくなる事例が数多く指摘されている。この局面では、出来るだけ本来の核力の基本的な性質に立脚した不安定核の理解が有効と考えられる方法である。本研究では、価核子間の有効相互作用を用いた配位混合の理論に基づいた不安定核の理解を目指し、核力から出発した有効相互作用の構築に取り組んだ。通常の多体摂動論では、非摂動のハミルトニアンが縮退しているか、ほとんど縮退した空間を模型空間としない限り、ダイアグラム展開が発散して破綻する。しかし、中性子過剰核の性質を探索するためには、二つ以上の殻を模型空間とすべき場合があることが、現象論的な研究から明らかにされてきた。本研究では、既存の多体摂動論を拡張し、非摂動のハミルトニアンが縮退していない場合でも、有効相互作用を求められる方法を開発した。今年度は、拡張された多体摂動論を用いて、実際に有効相互作用を構築し、その計算結果の数値的信頼性を検討し、結果が信頼出来るものであることを確認した。[27, 28, 29, 30, 52]

Accurate Solutions to the Schrödinger Equation for Nuclear Structure Physics

The goal of the proposed research is to efficiently compute accurate energy eigenvalues. I planned to develop the formalism to compute accurate wave functions for the purposes of theoretical nuclear structure physics. Many methods, like Full CI, do not necessarily take advantage of the inherent smoothness of the problem. If the wave function is simultaneously m -times differentiable with respect to every variable, then the convergence for the algorithm, the Smolyak algorithm, is $n^{-m/D}(\log n)^{m(D-1)/(D+1)}$. Mathematicians have proved that this is the most efficient possible method up to a logarithmic factor and is our motivation for implementing it. We believe this approach will expedite nuclear shell model computations.

The Smolyak algorithm is a grid based approach and as such it is easiest to implement for first quantized problems. However, most methods employed in theoretical nuclear structure physics generally need to be formulated in second quantization. I have been working towards generalising the approach to make it appropriate for second quantized computations while minimizing the sacrifice to the effi-

ciency of the method. To generalise the approach one can use an effective polynomial degree arising from the basis functions. This is accomplished by choosing orthogonal basis functions with an appropriate number of nodes (this effectively dictates the degree). In nuclear shell model calculations the basis functions are generally exact functions that come as solutions to eigenvalue problems where the operator is Hermitian (for example the Harmonic Oscillator basis). The exact solutions to eigenvalue problems involving Hermitian operators provide a complete set of orthogonal functions. When the solutions are exact the number of nodes of each solution is known a priori. We use these nodes as a way to find the effective polynomial degree.

So now instead of placing points using a grid that arise from choosing a polynomial degree, we keep the states that have the appropriate effective degree. Just like Gaussian quadrature gives the most efficient way to integrate polynomials with a grid, this approach, in principle, should give the most efficient states to keep in a variational procedure possible provided the basis functions are well chosen.

I have used this approach on small model systems such as Helium-4 and deuterium. We were able to compute these with the NuShell software package. I computed the energies at different basis sizes using different total angular momentum values. Unfortunately, this software is limiting in terms of the size of the basis set that can be used. As such, I am currently writing a computer code so I can increase the size of the basis sets we are employing and try more sophisticated systems. We also want to include extrapolation techniques to obtain the full configuration interaction value. We intend to publish this work in the next few months and present it at an upcoming conference in Japan in October. [31, 32, 33, 50, 63, 64, 66]

Size Consistency in the RDM Method

The reduced-density matrix method (known as the RDM method) is a method that uses the second-order reduced density matrix as an alternative to the wave function. All the information contained in the wave function is contained in the second order reduced density matrix. Unfortunately, the necessary and sufficient conditions to guarantee that the reduced density matrix will come from a wave function. However, practical necessary conditions (in this case, conditions that can be held in a semidefinite programming problem) have been used that, for electronic structure, give on the order of coupled cluster singles and doubles with perturbative triples (CCSD(T)).

Recently, it has come to attention in the litera-

ture that the necessary conditions that these necessary conditions are not size consistent. Size consistent within electronic structure is when a collection of nuclei (say an atom from a given molecule) are moved far from another collection of nuclei so that the two collections are not interacting. For a method to be size-consistent the energy of the two collections when computed in isolation or together in a supermolecule should be the same.

We have proposed a sufficient condition that will guarantee size consistency in the RDM method. This sufficient condition is not only programmable, but it can be directly implemented within standard RDM codes. This is the first time that a sufficient condition that can be programmed for size consistency has been introduced into the literature. Unfortunately, running calculations that will include this sufficient condition will be computationally costly. As such it will have limited practical utility. Nonetheless, if one has enough calculation time then we can guarantee size consistency. In April 2012 we submitted this work to Journal of Chemical Physics.

Ehrenfest Hessian

Describing the properties of an atom within a molecule gives insight into the behaviour of the molecule and how each atom influences that overall behaviour. Methods have been developed to describe the properties of atoms within molecules using the electron density and the derivatives of the first order reduced density matrix.

Recently, the divergence of the stress-tensor has been used to show properties. Unfortunately, this is not an observable quantity. But the divergence of the divergence of the stress tensor is an observable quantity; we refer to this as the Ehrenfest Hessian.

To compute the Ehrenfest Hessian requires fourth derivatives of the first order reduced density matrix. Moreover, numerical ill-conditioning might be a problem since approximate functions are used that are converged to ensure that second derivatives are accurate. As such analytical derivatives are preferred. I have written a Fortran code and worked with my collaborators to implement it into an open source atoms in molecules code known as AIMPAC2. I then went on to write subroutines that computed the Ehrenfest Hessian and integrated it with my collaborators into AIMPAC2. We will begin exploring chemical properties using the Ehrenfest Hessian in the near future.

中性子 EDM の評価

時間反転対称性が基本的相互作用においてどの程度破れているのかを研究し、その破れの機構を考察することは現代物理学において最重要項目の一つである。K 中間子や B 中間子において発見された CP 対称性の破れと CPT 定理から、時間反転対称性の破れは間接的に示唆されているが、直接的な発見は未だされていない。中性子や原子の永久電気双極子モーメント (EDM) 探索はその時間反転対称性の破れを直接測ることができる貴重な手段のひとつである。中間子の CP 非保存は小林、益川によって CP 非保存位相を通じて現象論的に説明されているが、この小林益川模型と EDM の関係性を注意深く考察することは重要なテーマである。中性子に EDM を生じさせるファインマンダイアグラムにおいてバーテックス補正の計算を行う際に W ボソンの伝播関数が重要であることに注意して、新たに評価された伝播関数を使って計算を行なった。中性子 EDM を求めるためのこのバーテックス補正の値はゼロになり、核子の EDM は小林益川模型の CP 非保存位相による計算だと厳密にゼロになることがわかった。CP 非保存以外の起源も視野に入れて中性子 EDM を注意深く考察することが重要である。[53]

太陽ニュートリノの地熱への寄与

地球内部の熱生成は直接観測することが困難なため、そのメカニズムに関しては未だ不明な点が多い。ウラン系列、トリウム系列の放射性元素の崩壊熱が地熱に重要な寄与をすると考えられてきたが、これまでの議論は定性的なものにおさまっていた。しかし 2011 年に KamLAND グループが地球内部のウラン・トリウム各系列の崩壊に伴う反電子ニュートリノ（地球ニュートリノ）の観測結果を発表し、地熱全体の半分程度がこの崩壊熱によるものであることがはっきりしてきた。残り半分の熱は地球誕生時に発生した熱の残りだと考えられているが、議論を定量的に進めていくためにも、他の熱源の可能性を探ることは重要だと思われる。そこで太陽から地球に降り注がれる大量のニュートリノ（太陽ニュートリノ）が地球内部の電子・原子核と反応することで生じる地球内部熱の計算を行なった。ニュートリノ-電子反応では散乱電子のエネルギーが、ニュートリノ-核子反応では反応ニュートリノのエネルギーが熱量に変換される量を、実験的に分かっている太陽ニュートリノフラックスをもとにして計算した。その結果、太陽ニュートリノにより生成される熱量は放射性元素の崩壊熱に比べて 8-10 桁ほど小さく、地熱への寄与はこの程度の大きさであることが定量的に分かった。[54]

相互作用するボソン模型

有限量子多体系である原子核は、表面変形の 4 重極集団運動において特徴的な振動・回転励起モードを示す。特に、強く楕円体変形した原子核の回転ス

ペクトルには、核力の複雑さからは想像もつかないほどの美しい秩序と規則性が現れる。例えば原子核の回転運動は、物理現象に普遍的に見られる対称性回復の機構の一例でもあり、その微視的な記述は核構造研究において最も難しく、且つ興味深いテーマの一つでもある。核子のペアをボソンの自由度と見なして集団運動のダイナミクスを記述する「相互作用するボソン模型」(IBM) は、現象論的に大きな成功を収めてきた。一方で、核子系のダイナミクスをそもそも何故ボソンで記述できるのか? という基本的な疑問は「IBM の微視的基礎づけの問題」として古くから知られ、原子核理論分野に於ける長年の謎であった。この謎に関する以下の研究を、原子核の密度汎関数理論 (DFT) に基づいて行った。また、これらの成果の一部を博士論文 [24] としてまとめた。

回転核のボソン写像

原子核が十分に強く変形した場合、IBM の計算が回転バンドの慣性率の実験値を数 10% 過小評価することがある。この問題の起源の一つとして、変形した核子系の内部固有状態（原子核とともに回転する座標系）の波動関数が、微小回転に対する応答の仕方に関してボソンの波動関数と大きく異なる点を指摘した。そこで、回転の操作に関してボソン系が DFT（核子）系と同様の応答をするように、回転の運動エネルギーに相当する項をボソン・ハミルトニアンに導入することを提案し、強く変形した原子核のいくつかについて回転スペクトルを現象論的補正無しに再現した [12, 51, 34, 35, 67, 68]。それによって、IBM が変形核にも適応可能であることを微視的観点から初めて示した。

ところで、回転運動の微視的記述における、IBM の正当性に関する懐疑的な批評が A. ボーアと B.R. モッテルソンにより 1980 年になされた。この批評に対する重要な知見を提供できた意味でも、本研究成果の意義は大きい。

中重核の形状相転移

原子核の 4 重極集団運動は核構造の基本的な性質であり、核子数の増減による基底状態の形状の変化（いわゆる形状相転移）は、ある種の量子相転移としても知られている。原子核の形状相転移は有限効果を反映した緩やかな遷移であり、無限系の量子相転移とは異なった興味深い様相を呈する。不安定核ではこの傾向はさらに顕著になると考えられる。

ゼロレンジの Skyrme 型、あるいは有限レンジの Gogny 型エネルギー密度汎関数 (EDF) から出発して、中重核の形状相転移を微視的に記述する研究が近年精力的に行われている。ところが、励起エネルギーや電磁氣的遷移強度などの観測量を EDF から直接的に計算するのは一般に難しい。そこで、EDF から相互作用するボソン模型 (IBM) のハミルトニアンを決める方法が筆者らにより提唱・発展されてきた。本研究ではこの方法を応用して、白金、オス

ミウム、タングステン等のガンマ不安定な（非軸対称変形した）原子核の励起状態を系統的に調べ、その有効性を示した。核子間有効相互作用には、最もポピュラーな EDF のひとつである Gogny-D1S と、より新しい D1M 相互作用を用いた。特に、中性子過剰な白金同位体におけるプロレート変形（扁長な回転楕円体）からオブレート変形（扁平な回転楕円体）への形状相転移に関わる励起状態の物理量を計算し、実験事実を矛盾なく説明した [13, 15, 51, 67, 68]。

これとは独立に、相対論的平均場模型から出発して集団運動ハミルトニアンと IBM ハミルトニアンを導き、両者から得られる励起状態の性質を、白金同位体において比較した。帰結として、基底バンドは両者が同程度の精度で実験のスペクトルを再現できる一方、ガンマバンドの詳細な記述に対しては IBM ハミルトニアンに 3 体力などの高次の効果が重要な役割を担う事を示唆した [14]。

また、ドイツ・ケルン大学の実験グループが研究対象としている原子核の解析に関して、理論計算を担当し共同研究を行った。中性子過剰なクリプトン同位体において、中性子数の変化に伴う形状相転移が緩やかに起こるとする新しい実験データに理論的に説明をあたえ、その様子を再現した。相互作用は Gogny-D1M を用いた。これは従来の実験データとは異なる知見であり、また研究対象とした質量領域が重元素合成プロセスとも関連するため、新たなガンマ線分光実験や原子核質量の測定実験を始め将来多くの研究の可能性が開かれることが期待される。理論面において、量子相転移の存在領域を定量的に決めることにもつながる [16]。

それとは別に、希土類領域の原子核の一次相転移に関して Skyrme 型 EDF を用いた同様の計算を行い、現象論的な IBM 計算と比べた。後者では、経験的に示唆されるような球形から軸対称変形への相転移がきれいに現れる一方、微視的相互作用に基づいた前者の計算ではより連続的に形状遷移が起きる様子を考察した。現象論計算との相違が生まれる原因として、DFT 固有の問題を指摘し、ある種の射影法や DFT 相互作用自体の改善の必要性を示唆した [18]。Yale 大学の J. Kotila 博士との共同研究に基づく。

非軸対称変形の新しい理論

原子核変形の多くは軸対称（プロレートまたはオブレート）だが、非軸対称変形した原子核も数多く存在する。ものの形を決めることは量子多体系共通の問題であり、非軸対称変形した原子核の構造も興味深い研究対象の一つとなっている。非軸対称変形は従来、ある特定の形をとるものであるという、rigid-triaxial rotor (Davydov-Filippov) 模型と、様々な形状のコヒーレントな重ね合わせであるという、 γ 不安定な (Wilets-Jean) 模型の二つの幾何学的模型によって理解されてきた。ところが、実験で観測されるほぼ全ての非軸対称変形核はそのいずれでもなく、丁度両者の中間であることが知られている。この問題を DFT の微視的相互作用に基づいた IBM の観点で考察し、経験的に知られた事実を説明した。非軸対称

変形の記述において、IBM ハミルトニアンにボゾンの三体力が必要であることが明らかになった。さらに、この結果は DFT の相互作用の詳細（対相関相互作用の種類、相対論的・非相対論的など）にはよらず普遍的であることも示された [17, 35, 36, 55, 56, 68]。

モンテカルロ殻模型による中重核構造の研究

不安定核の性質を記述するためには広い模型空間を用いる必要がある。しかし、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。そこで、モンテカルロ殻模型を用いることにより、従来よりも広い pf_{9d_5} 模型空間での計算を行った。殻模型計算では、それぞれの模型空間に適した有効相互作用を作ることが重要となる。 pf_{9d_5} 模型空間における既存の有効相互作用は精度が十分ではないため、計算結果に基づいて有効相互作用の改良を行った。これにより、Cr, Ni 同位体の実験結果を中性子過剰領域までよく再現することができ、まだ実験の行われていない原子核の性質を予言した。[25, 37, 57, 58, 59]

<受賞>

- [1] 大塚孝治: GENCO 会員賞 (2012 年)
- [2] J. S. M. Anderson, Scholarship for Young Researchers (ISTCP-VII Conference at Waseda University), June 2011
- [3] 野村昂亮: 理学系研究科研究奨励賞 (2012 年 3 月, 東京大学大学院理学系研究科)
- [4] 野村昂亮: Springer Outstanding Thesis Prize (2012 年 3 月, Springer)

<報文>

(原著論文)

- [5] A. Gade, D. Bazin, B. A. Brown, C. M. Campbell, J. M. Cook, S. Ettenauer, T. Glasmacher, K. W. Kemper, S. McDaniel, A. Obertelli, T. Otsuka, A. Ratkiewicz, J. R. Terry, Y. Utsuno, and D. Weisshaar, "In-beam γ -ray spectroscopy of ^{35}Mg and ^{33}Na ", Phys. Rev. C **83**, 044305 (2011).
- [6] T. Suzuki, M. Honma, H. Mao, T. Otsuka, and T. Kajino, "Evaluation of electron capture reaction rates in Ni isotopes in stellar environments", Phys. Rev. C **83**, 044619 (2011).
- [7] N. Tajima and T. Otsuka, "Meaning of antiparallel proton and neutron angular momenta at low spins", Phys. Rev. C **84**, 064316 (2011).
- [8] T. Suzuki, T. Yoshida, T. Kajino, and T. Otsuka, " β decays of isotones with neutron magic number of $N = 126$ and r-process nucleosynthesis", Phys. Rev. C **85**, 015802 (2012).
- [9] T. Adachi, Y. Fujita, A. D. Bacher, G. P. A. Berg, T. Black, D. De Frenne, C. C. Foster, H. Fujita, K. Fujita, K. Hatanaka, M. Honma,

- E. Jacobs, J. Jänecke, K. Kanzaki, K. Katori, K. Nakanishi, A. Negret, T. Otsuka, L. Popescu, D. A. Roberts, Y. Sakemi, Y. Shimbara, Y. Shimizu, E. J. Stephenson, Y. Tameshige, A. Tamii, M. Uchida, H. Ueno, T. Yamanaka, M. Yosoi, and K. O. Zell, “High-resolution study of Gamow-Teller transitions via the $^{54}\text{Fe}(^3\text{He},t)^{54}\text{Co}$ reaction”, *Phys. Rev. C* **85**, 024308 (2012).
- [10] N. Tsunoda, T. Otsuka, K. Tsukiyama and M. H. Jensen, “Renormalization persistency of the tensor force in nuclei”, *Phys. Rev. C*, **84**, 044322 (2011)
- [11] J. S. M. Anderson, P. W. Ayers “Relativistic Quantum Theory of Atoms in Molecules: Results for the SR-ZORA Hamiltonian”; *J. Phys. Chem. A* **2011**, 115, 13001-13006 (invited issue in honour of Richard F. W. Bader Festschrift).
- [12] K. Nomura, T. Otsuka, N. Shimizu, and L. Guo, “Microscopic formulation of the interacting boson model for rotational nuclei”, *Phys. Rev. C* **83**, 041302(R) (2011).
- [13] K. Nomura, T. Otsuka, R. Rodríguez-Guzmán, L. M. Robledo, P. Sarriguren, P. D. Regan, P. D. Stevenson, and Zs. Podolyák “Spectroscopic calculations of low-lying structure in exotic Os and W isotopes”, *Phys. Rev. C* **83**, 054303 (2011).
- [14] K. Nomura, T. Nikšić, T. Otsuka, N. Shimizu, and D. Vretenar, “Quadrupole collective dynamics from energy density functionals: Collective Hamiltonian and the interacting boson model”, *Phys. Rev. C* **84**, 014302 (2011).
- [15] K. Nomura, T. Otsuka, R. Rodríguez-Guzmán, L. M. Robledo, and P. Sarriguren, “Collective structural evolution in neutron-rich Yb, Hf, W, Os and Pt isotopes”, *Phys. Rev. C* **84**, 054316 (2011).
- [16] M. Albers, N. Warr, K. Nomura, A. Blazhev, J. Jolie, D. Mühler, B. Bastin, C. Bauer, C. Bernards, L. Bettermann, V. Bildstein, J. Butterworth, M. Cappellazzo, J. Cederkäll, D. Cline, I. Darby, S. Das Gupta, J. M. Daugas, T. Davinson, H. De Witte, J. Diriken, D. Filipescu, E. Fiori, C. Fransen, L. P. Gaffney, G. Georgiev, R. Gernhäuser, M. Hackstein, H. Hess, D. Jenkins, J. Konki, M. Kowalczyk, T. Kröll, R. Lutter, N. Marginean, C. Mihai, K. Moschner, P. Napiorkowski, B. S. Nara Singh, K. Nowak, T. Otsuka, J. Pakarinen, M. Pfeiffer, D. Radeck, P. Reiter, S. Rigby, L. M. Robledo, R. Rodríguez-Guzmán, M. Rudigier, P. Sarriguren, M. Scheck, M. Seidlitz, B. Siebeck, G. Simpson, P. Thoele, T. Thomas, J. Van de Walle, P. Van Duppen, M. Vermeulen, D. Voulot, R. Wadsworth, F. Wenander, K. Wimmer, K. O. Zell, and M. Zielinska, “Evidence for a smooth onset of deformation in the neutron-rich Kr isotopes”, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 062701 (2012).
- [17] K. Nomura, N. Shimizu, D. Vretenar, T. Nikšić, and T. Otsuka, “Robust Regularity in γ -Soft Nuclei and its Microscopic Realization”, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 132501 (2012).
- [18] J. Kotila, K. Nomura, L. Guo, N. Shimizu, and T. Otsuka, “Shape phase transitions in the interacting boson model: Phenomenological versus microscopic descriptions” *Phys. Rev. C* in press.
- (会議抄録)
- [19] N. Shimizu, Y. Utsuno, T. Mizusaki, T. Otsuka, T. Abe, and M. Honma, “Extrapolation method in the Monte Carlo Shell Model and its applications”, *AIP Conf. Proc.* 1355, 138 (2011).
- [20] Y. Utsuno, T. Otsuka, B. A. Brown, M. Honma, and T. Mizusaki, “Structure of unstable nuclei around $N = 28$ described by a shell model with the monopole-based universal interaction”, *AIP Conf. Proc.* 1355, 161 (2011).
- [21] T. Abe, P. Maris, T. Otsuka, N. Shimizu, Y. Utsuno, and J. P. Vary, “Benchmark calculation of no-core Monte Carlo shell model in light nuclei”, *AIP Conf. Proc.* 1355, 173 (2011).
- [22] K. Nomura, “Interacting Boson Model from Mean-Field Theory: Application to Triaxial Nuclei”, to appear in Proceedings of XIV. International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics (CGS14) World Scientific (Singapore) に掲載決定
- [23] M. Albers, N. Warr, N. Marginean, D. Muecher, A. Blazhev, J. Jolie, P. Reiter, P. van Duppen, D. Jenkins, R. Wadsworth, T. Kroell, M. Scheck, G. Georgiev, G. Simpson, J. Pakarinen, J. van de Walle, M. Zielinska, K. Nomura, T. Otsuka, Mini-ball IS485 Collaboration, “Evolution of nuclear deformation in the neutron-rich Kr isotopes”, Proceedings of XIV. International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics (CGS14), World Scientific (Singapore) に掲載決定
- (学位論文)
- [24] K. Nomura, “Interacting boson model from energy density functionals”, Ph.D. thesis (Mar. 2012, University of Tokyo). To appear in Springer Thesis Physics.
- [25] 角田佑介, “Study of medium-mass nuclei by large-scale shell model calculations”, 修士論文
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [26] N. Tsunoda, Advances in Radioactive Isotope Science - ARIS 2011, “Tensor force in effective interaction of nuclear force”, Poster presentation, Leuven, Belgium, 1st June, 2011,

- [27] N. Tsunoda, Three-Nucleon Forces in Vacuum and in the Medium, “Effective interaction for the shell model in non-degenerate model space”, Oral presentation, ECT*, Trento, Italy 15th July, 2011
- [28] N. Tsunoda, Frontier Issues in Physics of Exotic Nuclei (YKIS 2011), “Microscopic derivation of the effective interaction for the shell model in more than one major shell”, Oral presentation, Kyoto University, Kyoto, Japan, 14th Oct., 2011
- [29] N. Tsunoda, International Workshop on Theoretical Approaches to Correlations in Nuclei at the Limits of Stability, “A new microscopic method to derive the effective interaction for the shell model in more than one major shell”, Oral presentation, Tan Tao University, Ho-chiming, Vietnam, 20th Nov., 2011
- [30] N. Tsunoda, International Symposium on Physics of Unstable Nuclei (ISPUN 2011), “A new microscopic method to derive the effective interaction for the shell model in more than one major shell”, Oral presentation, Hanoi, Vietnam, 27th Nov., 2011
- [31] J. S. M. Anderson, “Novel Basis-Set Free Approaches to Solving the Electronic-Schrödinger Equation”, June 2011, 2nd International Symposium on Molecular Dynamics and Reactivity.
- [32] J. S. M. Anderson, “Novel Basis-Set Free Approaches to Solving the Electronic Schrödinger Equation: Mechanics of the Approach” presented at CSC Montreal, June 2011
- [33] J. S. M. Anderson, “Novel Basis-Set Free Approaches to Solving the Electronic Schrödinger Equation” presented at ISTCP-VII Tokyo, September 2011.
- [34] K. Nomura: “Microscopic formulation of IBM for rotational nuclei”(口頭発表、査読なし), International Symposium: Advances in Nuclear Many-Body Theory, プリモシュテン, クロアチア, 2011 年 6 月 7-10 日
- [35] K. Nomura: “Interacting Boson Model from Mean-Field Theory”(口頭発表、査読あり), XIV. International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics (CGS14), ゲルフ大学, オンタリオ州, カナダ, 2011 年 8 月 29 日-9 月 2 日
- [36] K. Nomura: “Proton-neutron IBM from microscopic theory”(口頭発表、査読なし), 6th International Workshop on Shape-Phase Transitions and Critical-Point Phenomena in Nuclei, ダルムシュタット工科大学, ダルムシュタット, ドイツ, 2012 年 2 月 27-29 日
- [37] Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, M. Honma, Y. Utsuno, “Study of medium-mass nuclei by large-scale shell model calculations”, Workshop “Nuclear forces and neutron-rich matter”, Kyoto University, Kyoto, Japan, March, 2012.
- [38] T. Otsuka, “Neutron-rich Exotic Nuclei and Nuclear Forces”, 3rd ANPhA Symposium, Lanzhou, 蘭州、中國、April 30, 2011
- [39] T. Otsuka, “Single-particle states and the tensor force”, ECT* workshop “Recent Development in Transfer and Knockout Reactions”, Trento, Italy, May 10 (9-13), 2011
- [40] T. Otsuka, “Exotic nuclei and new features of nuclear forces”, Nordic Conference on Nuclear Physics, Stockholm, Sweden, June 14 (13-17), 2011
- [41] T. Otsuka, “Nuclear forces and spectroscopy”, EGAN11 Padova, Italy, June 27 (27-30), 2011
- [42] T. Otsuka, “Problems and Ideas at the Dawn of Three-Body Force Effects in the Shell Model”, ECT* workshop “Three-Nucleon Forces in Vacuum and in the medium”, Trento, Italy, July 11 (11-15), 2011
- [43] T. Otsuka, “Novelty of Structure of Exotic nuclei and Nuclear Forces”, Rutherford Centennial Conference on Nuclear Physics, Manchester, United Kingdom, August 9 (8-12), 2011
- [44] T. Otsuka, “Structural evolution of exotic nuclei driven by nuclear forces”, Frontier Issues in Physics of Exotic Nuclei (YKIS2011), Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, October 11 (11-15), 2011
- [45] T. Otsuka, “Nuclear Forces, Exotic nuclei and Stellar Evolution”, 11th Int. Symp. on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, Wako, Japan, November 14 (14-17), 2011
- [46] T. Otsuka, “Structure of exotic nuclei and nuclear forces”, International Symposium on Physics of Unstable Nuclei (ISPUN11), Ha Noi, Vietnam, November 24 (23-28), 2011
- [47] T. Otsuka, “Evolution of structure in Exotic Nuclei and Nuclear Forces”, 1st International Symposium on the Science with KoRIA, Korea University Sejong Campus, December 2 (1-2), 2011
- [48] T. Otsuka, “60 years of nuclear shell model — paradigm, achievement and future —”, NUSTAR Annual Meeting 2012, GENCO Fest talk, GSI, Darmstadt, Germany, March 1 (Feb 27-March 2), 2012
- [49] T. Otsuka, “Can IBM work for deformed rotational nuclei? — Settlement of the debate with Bohr and Mottelson 30 years ago? —”, 6th Int. Workshop on Shape-Phase Transitions and Critical-Point Phenomena in Nuclei, Darmstadt, Feb 27 (27-29), 2012
- [50] J. S. M. Anderson, “Numerical Integration Using a Novel Sparse Grid” presented at MPD Workshop Paris, November 2011 (invitation only).
- [51] K. Nomura: “Shape transitions of exotic nuclei”, CNS-RIKEN Joint International Symposium on Frontier of gamma-ray spectroscopy (Gamma11), 理化学研究所, 埼玉県和光市, 2011 年 6 月 30 日-7 月 2 日

招待講演

（国内会議）

一般講演

- [52] 角田直文, HPCI 戦略プログラム分野 5 研究会「大規模計算による原子核研究の展開」, 非縮退模型空間における核力に基いた有効相互作用の導出, 口頭発表, 理化学研究所, 和光, 2012 年 1 月 24 日
- [53] 大島佐知子, 藤田丈久, 「中性子 EDM の評価」, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 弘前大学, 2011 年 9 月 17 日
- [54] 大島佐知子, 藤田丈久, 吉見彰洋, 「太陽ニュートリノの地熱への寄与」, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 24 日
- [55] 野村昂亮: “Structure of A~190 nuclei with triaxial shape”, 日本物理学会秋季大会, 弘前大学, 弘前市, 2011 年 9 月 16-19 日
- [56] 野村昂亮: “Proton-neutron mixed symmetry in axially deformed nuclei”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 西宮市, 2012 年 3 月 24-27 日
- [57] 角田佑介, 本間道雄, 清水則孝, 宇都野穰, 大塚孝治, 「大規模殻模型計算による Cr, Ni 偶偶核の研究」, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 弘前大学文京町キャンパス, 2011 年 9 月
- [58] 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中重核の研究」, HPCI 戦略プログラム分野 5 研究会「大規模計算による原子核研究の展開ー核子多体系を中心にー」, 理化学研究所, 2012 年 1 月
- [59] 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中重核の研究」, HPCI 戦略プログラム分野 5 「物質と宇宙の起源と構造」全体シンポジウム, 秋葉原コンベンションホール, 2012 年 3 月

招待講演

- [60] 大塚孝治, 「物理学者の取り組み 原子核物理学研究者による福島地方における環境放射線計測活動」, 日本物理学会シンポジウム「物理学者から見た原子力利用とエネルギー問題」, 立教大学, 2011 年 6 月 10 日
- [61] 大塚孝治, 「先端大型殻模型計算による ^{79}Se のベータ崩壊半減期」, 2011 年度核データ研究会, 2011 年 11 月 17 日 (16-17 日), 原研テクノ交流館リコッティ, 東海
- [62] 大塚孝治, 「福島土壌放射線プロジェクトと核物理学研究者の対応」, 日本物理学会年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 25 日

（セミナー）

- [63] J. S. M. Anderson, “Grid Approaches for Solving the Electronic Schrödinger Equation”, Invited Talk, Chemistry Department, Hunan Normal University, Changsha, Hunan, China, April 2011
- [64] J. S. M. Anderson, “Novel Basis-Set Free Approaches to Solving the Electronic-Schrödinger Equation”, Prof. Wenjian Liu Group, Peking University, November 2011.

- [65] J. S. M. Anderson, “ZORA Formulation of the Quantum Theory of Atoms in Molecules”, Invited Talk, Physics Department, Hunan Normal University, Changsha, Hunan, China, December 2011.
- [66] J. S. M. Anderson, “Novel Basis-Set Free Approaches to Solving the Electronic-Schrödinger Equation”, Prof. Takehisa Fujita Group, Nihon University, January 2012.
- [67] K. Nomura: “Microscopic formulation of the interacting boson model and the low-lying structure in neutron-rich nuclei”, ザグレブ大学, ザグレブ, クロアチア, 2011 年 4 月 14 日
- [68] K. Nomura: “Interacting boson model from mean-field theory”, Grand Accélérateur National d’Ion Lourds (GANIL), カーン, フランス, 2011 年 12 月 13 日

（その他）

- [69] J. S. M. Anderson, “How To Do Research” presented at Hunan Normal University, Changsha, Hunan, China, April 2011.
- [70] J. S. M. Anderson, “Why Study Science” presented at Ishikawa Prefectural Nanao High School, Japan Dialogue Program, Nanao, Ishikawa, Japan, January 2012.

量子ハドロン物理

研究室およびその活動の概要。

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強い束縛状態で、量子色力学（QCD）がその多様な構造や相互作用を支配している。QCD はその本質的な非線形性と強い量子効果のために、そのハミルトニアンからは予想もできないような様々な現象を示す。我々の研究室では、ハドロンやハドロン間相互作用のクォーク・グルーオン構造、QCD の真空構造と高温高密度における相転移などを、QCD の量子多体問題という観点から理論的に研究している。その手法は、場の量子論による解析的アプローチと、格子上で定義された QCD の数値シミュレーションによる第一原理的アプローチである。

我々の研究対象は、ハドロンの励起状態スペクトルの構造、新しいハドロン状態としてのマルチクォーク状態の解明、クォーク閉じ込め現象の数理、核力をはじめとするハドロン間相互作用、原子核中でのカイラル対称性、宇宙初期の高温プラズマの熱力学的性質やその動的構造、中性子星やクォーク星内部の高密度クォーク物質におけるカラー超伝導現象、相対論的重イオン衝突実験から得られるクォーク・グルーオン・プラズマ物性、冷却原子フェルミ気体やボース気体の物性、グラフェンなどの強結合電子系、など多岐にわたり、実験や観測と密接に関係した研究を展開している。

格子 QCD に基づくバリオン間相互作用

フレーバー SU(3) 対称性が厳密に成り立つ場合に、クォーク質量を変えつつクォーク真空偏極の入った格子 QCD 数値シミュレーションを実行し、(uuddss) なる 6 クォーク状態 (H ダイバリオン) の性質を調べた。フレーバー 1 重項では、バリオン間に短距離で“引力”芯が現れることにより、軽いクォーク質量でも束縛状態が存在することを明らかにした [6]。また、格子 QCD からバリオン間ポテンシャルを求める場合の非局所性の大きさ [7]、非弾性散乱問題への拡張 [8] についての理論的考察を行った。

高温 QCD 物質の重いクォーク領域での相構造

クォーク質量の関数としての QCD の相図は、重いクォーク領域では一次相転移を示し、クォーク質量の減少とともに 2 次相転移を経てクロスオーバーに移行すると考えられている。格子 QCD 計算を用い、プラケット変数の関数として有効ポテンシャルを求める手法でこの一次相転移からクロスオーバーへの変化をあらわに示した [9]。

格子 QCD 数値解析によるハイペロン β 崩壊とフレーバー SU(3) の破れの研究

ハイペロン β 崩壊は現象論的に「カビボ-小林-益川 (CKM) 行列のユニタリティの問題」や「陽子スピン問題」と関連して重要であるにも関わらず、ハイペロン β 崩壊におけるフレーバー SU(3) の破れの構造が理論的不定性なく理解されているとは言い難い。本研究ではその破れの構造を明らかにするために、これまでのクォークの動的効果を完全に無視したクエンチ近似計算を越えて、より現実的なフレーバー SU(3) の破れを厳密に取り入れた 2+1 フレーバーの動的格子 QCD 計算を行なった。すでに研究代表者らによって核子の構造についてその研究が完了している、RBC+UKQCD collaborations により国内外の研究者に対して無償公開されているドメインウォールフェルミオン形式による 2+1 フレーバー QCD ゲージ配位 (格子間隔 0.11 fm で物理的格子サイズ 約 3 fm に相当) 上での数値解析を行なった。当該年度は、CKM 行列要素のユニタリティの検証に関係して、ハイペロン β 崩壊のベクトルカレントの形状因子、Dirac 形状因子 $f_1(q^2)$ におけるフレーバー SU(3) の破れの効果に的を絞って研究を行なった。アップ・ダウンクォークに対して 4 種類の質量に対して公開されている QCD ゲージ配位のうち、現実のアップ・ダウンクォーク質量により近い 3 つの質量 (π 中間子質量で 330, 430, 560 MeV 相当) の QCD ゲージ配位上でのシミュレーションが完了した。これまでのクエンチ近似格子 QCD 計算と同様に、フレーバー SU(3) 対称性の破れの増大によってベクトル結合 $f_1(0)$ の大きさが SU(3) 対称性が厳密に成り立つ場合に比べ、相対的に減少していることが明らかとなった。この傾向は重いバリオンを含んだ拡張

されたカイラル摂動論やラージ N_c 極限による解析とは逆の傾向を示している。現実的な格子 QCD 計算による「模型に依らない理論的評価」は、カイラル摂動論やラージ N_c 極限による解析の正当性に疑問を呈することとなった [19, 34]。

格子 QCD 数値解析による閾値近傍のチャーモニウム核子散乱位相の研究

チャーモニウムと核子の弾性散乱の散乱位相を数値的に求めるための新しい方法：空間方向にツイストされた周期境界条件の活用により、閾値近傍における散乱位相の計算に成功した。この閾値近傍での振る舞いから低エネルギーでの相互作用を記述する上で普遍的な量となる、散乱長と有効到達距離を求めることが可能となった。QCD 第一原理計算によって、チャーモニウム-核子間の S 波散乱長は 0.3 fm 程度、有効到達距離は 1.5 fm 程度であることが明らかとなった。これらの値から Brodsky らによってその存在が予測されてきた比較的軽い原子核にチャーモニウムが束縛したエキゾチック原子核の存在の理論的可能性がより強くなったことを指摘した。[58, 65]

格子 QCD を用いたクォーコニウム間相互作用に関する研究

低エネルギー J/ψ - ϕ 散乱を格子 QCD を用いて解析するため、空間的にツイストされた周期境界条件の下での有限体積法を構築した。またツイストされた周期境界条件が格子上に課された時の系の対称性を明らかにした。得られた有限体積法を用いて、まずは動的なクォークの効果を無視したクエンチ近似で J/ψ - ϕ 系の散乱長及び、散乱の位相差を計算した。この時、散乱長は 0.15[fm] 程度となり、 J/ψ - ϕ 間相互作用が弱い引力である事が分かった。また、散乱の位相差は典型的な s-波の振る舞いを示した。次にパイオンの質量が 156 MeV に対応する動的なクォークを考慮したシミュレーションを行った。その結果、散乱長は 0.12[fm] 程度となり、散乱の位相差はやはり s-波の振る舞いを示した。クエンチの結果と大きな違いが見られなかったことは、 J/ψ - ϕ 系においてグルーオン交換が支配的である事を示唆している。また同様の計算を Υ - ϕ 及び Υ - J/ψ 系についても行った。結果として、これらの相互作用も引力となり、その強さは J/ψ - ϕ のそれと比べて 1/2 ほど小さい事が分かった [37, 38, 67, 68, 69]。

格子ゲージ理論による chiral magnetic effect の解析

Chiral magnetic effect とは、強磁場下における局所的な CP 対称性の破れに関係した現象であり、重イオン加速器実験によって検証が試みられている。本研究では、格子ゲージ理論を用いることで、基礎理

論である QCD に基づいた chiral magnetic effect の解析を行った。強磁場下における格子ゲージ理論の数値シミュレーションを行い、chiral magnetic effect が実際に起こりうることを定量的に示した。

Phase structure of the $U(N) \times U(N)$ meson model.

During my stay in Tokyo University I have written one paper, regarding to the phase structure of the $U(N) \times U(N)$ meson model. It has been known for a long time (Pisarski and Wilczek, 1984) that in the system of the $U(N) \times U(N)$ model a first order transition takes place, if $N \geq 2$. This has been verified by Functional Renormalization Group methods (Berges et al., 1997 and Fukushima et. al, 2011), however there is no perturbative treatment which could reproduce the phenomenon of fluctuation induced first order transition.

In my study I realized a certain resummation of the perturbative series through the large- N technique, combining it with an approximation based on the existence of heavy scalar particles. I mapped out a large part of the parameter space and found that, first order transition indeed takes place in the system. However, it turned out that, compared to previous studies, in some cases large- N technique predicts a different symmetry breaking scenario: instead of the $U(N) \times U(N) \rightarrow U(N)$ breaking, I obtained $U(N) \times U(N) \rightarrow U(N-1)$. Properties of the ground state and the finite temperature behavior at $N = 3$ was studied in terms of various strengths of the explicit symmetry breaking and couplings.

格子ゲージ理論を用いたグラフェン上の秩序状態の競合に関する研究

炭素の層状物質であるグラフェン (graphene) 上の電子は、低エネルギーでは無質量ディラック粒子のように振舞うことが知られており、現在では実験・理論双方の分野において多大な注目を集めている。しかし、外部の物質の影響を受けず、真空中の宙吊り状態のグラフェンの電子物性はまだ知られていない事項が多い。真空中では電子が光速に比べて非常に遅く伝播する上に、電子間のクーロン相互作用が遮蔽されないため、量子電磁気学 (QED) に比べて相互作用が実効的に強くなると予想される。このため、真空中のグラフェンでは電子と正孔がペアを組み (エキシトン凝縮)、ギャップを生成して絶縁体として振舞う可能性が指摘されている。このメカニズムは量子色力学 (QCD) などの強結合ゲージ理論におけるカイラル対称性の自発的破れ、およびそれに伴うフェルミオン質量の動的生成に類似していることから、これらの高エネルギー理論の研究手法を活用したグラフェンの研究が期待されている。

本研究では、グラフェンの六角格子構造を由来とする多彩な秩序を取り入れるべく、グラフェンの六角格子構造を保つ $U(1)$ 格子ゲージ理論のモデルを構築した。その上で、強結合展開を行うことによりクーロン相互作用の強結合領域における系の振舞いを考え、異なる秩序間の競合について以下の 2 つの問題を取り扱った。

(i) 自発的に生成される部分格子対称性の破れと、外的に誘起される Kekulé 歪みの競合: 強結合極限においては、六角格子の部分格子対称性 (カイラル対称性に対応) が自発的に破れ、ギャップを生成する可能性がある。一方、格子歪みの一つである Kekulé 歪みは並進対称性を部分的に破るによりギャップを生成するが、吸着原子などによって外的に誘起される可能性が指摘されている。本研究では、これらの自発的秩序および外的秩序の競合現象について、相互作用の強結合領域において格子上の強結合展開の手法を用いて取り扱った。その結果、部分格子対称性の破れは外的 Kekulé 歪みにより抑えられ、Kekulé 歪みが十分大きい場合は相互作用の強さに関係なく部分格子対称性が回復されることを示した。この結果は、高エネルギー物理における「カイラル対称性の回復」の新たなメカニズムを示したものとしても意義を持つ。[14, 22, 23, 24, 43, 44, 71, 72, 94, 95]

(ii) 自発的に生成される部分格子対称性の破れと、自発的に生成される Kekulé 歪みの競合: Kekulé 歪みは (i) のように外的に誘起されう一方、相互作用によって自発的に生成される可能性もあることが、C.-Y. Hou, C. Chamon, C. Mudry 各氏によって指摘されている。本研究では、このような自発的 Kekulé 歪みと自発的部分格子対称性の破れの競合現象を基本理論である $U(1)$ ゲージ理論から導出すべく、格子理論の強結合展開を用いて解析を行った。その結果、強結合極限の近傍では同一サイト間相互作用が支配的となるため、部分格子対称性の破れが誘起される一方、強結合極限から少し離れると隣接サイト間相互作用が支配的となるため、Kekulé 歪みが自発的に生成されるようになることを明らかにした。更に、この Kekulé 歪みの相は歪みの向きによって 2 つの相に分かれることを示した。[15, 45, 95]

格子 QCD 数値解析によるチャーモニウム核子間ポテンシャルの研究

チャーモニウム ($c\bar{c}$)-核子系の特徴は、互いに構成要素として同種フレーバーのクォークを含まないことである。このため、チャーモニウム-核子間相互作用では、非自明な多重グルーオン交換による相互作用が支配的となる。このような、カラー中性粒子間の相互作用は、QED ではファンデルワールス力に対応し、単純には引力的であることが期待できる。さらに、この特異なフレーバー構造のおかげで、チャーモニウム-核子系ではパウリの排他律が働かない。このことから、チャーモニウム-核子間の引力が十分に強ければ、チャーモニウムと原子核の束縛状態が実現する可能性がある。筑波大学の PACS-CS Collaboration によって生成されている 2+1 フレー

バー QCD ゲージ配位 (格子間隔 0.091fm で物理的格子サイズ 3fm) を用いて、動的クォークの効果を含めた格子 QCD 数値計算を進めた。パイオン質量が 290MeV と 410MeV に対応するクォーク質量においてチャーモニウム-核子間ポテンシャルの導出に成功している。さらに、ツイスト境界条件のもとでルシャーの公式をチャーモニウム-核子系に適応し、小さな運動量の領域で散乱位相をよみとることで散乱長 $a_{J/\psi-N} \sim 0.3\text{fm}$ と有効距離 $r_{J/\psi-N} \sim 2\text{fm}$ という結果が得られた。

[59]

格子 QCD を用いた有限クォーク質量におけるクォーク間ポテンシャルの研究

本研究では、核力ポテンシャルの導出で成功した二体ハドロン間の Bethe-Salpeter 振幅からハドロン間ポテンシャルを導出する定式化をクォーク-反クォーク系に応用し、チャーモニウムやボトムニウムなどの重いクォークニウム内で働く相互作用の性質を明らかにすることを目的としている。そこで、PACS-CS Collaboration によりパイオン質量に換算して 156MeV の現実的クォーク質量の領域で生成されている 2+1 フレーバー QCD ゲージ配位を用いて物理点近傍で計算を行った。また、「相対論的重いクォーク作用」とよばれる新しい格子フェルミオンの定式化を重いクォークの計算に用いて、大きいクォーク質量から導かれる離散化誤差を取り除き、チャーモニウムのクォーク質量を再現するようにクォーク質量を決めた。結果としてチャーモニウム間のポテンシャルに導出に成功し、さらにスピン-スピン力を求めることにも成功した。そこでは、有限クォーク質量を考慮することで初めてチャーモニウムのスペクトラム構造を導くのに必要な近距離で引力的なスピン-スピン力が確認された。

[3, 10, 20, 35, 36, 64, 66, 85]

相対論的粘性流体モデルによるクォークグルーオンプラズマの研究

高エネルギー重イオン衝突反応においてはクォークグルーオンプラズマとよばれるハドロンの内部自由度が露になった系が生成されると考えられており、粘性の極めて小さな相対論的流体として振る舞う事が実験との定量的な比較から明らかになっている。そこでまず複数の保存荷電流が存在する系における相対論的な粘性流体方程式をエントロピー生成と相対論的運動学における自己無撞着条件から導出し (1) 因果律と安定性を保つ緩和項、(2) 線形応答理論に対応する一次交差項、(3) 一意的な高次展開に起因する二次項を得た [93]。さらに得られた方程式を用いて空間 1 次元+時間 1 次元の粘性流体モデルを数値的に構築し、相対論的衝突型加速器 (RHIC) や 2010 年後半から始まった最新の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) における原子核衝突反応における衝突軸

方向の時空発展を解析した。衝突直前の原子核はグルーオンが飽和しカラーグラス凝縮 (CGC) の描像によって記述されると考えられているが、これを初期条件として評価を行った結果、(i) 中心から離れた領域へのエントロピー流と (ii) 粘性によるエントロピー生成の効果により、CGC の分布は明らかな変更を受けることが分かった。RHIC と LHC における効果の大きさの違いにより、CGC 単独の理論予測が LHC において中心付近の粒子生成を過小評価するのを、流体効果によって定性的に説明できることを示した [17, 25, 26, 46, 47, 48, 49, 73, 74, 84, 93]。また、LHC の最新の実験結果を受けて、高次の方位角異方性などについて論じた [84]。

有限化学ポテンシャルにおけるアンダーソン・ヒッグス機構

対称性の自発的破れは、素粒子・原子核・物性物理学における基礎概念であり、その重要な帰結のひとつにゼロ質量粒子、南部・ゴールドストーン (NG) ボソンの存在が挙げられる。現在、NG ボソンには、Type-I と Type-II の 2 種類あることが知られている。Type-I の典型例は、QCD 真空中のパイ中間子である。パイ中間子は、線形の分散関係を持ち、NG ボソン数と破れた生成子の数が等しくなっている。一方、Type-II の典型例は、強磁性体中のマグノンである。これは二次の分散関係を持ち、NG ボソン数と破れた生成子の数が一致しないという特徴を持つ。このように、非相対論的であったり、Lorentz 共変性が無い場合に現れる Type-II NG ボソンは、分散関係や自由度の数が通常と異なっている。本研究の目的は、この新奇な Type-II NG ボソンのスペクトルを通じた素粒子・原子核・物性物理学の研究である。そのための第一歩として、本研究では、中性子星中心核で存在する可能性のあるカラー超伝導における NG ボソンのスペクトルと、それに伴うアンダーソン・ヒッグス機構またはマイスナー効果を、クォークのクーパー対とグルーオンのゲージ結合のモデルとなる、有限化学ポテンシャルにおけるゲージ化された複素スカラー場モデルを用いて解析した。その結果、零質量 NG ボソンだけでなく、化学ポテンシャルにより生じた軽い場もゲージ場に吸収されることで、物理的スペクトルが、ゲージ場と重い場のみになり、化学ポテンシャルの効果によって NG ボソンの数と破れた生成子の数にミスマッチがある状況下でも、物理的全自由度が正しく保存した形で Higgs 機構が働くことが分かった。[16, 60, 61, 86, 87, 75]

カラー超伝導に現れる非可換渦の性質の研究

QCD 物質は、中性子星のコアで実現するような低温・高密度の環境においてカラー超伝導状態となっていると考えられている。特に高密度で実現するカラー・フレーバー・ロッキング (CFL) 相と呼ばれる CFL 相では、渦糸が安定な位相欠陥として存在することが、対称性の破れのパターンから結論

できる。QCD の持つカラーやフレーバーの自由度に起因して、CFL 相に残っている対称性は非可換群となり、このような場合に現れる一次元の位相欠陥は非可換渦と呼ばれる。本研究では、この非可換渦の性質を調べた。まず、CFL 相の非可換渦と、CFL 相における準粒子との相互作用ラグランジアンを双対変換と呼ばれる手法により導出した。特に渦の位置の自由度は $U(1)_B$ 対称性の破れに伴う南部・ゴールドストーンボソンと、渦の内部自由度は環境のグルーオンと非自明に相互作用することを明らかにした [18, 40, 88, 89]。

渦上に局在する自由度を表す場は 2 次元複素射影空間 (CP(2)) の元となっている。この非可換渦上に局在する CP(2) モードが、電磁相互作用に関する電荷を持っていることを示し、電磁場との結合を含めた CP(2) 場の有効理論を構築した。CFL 相の超伝導体自身は電磁場に対して中性であることから、CP(2) モードの有効理論は 3 次元空間を伝搬するゲージ場と渦に局在した自由度が結合した理論となる。さらにこの有効理論に基づいて、一本の渦や渦の格子がどのような電磁氣的性質を持つのかを調べた。その結果、渦格子は光に対して偏光板として働くことがわかった [77]。

内部に複数のマヨラナフェルミオンを持つ渦の非可換統計

ある種の超伝導や超流動における量子渦は内部にマヨラナフェルミオンのなゼロエネルギー束縛状態を持つ。このゼロエネルギー状態によって基底状態に縮退が生じ、渦の交換に際して非可換統計が現れることが知られている。この研究では、渦が内部に $SO(N)$ のベクトル表現として変換するような N 個のマヨラナフェルミオンを持つ場合における非可換統計の性質を調べた。まず、マヨラナフェルミオンの演算子によって表現した渦の交換演算子が二つの演算子の積として書けることを示した。そのうち一方の演算子は、各渦にトラップされたフェルミオンが一個の場合の交換演算子と等価であり、もう一方の演算子はコクセター群の生成子の表現となっていることがわかった。さらに、交換演算子を行列表示した場合に、ある基底を取るとその表現行列が、渦上のフェルミオンが一個の場合の交換演算子の表現行列と、コクセター群の生成子の表現行列とのテンソル積で与えられることを示した [42, 76]。

相関がある場合の交換揺らぎの定理

「交換揺らぎの定理」は二つの系の間にやりとりされるエネルギーの確率分布に関する等式である。通常この定理は、初期状態には二つの系に相関がない、という条件のもとで定式化される。この研究では、二つの系の相関がどのようにエネルギーのやりとりに影響するかを調べるため、「交換揺らぎの定理」を相関のある系へと一般化した。得られた等式には、相関を定量化する量として、初期時刻と終時

刻における二つの系の相互情報量の差が入ってくることがわかった [41]。

正準交換関係に基づく QCD 和則の導出と新しい質量公式

量子多体系における和則をゲージ場の量子論を用いて記述される系に拡張することで、量子色力学 (QCD) における和則を導出する新しい枠組みを提案し、QCD の低エネルギーに現れるハドロンによる共鳴現象を、量子多体系において同様の共鳴を説明するコレクティブモードとの類推から解析した。この枠組みは、次の 3 つの事柄に基づくスペクトル関数の和則から成る。

1. 九後-小嶋による BRST 対称性に基づく非可換ゲージ場の正準量子化法
2. Bjorken-Johnson-Low による経路積分を用いた同時刻交換関係の計算法
3. 和則に現れる発散の繰り込み

カレント相関関数の虚部を用いて与えられるスペクトル関数 $\rho(s)$ に重心エネルギー s について重みを付けた積分 (和) を、対称性の破れに関係する真空期待値 (カイラル凝縮 $\langle \bar{q}q \rangle$ やグルーオン凝縮 $\langle \alpha_s G^{\mu\nu} G_{\mu\nu}^a \rangle$) を表すことで、ハドロンの物理と対称性の破れを定量的に結びつける関係式を与えた。本研究では、このスペクトル関数の積分を、非摂動的な真空の下での演算子積展開を用いることなく、カレントとハミルトニアンとの交換関係の真空期待値を用いて与える枠組みを提案した。交換関係を正準交換関係や BJL に基づく方法を用いて計算することで、交換関係を対称性を破る局所演算子の線形結合で書き下し、積分と真空凝縮との関係式を得た。場の量子論的系では、量子多体系における和則をそのまま拡張した表式は発散しているため、繰り込みが必要になる。本研究では、両辺を摂動的に評価して得られる発散を差し引くことで有限の和則を得る方法を提案した。繰り込みにより、スペクトル関数の積分は高エネルギーでの漸近形が引き算され有限になるとともに、低エネルギー部分、QCD においてはメソンやバリオンの共鳴が積分の主要な寄与となる。真空期待値においては、摂動的寄与が取り除かれることで対称性の破れに伴う非摂動的な凝縮だけが残る。この繰り込まれた和則を通じて、低エネルギーのメソンやバリオンの共鳴と QCD の非摂動的真空凝縮とを結びつけることが可能になる。この手法を用いて、Weinberg 和則およびベクトルカレントと軸性ベクトルカレントについての和則の導出を行った。この際、BJL の計算において正準交換関係による計算を再現するものとなしいものが現れることを明らかにした。QCD 和則の計算において、正準交換関係に帰着できる寄与はカイラル凝縮を与えること、帰着できない寄与が非常に重要で、グルーオン凝縮はこの交換関係に現れる異常項を与えていることを示した。

この手法によって、ハドロンのスペクトル構造と QCD の真空構造とを定量的に結ぶ関係式を一般的かつ系統的に与えることができ、特に演算子積展開

と分散関係に基づいて与えられる既存の和則が導出できることを示した。これにより、今まで摂動的な手法を用いてのみ解析されていた QCD 和則に、演算子形式からのより深い基礎付けを与えることができた。さらに、演算子積展開に基づく手法では調べられない重みの和則である半整数べきの重みの和則を考察することで、メソンの質量と真空の揺らぎを結びつける新しい質量公式を与えた。今後、さらに新しい QCD 和則を得ることや、他の強結合系、例えば冷却原子におけるユニタリー極限や、グラフェンといった系へ応用することができると考えている。[1, 27, 28, 31, 50, 78, 96]

相対論的重イオン衝突反応における揺らぎ

高エネルギー重イオン衝突実験の測定量であるハーモニクスにおいて、近年、衝突のイベント毎の揺らぎを示唆する振る舞いが観察され注目を集めている。本研究では、高エネルギー重イオン衝突反応の非平衡的な過程を記述する相対論的流体モデルへの揺らぎの入り方とその測定量へ与える効果について考察した。まず、流体の粘性量などといった散逸に対応して発生する揺動を相対論的に取り扱う方法について考察し方程式を書き下した。また、初期の原子核内の核子分布に由来する流体の初期条件の揺らぎが測定量であるハーモニクスに与える効果を、数値シミュレーションによって調べた。イベント毎の初期状態を記述するモンテカルロ・グラウバーモデルおよびモンテカルロ・KLN 模型から、中間状態である QGP の相対論的完全流体力学、終状態のハドロンガスの運動学、最終的なハーモニクスの解析部分までを含む統合的な数値計算の枠組を構築し、それを利用して幾つかの設定でそれぞれ十万におよびイベント毎の数値解析を行った。結果として、揺らぎがハーモニクスに与える影響が定性的に実験結果と一致する事を確かめ、またハーモニクスの解析手法による違いを示し実験と同じ解析手法を用いる必要がある事を示した [32, 79]。

ジェットからのエネルギー・運動量流入を考慮した相対論的流体モデル

高エネルギー重イオン衝突では相対論的流体力学に従って時空発展するクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 流体と同時に核子内のパートンの散乱によって高エネルギーのパートン (ジェット) も生成される。ジェットは QGP 中を通過する際に QGP との強い相互作用によってエネルギーを損失する (ジェットクエンチング)。その際ジェットからエネルギー・運動量の流入をうけた QGP 流体の時空発展はその影響を受けるはずである。本研究では高エネルギー重イオン衝突実験で生成したジェットと QGP 流体が互いの時空発展に及ぼし合う影響について調べた。そのためにジェットによるエネルギー・運動量の流入の寄与を湧きだし項として含んだ相対論的流体方程式を導き、計算機を用いて数値的に解いた。ジェット

が一樣流体中を通過する場合のシミュレーションにおいては流体中にマッハコーンや渦輪といった構造が確認された。また放射状に膨張する流体中をジェット対が通過する際のシミュレーションではジェットの軸から観て大角度方向では運動量の小さい粒子がジェットが損失した運動量の多くを担っているという結果が得られた。この結果は CMS グループによる LHC での実験結果を定性的に説明するものである。[33, 80]

<受賞>

- [1] 早田智也:平成 23 年度理学系研究科研究奨励賞 (東京大学理学系研究科、2012 年 3 月 22 日)。
- [2] 平野哲文: 第 1 回 Zimanyi Nuclear Theory Medal (2011 年 5 月)。
- [3] Taichi Kawanai, EPS-Gold Medal for the best student presentation at the Erice School on Nuclear Physics "From Quark and Gluons to Hadrons and Nuclei", Erice, Sicily, Italy, Sep 16-24, 2011
- [4] 山本直希: 第 28 回 井上研究奨励賞 (2011 年 12 月)。
- [5] 初田哲男: 第 17 回 日本物理学会論文賞 (2012 年 3 月)。

<報文>

(原著論文)

- [6] T. Inoue, N. Ishii, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki [HAL QCD Collaboration], "Bound H-dibaryon in Flavor SU(3) Limit of Lattice QCD", Phys. Rev. Lett. **106**, 162002 (2011).
- [7] K. Murano, N. Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda, "Nucleon-Nucleon Potential and its Non-locality in Lattice QCD", Prog. Theor. Phys. **125**, 1225 (2011).
- [8] S. Aoki *et al.* [HAL QCD Collaboration], "Extraction of Hadron Interactions above Inelastic Threshold in Lattice QCD", Proc. Japan Acad. B **87**, 509 (2011).
- [9] H. Saito, S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno, T. Umeda [WHOT-QCD Collaboration], "Phase structure of finite temperature QCD in the heavy quark region", Phys. Rev. D **84**, 054502 (2011).
- [10] T. Kawanai and S. Sasaki, "Interquark potential with finite quark mass from lattice QCD", Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 091601.
- [11] A. Yamamoto, "Chiral magnetic effect in lattice QCD with a chiral chemical potential", Phys. Rev. Lett., **107**, 031601 (2011)
- [12] A. Yamamoto, "Lattice study of the chiral magnetic effect in a chirally imbalanced matter", Phys. Rev. D, **84**, 114504 (2011)
- [13] Finite temperature symmetry restoration in the $U_L(3) \times U_R(3)$ linear sigma model from a large- n approximation G. Fejos and A. Patkos arXiv:1201.6119 Accepted for publication in Phys. Rev. D

- [14] Y. Araki, “Chiral symmetry restoration in monolayer graphene induced by Kekulé distortion”, *Phys. Rev. B* **84**, 113402 (2011).
- [15] Y. Araki, “Phase structure of monolayer graphene from effective U(1) gauge theory on honeycomb lattice”, *Phys. Rev. B* **85**, 125436 (2012).
- [16] Y. Hama, T. Hatsuda, and S. Uchino: “Higgs Mechanism with Type-II Nambu-Goldstone Bosons at Finite Chemical Potential”, *Phys. Rev. D* **83**, 125009 (2011).
- [17] A. Monnai and T. Hirano, “Longitudinal Viscous Hydrodynamic Evolution for the Shattered Colour Glass Condensate”, *Phys. Lett. B* **703**, 583 (2011).
- [18] Y. Hirono, T. Kanazawa and M. Nitta, *Phys. Rev. D* **83**, 085018 (2011) [arXiv:1012.6042 [hep-ph]].
- (会議抄録)
- [19] S. Sasaki, “Hyperon vector form factors with 2+1 flavor dynamical domain-wall fermions”, *PoS LAT2011* (2011) 172.
- [20] T. Kawanai and S. Sasaki, “Interquark potential for the charmonium system with almost physical quark masses”, *PoS LAT2011* (2011) 126.
- [21] A. Yamamoto, “Lattice QCD simulation at finite chiral chemical potential”, *PoS Lattice 2011*, 220 (2011)
- [22] Y. Araki, “Spontaneous mass gap generation in monolayer graphene with strong coupling expansion of square/honeycomb lattice gauge theory”, *J. Phys.: Conf. Ser.* **302**, 012022 (2011).
- [23] Y. Araki, “Chiral symmetry restoration in monolayer graphene induced by Kekulé distortion”, *PoS (Lattice 2011)* 054 (2011).
- [24] 荒木康史, 「グラフェンにおけるカイラル対称性の破れ・回復と Kekule 歪み」, 素粒子論研究・電子版 Vol. 11, No. 1, 158 (2012).
- [25] A. Monnai and T. Hirano, “Viscous Hydrodynamic Evolution with Non-Boost Invariant Flow for the Color Glass Condensate”, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **38**, 124168 (2011).
- [26] 門内晶彦、平野哲文, “Hydrodynamic Effects on the Color Glass Condensate in Non-Equilibrium and Non-Boost Invariant Systems”, 素粒子論研究 119, F149 (2012).
- [27] 早田智也, “正準交換関係に基づく新しい QCD 和則の構築と、その QCD 物性への応用”, 研究会報告 “熱場の量子論とその応用”, **119** 4C, F173 (2012).
- [28] T. Hayata, “New QCD sum rules based on canonical commutation relations”, “International Workshop on Nuclear Physics, 33rd Course”, *Prog. Part. Nucl. Phys.* **67**, 136 (2012).
- (国内雑誌)
- [29] 初田哲男, “量子力学と演算子 -量子力学に必要な知識はすべてディラックの教科書で学んだ-”, 数理学 (サイエンス社), 6月号 (2011).
- [30] 初田哲男, “クォークからハドロン・原子核へ”, 計算と宇宙 (岩波講座 計算科学 第2巻 第4章) (岩波書店) (2012).
- (学位論文)
- [31] 早田智也: “New Derivation of QCD Sum Rules Based on Canonical Commutation Relations”, 修士論文
- [32] 村瀬功一: “揺らぎの効果を取り入れた相対論的流体模型の構築”, 修士論文
- [33] 橘保貴: “湧き出し項を含む相対論的流体模型とその重イオン衝突反応への応用”, 修士論文
- (著書)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [34] S. Sasaki, “Hyperon vector form factors with 2+1 flavor dynamical domain-wall fermions”, The XXIX International Symposium on LATTICE FIELD THEORY (LATTICE 2011), July 10-16, 2011, Lake Tahoe, California, USA.
- [35] T. Kawanai and S. Sasaki, “Interquark potential for the charmonium system with almost physical quark masses” Erice school; From Quarks and Gluons to Hadrons and Nuclei, Erice, Sicily, Italy, Sep 16-24, 2011
- [36] T. Kawanai and S. Sasaki, “Interquark potential for the charmonium system with almost physical quark masses” 29th International Symposium on lattice field theory (LATTICE 2011) Squaw Valley, Lake tahoe, California, USA, Jul 11-16, 2011
- [37] S. Ozaki, S. Sasaki and T. Hatsuda : “Charmonium-hadron scatterings and exotics from lattice QCD”, Future Prospects Hadron Physics at J-PARC and Large Scale Computational Physics, Ibaraki, Japan, Feb. 9-11, 2012
- [38] S. Ozaki, S. Sasaki and T. Hatsuda : “ J/ψ - ϕ scattering and $Y(4140)$ on lattice QCD”, Hadron Structure and Interaction in 2011, Osaka University, Japan, Nov. 25-26, 2011
- [39] A. Yamamoto, “Lattice QCD simulation at finite chiral chemical potential”, The XXIX International Symposium on Lattice Field Theory, Squaw Valley, Lake Tahoe, California, USA, July 10-16, 2011.
- [40] Y. Hirono, “Topological interactions of non-Abelian vortices with quasiparticles in high density QCD”, Quark Matter 2011, Annecy, France, 23-28 May 2011.

- [41] Y. Hirono, "An extension of the exchange fluctuation theorem for initially correlated systems", *Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics*, Prague, Czech Republic, 25-30 July 2011.
- [42] Y. Hirono, "Non-Abelian Vortices in High Density QCD", , The 4th Yonsei-Tokyo joint workshop, Seoul, Korea, 17-18 Feb. 2012.
- [43] Y. Araki: "Chiral symmetry restoration in graphene induced by Kekulé distortion", *Lattice 2011 (The 29th International Symposium on Lattice Field Theory)*, Squaw Valley, California (USA), Jul. 10-16, 2011.
- [44] Y. Araki: "Sublattice symmetry breaking and lattice distortion in monolayer graphene by strong coupling expansion of honeycomb lattice gauge theory", *The 19th international conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS19)*, Tallahassee, Florida (USA), Jul. 25-29, 2011.
- [45] Y. Araki: "Phase structure of monolayer graphene from effective U(1) gauge theory on honeycomb lattice" *RIKEN-APW-APCTP Joint Workshop: "Recent trends in condensed matter physics"*, RIKEN, Wako (Japan), Jan. 14-16, 2012.
- [46] A. Monnai: "Viscous Hydrodynamic Evolution with Non-Boost Invariant Flow for the Color Glass Condensate", Oral presentation, *The 22nd International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2011)*, Annecy, France, May 22-28, 2011.
- [47] A. Monnai: "Viscous Hydrodynamic Expansion of the Quark-Gluon Plasma for the Color Glass Condensate", Oral presentation, *Standard and Novel QCD Phenomena at Hadron Colliders, ECT**, Trento, Italy, May 30-June 2, 2011.
- [48] A. Monnai: "Non-Boost Invariant Expansion of Viscous Fluids for the Color Glass Condensate", Poster presentation, *Particles and Nuclei International Conference 2011(PANIC 2011)*, MIT, Cambridge, USA, July 24-29, 2011.
- [49] A. Monnai: "Viscous Hydrodynamic Deformation in Rapidity Distributions of the Color Glass Condensate", Oral presentation, *Workshop for Particle Correlations and Femtoscopy 2011 (WPCF 2011)*, The University of Tokyo, Japan, September 20-24, 2011.
- [50] T. Hayata, "New QCD sum rules based on canonical commutation relations", *INTERNATIONAL SCHOOL OF NUCLEAR PHYSICS 33rd Course "From Quarks and Gluons to Hadrons and Nuclei"*, Erice-Sicily, Sep., 2011.
- [51] T. Hatsuda, "Recent Results in Particle and Nuclear Physics from Lattice QCD", *The 19th Particles and Nuclei International Conference (PANIC11)*, *Rutherford Centennial* (Boston, USA, July 24-29, 2011).
- [52] T. Hatsuda, "Nuclear force and nuclear physics from lattice quantum chromodynamics", *The Rutherford Centennial Conference on Nuclear Physics* (Manchester, UK, Aug. 8-12, 2011).
- [53] T. Hatsuda, "Hadron Interactions from Lattice QCD", *International School of Nuclear Physics, 33rd Course, From Quarks and Gluons to Hadrons and Nuclei* (Erice, Italy, Sep. 16-24 2011).
- [54] T. Hatsuda, "Introduction to the QCD Phase Transition", *The International School for High-Energy Nuclear Collisions (SCHOOLNP2011)* (Wuhan, China, Oct. 31 - Nov. 5, 2011).
- [55] T. Hatsuda, "QCD Structure of Matter", *The 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies* (Wako, Japan, Nov.14 - 17, 2011).
- [56] T. Hatsuda, "QCD Structure of Hadronic Matter", *YIPQS Symposium, Perspectives in Theoretical Physics - From Quark-Hadron Sciences to Unification of Theoretical Physics -* (Kyoto, Japan, Feb.6-8, 2012).
- [57] T. Hatsuda, "Recent Results in Particle and Nuclear Physics from Lattice QCD Simulations", *2nd AICS International Symposium - Computer and Computational Sciences for Exascale Computing -* (Kobe, Japan, March 1-2, 2012).
- [58] S. Sasaki, "Progress in lattice QCD relevant for charmonium physics", *EMMI Workshop on Quarkonia in Deconfined Matter*, September 28 - 30, 2011, Acitrezza, Italy
- [59] T. Kawanai and S. Sasaki, "Lattice Study of J/Psi-Nucleon Interaction" *Non Perturbative Color Force in QCD (NPCFiQCD 2012)*, Temple University, Philadelphia, USA, Mar 26-28, 2012
- [60] Y. Hama, T. Hatsuda, and S. Uchino: "Higgs Mechanism at Finite Chemical Potential with Type-II Nambu-Goldstone Bosons", *YIPQS and WCU(Hanyang) joint workshop on Dense Strange Nuclei and Compressed Baryonic Matter (Dense11)*, Yukawa Inst., Kyoto, Japan, April 18th-May 18th, 2011.
- [61] Y. Hama, T. Hatsuda, and S. Uchino: "Higgs Mechanism at Finite Chemical Potential with Type-II Nambu-Goldstone Bosons" (poster), *19th Particles and Nuclei International Conference (PANIC11)*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, July 24th-29th, 2011.
- [62] A. Yamamoto, "Lattice Fermion with chiral chemical potential", *New-type of Fermions on the Lattice, YITP*, Kyoto University, Japan, February 9-24, 2012.
- [63] G.Fejos, 'Functional methods of quantum field theory' seminar in Tokyo University (February 24, 2012): An approximate large-N solution of the $U(N) \times U(N)$ model

招待講演

(国内会議)

一般講演

- [64] 河内太一, 佐々木勝一, “格子 QCD に基づくスピンの依存する重いクォーク間ポテンシャルの研究”, 日本物理学会 第 67 回年会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 24-27 日
- [65] 佐々木勝一, “重いクォークを含むエキゾチックなハドロン・原子核の探索に向けて”, 新学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会, 理化学研究所 計算科学研究機構, 2011 年 6 月 23-24 日
- [66] 佐々木勝一, “格子 QCD によるクォーク間ポテンシャルの精密化” 研究会: 「素核宇宙融合による計算基礎物理学の進展 - ミクロとマクロのかけ橋の構築 -」, 三重県志摩市・合歓の郷, 2011 年 12 月 3-5 日
- [67] 尾崎翔, 佐々木勝一, 初田哲男: “格子 QCD によるチャーモニウム及びボトモニウムを含んだハドロン散乱の研究”, 日本物理学会年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月
- [68] 尾崎翔, 佐々木勝一, 初田哲男: “格子 QCD による J/ψ - ϕ 散乱および $Y(4140)$ に関する研究”, 日本物理学会秋季大会, 弘前大学, 2011 年 9 月
- [69] 尾崎翔, 佐々木勝一, 初田哲男: “格子 QCD による J/ψ - ϕ 間相互作用及び $Y(4140)$ に関する研究”, 素核宇宙融合による計算基礎物理学の進展-ミクロとマクロのかけ橋構造-, 三重県, 2011 年 12 月
- [70] 山本新, Chiral magnetic effect from lattice QCD, 日本物理学会秋季大会, 弘前大学, 2011 年 9 月 16-19 日
- [71] Y. Araki: “Chiral symmetry restoration in graphene induced by Kekulé distortion”, Interactive lecture - “Exotic superconductivity”, The Univ. of Tokyo, Tokyo (Japan), Jun. 10, 2011.
- [72] 荒木康史: 「グラフェンにおけるカイラル対称性の破れ・回復と Kekulé 歪み」, 基研研究会「熱場の量子論とその応用」, 京都大学 基礎物理学研究所, 2011 年 8 月 22 日-24 日.
- [73] 門内晶彦: “Hydrodynamic Effects on the Color Glass Condensate in Non-Equilibrium and Non-Boost Invariant Systems”, 熱場の量子論とその応用 2011, 京都大学基礎物理学研究所, 2011 年 8 月.
- [74] 門内晶彦: “相対論的粘性によるカラーガラス凝縮からの時空発展”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 弘前大学, 2011 年 9 月.
- [75] 濱祐介, 初田哲男, 内野瞬: “有限化学ポテンシャルにおけるアンダーソン・ヒッグス機構”, 日本物理学会 第 66 回秋季大会, 弘前大学, 2011 年 9 月 16-19 日.
- [76] 広野雄士: 「量子渦の非可換統計 - $SO(N)$ 対称性を持つ Majorana フェルミオン -」, 量子論の諸問題と今後の発展, 高エネルギー加速器研究機構, 2012 年 3 月 16 - 17 日.
- [77] 広野雄士: “回転する高密度クォーク物質の異方的光学応答”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学 西宮上ヶ原キャンパス, 2012 年 3 月 24 - 27 日.
- [78] 早田智也, “正準交換関係に基づく新しい QCD 和則の構築と、その QCD 物性への応用”, 基研研究会 “熱場の量子論とその応用”, 京都, 2011 年 8 月.
- [79] 村瀬功一: “相対論的流体模型における初期条件の揺らぎの効果”, 日本物理学会 2012 年春季大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月.
- [80] 橋保貴: “ジェットによるエネルギー・運動量流入を考慮した相対論的流体モデル”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学 西宮上ヶ原キャンパス, 2012 年 3 月 24 - 27 日

招待講演

- [81] 初田哲男, “宇宙の進化と物質の起源 -クォーク・グルーオン・プラズマから中性子星へ”, 「物理学の最前線」(東北大学, 仙台市, 2011 年 12 月 2 日)
- [82] 初田哲男, “素粒子・原子核から宇宙へ: スーパーコンピュータと現代物理学”, 第 2 回 仁科記念シンポジウム「アイソトープ科学の最前線」原子力と仁科博士(科学技術館, 東京, 2012 年 3 月 23 日)
- [83] 佐々木勝一, “核子構造の 3 次元的理解に向けて - Lattice QCD によるアプローチ”, 日本物理学会 秋季大会, 弘前大学文京町キャンパス, 2011 年 9 月 16 - 19 日
- [84] 門内晶彦: “Viscous Fluids in Heavy Ion Collisions”, 第 19 回 Heavy Ion Café 並びに第 12 回 Heavy Ion Pub 合同研究会「QCD 物質の最前線」, 名古屋大学, 2011 年 6 月.

(セミナー)

- [85] T. Kawanai and S. Sasaki, “Interquark potential for the charmonium system with almost physical quark masses”, RIKEN Lunch Seminar, Brookhaven National Laboratory, New York, USA, Sep 1, 2010
- [86] 濱祐介: “Higgs Mechanism with Type-II Nambu-Goldstone Bosons at Finite Chemical Potential”, (東京大学駒場原子核理論研究室, 2011 年 5 月 18 日)
- [87] 濱祐介: “Higgs Mechanism with Type-II Nambu-Goldstone Bosons at Finite Chemical Potential”, (京都大学大学院原子核理論研究室, 2011 年 6 月 1 日)
- [88] 広野雄士: “カラー超伝導における非可換渦と準粒子との相互作用”, (東京大学駒場, 2011 年 6 月 29 日).
- [89] Y. Hirono, “Interaction of non-Abelian vortices with quasiparticles in a color superconductor”, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, USA, 29 Sep. 2011.
- [90] A. Yamamoto, Chiral magnetic effect in lattice QCD with a chiral chemical potential, Stony Brook University, Oct. 25, 2011
- [91] G.Fejos, HD seminar of Hatsuda group (January 10, 2012): 2PI formalism in scalar field theories and the $U(N) \times U(N)$ model
- [92] G.Fejos, KEK seminar in Tsukuba (March 6, 2012): An approximate large- N solution of the $U(N) \times U(N)$ model from 2PI effective action

- [93] A. Monnai: “Relativistic Viscous Hydrodynamic Models in High-Energy Nucleus-Nucleus Collisions”, Global COE “Quest for Fundamental Principles in the Universe” Seminar, Nagoya University, Japan, September 30, 2011.
- [94] Y. Araki: “Chiral symmetry restoration in graphene induced by Kekulé distortion”, RIKEN BNL Research Center, Upton, New York (USA), Jul. 21, 2011.
- [95] 荒木康史: 「グラフェンにおけるカイラル対称性の破れ・回復と Kekulé 歪み」, 新潟大学 素粒子論研究室, 2011 年 10 月 20 日.
- [96] T. Hayata, “New Derivation of QCD sum rules based on canonical commutation relations”, (RCNP, 2012 年 3 月 28 日).

1.2 素粒子論研究室（諸井・柳田・松尾・浜口）

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。

2011 年度は中山が助教として着任した。

1.2.1 現象論

LHC 現象論

超対称標準模型においては、その枠組みのうち数種において、スカラータウ粒子（タウレプトンの超対称パートナー）が長寿命となる。特にスカラータウの平均飛程が 1 m 程度である場合には、LHC 実験で生成されたスカラータウが検出器の内側で崩壊することが起こりうる。遠藤、濱口、岩本は、浅井、東（東大）と共に、そのような場合に ATLAS 検出器で荷電トラックの折れ曲がり観測されることを示し、さらにどのような枠組みの為にスカラータウが長寿命になったのかを、崩壊の娘粒子を同定することによって識別できることを指摘した [2]。関連講演が岩本により為されている [53, 55, 64]。

中村は、浅井（東大理）、白井（カリフォルニア大学バークレー校）との共同研究においてグラビティーノが軽いゲージ伝達型模型と重力伝達型模型が LHC の発見後に直接グラビティーノの質量を測定することなく、そのシグナルによって区別可能であることを指摘し、その方法を提案した。また具体的な解析により、発見後早い段階において実際に区別可能であることを示した [12]。

中村は、この結果および最近の LHC の実験結果による模型の制限についての研究成果を博士論文としてまとめた [45]。

コライダー現象論

論文 [9] 及び [10] は、グラビティーノ質量が極めて小さい場合、インパクトパラメータ情報を用いると LHC 及び ILC 実験においてグラビティーノ質量を決定できる可能性があることを指摘した。また、以上の成果は、“Embarking on a New Era of Discovery” 及び “International Workshop on Future Linear Colliders” という国際会議で発表された [57, 63]。

浅野は齋藤（東北大学）、末原（ICEPP）、藤井（KEK）、Hundi（IACS）、伊藤（ICRR）、松本（IPMU）、岡田（アラバマ大学）、田窪（KEK）、山本（東北大学）とともに、一般的な暗黒物質に対する ILC 実験での検証可能性を検討した。[1]

佐藤、米倉は白井（KEK）とともに、CDF 実験で

観測された標準模型との矛盾を、R パリティを破る超対称性模型で説明した。[26]

ヒッグス粒子

標準模型は実験的にとてもよく検証されているが、ゲージ粒子に質量を与えるための機構は唯一未解決のままとなっている。ヒッグス機構はその有力な候補であり、その機構を引き起こす要となるヒッグス粒子 (Brout-Englert-Higgs boson) は、LHC 実験において近く発見されると期待されている。

ヒッグス粒子が存在すると仮定した場合、その質量は 114 GeV 以上であることが LEP 実験によって知られていたが、近年の LHC 実験の順調な進展により、その可能性は 124 GeV 付近の狭い領域に絞り込まれた。

ミュー粒子の異常磁気モーメントの観測値は、標準模型における理論値と整合していない。標準模型を超対称標準模型へと拡張すると、その不一致は解消されることが知られている。遠藤、濱口、岩本、横崎は、超対称標準模型に更にクォークを付け加えることで、超対称標準模型のその利点を保ちながらヒッグス粒子の質量を大きくすることができることを示した [3]。関連講演が岩本により為されている [54, 56, 65, 66]。

諸井、佐藤、柳田は、MSSM にさらに粒子を加えるような模型で、LHC 実験により示唆された 125 GeV の質量を持つヒッグスを説明しつつ、ミューオンの磁気双極子モーメントの理論と実験のずれを超対称性粒子の寄与で説明した。[30]

超対称な模型では、大きな量子補正がない限りヒッグス粒子の質量は軽くなる傾向がある。ところが、ヒッグス粒子の探索に関する一連の実験結果は重いヒッグスを示唆している。ヒッグス粒子の質量に対する量子補正が大きいとき、理論はパラメータの微調整が必要である。浅野・諸井・横崎は、このようなパラメータの微調整がなくても、シングレットスカラーが新しい物質場と相互作用しているときに、重いヒッグス粒子のように振る舞う可能性があることを示した [32]。

佐藤、柳田は白井（KEK）とともに、標準模型ヒッグスと混合を起こすようなスカラー粒子について、LHC 実験における検証可能性を検討した。[27]

浅野、諸井、佐藤、柳田は、離散的な R 対称性からアノマリーを取り除くためには MSSM にさらに粒子を加える必要があること、さらにそのような粒子を取り入れた効果で 140 GeV という比較的重いヒッグス粒子を実現できることを示した。

中山、横崎、米倉は、NMSSM の模型においてシングレット場とヒッグス場の相互作用が大きくなる模型を構築し、さらにそのときヒッグス質量が量子補正で大きくなることを発見した [36]。

北原は、ゲージ重項超場を含む最小超対称性模型におけるヒッグス粒子の質量上限値に関してのレビューを修士論文でまとめた。[41]

SUSY 現象論

ゲージ媒介機構は、超対称性を破る魅力的な機構である。なぜならスフェルミオンセクターの超対称性の破れに関して、CP 対称性やフレーバーの破れが無いからである。しかし、諸井・横崎はゲージ媒介機構においても、大統一理論の破れや、超重力による超対称の破れの効果を通じて、CP 対称性が大きく破れる可能性があることを示した。これらの効果はヒッグスセクターを通じて現れ、電子や中性子の電気双極子モーメントに重要な寄与を与える。パラメータによっては、すでに実験により除外されているか、あるいは将来の実験で検出できる可能性があることがわかった [31]。研究成果は、横崎によって国際会議で口頭発表された [60]。

ゲージ媒介機構は、スフェルミオンの超対称性の破れについて CP の破れやフレーバーの破れの問題のない魅力的な超対称性の破れの機構である。しかし、ヒッグシーノの質量項の起源の問題 (ミュー問題)、またそれに起因する CP 対称性の破れの問題がある。濱口・中山・横崎は、Next-to-Minimal Supersymmetric Standard Model とゲージ媒介機構を組み合わせることで、上記 2 つの問題を解決するモデルを構築した。通常このようなモデルは、ドメインウォールが生成され、そのエネルギーが宇宙のエネルギーを支配してしまう。その結果、現在観測されている宇宙が再現されないという問題がある。しかし、彼らは隠れた対称性による量子異常によってこの問題をも解決した [33]。

超対称性とヒッグスに関するパラメータの微調整の問題は深く関わっている。微調整の少ない超対称性理論を自然な超対称性理論という。ヒッグス粒子の質量は、大きな量子補正を必要とし、このときにパラメータの微調整が生じる。一般に、トップの超対称パートナーであるストップとヒッグス粒子のスカラー 3 点結合を大きくすることによって、ヒッグスセクターの微調整を緩めることができる。しかし、横崎は石渡 (カリフォルニア工科大学)・永田 (名古屋大・東京大) とともに、ヒッグスセクターの微調整が緩くなる領域 (5% 以下) では、 B メソンの Rare Decay、 $B \rightarrow X_s \gamma$ の崩壊分岐比が大きくなり実験の制限を逃れられないことを示した [34]。

諸井、佐藤、柳田は浅野 (ハンブルク大) とともに、MSSM に右巻きニュートリノを加えることにより、スカラー粒子が重い領域でも、必要とされるパラメータ調整の精度が和らぐことを示した。[29]

吉永は、超対称性理論による $B \rightarrow K\pi$ 崩壊異常の説明可能性について修士論文にまとめた [44]。

超対称ゲージ理論

米倉はプリンストン高等研究所の立川とともに、3 重基本表現で振る舞う物質場が存在する $N=1$ 超対称ゲージ理論において、クーロン相を記述する Seiberg-Witten curve を決定した [35]。

米倉は、超対称ゲージ理論におけるアノマリー問題について博士論文をまとめた [47]。さらに、くり

こみ処方依存性についての考察を深めることにより、 $N=1$ 超対称 Yang-Mills 理論でのアノマリー問題に明確な解決を与えた [37]。

暗黒物質対消滅に対する宇宙論的制限

諸井、中山は久野 (名古屋大)、川崎 (東大宇宙線研)、郡 (KEK)、関口 (名古屋大) らとともに、一般に暗黒物質が速度に依存した対消滅断面積を持つ場合に、ビッグバン元素合成及び宇宙背景放射の非等方性の観測から断面積に対して強い制限が得られることを示した [13]。

超重力理論におけるインフレーションモデル

中山は川崎、北嶋 (ともに東大宇宙線研) とともに、超対称アキシオンモデルにおいて自然にハイブリッドインフレーションが実現し、このとき Peccei-Quinn 対称性の破れのスケールが 10^{15} GeV 程度に预言されることを示した [14]。

中山は高橋 (東北大) とともに、インフレーションが B-L ヒッグスボゾンで引き起こされた場合、超対称性の破れのスケールが PeV スケールに预言されることを示した。また、これが最近の LHC におけるヒッグス探索の結果とも合致することを示した [18, 19]。

また、中山は鎌田 (DESY)、横山 (東大 RESCEU) とともに、GUT 相転移がインフレーション中に起こる可能性を調べ、そのときに生成されるモノポールの量を見積もった。IceCube 等の将来観測で、このようなモデルへの制限が改善されることを示した [21]。

モジュライ問題への解

超弦理論や超重力理論に現れるモジュライと呼ばれる長寿命粒子が宇宙論的に深刻な問題を引き起こすことが古くから知られており、モジュライ問題と呼ばれている。

諸井、中山はモジュライ問題への解として熱的インフレーションに着目した。一般に熱的インフレーション終了後にドメインウォールが形成され、これが再び宇宙論的問題を引き起こすが、QCD インスタントンの効果によりドメインウォールが崩壊し、更にこのとき発生する重力波がパルサー観測によって検出可能であることを示した [15]。

また、モジュライが大きな Hubble 質量を持っていれば、モジュライ問題が解決することが知られていた (断熱解)。中山、柳田は高橋 (東北大) とともに断熱解を詳細に調べ、一般にインフレーション終了時にモジュライの振動が誘起されることを示し、可能な最小のモジュライの振幅を導いた [20]。

速度揺らぎからの曲率揺らぎの生成

中山は須山（東大 RESCEU）とともに、新たな宇宙論的な曲率揺らぎの生成機構を提唱した。崩壊粒子が大スケールの速度揺らぎを持っていたとすると、ローレンツ因子を通して崩壊幅が空間的揺らぎを持つことに着目し、速度揺らぎから曲率揺らぎを得るモデルを構築し、この場合の曲率揺らぎが持つ非ガウス性を評価した [16]。

Dark radiation の等曲率揺らぎ

近年の宇宙観測により、宇宙を満たす余分な輻射成分（dark radiation）の存在が明らかになってきている。中山は、川崎、宮本（ともに東大宇宙線研）、関口（名古屋大）とともに、WMAP, ACT などの現在の宇宙観測データを用いて dark radiation が持ち得る等曲率揺らぎの量に対して制限を導いた。またその制限を具体的なモデルに適用し、dark radiation モデルを選別する上で重要な制限になることを示した [17]。

背景重力波による初期宇宙の探索

中山は黒柳（東大宇宙線研）、齋藤（UC Berkeley）とともに、インフレーションで生成された背景重力波の直接観測による極初期宇宙の探索可能性を詳しく調べた。特に将来の重力波実験 DECIGO における再加熱温度や宇宙の状態方程式の決定精度を調べ、再加熱温度が 10^7 GeV 程度の場合には極初期宇宙の熱史が非常によく決定されることを示した [22]。

Wino 暗黒物質の検出可能性

諸井、中山は最近の LHC におけるヒッグス粒子探索の結果を受けて、 125 GeV ヒッグス粒子がアノマリー伝達モデルにおいて自然に実現されることから、Wino 暗黒物質の将来の直接および間接検出、および LHC での検出可能性を調べた [23]。

非平衡粒子のボルツマン方程式とその非熱的暗黒物質生成への応用

濱口、諸井、向田は、freeze-in と呼ばれる暗黒物質生成機構に高温プラズマが与える影響について調べ、予言される暗黒物質残存量が従来のものと変わり得ることを示した [11]。向田は、本研究の内容とともに熱場の理論についてのレビューを修士論文にまとめた [42]。

グラビティーノ問題

超重力理論ではモジュライやグラビティーノといった長寿命な粒子が宇宙論的な問題を起こすことが知られている。近年、モジュライやインフラトンの崩壊によってもグラビティーノが生成されすぎる事が分かった。ところが、F タームと D タームの 2 タイプある超対称性の破れのうち、F タームの方の状況しか考慮されていなかった。遠藤、濱口、寺田は、D タームによる超対称性の破れがある状況でのモジュライ／インフラトンの崩壊によるグラビティーノ問題を調べ、モジュライ及びインフラトンと超対称性を破る場との混合を考慮に入れたグラビティーノへの有効結合定数の主要項に対する一般的な式を導いた [80]。寺田は、モジュライ問題を中心とした超重力理論の宇宙論的側面のレビューと共に、上記の結果を修士論文にまとめた [43]。

ホログラフィック QCD

ハドロンの物理は非摂動的であるため通常、解析が困難であるが、ゲージ／重力対応を用いた方法は有力な解析手法の一つである。西尾はゲージ／重力対応を用いてハドロンの高エネルギー散乱現象を解析し、散乱現象の非摂動部分である（一般化された）パートン分布関数を理論的に与えた。[24, 25, 75, 76]。

格子場の量子論

格子正則化は、場の量子論の非摂動的な解析を可能にする有用な定式化である。Overlap Dirac 作用素の発見により、従来まで不可能と考えられていた厳密なカイラル対称性の取り扱いが可能になったが、その量子論的な性質に関しては、未だに不明な点も多い。臼井は、エルミート性、並進不変性、Reflection Positivity、および、多項式有界性をもつ、任意の格子場のスカラー場の理論において、Umezawa-Kamefuchi-Källén-Lehmann のスペクトル表示を導出し、この表示を用いて、overlap Dirac 作用素を用いて定義されるスカラー場の理論の、量子論的な Unitarity について論じた。また、これらの研究成果を博士論文にまとめた [46]。

1.2.2 弦理論

重複した M 5 ブレーン

松尾は P.M.Ho, K.W.Huang とともに非可換ゲージ対称性を持つ 6 次元中の自己双対場のラグランジアンを提案した。[6] このような場は重複した M5 ブレーン上の場の理論として現れるべきものであり、4 次元理論の双対性を理解する上で重要であると考えられている。その後、この理論の超対称化と非可換 gerbe などの幾何学との対応関係について研究が続いている。[62]

4 次元ゲージ理論と 2 次元戸田理論の対応

近年 4 次元の超対称ゲージ理論の分配関数が 2 次元戸田理論の相関関数と等しいことが予想されている（AGT 予想）。菅野と松尾は柴とともにこの対応の背景にある対称性として $W_{1+\infty}$ 対称性があることを予想し、両方の理論のインスタントパラメータに関する展開の最初の数項を用いて、この予想が成立していることを示した。[7]

さらに松尾と張は、戸田理論の相関関数を Dotsenko-Fateev 表示すると相関関数の積分が Schur 多項式の Selberg 平均で書かれることを示した。さらにこの積分がどのような値を与えるかをいくつかの整合性条件を用いて予想し、その予想の下に AGT 関係式を証明した。[8]

3 次元超対称ゲージ理論と 3 次元重力理論の対応

福居は 3 次元超対称ゲージ理論と 3 次元多様体上のトポロジカルな理論であるチャーンサイモンズ重力理論の対応に関するレビューを修士論文にまとめた。[40]

F 理論のコンパクト化を用いた GUT 理論の研究

川野と土屋は、F-Theory のコンパクト化を用いた GUT 理論の研究を行った。

特に、渡利氏と共同で、GUT 理論の Charged Matter は、F-Theory では、7-branes の交差するところで現れるが、これらの運動項を解析して調べた。その結果、Charged Matter の運動項が GUT 群が存在する 7-brane 上全体の積分で与えられるのではなく、その交差している複素曲線上の積分で与えられることを明らかにした。[4]

また、川野は、林氏と渡利氏と共同で、現象論的要請から GUT 群が存在する 7-brane のトポロジーに制限が付くことを明らかにした。[5]

GUT 群を標準模型のゲージ群に破るシナリオでは、GUT 群が存在する 7-brane が Hirzebruch 曲面であることは、余計な Charged Matter が現れることから禁止される。また、 U_p タイプの湯川相互作用を与える codimension-3 の 7-brane 交差を 1 つにするため、discrete 群を使うシナリオでは、GUT 群が存在する 7-brane が del Pezzo 曲面であることは禁止される。

土屋は F 理論のコンパクト化と右巻きニュートリノの関係について博士論文にまとめた。[48]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] M. Asano, T. Saito, T. Suehara, K. Fujii, R. S. Hundi, H. Itoh, S. Matsumoto and N. Okada *et al.*, Phys. Rev. D **84** (2011) 115003 [arXiv:1106.1932 [hep-ph]].

- [2] S. Asai, Y. Azuma, M. Endo, K. Hamaguchi and S. Iwamoto, “Stau Kinks at the LHC,” JHEP **1112** (2011) 041 [arXiv:1103.1881].
- [3] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto and N. Yokozaki, “Higgs Mass and Muon Anomalous Magnetic Moment in Supersymmetric Models with Vector-Like Matters,” Phys. Rev. D **84** (2011) 075017 [arXiv:1108.3071].
- [4] T. Kawano, Y. Tsuchiya and T. Watari, “A Note on Kahler Potential of Charged Matter in F-Theory,” Phys. Lett. B **709**, 254 (2012) [arXiv:1112.2987 [hep-th]].
- [5] H. Hayashi, T. Kawano and T. Watari, “Constraints on GUT 7-brane Topology in F-Theory,” Phys. Lett. B **708**, 191 (2012) [arXiv:1112.2032 [hep-th]].
- [6] P.-M. Ho, K.-W. Huang and Y. Matsuo, “A Non-Abelian Self-Dual Gauge Theory in 5+1 Dimensions,” JHEP **1107**, 021 (2011) [arXiv:1104.4040 [hep-th]].
- [7] S. Kanno, Y. Matsuo and S. Shiba, “ $W(1+\infty)$ algebra as a symmetry behind AGT relation,” Phys. Rev. D **84**, 026007 (2011) [arXiv:1105.1667 [hep-th]].
- [8] H. Zhang and Y. Matsuo, “Selberg Integral and $SU(N)$ AGT Conjecture,” JHEP **1112**, 106 (2011) [arXiv:1110.5255 [hep-th]].
- [9] S. Matsumoto and T. Moroi, “Studying Very Light Gravitino at the ILC,” Phys. Lett. B **701** (2011) 422.
- [10] M. Asano, T. Ito, S. Matsumoto and T. Moroi, “Exploring Supersymmetric Model with Very Light Gravitino at the LHC,” JHEP **1203** (2012) 011.
- [11] K. Hamaguchi, T. Moroi and K. Mukaida, JHEP **1201**, 083 (2012) [arXiv:1111.4594 [hep-ph]].
- [12] S. Asai, E. Nakamura and S. Shirai, “Discriminating Minimal SUGRA and Minimal Gauge Mediation Models at the Early LHC,” JHEP **1204** (2012) 003 [arXiv:1202.3584 [hep-ph]].
- [13] J. Hisano, M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi, K. Nakayama and T. Sekiguchi, “Cosmological constraints on dark matter models with velocity-dependent annihilation cross section,” Phys. Rev. D **83**, 123511 (2011) [arXiv:1102.4658 [hep-ph]].
- [14] M. Kawasaki, N. Kitajima and K. Nakayama, “Cosmological Aspects of Inflation in a Supersymmetric Axion Model,” Phys. Rev. D **83**, 123521 (2011) [arXiv:1104.1262 [hep-ph]].
- [15] T. Moroi and K. Nakayama, “Domain Walls and Gravitational Waves after Thermal Inflation,” Phys. Lett. B **703**, 160 (2011) [arXiv:1105.6216 [hep-ph]].
- [16] K. Nakayama and T. Suyama, “Curvature perturbation from velocity modulation,” Phys. Rev.

- D **84**, 063520 (2011) [arXiv:1107.3003 [astro-ph.CO]].
- [17] M. Kawasaki, K. Miyamoto, K. Nakayama and T. Sekiguchi, “Isocurvature perturbations in extra radiation,” JCAP **1202**, 022 (2012) [arXiv:1107.4962 [astro-ph.CO]].
- [18] K. Nakayama and F. Takahashi, “Low-scale Supersymmetry from Inflation,” JCAP **1110**, 033 (2011) [arXiv:1108.0070 [hep-ph]].
- [19] K. Nakayama and F. Takahashi, “Higgs mass and inflation,” Phys. Lett. B **707**, 142 (2012) [arXiv:1108.3762 [hep-ph]].
- [20] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “On the Adiabatic Solution to the Polonyi/Moduli Problem,” Phys. Rev. D **84**, 123523 (2011) [arXiv:1109.2073 [hep-ph]].
- [21] K. Kamada, K. Nakayama and J. i. Yokoyama, “Phase transition and monopole production in supergravity inflation,” Phys. Rev. D **85**, 043503 (2012) [arXiv:1110.3904 [hep-ph]].
- [22] S. Kuroyanagi, K. Nakayama and S. Saito, “Prospects for determination of thermal history after inflation with future gravitational wave detectors,” Phys. Rev. D **84**, 123513 (2011) [arXiv:1110.4169 [astro-ph.CO]].
- [23] T. Moroi and K. Nakayama, “Wino LSP detection in the light of recent Higgs searches at the LHC,” Phys. Lett. B **710**, 159 (2012) [arXiv:1112.3123 [hep-ph]].
- [24] R. Nishio and T. Watari, Phys. Rev. D **84**, 075025 (2011) [arXiv:1105.2999 [hep-ph]].
- [25] R. Nishio and T. Watari, Phys. Lett. B **707**, 362 (2012) [arXiv:1105.2907 [hep-ph]].
- [26] R. Sato, S. Shirai and K. Yonekura, Phys. Lett. B **700**, 122 (2011) [arXiv:1104.2014 [hep-ph]].
- [27] R. Sato, S. Shirai and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B **704**, 490 (2011) [arXiv:1105.0399 [hep-ph]].
- [28] M. Asano, T. Moroi, R. Sato and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B **705**, 337 (2011) [arXiv:1108.2402 [hep-ph]].
- [29] M. Asano, T. Moroi, R. Sato and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B **708**, 107 (2012) [arXiv:1111.3506 [hep-ph]].
- [30] T. Moroi, R. Sato and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B **709**, 218 (2012) [arXiv:1112.3142 [hep-ph]].
- [31] T. Moroi and N. Yokozaki, Phys. Lett. B **701**, 568 (2011) [arXiv:1105.3294 [hep-ph]].
- [32] M. Asano, T. Moroi and N. Yokozaki, Phys. Lett. B **708**, 280 (2012) [arXiv:1107.4523 [hep-ph]].
- [33] K. Hamaguchi, K. Nakayama and N. Yokozaki, Phys. Lett. B **708**, 100 (2012) [arXiv:1107.4760 [hep-ph]].
- [34] K. Ishiwata, N. Nagata and N. Yokozaki, Phys. Lett. B **710**, 145 (2012) [arXiv:1112.1944 [hep-ph]].
- [35] Y. Tachikawa and K. Yonekura, “N=1 curves for trifundamentals,” JHEP **1107**, 025 (2011) [arXiv:1105.3215 [hep-th]].
- [36] K. Nakayama, N. Yokozaki and K. Yonekura, “Relaxing the Higgs mass bound in singlet extensions of the MSSM,” JHEP **1111**, 021 (2011) [arXiv:1108.4338 [hep-ph]].
- [37] K. Yonekura, “On the Trace Anomaly and the Anomaly Puzzle in N=1 Pure Yang-Mills,” JHEP **1203**, 029 (2012) [arXiv:1202.1514 [hep-th]].
- (会議抄録)
- [38] Y. Kikukawa and K. Usui “Reflection Positivity of $\mathcal{N} = 1$ Wess-Zumino model on the lattice with exact $U(1)_R$ symmetry” PoS **LATTICE2010**, 251(2011)
- (国内雑誌)
- [39] 中山和則, “暗黒物質直接検出の現状と展望” 日本物理学会誌 **66** (2011) 675.
- (学位論文)
- [40] 修士論文: 福居文崇, “3次元ゲージ理論とタイヒミュラー理論の量子化”
- [41] 修士論文: 北原鉄平, “ゲージ重項超場を含む超対称素粒子模型のヒッグスセクター”
- [42] 修士論文: 向田享平, “Non-Equilibrium Quantum Field Theory: Application to Particle Cosmology.”
- [43] 修士論文: 寺田隆広, “Cosmological aspects of supergravity.”
- [44] 修士論文: 吉永尊洸, “超対称性理論による $B \rightarrow K\pi$ 崩壊異常の説明可能性”
- [45] 博士論文: E. Nakamura, “Low-Scale Gauge Mediation Models at the LHC: Their Test and Discrimination from Other Supersymmetric Models”
- [46] 博士論文: K. Usui, “Quantum-theoretical properties of lattice field theories with exact chiral symmetry”
- [47] 博士論文: K. Yonekura, “The anomaly puzzle in supersymmetric field theories.”
- [48] 博士論文 Y. Tsuchiya, “Right-handed Neutrinos in F-theory Compactifications”.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [49] M. Asano, “Discovery potential for the natural supersymmetry,” Summer Institute 2011, Fuji-Yoshida, August 2011
- [50] M. Asano, “Singlet Boson in SUSY Model as a Mimic of the SM Higgs at the LHC,” Scalars 2011, University of Warsaw, ポーランド, August 2011

- [51] M. Asano, “Non-anomalous Discrete R-symmetry, Extra Matters, and Enhancement of the Lightest SUSY Higgs Mass,” 2011 IPMU-YITP School and Workshop on Monte Carlo Tools for LHC, Yukawa Institute for Theoretical Physics, September 2011
- [52] S. Iwamoto, “Top Forward-Backward Asymmetry and Di-jet Cross Section in LHC”, Summer Institute (phenomenology) 2011, Fuji-Yoshida, August 2011.
- [53] S. Iwamoto, “In-flight-decay of Stau in the LHC Tracker”, School on Monte Carlo Tools for LHC, YITP, September 2011.
- [54] S. Iwamoto, “Muon $g - 2$ anomaly and 125 GeV Higgs : Extra vector-like quark and LHC prospects”, Physics opportunities with LHC at 7 TeV, KEK, February 2012.
- [55] S. Iwamoto, “Long-lived stau kink signature at the LHC”, KEK-PH 2012, KEK, February 2012,
- [56] S. Iwamoto, “Muon $g - 2$ anomaly and 125 GeV Higgs : Extra vector-like quark and LHC prospects”, GUT 2012, YITP, 2012 年 3 月.
- [57] “Studying very light gravitino at future linear colliders” T. Moroi, International Workshop on Future Linear Colliders (September 26 – 30), Granada, Spain
- [58] R. Sato, “Sneutrino Inflation with Asymmetric Dark Matter,” SUSY11, Fermi National Accelerator Laboratory, August 2011
- [59] K. Usui “Reflection Positivity of $\mathcal{N} = 1$ Wess-Zumino model on the lattice with exact $U(1)_R$ symmetry” The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory, Lattice2011, June 10-16, 2011 Squaw Valley, Lake Tahoe, California
- [60] N. Yokozaki, “SUSY CP Problem in Gauge Mediation Model”, Supersymmetry 2011, Fermilab, 28-Aug
- [61] K. Yonekura, “A single scale model of SUSY breaking, gauge mediation and dark matter”, SUSY2011, Fermilab, August 2011
- 招待講演
- [62] Y. Matsuo, “A Non-Abelian Self-Dual Gauge Theory in 5+1 Dimensions” (March 6th, 2012) in workshop “The Mathematics and Applications of Branes in String and M-Theory” Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences, Cambridge, 3 January-29 June 2012.
- [63] “Long-lived stau at the LHC” T. Moroi, Embarking on a New Era of Discovery: LHC, Dark Matter, and their interplay (May 19 – 23, 2011), University of California, Berkeley, U.S.A.
- (国内会議)
- 一般講演
- [64] 岩本 祥, “Long-lived Stau might be Detected in the LHC”, 原子核三者若手 夏の学校, 滋賀, 2011 年 8 月.
- [65] 岩本 祥, “Higgs Mass and Muon Anomalous Magnetic Moment in Supersymmetric Models with Vector-Like Matters”, 2012 年冬の富山 素粒子宇宙論研究会, 富山大学, 2012 年 2 月.
- [66] 岩本 祥, “ $g - 2$ と 125 GeV Higgs”, 札幌冬の学校 2012, 2012 年 3 月.
- [67] 菅野正一, “W(1+infinity) algebra as a symmetry behind AGT relation,” 基研研究会「場の理論と弦理論」、京都大学基礎物理学研究所、2011 年 7 月
- [68] 菅野正一, “Correlation function of W(1+ ∞) algebra, Selberg integral and AGT-W relation,” 日本物理学会、関西学院大学、2012 年 3 月
- [69] 向田 享平, “Boltzmann equation for non-equilibrium particles and its application to non-thermal dark matter production,” 日本物理学会、関西学院大学、2012 年 3 月.
- [70] 北原鉄平, “The Higgs Sector of the Next-to-MSSM”, 原子核三者若手 夏の学校, 滋賀県白浜荘, 2011 年 8 月 18 日.
- [71] 中山和則, “Domain walls and gravitational waves after thermal inflation,” 日本物理学会 2011 年秋季大会、弘前大学、2011 年 9 月 18 日.
- [72] 中山和則, “CTA 報告 22 : CTA 時代における Dark Matter 探索,” 日本物理学会 2011 年秋季大会、弘前大学、2011 年 9 月 19 日.
- [73] 中山和則, “On the adiabatic solution to the moduli problem,” 2012 年冬の富山 素粒子宇宙論研究会、富山大学、2012 年 2 月 21 日.
- [74] 中山和則, “A Solution to the $\mu/B\mu$ Problem in Gauge Mediation with Hidden Gauge Symmetry,” 日本物理学会 2012 年年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月 25 日.
- [75] 西尾亮一, 基研研究会 [場の理論と弦理論] “Virtual Compton Scattering and GPD in gravity dual” 2011/07/26
- [76] 西尾亮一, 日本物理学会年次大会 2012/03/27 “skewedness of GPD in gravity dual” 2012/03/27
- [77] 佐藤亮介, “Non-anomalous Discrete R-symmetry, Extra Matters, and Enhancement of the Lightest SUSY Higgs Mass,” LHC が切り拓くテラスケールの物理、東京大学、2011 年 8 月
- [78] 佐藤亮介, “Sneutrino Inflation with Asymmetric Dark Matter,” 日本物理学会 2011 年秋季大会、弘前大学、2011 年 9 月
- [79] 佐藤亮介, “Focus Point Assisted by Right-Handed Neutrinos,” 2012 年冬の富山、素粒子宇宙論研究会 富山大学、2012 年 2 月
- [80] 寺田隆広, 「モジュライ崩壊によるグラヴィティーノ問題」、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月
- [81] 米倉和也, “N=1 curves for trifundamentals”, 基研研究会「場の理論と弦理論」、京都大学基礎物理学研究所、2011 年 7 月

- [82] 吉永尊洸, "B の物理の現状", 原子核三者若手夏の学校, 滋賀県白浜荘, 2011 年 8 月 20 日
- [83] 吉永尊洸, " $B \rightarrow K\pi$ in Supersymmetry", 日本物理学会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 25 日
- [84] 遠藤基, "GMSB extensions in light of recent Higgs searches", 2012 年冬の富山 素粒子宇宙論研究会, 富山大学, 2012 年 2 月.

招待講演

- [85] 川野 輝彦, "F 理論と大統一理論," Summer Institute 2011、山梨県富士吉田、2011 年 8 月 3 日-12 日
- [86] 川野 輝彦, "F-Theory and Grand Unification," 三者若手夏の学校、滋賀県高島市、2011 年 8 月 16 日-21 日
- [87] 中山和則, "SUGRA 宇宙モデルと large field inflation," 新学術領域シンポジウム、JAXA 宇宙科学研究所、2011 年 7 月 12 日.
- [88] 中山和則, "Phenomenological Aspects of Polonyi /Moduli Problem," Summer Institute 2011、人材開発センター富士研修所、2012 年 8 月 7 日.
- [89] 中山和則, "Reviews on Cosmology : Dark Matter and Radiation," 基研研究会 標準模型を超えた素粒子理論へ向けて、京都大学基礎物理学研究所、2012 年 3 月 20-21 日.
- [90] 遠藤基, "Belle-II での New Physics," B Workshop 2011、福島、2011 年 12 月.
- [91] 遠藤基, "素粒子と暗黒宇宙を結ぶ新しい物理," Workshop on Particle Physics of the Dark Universe、東京大学 IPMU、2012 年 3 月.
- [92] 遠藤基, "Flavor and CP," 基研研究会 標準模型を超えた素粒子理論へ向けて、京都大学基礎物理学研究所、2012 年 3 月.

2 原子核・素粒子実験

2.1 原子核実験グループ

【早野・櫻井】

原子核実験グループは、早野研、櫻井研の二つの研究室で構成され、国内外の加速器を利用して原子核物理の実験的研究を行っている。両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、特別推進研究「エキゾチック原子の分光による基礎物理量の精密測定（2008年度～2012年度）」によって進めている。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、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や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（魔法数の喪失など）、核反応を用いた動的性質の研究を進めている。また、元素合成過程で重要な役割を果たす不安定核の研究にも取り組んでいる。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」で得られる不安定核ビームを利用している。

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 $\ell \sim n+1 \sim 38$ を持つ反陽子がまわる三体系のリドベルグ原子である。この原子の遷移エネルギーをレーザー分光で精密に測ることによって、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。

精密分光にあたり実験データの分解能と精度を制限するのは、原子の熱運動によって引き起こされるスペクトル線のドップラー幅である。2011年度、早野研究室とマックスプランク量子光学研究所の実験グループは、 $\bar{p}\text{He}^+$ に対向する二本のレーザー光線を照射して、深紫外の遷移波長139.8–197.0 nmをもつ三種類の反陽子の非線形二光子遷移をはじめて励起した実験結果について報告した [3]。これにより、ドップラー幅を大幅に減少させて鋭い分光スペクトルを測定して、原子の遷移周波数を $2.3 - 5 \times 10^{-9}$ の精度で求めることに成功した。この結果をJINRのKorobovらによる三体系量子電磁学 (QED) 計算と比較することで、 $M_{\bar{p}}/m_e = 1836.1526736(23)$ と決定したが、これは同等の精度で知られている陽子・電子質量比 M_p/m_e と一致した。

また、実験結果から、陽子と反陽子の電荷と質量の相対的な差は、90%の信頼水準で 7×10^{-10} 以下である事がわかった。一方、陽子と反陽子の質量が同値である（つまり、CPT対称性が成立している）と仮定した上で、本実験結果と科学技術データ委員会 (CODATA) が推奨する陽子の原子質量 $1.00727646677(10)u$ を組み合わせることで、電子の質量を $0.0005485799091(7)u$ と決定した。また、同位体 $\bar{p}^3\text{He}^+$ の超微細構造をマイクロ波分光法で研究した [5]。現在、反陽子ヘリウム原子を $T \sim 1.5 \text{ K}$ まで冷却する事で、さらにレーザー共鳴線の分解能を高めて、実験精度を向上させる努力を行っている。この実験のためにスペクトル線幅の狭い注入同期型固体レーザーを開発した。

反陽子が消滅すると、大量のパイ中間子が放出されるが、これらを高い計数率で測定するシンチレーション検出器と読み出し回路を独自開発した。検出器は、安価な押出成形法で製作した $10 \times 10 \times 1000 \text{ mm}$ 程度の棒状のプラスチックシンチレータを ~ 400 本並べたもので、各々のシンチレータの芯には直径1.2 mmの波長変換ファイバーが埋め込まれている。パイ中間子が検出器を通過する際に発生するシンチレーション光を、ガイガーモードアバランシェ・フォトダイオード (MPPC) で捉えた。読み出し回路は、GHzの周波数帯域をもつ増幅器とApplication Specific Integration Circuit (ASIC)、Field Programmable Gate Array (FPGA) を150 mm程度の小型な基板上に表面実装したもので、従来のものに比べて安価(1/10以下)で多チャンネル化が可能になった (早野)。

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、高エネルギーではその吸収断面積は原子核の幾何学的な面積に比例 ($\sigma_{\text{ann}} \propto A^{2/3}$) することが知られている。反陽子のドブロイ波長が原子核のサイズを越えるような超低エネルギー ($E_p < 100 \text{ keV}$) では、 $A^{2/3}$ からのズレが見えることが予想されるが、これまでこのような超低エネルギー反陽子ビームが存在しなかったため、実験的な検証はなされていない。

我々は、反陽子ヘリウム原子分光などのために開発した反陽子線形減速器を利用して、130 keV での反陽子-原子核吸収断面積測定に着手した。2011 年度は測定に用いる予定である MPPC とプラスチックシンチレータ、波長変換ファイバからなる検出器の性能評価実験を行い、この検出器が十分な性能を持つことを確認した。また、反陽子ビームの時間分解能を上げるためにビームチョッパーを新たに開発し、実際に超低速反陽子ビームを用いて反陽子輸送系の最適化を行った。現在は検出器の読み出し回路の開発と静電四重極トリプレットの開発を行っている。これらを活用し、2012 年 5 月のビームタイムで実際に 130 keV での反陽子-原子核吸収断面積の測定実験を実行予定である (早野・轟)。

2.1.2 CERN の ISOLDE における不安定フランシウム同位体のレーザー分光 (早野研究室)

レーザー分光で、不安定原子核の基底状態の特性を調べる研究を行う。レーザー分光では原子の遷移周波数を高い精度で測定できる。ここでは、原子核の影響による原子の遷移周波数の微小なシフト (10^{-6} 程度) を測定する。このシフトはいくつかの要因で生じ、同位体シフト、超微細構造と呼ばれている。同位体シフトから、同位体間の平均 2 乗荷電半径の差が、超微細構造から、核のスピン、パリティ、磁気双極子モーメント、電気四重極モーメントが求まる。

CERN の ISOLDE で、Manchester, Leuven, Birmingham, Orsay, マックスプランク量子光学研究所、東京 (早野研究室) のグループで構成されている CRIS コラボレーションが、不安定フランシウム同位体を測定するために、Collinear resonant ionization spectroscopy (CRIS) 実験を提案した。実験においては ISOLDE から得られる不安定原子核のイオンビームにレーザーを照射し、遷移周波数を測定する。特に、中性子数が極端に少ない不安定フランシウム同位体では、基底状態のスピン、パリティや原子核の形状がよく分かっていない。過去の α 崩壊実験で、安定核と比べて、基底状態と励起状態が逆転し、大きく変形している兆候が見つかっており、この実験で検証する。

2011 年度は、比較的安定で、生成量の多い同位体の一つの測定に成功した。早野研究室とマックスプランク量子光学研究所では、独自開発したナノ秒チタンサファイヤレーザーを提供した。このレーザー

は、CERN の ASACUSA 実験のレーザーを参考にしており、数 kW の高い出力パワーと 100 MHz 程度の狭い線幅 (レーザー光子のエネルギー広がり) を特徴としている。2012 年度は、中性子数が極端に少なく、生成量の少ない同位体の測定を予定している (早野・小林)。

2.1.3 K 中間子原子の精密分光 (早野研究室)

早野研究室では水素や重水素、ヘリウム等の軽い原子核における K 中間子原子の精密分光実験をイタリアの DAΦNE 及び J-PARC 加速器にて精力的に進行中である。 K 中間子原子の研究において我々は直接の測定が困難である 0 エネルギーでの反 K 中間子-核子あるいは原子核の間に働く強い相互作用についての知見を得る事が出来る。これらの研究は後述する反 K 中間子原子核の問題とも密接な関連を持っている。

DAΦNE における K 中間子原子 X 線の精密測定

イタリアの DAΦNE 電子陽電子衝突型加速器で行われた SIDDHARTA 実験では、電子・陽電子正面衝突で大量に生成した ϕ 中間子の $\phi \rightarrow K^+ K^-$ 崩壊で生じる低エネルギー K^- 中間子を気体標的に静止させることで K 中間子原子を生成し、その遷移 X 線を有効面積 1 cm^2 のシリコンドリフト検出器 (SDD) を 144 個並べる事により検出した。2011 年度においては水素標的及び世界初となる重水素標的の測定データが鋭意解析された。結果として重水素標的データからは K 中間子重水素原子の遷移 X 線事象を同定することは叶わなかったものの、そのスペクトルは水素標的測定のバックグラウンド解析に利用され、その測定精度の向上に寄与した。最終的に、電磁相互作用のみで計算された K 中間子水素原子 $1s$ 準位のエネルギーに対する強い相互作用の効果によるシフト ϵ_{1s} 及び状態の自然幅 Γ_{1s} は

$$\begin{aligned}\epsilon_{1s} &= -283 \pm 36(\text{stat.}) \pm 6(\text{syst.})\text{eV}, \\ \Gamma_{1s} &= 541 \pm 89(\text{stat.}) \pm 22(\text{syst.})\text{eV},\end{aligned}$$

と決定された。今回得られた世界最高精度のシフトと幅は、低エネルギー極限における $\bar{K} - p$ 相互作用の理解のための重要な知見を与える (早野・竜野・施)。

J-PARC における K 中間子ヘリウム 3 原子 X 線の精密測定 (E17)

早野研究室では 2005 年度に K 中間子ヘリウム 4 の精密分光実験 KEK-PS E570 を行い「 K 中間子ヘリウムパズル」として長年問題になっていた理論と実験の不一致を解決した。そして反 K 中間子と原子核間のポテンシャルに関する知見をより完全なもの

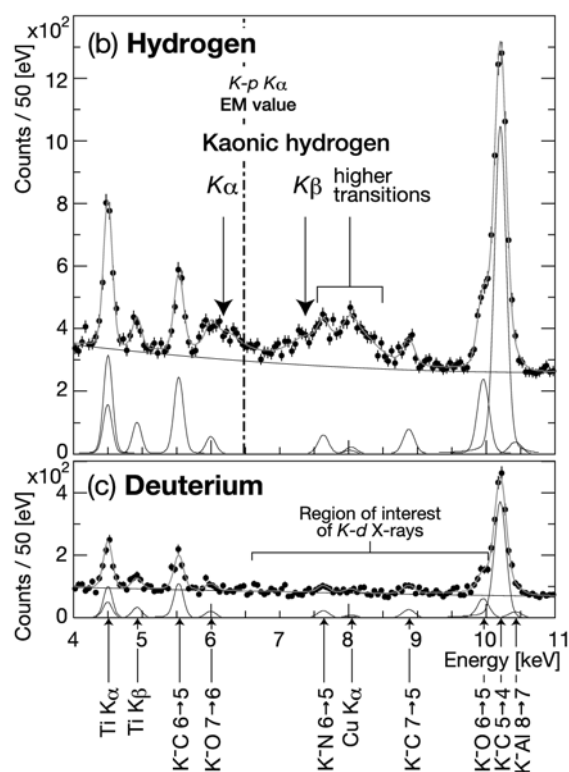


図 2.1.1: 水素と重水素標的の測定で得られた X 線スペクトル (全 SDD のデータ)。水素標的に対しては K_{α} 線が明瞭に観測された (パネル (b)) 一方、 K^{-} 中間子重水素原子の特性 X 線は同定されなかった (パネル (c))。この重水素標的のデータは K^{-} 中間子がカプトン製の気体標的の容器に含まれる酸素と窒素に捕獲される際に発生する X 線バックグラウンドの解析に利用された。

にするため、J-PARC E17 実験において K^{-} 中間子ヘリウム 3 及び K^{-} 中間子ヘリウム 4 の強い相互作用による $2p$ 軌道のエネルギーシフトの差 (同位体シフト) を X 線分光によって決定することを目指している。更には 2012 年 1 月の J-PARC 実験審査会において、 K^{-} 中間子ヘリウム 3 の $2p$ 状態幅を測定することを提案した。我々の使用する X 線検出器 (SDD) の分解能に比べ、 K^{-} 中間子ヘリウム 3 の $2p$ 状態幅は数 eV と極めて小さいと予想されるため、我々はネオジウム (Nd) の L3 吸収端を用いて X 線吸収分光を応用した手法で測定する。

2011 年度は、震災後 J-PARC ハドロンホールへの立ち入りが制限される中、各種検出器の健全性確認から始まった。SDD 及び液体ヘリウム標的は震災前と同様の動作をすることを 2011 年末までに確認した。SDD については、昨年度の続きで応答関数の基礎研究を進め、とくに入射エネルギーに対する応答関数の依存性の測定を行った。2012 年 2 月までには、震災で故障したビーム飛跡検出用のドリフトチェンバーの修理、新調を行い、2 月のビームタイムにおいて E17 で用いる運動量である $0.9\text{GeV}/c$ で震災前と同等の K^{-} 中間子ビームが得られることを確認した。

E17 のデータ取得は先行する反 K^{-} 中間子深束縛核探索実験 (J-PARC E15) の 1st stage が終了次第、速やかに行う予定である (早野・鈴木・佐藤・橋本)。

2.1.4 反 K^{-} 中間子原子核の研究 (早野研究室)

反 K^{-} 中間子が原子核に強い相互作用で束縛された、準安定かつ高密度な「反 K^{-} 中間子原子核」が存在するのではないかという議論が近年活発に成されている。もしもそのような状態が実在するならば、全く新しい形態のハドロン系としてその存在自体が興味深い上に、超高密度核物質の実験的研究への道を拓く事が期待される。

J-PARC における $K^{-}pp/K^{-}pn$ 状態の探索 (E15)

現在実験/理論の両面から精力的な研究が続けられている $K^{-}pp$ 状態の同定を目指し、J-PARC K1.8BR ビームラインにおいて E15 実験を行う。実験では先述の E17 と同一の液体ヘリウム 3 標的を使用し、入射運動量 $1.0\text{GeV}/c$ の (K^{-}, N) 反応によって $K^{-}pp/K^{-}pn$ を生成し、生成時に前方に投射される核子と同時に状態の崩壊で生じる Λ を CDS (Cylindrical Drift-chamber System) を用いて再構成する。

2011 年度においては震災後の復旧を含めた実験準備を進行し、主に前述の E17 との共用部分すなわち CDS、 ^3He 標的及びビームライン検出器の構築を完了し、 $1.0\text{GeV}/c$ の K^{-} ビーム調整を進行した他、その K^{-} ビームを利用して CDS 及び標的の実機の同時運転を行うことにより装置全体の健全性及びトリガーの計数率等を確認した。2012 年度春に前方の核子検出器系の建設を行い、秋には実験の初期フェイ

ズとして 10 kW×3 週程度の物理 run を実行する予定である (早野・鈴木・佐藤・施・橋本)。

2.1.5 深く束縛された π 中間子原子の精密分光 (早野研究室)

今日のハドロン物理学における最重要課題の一つとして、ハドロン質量の核物質中での変化の問題を挙げることが出来る。ハドロン質量はカイラル対称性の自発的な破れのパラメータであるクォーク反クォーク対 ($\bar{q}q$) の真空期待値と密接に関連していることが広く知られている。カイラル動力学の観点からは軽い擬スカラー中間子、即ち π , K は対称性の自発的破れに付随する南部-Goldstone ボゾンとして解釈され、それらの質量は核密度と共に変化すると考えられる $\bar{q}q$ 真空期待値に直接に関係付けられる。必然として高密度の核媒質中では中間子質量の変化が期待されるため、核媒質中での中間子質量、言い換えれば中間子-原子核間の強い相互作用、に関する実験的な情報を得る事でこの問題の最終的な解決に到達することが出来ると考えられる。”深い束縛状態”においては中間子は原子核のごく近傍に位置するかあるいは完全に内部に埋め込まれ、相互作用は短距離で高密度に於いて働くため、それらがもしも観測されれば我々が興味を持っているレンジに於ける相互作用に関する決定的な情報を得ることが出来る。このような状態としては中間子原子及び原子核状態が挙げられるが、現在に至る迄中間子原子核状態が疑問の余地無く明確に同定された例は存在しないため、深く束縛された π 中間子原子は精密分光が実施可能であるという点に於いて極めて重要なプローブである。

($d, {}^3\text{He}$) 反応を用いた π 中間子原子の精密分光

我々は現在理化学研究所の RIBF において、250 MeV/u の重陽子ビームによる ${}^{122}\text{Sn}(d, {}^3\text{He})$ 反応を用いた π 中間子の原子 1s 軌道のエネルギー及びその幅の高精度分光実験を実行している。2011 年度は 2010 年度に行われたパイロット実験の解析を行った。2010 年度までの解析により各検出器が正常に働き、焦点面にやってくる粒子に約 0.1% 含まれる ${}^3\text{He}$ を正確に同定し、軌跡を再構成出来ていることが確認されている。2011 年度はそれらのデータを基に焦点面での ${}^3\text{He}$ の位置スペクトルを求め、イオン輸送系からくる補正を行い、図 2.1.2 にあるような焦点面における ${}^3\text{He}$ の位置スペクトルを得ることができた。これは ${}^{121}\text{Sn}$ 中に束縛された π^- の世界初の観測であり、同時に理化学研究所における実験での初の π 中間子原子の観測となる。さらに今回の実験では、理化学研究所の RIBF が持つ広い角度アクセプタンスによりこれまで観測されて来なかった ($d, {}^3\text{He}$) 反応の断面積の反応角度に対する依存性の観測にも成功した。現在は位置スペクトルの反応の Q 値のスペクトルへの変換、及びさらなる高精度かつ系統的な研究を目指した次期実験の準備を行なっている (早野・伊藤・西)。

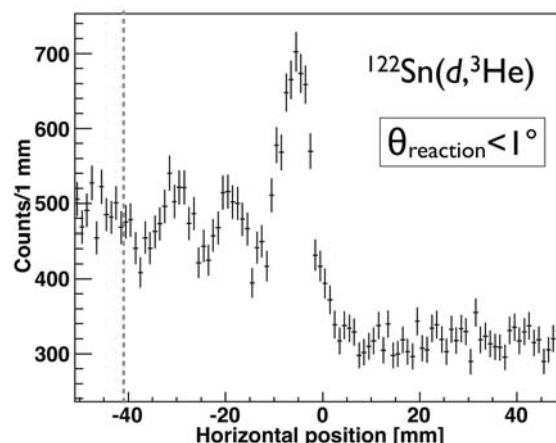


図 2.1.2: 焦点面における ${}^3\text{He}$ の位置スペクトル。焦点面では位置は反応の Q 値と一対一対応しており、点線は π^- の quasi-free production のしきい値を表す。この線より右にあるピークは束縛された π^- に対応し、特に最も右の顕著なピークは ${}^{121}\text{Sn}$ 原子の 1s 軌道に束縛された π^- を表す。

逆運動学を用いた中性子過剰核に対する π 中間子原子の精密分光

今日に至るまでにドイツの GSI や理研 RIBF 施設で行われてきた安定核標的を用いた π 中間子原子の分光では $0.6\rho_0$ (ρ_0 :標準核密度) の近傍の密度でのみカイラル凝縮を研究することが出来る。この π 中間子原子の精密分光の方法を異なった密度におけるカイラル凝縮の研究に適用すべく中性子過剰核 (HI) の π 中間子原子の分光を行うことが考えられ、その生成には逆運動学が有効な手段となる。現在、($d, \text{HI}, {}^3\text{He}$) 反応を用いた π 中間子原子の精密分光実験のセットアップとして、標的を兼ねた重陽子ガスをを用いた TPC (Time Projection Chamber) と積層型 Si の全エネルギー検出器を用いたものを計画している。2011 年度には各々の検出器の必要な性能の評価が終了し、2012 年度には検出器のテスト実験を行う (早野・大河内)。

2.1.6 η' 原子核の研究 (早野研究室)

η' 中間子は、958 MeV/ c^2 という特異に大きな質量を持つ中間子である。これは $U_A(1)$ 量子異常の効果で η' 中間子が真空中のクォーク反クォーク凝縮 (カイラル凝縮) と相互作用する結果と考えられている。原子核中では、カイラル凝縮の大きさが減少するため、この η' 中間子の質量が減少すると予想され、原子核に η' 中間子が束縛される状態 (η' 中間子原子核) の存在が予言されている。そこで我々は、この η' 中間子原子核を探索、分光する実験を行い、 η' 中間子の質量起源を調べることを計画している。

実験はドイツの GSI 研究所において実施する予定

である。 (p, d) 反応により η' 中間子を炭素原子核中に生成し、終状態の重陽子の運動量を磁気スペクトロメータを用いて測定することで η' 原子核のエネルギー準位を調べる。2011 年度は、バックグラウンドの除去に必要なエアロジェルチェレンコフ検出器を開発した。2012 年度は、このチェレンコフ検出器の性能をテストした後に、GSI 研究所で実際のセットアップを用いてパイロット実験を行う予定である (早野・田中)。

2.1.7 ミュオニウム生成標的の研究 (早野研究室)

ミュオニウムとは、正の電荷を持つミュオン (μ^+) 一つと電子一つが束縛された原子様状態で、 μ^+ を物質中に静止させることで生成することが出来る。ミュオニウムはエネルギー準位の精密分光によるミュオンの異常磁気能率といった物理定数の測定対象であるだけでなく、物質内部の磁性を測定する手法である μ SR 法において、特に深さ方向の分解能を要求される場合に活躍する超低速偏極ミュオンビームの生成に利用されるなど、広く応用されている。ミュオンをミュオニウムに転換する物質、すなわちミュオニウム生成標的として、粉末状の酸化物が高い変換効率を持つことが知られている。我々は 2010 年に μ SR 法を用いた測定によってシリカエアロジェルは粉末に匹敵する変換効率を示すことを明らかにした。今年度は標的内部でのミュオニウムの拡散を測定するために、ミュオニウム崩壊で放出される陽電子と、開放される電子の両方の飛跡を捉え崩壊点を結ぶ測定器群を開発し、カナダの TRIUMF 研究所において 2011 年 10 月にビームタイムを取得し測定を行った。その結果は現在解析中である (早野・藤原)。

2.1.8 崩壊分光法による核構造研究 (櫻井研究室)

不安定核の基底状態もしくは長寿命励起準位 (アイソマー) からの β 崩壊および脱励起 γ 放出の観測による核分光を進めている。

β 崩壊は、その機構がよく理解されているため、崩壊の始状態、終状態の核構造を知るための優れた手法である。また、不安定核はその定義からいって、必ず β 崩壊するため、 β 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、2 次反応を用いる核分光法にくらべ、きわめて効率のより実験手段である。安定性から離れた陽子・中性子過剰核を対象とした場合は、 β 崩壊の Q 値が一般に 10~20 MeV 程度と大きいため、 β 線と β 遅発 γ 線の測定だけではなく、遅発陽子・中性子を同時に測定する方法も有効であり、娘核の束縛状態、非束縛状態に関する情報を得ることができる。我々は実験状態に応じた測定方法の考案、必要な検出器の開発を行い、研究を推進している。

中性子過剰な質量数 ~ 110 領域核の分光

2009 年 12 月に RIBF を利用して質量数 ~ 110 の中性子過剰な原子核の崩壊分光を行った。この実験では、核子当たり 345 MeV のウランビームを Be 標的に照射し、BigRIPS で分離された分裂片を ZeroDegree スペクトロメータの最下流に配置されたシリコンストリップストッパーに打ち込んだ。シリコンの周りには BGO アクティブコンプトンシールドを装着した 4 台のクローバー型 Ge 検出器を置き、アイソマーガンマ線およびベータ遅発ガンマ線を測定した。

本年度は、このデータの解析をさらにすすめ、Zr 同位体の変形魔法数 $N=64$ の決定 [8] や ^{110}Mo の三軸非対称性に関する成果 [28] を挙げた (櫻井)。

EURICA を利用した崩壊分光

崩壊分光での γ 線検出効率の飛躍的向上をめざし、欧州研究者の所有するクラスター型 Ge 検出器 12 台を利用した「EURICA コラボレーション」に参画している。2012 年度から 13 年度までの本格データ収集に向け、アクティブシリコンストッパーの準備を進めた [82]。2012 年 3 月のテスト実験では ^{16}N などからのアイソマー γ 線やベータ遅発 γ 線の測定に成功し、アクティブストッパーでのベータ線観測の有実性を実証することができた (櫻井・徐)。

2.1.9 インビーム γ 核分光法による核構造研究 (櫻井研究室)

γ 線核分光は、不安定核の構造研究に有力な実験手段の一つである。適当な核反応で原子核の励起状態を生成し、脱励起する際の γ 線のエネルギーと絶対強度を測定することで、励起準位のエネルギー、スピン・パリティ、遷移強度等の知見が得られる。特に、低励起状態には、原子核の回転や振動運動に対応する 2^+ 、 4^+ 状態、殻構造を特徴づける一粒子状態など、原子核の代表的な励起様式が現れるため、核構造研究の重要な研究対象である。

RI ビームファクトリーで得られる高速不安定核ビームを利用して 2008 年から実験を推進しており、BigRIPS で生成分離されたビームを 2 次標的に照射し、標的周辺のガンマ線検出器で脱励起ガンマ線を観測すると同時に反応生成物を ZeroDegree スペクトロメータで粒子識別し、反応チャンネルを実験的に決定する。対象となる不安定核の種類や得られるビーム強度に応じて、様々な物理量を測定すべく、様々な測定方法、励起方法を用いた研究を行っている。また、より広範囲の原子核を対象とし、多様な物理量を測定すべく、新しい手法の開発も行っている。

N=20~28 の中性子過剰核

中性子過剰な $Z \sim 10$ の原子核は中性子数 $N=20$ の魔法数で大きく変形していることが知られている。同時に $N=28$ でも魔法数の喪失現象が議論されており、 $N=20$ から 28 に至る領域は、核内の有効核力の変化や弱束縛性の効果などから核構造研究のパイロット領域として注目されている領域である。RIBF で得られる高速不安定核ビームを利用して 2008 年からデータ取得を重ねている。本年度は 2010 年末に取得したデータから ^{42}Si の第二励起準位のエネルギーの決定を行い、第一励起準位のエネルギー異常とともに集団性が大きく発達していることを見出した [51] (櫻井)。

LaBr₃ ガンマ線検出器開発

現在、理研では NaI 検出器を利用したクリスタルボールが活用されているが、エネルギー分解能が約 7-8% と劣るため、軽い核や魔法数周辺の偶偶核に研究対象が限定されている。この現状を打破するため LaBr₃ 結晶を利用したガンマ線検出器の開発を進めている。

LaBr₃ 検出器のエネルギー分解能は約 3-4% で Ge 検出器よりは劣るものの、高速不安定核ビームを利用した実際のセットアップを考慮すると標的厚などに起因するドップラー補正の不確定性と同程度である。検出効率も NaI に比べて高く、コンパクトなシステムを構築できる利点もある。時間分解能にも優れ、励起準位の寿命を直接測定することも可能となる。

本年度は、 $15 \times 40 \times 80 \text{ mm}^3$ の結晶を利用した開発研究に着手した (櫻井)。

2.1.10 欠損質量法による核構造研究 (櫻井研究室)

原子核散乱や反応によって原子核の性質を調べる際、終状態にあらわれる研究対象の原子核の質量 (エネルギー) を始状態のビームの四元運動量、標的の質量、終状態の他の粒子の四元運動量の測定から得ることができる。この手法を欠損質量法と呼び、目的の原子核が粒子やガンマ線を放出して直ちに崩壊してしまう場合でも励起エネルギーや運動量移行を決定できるという利点がある。

本年度は、 (p, n) 反応の開発に取り組んだ。

欠損質量法を不安定核の構造研究に適用する際には、逆運動学の条件下で測定が行われる。たとえば、 (p, n) 反応の場合、不安定核 X のビームを水素標的に入射し、目的の原子核 Y を生成する。この際に反跳を受けた中性子を測定することで Y のエネルギースペクトルを得る。

逆運動学による (p, n) 荷電交換反応

核子あたりエネルギー数百 MeV における荷電交換反応は、原子核のスピン・アイソスピン反転励起の強力なプローブである。スピン・アイソスピン反転励起のうち、角運動量移行の小さなガモフテラー遷移 ($\Delta L = 0$) やスピン双極遷移 ($\Delta L = 1$) などの観測においては、一般に反跳が小さいため、逆運動学測定では運動エネルギーの小さな (1 MeV 程度) 粒子を測定しなければならない。荷電交換反応のうち、出射粒子が中性子である (p, n) 反応では、出射粒子が標的中でエネルギーを失わないため、この困難を回避することができる。

我々は、逆運動学による (p, n) 反応の測定のため、2011 年 6 月に理研 RIBF の SHARAQ 実験施設に中性子検出器アレイ WINDS (Wide-angle Inverse-kinematics Neutron Detectors for SHARAQ) を建設した。WINDS の概略を図 2.1.3、2.1.4 に示す。WINDS は、逆運動学 (p, n) 測定装置としては世界最大規模のもので、 $60 \times 10 \times 3 \text{ cm}^3$ のプラスチックシンチレータ (BC408) 59 本が、標的から 180 cm の距離に、実験室系での散乱角領域 $60^\circ \sim 120^\circ$ をカバーするように設置されている。シンチレータの上下端にはライトガイドを通してそれぞれ光電子増倍管 (H7195) が接続され、シンチレータ中の陽子が中性子と衝突してシンチレータが発光する事象を捉えることで中性子を検出する。中性子のエネルギーは飛行時間法で測定し、検出効率は 2 MeV の中性子に対し 36% である。

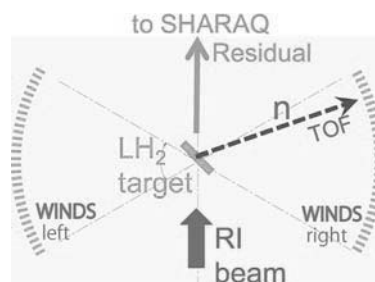


図 2.1.3: Schematic view of the setup of the (p, n) measurement in inverse kinematics.

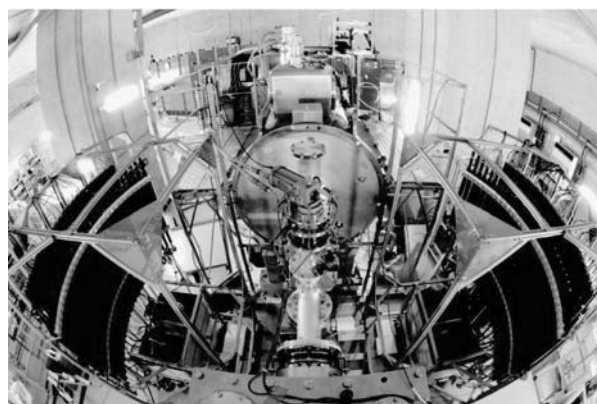


図 2.1.4: A Photo of WINDS.

WINDS を用いた最初の実験として ^{12}Be からの (p, n) 反応の測定を遂行した。 ^{12}Be は中性子数 8 の魔法数の破れが指摘されている典型的な中性子過剰核である。RIBF-BigRIPS で 200 A MeV の ^{12}Be ビームを生成し、14 mm 厚の液体水素標的に照射した。信号雑音比を改善するため、WINDS での中性子検出と同時に反応生成物の B 同位体を SHARAQ スペクトロメタを用いて同定した。得られたスペクトルを図 2.1.5 に示す。図中のローカスは ^{12}B 基底状態への GT 遷移である。低バックグラウンドのスペクトルが得られ、RIBF における逆運動学 (p, n) 測定の手法が確立されたと言える。詳細な解析が進行中である [68] (矢向)。

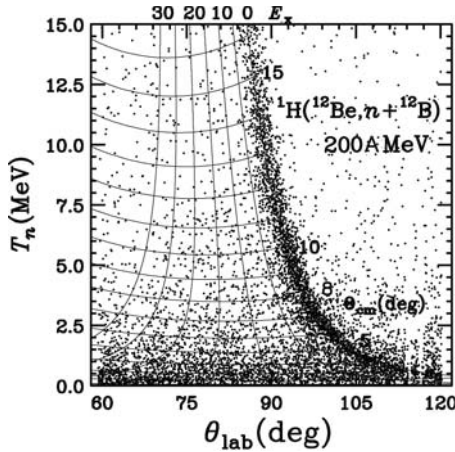


図 2.1.5: Preliminary spectrum of the $^{12}\text{Be}(p, n)^{12}\text{B}$ reaction with tagging of ^{12}B at SHARAQ.

<受賞>

- [1] 橋本直：HUA 修士論文賞, J-PARC ハドロンホールユーザー会 (HUA), 2011 年 6 月 11 日。
- [2] 鈴木大介：the 1st GANIL PhD Award, GANIL, Jan. 23, 2012.

<報文>

(原著論文)

- [3] M. Hori *et al.* : “Two-photon laser spectroscopy of antiprotonic helium and the antiproton-to-electron mass ratio”, *Nature* **475**, 484 (2011).
- [4] G.B. Andresen *et al.* : “Confinement of antihydrogen for 1,000 seconds”, *Nature Physics* **7**, 558 (2011).
- [5] S. Friedreich *et al.* : “First observation of two hyperfine transitions in antiprotonic ^3He ”, *Phys. Lett. B* **700**, 1 (2011).
- [6] M. Bazzi *et al.* (SIDDHARTA collaboration) : “A new measurement of kaonic hydrogen X-rays”, *Phys. Lett. B* **704**, 113 (2011).
- [7] C. Curceanu *et al.* : “Low-Energy Kaon-Nucleon/Nuclei Interaction Studies at DAΦNE (SIDDHARTA and AMADEUS Experiments)”, *Few Body Systems* **50**, 447 (2011).

- [8] T. Sumikama *et al.* : “Structural evolution in the neutron-rich nuclei ^{106}Zr and ^{108}Zr ”, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 202501 (2011).
- [9] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : “Cold Nuclear Matter Effects on J/psi Yields as a Function of Rapidity and Nuclear Geometry in d plus A Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV”, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 142301 (2011).
- [10] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : “Suppression of Back-to-Back Hadron Pairs at Forward Rapidity in d plus Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV”, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 172301 (2011).
- [11] M. Sasano *et al.* : “Gamow-Teller Transition Strengths from ^{56}Ni ”, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 202501 (2011).
- [12] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : “Measurements of Higher Order Flow Harmonics in Au plus Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV”, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 252301 (2011).
- [13] T. Yasunari *et al.* : “Cesium-137 deposition and contamination of Japanese soils due to the Fukushima nuclear accident”, *PNAS* **108**, 19530 (2011).
- [14] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : “Azimuthal correlations of electrons from heavy-flavor decay with hadrons in p plus p and Au plus Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV”, *Phys. Rev. C* **83**, 044912 (2011).
- [15] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : “Identified charged hadron production in p plus p collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ and 62.4 GeV”, *Phys. Rev. C* **83**, 064903 (2011).
- [16] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : “Event structure and double helicity asymmetry in jet production from polarized p plus p collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ and 62.4 GeV”, *Phys. Rev. D* **84**, 012006 (2011).
- [17] T. Yamaguchi *et al.* : “Nuclear reactions of $^{19,20}\text{C}$ on a liquid hydrogen target measured with the superconducting TOF spectrometer”, *Nucl. Phys. A* **864**, 1 (2011).
- [18] S. Sakaguchi *et al.* : “Analyzing power in elastic scattering of ^6He from a polarized proton target at 71 MeV / nucleon”, superconducting TOF spectrometer, *Phys. Rev. C* **84**, 024604 (2011).
- [19] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : “Suppression of away-side jet fragments with respect to the reaction plane in Au plus Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV”, *Phys. Rev. C* **84**, 024904 (2011).
- [20] Y. Togano *et al.* : “Resonance states in P-27 using Coulomb dissociation and their effect on the stellar reaction $^{26}\text{Si}(p, \gamma)^{27}\text{P}$ ”, *Phys. Rev. C* **84**, 035808 (2011).

- [21] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : “Production of omega mesons in p plus p, d plus A. Cu plus Cu, and Au plus Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV”, Phys. Rev. C **84**, 044902 (2011).
- [22] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : “Heavy-quark production in p plus p and energy loss and flow of heavy quarks in Au plus Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV”, Phys. Rev. C **84**, 044905 (2011).
- [23] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration) : “J/psi suppression at forward rapidity in Au plus Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV”, Phys. Rev. C **84**, 054912 (2011).
- [24] A. Ozawa *et al.* : “One- and two-neutron removal reactions from $^{19,20}\text{C}$ with a proton target”, Phys. Rev. C **84**, 064315 (2011).
- [25] Y. Satou *et al.* : “Invariant Mass Spectroscopy for the Neutron Rich Nuclei”, J. Korean Phys. Soc. **59**, 1467 (2011).
- [26] K. Tshoo *et al.* : “Measurement of Unbound Excited States of ^{24}O ”, J. Korean Phys. Soc. **59**, 1529 (2011).
- [27] H. Sakurai : “Present Status and Perspectives of RIBF”, J. Korean Phys. Soc. **59**, 1569 (2011).
- [28] H. Watanabe *et al.* : “Development of axial asymmetry in the neutron-rich nucleus ^{110}Mo ”, Phys. Lett. B **704**, 270 (2011).
- [29] Z.X. Cao *et al.* : “Recoil proton tagged knockout reaction for ^8He ”, Phys. Lett. B **707**, 46 (2012).
- [30] M. Takechi *et al.* : “Interaction cross sections for Ne isotopes towards the island of inversion and halo structures of Ne-29 and Ne-31”, Phys. Lett. B **707**, 357 (2012).
- (会議抄録)
- [31] M. Sato *et al.* : “Precision Spectroscopy of Kaonic Helium-3 X rays at J-PARC”, J. Phys. Conf. Ser. **312**, 022020 (2011).
- [32] H. Shi : “Kaonic helium X-ray measurement in the SIDDHARTA experiment”, J. Phys. Conf. Ser. **312**, 022021 (2011).
- [33] T. Hashimoto *et al.* : “Performance Evaluation of Silicon Drift Detectors for a Precision X-ray Spectroscopy of Kaonic Helium-3”, J. Phys. Conf. Ser. **312**, 052009 (2011).
- [34] Y. Shimizu *et al.* : “SAMURAI project at RIBF”, J. Phys. Conf. Ser. **312**, 052022 (2011).
- [35] K. Todoroki, T. Kobayashi and M. Hori : “Development of Beam Profile Monitor for Antiproton Annihilation Cross Section Measurements by the ASACUSA Collaboration”, J. Phys. Conf. Ser. **312**, 082042 (2011).
- [36] Y. Ichikawa *et al.* : “Proton-rich nuclear structure and mirror asymmetry investigated by beta-decay spectroscopy of ^{24}Si ”, J. Phys. Conf. Ser. **312**, 092031 (2011).
- [37] K. Tshoo *et al.* : “The first 2^+ excited state of ^{24}O ”, J. Phys. Conf. Ser. **312**, 092059 (2011).
- [38] K. Todoroki *et al.* : “Beam profile monitor for annihilation cross section measurements of antiprotons at 100 keV”, Hyperfine Interact. online only (2011).
- [39] M. Sato *et al.* : “Precision Spectroscopy of kaonic helium-3 X-rays”, AIP Conf. Proc. **1374**, 216 (2011).
- [40] T. Hashimoto *et al.* : “Precision Spectroscopy of Kaonic Helium-3 X-rays at J-PARC”, AIP Conf. Proc. **1388**, 580 (2011).
- [41] T. Nishi : “The first precision measurement of deeply bound pionic states in ^{121}Sn ”, Proceedings for 5th International conference on Fundamental Physics Using Atoms 2011, p.51.
- [42] K. Todoroki and M. Hori : “Beam profile monitor for Antiproton-nucleus annihilation cross section measurements”, JINST **7**, C02052 (2012).
- [43] T. Nishi : “A pilot experiment for the precise spectroscopy of pionic atoms with $4\times 10^{11}/\text{s}$ deuteron beam at RIBF”, RIKEN Accelerator Progress Report 2010, p.24.
- [44] S. Itoh : “Beamline optics for pionic atom spectroscopy at RIBF”, RIKEN Accelerator Progress Report 2010, p.221.
- (学位論文)
- [45] 伊藤聖 : “Precision spectroscopy of deeply bound states in the pionic ^{121}Sn atom”, 早野研博士論文, 2011.
- [46] 野地俊平 : “Development of a new spectroscopic tool for spin-isospin responses by the exothermic charge-exchange reaction”, 早野研博士論文, 2011.
- [47] 西隆博 : “Analysis of detectors in precise spectroscopy of pionic atom with (d, ^3He) reaction”, 早野研修士論文, 2011.
- <学術講演>
- (国際会議)
- ポスターセッション
- [48] K. Todoroki : “Development of a Beam Profile Monitor for Antiproton Annihilation Cross Section Measurements by ASACUSA Collaboration”, LEAP 2011, Vancouver (Canada), April 28, 2011.
- [49] K. Todoroki : “Development of a Beam Profile Monitor for Antiproton Annihilation Cross Section Measurements by ASACUSA Collaboration”, PSD 9, Aberystwyth (Wales), Sep. 14, 2011.
- [50] Y.K. Tanaka : “Development of an Aerogel Cherenkov Counter for Spectroscopy of η' Mesic Nuclei”, SNP School 2012, Sendai (Japan), Feb. 15, 2012.

一般講演

- [51] S. Takeuchi *et al.* : “Spectroscopy on ^{42}Si via two proton removal reaction”, Advances in Radioactive Isotope Science ARIS 2011, Leuven (Belgium), May 30, 2011.
- [52] S. Itoh : “Precision Spectroscopy of Pionic Atom at RIKEN-RIBF”, XIV International Conference on Hadron Spectroscopy, Munich (Germany), June 14, 2011.
- [53] T. Hashimoto : “Status of E17 (Kaonic helium atom x-rays)”, Korea-Japan workshop on nuclear and hadron physics at J-PARC, Seoul (Korea), Sep. 22, 2011.
- [54] T. Nishi : “The first precision measurement of deeply bound pionic states in ^{121}Sn ”, The 5th International conference on Fundamental Physics Using Atoms – Towards better understanding of our matter universe, Osaka (Japan), Oct. 9, 2011.
- [55] Y.K. Tanaka : “Report on aerogel Cherenkov detector”, η' in medium workshop, Giessen (Germany), Feb. 7, 2012.
- [56] T. Nishi : “The first precision measurement of deeply bound pionic states in ^{121}Sn at RIKEN RIBF”, The 4th Yonsei-Tokyo Joint Workshop, Seoul (Korea), Feb. 17, 2012.

招待講演

- [57] R.S. Hayano : “Hadronic Atoms”, 10th International Conference on Low Energy Antiproton Physics, Vancouver (Canada), April 27, 2011.
- [58] H. Sakurai : “Spectroscopy on exotic nuclei at RIBF”, Advances in Radioactive Isotope Science ARIS 2011, Leuven, (Belgium), June 1, 2011.
- [59] H. Sakurai : “Highlights and future plans at RIBF”, Nordic Conference on Nuclear Physics 2011, Stockholm (Sweden), June 17, 2011.
- [60] R.S. Hayano : “20 years of antiprotonic helium”, International Conference on Exotic Atoms and Related Topics – EXA2011, Vienna (Austria), Sep. 5, 2011.
- [61] H. Sakurai : “New results and future plans at RIBF”, International Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2011 (ISPUN11), Hanoi (Vietnam), Nov. 23–28, 2011.
- [62] H. Sakurai : “Quantum Jump in Nuclear Physics with RIBF – recent results and future plans –”, DAE Symposium on nuclear physics 2011, Visakhapatnam (India), Dec. 26–30 2011.
- [63] R.S. Hayano, “Kaonic Atoms”, Strangeness Nuclear Physics 2012, Tokai (Japan), Feb. 13, 2012.
- [64] R.S. Hayano : “Testing fundamental symmetries using the spectroscopy of exotic atoms”, The 4th Yonsei-Tokyo Joint Workshop, Seoul (Korea), Feb. 17, 2012.

- [65] R.S. Hayano : “Testing fundamental symmetries with antiprotons”, Workshop on Perspectives of Fundamental Physics, Heidelberg (Germany), March 30, 2012.

(国内会議)

一般講演

- [66] 橋本直 : “K 中間子 He 原子の X 線精密分光実験に用いるシリコンドリフト検出器の性能評価 (IV)”, 日本物理学会秋期大会, 弘前大学, 2011 年 9 月 16 日.
- [67] 西隆博 : “(d, ^3He) 反応を用いた π 中間子原子の精密分光 (5): $4 \times 10^{11}/\text{s}$ 重陽子ビームを用いたパイロット実験 2”, 日本物理学会秋期大会, 弘前大学, 2011 年 9 月 16 日.
- [68] 矢向謙太郎 : “SHARAQ でのスピン-アイソスピン実験”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 弘前大学, 2011 年 9 月 16 日.
- [69] H. Shi : “Precision spectroscopy of kaonic atom x rays at DAFNE with silicon drift detectors in SIDDHARTA (VI)”, 日本物理学会秋期大会, 弘前大学, 2011 年 9 月 18 日.
- [70] 藤原裕也 : “シリカエアロジェル標的を用いたミュオニウム生成実験”, 第 4 回「Muon 科学と加速器研究」, 大阪大学 RCNP, 2012 年 1 月 12 日.
- [71] 田中良樹 : “Spectroscopy of η' Mesic Nuclei with (p,d) Reaction”, 2011 年度「多彩なフレイバーで探る新しいハドロン存在形態の包括的研究」領域研究会, 大阪大学吹田キャンパス, 2012 年 2 月 21 日.
- [72] 佐藤将春 : “K 中間子 He 原子の X 線精密分光実験に用いるシリコンドリフト検出器の性能評価 (V)”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 24 日.
- [73] 小林拓実 : “不安定 Fr 同位体の同位体シフトと超微細構造の測定のためのレーザーの開発”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 25 日.
- [74] 早野龍五 : “Introduction to “20 years of antiprotonic helium”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 25 日.
- [75] 田中良樹 : “ η' 核分光実験のための粒子識別用エアロジェルチェレンコフ検出器の開発”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 25 日.
- [76] 藤原裕也 : “J-PARC ミュオン g-2/EDM 精密測定のためのミュオン源開発 シリカエアロジェル標的のミュオニウム生成効率と拡散のイメージング測定 2”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 25 日.
- [77] 轟孔一 : “超低エネルギー反陽子の原子核吸収断面積測定”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 27 日.
- [78] 橋本直 : “K 中間子 ^3He 原子の X 線分光実験における Nd 箔を用いた 2p 幅精密測定”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 27 日.
- [79] 伊藤聖 : “理研 RIBF におけるパイ中間子錫 121 原子の分光実験”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 27 日.

- [80] 西隆博：“(d, ^3He) 反応を用いた π 中間子原子の精密分光 (6): $4 \times 10^{11}/\text{s}$ 重陽子ビームを用いたパイロット実験 3”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 27 日.
- [81] 大河内公太：“(d(HI, ^3He) 反応による π 中間子原子分光の検討”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 27 日.
- [82] 徐正宇： “Recent development of RIKEN β -counting system for EURICA experiment”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 27 日.

招待講演

- [83] 櫻井博儀： “RIBF での最近の成果と今後”, HPCI 戦略プログラム分野 5 研究会「大規模計算による原子核研究の展開」, 和光, 2012 年 1 月 24 日.
- [84] 櫻井博儀： “RIBF で展開する原子核物理学の最前線”, 東京工業大学グローバル C O E 「ナノサイエンスを拓く量子物理学拠点」公開シンポジウム, 大岡山, 2012 年 2 月 21 日.

(セミナー等)

- [85] H. Sakurai： “Nuclear Physics with RIBF”, DST-SERC School on Modern trends in nuclear structure and dynamics, Indian Institute of Technology, Feb. 23, 2012.

2.2 駒宮研究室

まさに、素粒子物理は革命前夜である。世界高エネルギーの陽子・陽子相互衝突型加速器 LHC が稼働を始め、TeV (10^{12} 電子ボルト) のエネルギースケールでの新粒子・新現象を直接実験できる時代がきた。2011 年度には LHC でヒッグス粒子の兆候を観測し、その質量は 120-130 GeV の付近に制限された。将来はこれに続く電子・陽電子衝突のリニアコライダー ILC(図 2.2.1) を建設し、精密実験によって LHC での粒子の発見を物理の原理に高めていくことになる。

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である。前の実験である CERN の電子陽電子コライダー LEP-II での OPAL 実験では、素粒子の世代数を 3 と決定し、電弱相互作用と強い相互作用のゲージ原理をを決定的にするなどの成果を挙げた。これらの成果を踏まえて、LEP の次の世代の電子・陽電子コライダーである国際電子陽電子リニアコライダー ILC 計画の推進をその中心となっていく。特にナノスケールの精度を持つ「新竹ビームサイズモニター」の開発研究を行ない、KEK の ATF2 において実証実験を行なっている。さらに ILC での実験の検討を行なっている。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、粒子検出器の開発研究をおこなっている。粒子検出器開発においては超冷中性子の重力での束縛量子状態の測定と新たな近接力の探索、中国北京の高能研において新たに建設された低いエネルギーの電子陽電子コライダー BEPC-II における BES-III 実験の TOF 測定器の開発を行ない、BES-II のデータ解析を行ってきた。

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

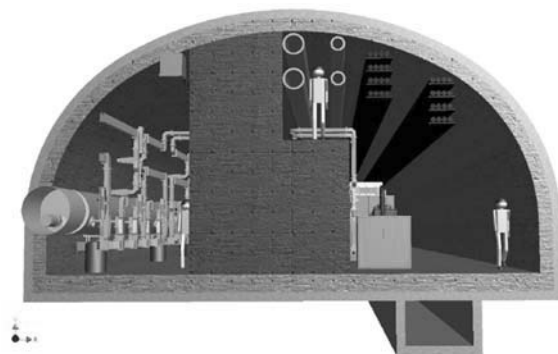


図 2.2.1: ILC 計画

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、技術開発を進めてきた。7 年前から ICFA (International Committee for Future Accelerators) ではリニアコライダーを国際的に推進する体制を整えた。2004 年 8 月には国際的に主線形加速器の加速技術を超電導加速空洞を用いることを決定し、2007 年 3 月には ICFA に基礎設計書が提出されプロジェクトは国際的に大きく進展した。2012 年末には技術設計書を作成することになっており、LHC での初期の物理結果によってはすぐに建設できるような体制を整え、わが国に国際リニアコライダー ILC を誘致するべく、全国の研究者と共に努力を重ねている。

一方、LEP のデータは電弱統一ゲージ理論の正しさを圧倒的な精度で検証したのみならず超対称性の正しさを示唆している。この理論では 130 GeV 以下の質量を持った軽いヒッグス粒子の存在を予言しており、また超対称性粒子が TeV 以下の質量領域で存在する可能性が高く、LHC での実験と相補い合う形でのリニアコライダーでの実験が極めて急務である。特に LHC でこれらの新粒子や新物理の兆候が見えれば ILC 計画には拍車がかかる。本研究室はリニアコライダーでの物理・測定器の研究を行ってきた。ILC での実験の測定器では荷電粒子と中性粒子をバランス良く測定し、ハドロンジェットのエネルギーを正確に測定するためには、半径が大きい測定器が極めて有利である。このような測定器のコンセプトを国際的に詰めてきた。本研究室は更に、ILC の加速器自体の研究開発にも参加してきた。具体的には KEK の ILC 開発テスト加速器 ATF2 において、レーザー干渉を用いた新竹ビームサイズモニターや、超高精度ビームポジションモニターの開発を行なっている。本研究室の駒宮は ICFA 及び ILCSC (International Linear Collider Steering Committee) において KEK の鈴木機構長とともにわが国の代表である。

ATF2

ILC の最終収束系には、(i) 主線形加速器で高いエネルギーに加速された電子・陽電子ビームを極めて細く絞り込むための、四極磁石等を組み合わせて構

築する最終収束系システムの開発と、(ii) 電子ビームと陽電子ビームを確実に衝突させるためのビーム軌道制御技術の確立が必要である。

KEK の先進加速器試験装置 (ATF) を拡張し、最終収束系システムを実証するための研究施設 (ATF2) を建設してきた。ILC で採用される局所色収差補正を基礎とした収束原理の実証を初めて行なう実験で、ILC の Scaled down model として 2008 年の終りからビームコミッショニングを進めている。プロジェクトでは目標を二段階に分けて設定している。初期の目標は、 10^{10} 個の電子を縦 37nm の非常に狭い空間に閉じこめ、極微のビームサイズを実現することである。その上で、ビーム軌道を 2nm の精度で制御するのが次期の目標となる。上記の技術が確立されれば、電子と陽電子を高い頻度で衝突させることを可能とする。研究室では、電子ビームのサイズや軌道を正確に求めるためのモニタの開発と、軌道を一定に保つためのフィードバックシステムの研究を進めている。

ATF2 は日本が主導する計画だが、アメリカやアジア、ヨーロッパの多数の国々が参加した国際共同研究として進めている。

ATF2 仮想衝突点ビームサイズモニター (新竹モニタ) の開発研究

ATF2 の仮想衝突点において収束した極小のビームを測定するビームサイズモニターとして、新竹モニターと呼ばれるモニターを研究開発している。

新竹モニターは、電子ビームに直交する平面上にレーザー干渉縞を作り、干渉縞をプローブとしてビームをスキャンすることでビームサイズを測定するビームサイズモニターである。干渉縞上で磁場強度の山の位置に電子ビームがある時、モニター後方に置いた γ 線検出器で測定されるコンプトン信号量は多くなり、谷の位置では少なくなる。ビーム位置に応じたコンプトン信号量の変調から、ビームサイズを算出することが可能である。このようなビームサイズ測定方式は新竹積氏によって提唱され、FFTB プロジェクトでは波長 1064nm のレーザーを用いてビームサイズ 65nm の測定に成功した。

新竹氏の研究からの変更は、より小さい 37nm のビームサイズを測定するために二倍高調波を使い波長 532nm のレーザーを生成する点、ビームを固定したままでのサイズ測定を可能にする光学遅延の導入、水平方向のビームサイズ測定にも対応する様にレーザーワイヤーとして使うことも可能にした点、シグナルに比較して高エネルギーのバックグラウンドに対応するための多層構造の γ 線検出器の導入などである。

現状と展望

年度初めは震災からの復旧と並行に、レーザー光学系の監視システムを立ち上げ、主要バックグラウ

ンドを抑制する中間コリメータを追加するなど、様々なハードウェア改良を施した。秋から再開した連続ビームランでは安定にビームサイズを測定し、ビーム収束に貢献してきた。取得した貴重なデータをもとに最新ステータスを正確に反映する系統・統計誤差を評価した。シグナルジッターの抑制とレーザー系の安定化だけでなく、測定分解能の改善も定量的に検証された。当時は測定状況が厳しかったのにもかかわらずこの性能上昇は特筆すべきである。そして年明けには既に ATF2 の目標 37nm に近いビームサイズを測る最もアドバンスされた光学系モードで信号を検出でき、凡そ 100nm のビームサイズを測定できた。今後、37nm に向けて収束されていく極細なビーム特有の誤差に対抗して、更なる長時間の測定安定性及び高いシグナル分解能が要求される。また、新竹モニタは単なる R&D から運転モードの「新時代」に移りつつある。これらを視野に入れながら徹底的なメンテナンスとハードウェア改良を重ねていく必要がある。更に、新竹モニタは ILC の初期ビームラインの立ち上げに必須な nm 分解能ビームサイズモニタの強い候補である。ATF2 の目標達成後は、本場 ILC での適用できる設計を提唱する予定である。ATF2 で検証されるビーム収束技術は直接 ILC の最終収束系で適用され、新竹モニタは ATF2 の最も注目されている要素の 1 つである。

2.2.2 UCN 実験

超冷中性子はその運動エネルギーが物質のフェルミポテンシャルよりも小さい時、物質表面で全反射する。そして、全反射する床と重力のポテンシャルによって束縛された超冷中性子は、高さ方向に量子化されて存在する。この存在確率は $10 \mu\text{m}$ オーダーの濃淡の分布を持つ。この分布を精密に観測することがこの実験の目標である。また、測定された分布が量子力学による予想と異なった場合、到達距離 $10 \mu\text{m}$ 程度の未知短距離力の探索も可能である。この実験装置は、三つの主要なコンポーネントから構成されている。まず、重力による量子状態の低エネルギー準位のみを通すガラス製のガイドがある。ガイドの床は超冷中性子を全反射し、天井は超冷中性子を吸収するように作られている。次に超冷中性子を反射する拡大円筒がある。ガイドを通過し、量子化された中性子の分布は円筒表面で反射することで拡大される。最後に、CCD ベースの中性子用ピクセル検出器がある。拡大された中性子の分布を表面に蒸着させたホウ素によって荷電粒子に変換し、リアルタイムで測定する。これらの装置によって $1 \mu\text{m}$ 以下の精度で、量子状態の分布を測定することを目指している。

我々は 2009 年度に装置を完成させ測定の準備を終えて、フランスの ILL (Institut Laue-Langevin) においてテスト実験を行った。このテスト実験を踏まえ、実験装置の精度向上をおこなった。新たに、より広い範囲を測定でき数 μm オーダーの位置分解能を持つピクセル検出器を開発し、測定される統計を 2 倍に増やせるようにした。また、分布を明瞭に観測す

るため、拡大円筒の拡大率と精度をあげ、統計を 2.5 倍増やせるようにした。さらに、超冷中性子が空気中を走る区間をヘリウムで置換できるように改良し、これにより統計を 1.6 倍に増やすことができた。

2011 年度は改良された装置を用いて、ILL において新たに量子分布を測定した。拡大円筒をニッケルコーティングしたものと、ガラス面のままのものに対して測定を行い、それぞれ 2009 年度の 10 倍の統計を確保することが出来た。また、拡大円筒を使わない実験も行い、拡大機構が設計通り機能していることを確認した。現在は、重力による量子効果を取り入れた解析を行っている。

超冷中性子の重力による量子状態を観測するための測定器を開発している。

まず、超冷中性子を平滑な床と吸収体の天井を持つガイドに通す。超冷中性子は床の上で重力による量子状態を作る。高いエネルギー準位の状態は観測の妨げになるため、天井に衝突するような主量子数の高い中性子を吸収体によって取り除く。天井は $0.3 \mu\text{m}$ の粗さを持つ。このため、天井に衝突した中性子の水平方向の速度を鉛直方向の速度に変えて、反射回数と吸収確率が飛躍的に増加する。吸収体は、ガラス基板に中性子を吸収する合金を蒸着して作製した。この合金は中性子に対するポテンシャルが小さくなるようにしてある。

ガイドを通ってきた中性子を、超冷中性子が物質表面で全反射するという性質を利用して、円筒の曲面によって中性子の分布を 20 倍程度に拡大する。ランダムな反射を防ぐため、円筒面は中性子の波長以上に精密に研磨した。また、浅い角度で衝突させることでより早い中性子も反射することが出来るようにした。

拡大された分布を測定するために、CCD をベースとし、リアルタイム測定可能なピクセル検出器を開発した。電荷を持たない中性子を CCD によって検出するために、コンバータとの核反応によって、中性子を荷電粒子に変換する必要がある。高い位置分解能を維持するために、 ^{10}B の中性子コンバータ膜を CCD 受光面に直接蒸着した。コンバータ膜の厚みは、検出効率と位置分解能に対して最適化されている。このピクセル検出器は超冷中性子に対して 40% の高い検出効率を持ち、位置分解能は約 $3 \mu\text{m}$ であることが確かめられている。

中性子ガイド、拡大機構、CCD 検出器を組み合わせることで、中性子の高さ分布をサブミクロンの精度で測定可能な装置を開発した。

2.2.3 LHC での物理解析

我々が長年探索し続けてきたヒッグス粒子や超対称性粒子を発見出来る時代が迫っている。LHC は CERN の世界最高エネルギーの陽子陽子衝突の加速器である。2010 年 3 月に重心系エネルギー 7 TeV での実験が開始された。わが国は汎用測定器の ATLAS 実験に参加している。本来、 e^+e^- コライダーでの実験の方が LHC のようなハドロンコライダーでの実験よりも事象や実験環境がクリーンであり、バックグ

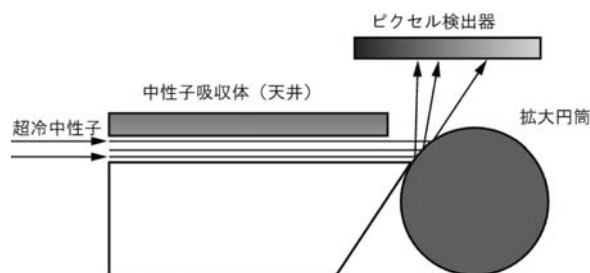


図 2.2.2: 実験セットアップ概念図

ラウンドも非常に低いですが、先にも述べた通り円形加速器ではシンクロトロン放射によるエネルギー欠損が大きく e^+e^- 衝突ではリニアコライダー以外の解はない。一方、陽子は重いので殆んどシンクロトロン放射を出さないで高いエネルギーまで加速できる。これが LHC の有効性であるが、陽子どうしの衝突は、陽子が複合粒子なので実験はバックグラウンドが高く且つ放射線レベルが高いので難しい。ATLAS 実験はこのような困難を克服して TeV スケールの重要な物理を発見できるように設計され建設された。本学の素粒子物理国際研究センターを中心として物理解析の準備を進めてきた。LHC での最も重要な物理は、素粒子の質量の起源とされるヒッグス粒子の発見と、重力も含めた相互作用の超統一にとって不可欠な超対称性の発見である。ヒッグス粒子は LHC での探索によって質量範囲が 120-130 GeV 程度に狭められ、発見も間近い。特に質量ピークが明確に見える $\gamma\gamma$ に崩壊するモードが有望である。超対称性粒子に関しては、強い相互作用で生成されるグルーオンやクォークの超対称性パートナーが大量に生成されると期待されているが、特に、トップやボトムクォークの超対称性パートナーが軽い可能性が高いのでこれらを集中して探索している。更に、エネルギーフロンティアの実験では、従来の理論では全く予期されない発見の可能性もあり期待できる。

ヒッグス粒子の探索

標準理論で予言されるヒッグス粒子が存在し、その質量が 110-150 GeV である場合、2 photon に崩壊するモードが強い発見感度をもつ。このモードではヒッグスの崩壊先の粒子の全 4-momentum が測定できることから、2 photon の invariant mass 分布にヒッグスの質量に鋭いピークが現れることが特徴の一つである。2011 年のデータ (衝突エネルギー 7 TeV, ルミノシティ 4.9 fb^{-1}) を解析したところ、このヒッグスのピークの候補が 126.5 GeV 付近に現れた (図 2.2.3)。候補のピークが背景事象と consistent である確率を表す p0-value は、このモードでは 2.8σ , look elsewhere effect を考慮すると 1.5σ であった。さらに 113-115 GeV および 134.5-136 GeV の領域が、95% confidence level で exclude された。このようにヒッグス発見への期待が大変に高まっている。2012 年度には LHC は衝突エネルギー 8 TeV で運転し、ルミ

ノシティ 15 fb^{-1} 程度のデータを取得する予定である。もし標準理論で予言されるヒッグス粒子が存在しなければ、110-130 GeV の全領域を exclude 可能な見通しである。

ATLAS 検出器による超対称性粒子の解析

現在、質量 $126 \text{ GeV}/c^2$ 付近にヒッグス粒子存在の兆候が見られているが、素粒子標準模型ではパラメータ間に驚くべきファインチューニングがなければ、ヒッグス粒子質量は発散し、有限の質量のヒッグス粒子が得られないことが知られている。この問題を解決する有力な理論が超対称性理論であり、そこでは各粒子に超対称パートナーが存在することが予言させている。特に、標準理論において重いトップクォークの超対称性パートナー（スカラートップクォーク）は逆に他の超対称性粒子よりも軽くなることが予測されており、その発見の期待が高まっている。

2011 年までに得られたデータを用い、ヒッグス粒子の質量を与える自然な理論のパラメータから予測されるモデルにおいてスカラートップクォーク対生成探索を行った。ここで予測される信号は最も軽い超対称性粒子が検出器で検出されることなく逃げることによる消失エネルギーとスカラートップクォークの崩壊から生じるボトムクォークである。これらの信号を頼りに探索を行ったが、得られたデータは標準模型からの予測に矛盾がなく、その結果、スカラートップクォークの質量において $300 \sim 400 \text{ GeV}/c^2$ （モデル及びパラメータに依存）以下の領域が棄却された。

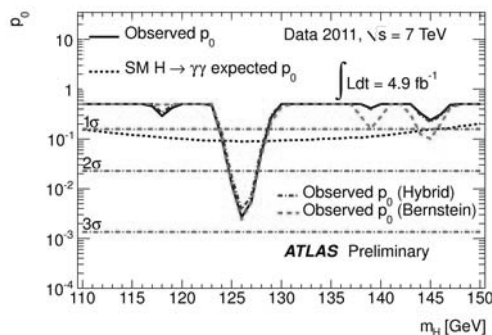


図 2.2.3: $H \rightarrow \gamma\gamma$ モードによって測定されたヒッグス粒子の p_0 -value

2.2.4 BES 実験

Beijing Spectrometer(BES) 実験は中国・北京の高エネルギー研究所 (IHEP) にある Beijing Electron-Positron Collider(BEPC) で行われている、高エネルギー電子・陽電子衝突実験である。1989 年より BES-I 実験、次いで 1996 年から BES-II 実験が行われた。BEPC の

ビームエネルギーは 1.5 GeV から 2.8 GeV である。BEPC は c -クォークと τ レプトンの物理に特化した加速器である。本研究室では CP の破れを探索した。2008 年には加速器は BEPC-II に upgrade し、ビームエネルギー 1.89 GeV でピークルミノシティを $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に増強しつつある。実験装置も性能を更に向上させた BES-III 実験に移行した。BES-III 実験では 1 年間に 10^9 の J/ψ 粒子を得ることが計画され、これまでの実験結果よりさらに精度の高い結果が得られると期待される。本研究室では、BES-III 実験に向け新たな TOF システムの構築を IHEP、USTC とともに担当してきた。また、BES-II 実験の解析では $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ 過程を用いて CP の破れを探索した。

<受賞>

- [1] 山口洋平 高エネルギー物理学研究者会議・第一回測定器開発優秀修士論文賞, 2011 年 9 月

<報文>

(原著論文)

- [2] OPAL Collaboration, G.Abbiendi et al. : "Determination of α_s Using OPAL Hadronic Event Shapes at $\sqrt{s} = 91\text{-}209 \text{ GeV}$ and Resummed NNLO Calculations", Euro.Phys.J. C71 (2011) 1733
- [3] BESIII Collaboration, M.Ablikim et al. : "Evidence for ψ' Decays into $\gamma\pi^0$ and $\gamma\eta$ ", Phys.Rev.Lett. 105 (2010) 261801
- [4] BESIII Collaboration, M.Ablikim et al. : "First Observation of the Decays $\chi_{cJ} \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0\pi^0$ ", Phys.Rev. D83 (2011) 012006
- [5] BESIII Collaboration, M.Ablikim et al. : "Measurement of the Matrix Element for the Decay $\eta' \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ ", Phys.Rev.Lett. 104 (2010) 132002
- [6] BESIII Collaboration, M.Ablikim et al. : "Evidence for ψ' Decay into $\gamma\pi^0$ and $\gamma\eta$ ", Phys.Rev. D83 (2011) 12003
- [7] BESIII Collaboration, M.Ablikim et al. : "Confirmation of the $X(1835)$ and Observation of the Resonances $X(2120)$ and $X(2370)$ in $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-\eta'$ ", Phys.Rev. D83 (2011) 012006
- [8] BESIII Collaboration, M.Ablikim et al. : "Study of $a_0^0(980)$ - $f_0(980)$ Mixing", Phys.Rev. D83 (2011) 032003
- [9] BESIII Collaboration, M.Ablikim et al. : "Study of χ_{cJ} Radiative Decay into Vector Mesons", Phys.Rev. D83 (2011) 012005
- [10] BESIII Collaboration, M.Ablikim et al. : "Observation of χ_{c1} Decay into Vector Mesons Pairs $\phi\phi$, $\omega\omega$, and ω/ϕ ", Phys.Rev.Lett. 107 (2011) 092001
- [11] BESIII Collaboration, M.Ablikim et al. : "Search for CP and P Violating Pseudoscalar Decays into $\pi\pi$ ", Phys.Rev. D84 (2011) 032006

- [12] BESIII Collaboration, M.Ablikim *et al.* : " $\eta\pi^+\pi^-$ Resonant Structure around 1.8 GeV/ c^2 and $\eta(1405)$ in $J/\psi \rightarrow \omega\eta\pi^+\pi^-$ ", Phys.Rev.Lett. 107 (2011) 182001
- [13] Jaqueline Yan *et al.*, "Measurement of Nanometer Scale Beam Size by Shintake Monitor (IPBSM)", ICFA Beam Dynamics NewsLett. 54 (2011) 80-95
- [14] ATF Collaroration, J. Alabau-Gonzalvo *et al.*, "ATF2 Summary and Status", ICFA Beam Dynamics NewsLett. 54 (2011) 62-80
- [15] J. Yan, M.Oroku *et al.* : "Shintake Monitor, Nanometer Beam Size Measurement and Beam Tuning" Technology and Instrumentation for Particle Physics 2011
- [16] Y. Yamaguchi, M.Oroku, J. Yan *et al.* : "Current Status of Nanometer Beam Size Monitor for ATF2" Technology and Instrumentation for Particle Physics 2011, June 2011, Chicago, USA
- [17] ATLAS Collaboration: "Search for supersymmetry in pp collisions at $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ in final states with missing transverse momentum and b-jets", Phys. Lett. B701 (2011) 398-418
- [18] ATLAS Collaboration: "Search for scalar bottom quark pair production with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 7\text{ TeV}$ ", Accepted by Phys. Rev. Lett., arXiv:1112.3832
- [19] Y. Arimoto, ..., Y. Kamiya, *et al.*: Longitudinal-gradient magnet for time focusing of ultra-cold neutrons, Physics Procedia bf 17, 20-29 (2011)
- [20] T. Yoshioka, ..., S. Komamiya, Y. Kamiya, *et al.*: Polarization of very cold neutron using a permanent magnet quadrupole Nucl. Instr. Meth. A bf 634, S17-S20 (2011)
- (会議抄録)
- [21] Yohei Yamaguchi, "Shintake Monitor in ATF2: Performance Evaluation", To appear in Proceedings of International Linear Collider Workshop 2010, Beijing, China, 26-30 March 2010
- [22] Koichi Murase *et al.*, "Using Single Photons for WIMP Searches at the ILC", To appear in Proceedings of International Linear Collider Workshop 2010, Beijing, China, 26-30 March 2010
- [23] Takashi Yamanaka, "Shintake Monitor in ATF2: Present Status", To appear in Proceedings of International Linear Collider Workshop 2010, Beijing, China, 26-30 March 2010
- [24] J. Yan *et al.* : "IPBSM Status and Plan" 12th ATF2 Project Meeting (& LCWS 2011), Sep 28 2011, Granada
- [25] Yohei Yamaguchi: "Current Status of Nanometer Beam Size Monitor for ATF2", Proceedings of the Technology and Instrumentation for Particle Physics 2011, 11 Jun
- [26] J. Yan *et al.* : "IPBSM Status and Plan" 13th ATF2 Project Meeting, Jan 12 2012, KEK, Tsukuba
- [27] J. Yan *et al.* : "IPBSM: Status and Systematic Errors" FJPPL-FKPPL Workshop on ATF2 Accelerator R&D, March 19-20 2012, LAL, Orsay
- [28] J. Yan *et al.* : "IPBSM: Issues on Beam Stability and Statistical Errors" FJPPL-FKPPL Workshop on ATF2 Accelerator R&D, March 19-20 2012, LAL, Orsay
- (国内雑誌)
- [29] 駒宮幸男, 「高次元ブラックホールと LHC 実験」, 数理学 No.580 (2011) 31
- [30] 駒宮幸男, 「物理っておもしろい」 だけでは済まされない, パリティー Vol.26 No.07 (2011) 57
- (学位論文)
- [31] 園田 真也 : 「Measurement of Form Factors and Search for CP Violation in the Process $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ at the e^+e^- Collider BEPC」, 博士論文 (東京大学大学院理学系研究科), 2012 年 1 月
- [32] 山中隆志 : 「Searches for Supersymmetric Partners of Top and Bottom Quarks in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7\text{ TeV}$ 」, 博士論文 (東京大学大学院理学系研究科), 2012 年 3 月
- [33] Jaqueline Yan : 「Measurement of Nanometer Electron Beam Size with Laser Interference Using Shintake Monitor」, 修士論文 (東京大学大学院理学系研究科), 2012 年 3 月
- [34] 南雄人 : 「重力場における超冷中性子の量子状態観測のための基礎研究」, 修士論文 (東京大学大学院理学系研究科), 2012 年 3 月
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [35] T. Yamanaka for the ATLAS Collaboration: "Search for supersymmetry in events with missing transverse momentum and at least one b-jet candidate in 7 TeV pp collisions with the ATLAS detector", PLHC2011, June 2011, Perugia, Italy
- [36] T. Yamanaka for the ATLAS Collaboration : "Search for supersymmetry in final states with b-jets and missing transverse energy with the ATLAS detector", SUSY11, August 2011, Batavia, USA
- [37] J. Yan *et al.* : "IPBSM Status and Plan" 12th ATF2 Project Meeting (& LCWS 2011), Sep 28 2011, Granada
- [38] M.Oroku : "IPBSM: plans and strategy to make the IPBSM operational reliable" ATF project meeting, KEK, Tsukuba, Japan, 2012 Jan
- [39] J. Yan *et al.* : "IPBSM Status and Plan" 13th ATF2 Project Meeting, Jan 12 2012, KEK, Tsukuba

- [40] J. Yan *et al.* : “IPBSM: Status and Systematic Errors” FJPPL-FKPPL Workshop on ATF2 Accelerator R&D, March 19-20 2012, LAL, Orsay
- [41] J. Yan *et al.* : “IPBSM: Issues on Beam Stability and Statistical Errors” FJPPL-FKPPL Workshop on ATF2 Accelerator R&D, March 19-20 2012, LAL, Orsay

招待講演

- [42] Sachio Komamiya, “Higgs Physics”, 10th ICFA Seminar, Oct 3-6 2011, CERN

(国内会議)

一般講演

- [43] 山中隆志 : 「LHC-ATLAS 実験におけるボトムジェットを用いたスカラートップクォークの探索」, 日本物理学会 (2011 年 9 月), 弘前大学, 青森
- [44] 山口洋平: 「レーザー干渉型電子ビームサイズモニタ」, 日本物理学会 (2011 年 9 月), 弘前大学, 青森
- [45] ジャクリン ヤン : 「新竹モニタによるナノメートルビームサイズ測定」, 日本物理学会 (2011 年 9 月), 弘前大学, 青森
- [46] 山中隆志 : 「LHC-ATLAS 実験におけるボトムジェットを用いたスカラートップクォークの探索」, 日本物理学会 (2012 年 3 月), 関西学院大学, 西宮
- [47] 山口洋平: 「LHC-ATLAS 実験における二光子に崩壊するヒッグス粒子の探索 (2)」, 日本物理学会, (2012 年 3 月), 関西学院大学, 西宮
- [48] ジャクリン ヤン : 「新竹モニタによるレーザー干渉を用いたナノメートル電子ビームサイズ測定」, 日本物理学会 (2012 年 3 月), 関西学院大学, 西宮

招待講演

- [49] 駒宮幸男 : 「質量の起源と素粒子実験」, シンポジウム「質量の起源と階層性」, (2012 年 1 月) 福岡タワー
- [50] 駒宮幸男 : 「巨大加速器が解明する素粒子と宇宙の謎」, 東京大学エグゼクティブ・マネージメント・プログラム (2011 年 5 月) 東京大学
- [51] 駒宮幸男 : 「巨大加速器が解明する素粒子と宇宙の謎」, 東京大学エグゼクティブ・マネージメント・プログラム (2011 年 12 月) 東京大学

2.3 衰輪 研究室

衰輪研究室では、「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 PANDA – 原子炉ニュートリノモニター

国際原子力機関 (IAEA) は核兵器不拡散条約 (NPT) に基づき、世界各地の原子力関連施設において査察活動をはじめとした保障措置を行っている。現在の査察は、原子炉から放出される中性子や使用済み核燃料の放射能をモニタリングすることで行われており、査察機関と査察対象国双方にとって負担が大きい侵襲的な方法であることが課題となっている。

そこで現在、非侵襲的なモニタリング方法として反電子ニュートリノの検出技術に応用するための研究が世界の複数のグループにより進められている。原子炉内で発生する反電子ニュートリノを捉えることで、原子炉の運転状況を外部から把握することが目的である。ニュートリノは透過性が極めて高く、また代替のニュートリノ源を用意することが困難であることから、原子力関連施設の監視に大きな威力を発揮するものと期待されている。

我々のグループは、原子炉モニタリングを目的とする可搬性の反電子ニュートリノ検出器 PANDA (Plastic Anti-Neutrino Detector Array) の開発をおこなっている。PANDA は不燃性のプラスチックシンチレータを使用しているため、可燃性の液体シンチレータを使用している他の研究グループの原子炉ニュートリノ検出器と比べ安全面で優れている点が大きな特長である。原子力発電所の敷地内において原子炉モニタリング測定をおこなう際には高い安全性が求められるため、この特長は大きなメリットとなる。また PANDA のもう一つの特長として、トラックに積載して移動ができるように設計されている点が挙げられる。同一の検出器を用いて複数の原子炉のニュートリノ測定をおこなうことができるため、燃料組成比の異なる核燃料を使用している複数の原子炉に設置することで、それぞれの原子炉におけるニュートリノスペクトルの違いを観測することが可能であると考えている。

PANDA の構造は、10cm×10cm×100cm の棒状プラスチックシンチレータを縦横に 10 本×10 本の計 100 本を積み重ね、その間にガドリニウム含有フィルムを挟み込むものである。原子炉で発生する反電子ニュートリノ ($\bar{\nu}_e$) がプラスチックシンチレータ中に含まれる陽子 (p) と反応すると、逆 β 崩壊により陽電子 (e^+) と中性子 (n) が発生する。陽電子はシンチレータにエネルギーを落としながら短距離を移動し、その後シンチレータ中の電子と対消滅して 2 本の γ 線を放出する。一方、中性子はシンチレータ中で繰り返し散乱しエネルギーを十分に失った後、ガドリニウム含有フィルムに含まれるガドリニウムによって吸収され、そのときに合計約 8MeV の γ 線を

放出する。陽電子と中性子によるこの 2 つの信号の時間差は平均 60 μ s 程度であり、この時間差を利用することでバックグラウンドの影響を大きく排除して反電子ニュートリノを検出することができる。

2011 年度は、2010 年度に開発したプラスチックシンチレータ 16 本を用いた第 1 次プロトタイプ検出器である lesser PANDA を用いて試験的な測定をおこなった。測定は中部電力浜岡原子力発電所において、2011 年 3 月上旬から開始した。浜岡原子力発電所 3 号機の炉心から約 40m の位置に lesser PANDA 検出器をトラックに積載した状態で設置し、原子炉の非稼働 (OFF) から稼働 (ON) への遷移に伴うニュートリノフラックスの変動の観測を目的として測定を開始した。しかし 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災の影響で総理大臣による運転停止要請が出たため、浜岡原子力発電所 3 号機は稼働せず、結果として 2011 年 5 月中旬まで 2ヶ月間のバックグラウンド測定を行うこととなった。この測定では原子炉の ON/OFF に伴うニュートリノフラックスの変動を測定することは出来なかったが、定期的なデータ回収作業を除くと、2ヶ月間の無人運転が可能であること、バックグラウンドの変動が十分に小さいことが確認できた。



図 2.3.1: 第 2 次プロトタイプ検出器 PANDA36

lesser PANDA の浜岡原子力発電所での測定終了後、プラスチックシンチレータを 36 本用いた第 2 次プロトタイプ検出器 PANDA36 の開発をおこなった (図 2.3.1)。PANDA36 の開発にあたっては、lesser PANDA で得られた知見をいかして複数の改善がなされた。lesser PANDA ではプラスチックシンチレータとライトガイドの接着面に気泡が入ったり、光電子増倍管とライトガイドの接着が弱くばねで支える構造が必要であるなどの問題点があったが、PANDA36 では接着方法の変更によりこれらの問題が改善した。接着部分の強度の改善により、プラスチックシンチレータを 1 本ずつ遮光することが可能になり、検出器本体構造の大幅な簡略化が実現した。またデータ取得回路についても見直しをおこない、lesser PANDA と比べ複雑なコインシデンスをとることが可能になった。またコインシデンス設定値やゲート幅などをオンラインで変更できるようにするなど、原子力発電

所敷地内での無人測定に適したデータ取得回路を設計した。



図 2.3.2: トラックに積載した状態で関西電力大飯発電所に設置された PANDA36

完成した PANDA36 は関西電力大飯発電所の 2 号機近傍に輸送され、2011 年 11 月中旬から 2012 年 1 月中旬までの 2ヶ月間測定をおこなった (図 2.3.2)。原子炉は 2011 年 12 月中旬に定期検査入りしたため、原子炉稼働中 (ON) と停止中 (OFF) それぞれ 1ヶ月間ずつのデータを取得した。両者を比較した結果、ニュートリノ由来だと思われる差が確認された。一方でバックグラウンドの大多数が宇宙線起源の高速中性子による事象であると解明し、高速中性子バックグラウンド事象とニュートリノ事象を判別する手法を確立した。

今後は今回プロトタイプで得られた知見を生かし、さらに一回り大きい検出器を作成して地上での原子炉ニュートリノのさらに明確な観測を目指す。具体的には水タンクによる高速中性子の遮蔽、MPPC を活用した安価な active shield などを検討している。

2.3.2 Sumico, アクシオンヘリオスコープ実験

強い相互作用の理論である量子色力学 (QCD) には実験事実と反して CP 対称性を破ってしまう問題、強い CP 問題があることが知られている。アクシオン (axion) 模型はこの問題を解決するものとして期待されているが、それには模型が予言する擬南部ゴールドストーンボソンであるアクシオンの発見が不可欠である。しかし、今のところこの素粒子はいかなる実験、観測によっても発見されていない。アクシ

オンは小さい質量を持った中性擬スカラーボソンであり、物質や電磁場とはほとんど相互作用しないと考えられている。

我々は太陽由来の太陽アクシオンを捉えるために、高エネルギー加速器研究機構の山本明教授と共同で中心磁場 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) を開発した。この装置は、太陽起源のアクシオンを磁場領域で光子へと変換 (逆ブリュワ変換) し、その光子を PIN フォトダイオードで捉えるものである。また、磁場領域に He ガスを導入することで質量を持ったアクシオンに対して感度を持たせることができる。これまでの観測ではアクシオン由来と考えられる有意な事象は捉えられていないが、アクシオンの質量として $m_a < 0.27 \text{ eV}$ 、 $0.79 \text{ eV} < m_a < 1.00 \text{ eV}$ という範囲でアクシオンと光子の結合定数に対して $g_{a\gamma\gamma} < 5.6 - 17.9 \times 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$ という上限値を得ることに成功している。現在は質量 1 eV 以上のアクシオン探索を行うべく、実験装置の改修を行い、測定準備をしている。

2.3.3 Hidden photon 探索実験について

標準模型の諸問題を解決する手段の一つとして新たな対称性、特に $U(1)_h$ 対称性を導入する方法が考えられるが、対応するゲージボソンとして Okun が提唱した hidden photon が挙げられる。Hidden photon は物質と直接相互作用しない粒子だが、ニュートリノ振動のようにその質量 $m_{\gamma'}$ 、飛距離、エネルギー、媒質密度、hidden photon と光子 (photon) の混合角 χ 等に応じたある確率で光子に振動、転換する性質を持つ。現在までに世界中で種々の hidden photon の探索実験、考察が行われてきたが発見されていない。

本研究では太陽が強力な光源であると同時に hidden photon 発生源であることに着目して、数 eV のエネルギーの太陽 hidden photon の探索実験を検討し hidden photon 探索測定を行ってきた。Hidden photon 検出装置は hidden photon が光子に転換する真空容器、転換光子を集光するための放物面鏡、集光された光子を検出するための光検出器 (浜松ホトニクス製 PMT (R3550P)) で構成される。また、測定の際には検出装置を太陽に向ける必要があるがこれを実現するために既存の装置である東京アクシオンヘリオスコープに本検出装置を搭載し、その太陽追尾システムを利用する手段を用いている (図 2.3.3 参照)。

以下に本年度の研究実績をまとめる。

太陽内部からの hidden photon flux の修正

Hidden photon 探索は太陽追尾測定時とバックグラウンド測定時における single photon like なイベントのカウントレートの差を求めることで行う。2010 年度に行った測定では検出頻度に有意な差が見られなかったため hidden photon イベントの上限値を決

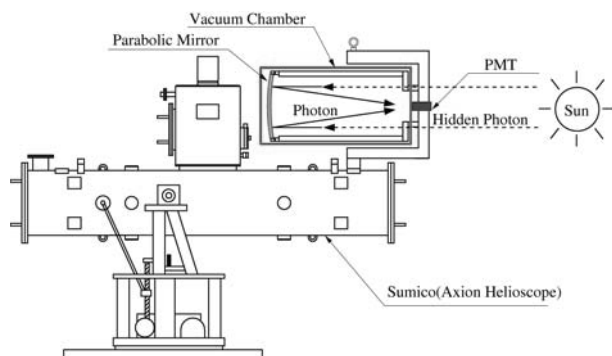


図 2.3.3: hidden photon 探索装置の模式図

定し、PMT の検出効率等を考慮することで photon と hidden photon との混合角 χ の上限値を決定した。

このとき太陽からの hidden photon flux は 2008 年に Redondo が行った見積りを用いていた。しかし 2012 年に Redondo が太陽内部からの hidden photon flux についてより詳細な見積りをし、我々が検出を目指している可視光領域のエネルギーをもった hidden photon については 2008 年時の見積りより 2 桁以上大きな flux があることがわかった。

これを用いて再び photon と hidden photon との混合角 χ の上限値を決定した。混合角 χ の上限値は hidden photon の質量 m_γ の関数で表され、図 2.3.4 の通りである。

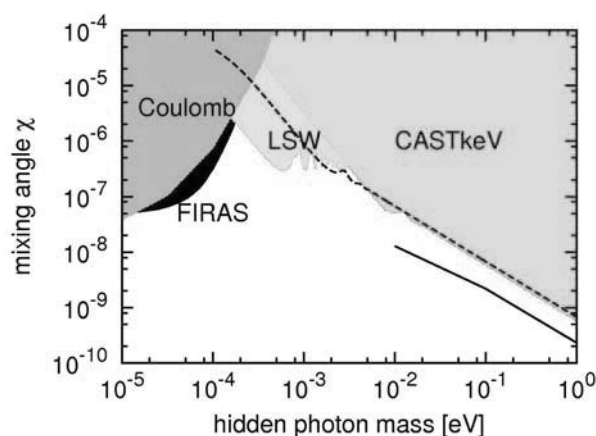


図 2.3.4: 2010 年度における測定により得られた χ の上限値。破線は 2008 年時における hidden photon flux の見積りを、実線は 2012 年に行われた再計算の結果を用いた場合に得られる上限値。塗りつぶされた領域は他グループの実験結果、考察結果によって否定された領域。

バックグラウンドの位置依存性

2010 年度の測定において太陽追尾測定時にはアクシオン望遠鏡を動かしていたが、バックグラウンド測定時にはアクシオン望遠鏡を動かさずに測定を行っており、太陽追尾測定時における測定容器の位置変化による系統誤差が大きかった。

この問題に対し、我々の研究室では光路遮断機を用いた測定手法の確立を目指している。測定時に光路を開放、遮断することで太陽追尾測定およびバックグラウンド測定を同時に行うことを可能にする。この手法を用いればバックグラウンドが測定位置などから与えられる影響を避けることができると期待される。

2.3.4 安価な食物放射能測定器の開発

2011 年に起こった東日本大震災の津波の際の原子力発電所事故による食品の放射能汚染が問題視されている。放射能を計測するためにはシンチレーション検出器やゲルマニウム検出器などが必要となってくるが、現時点での食品放射能測定器は非常に高価なものしか市販されていない。一般家庭における食への不信感を払拭するためには、より安価な放射能測定器が必要不可欠である。

そうした観点から、我々は CsI シンチレータと PIN フォトダイオードを用いた放射能測定器の開発を行っている。 $\phi 25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ の CsI(Tl) シンチレータに $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ の PIN フォトダイオードを接着し、その信号をチャージアンプに通し増幅する。通常であればこの信号をさらにシェーピングアンプで整形しマルチチャンネルアナライザーを介して PC へと取り込んでいくのだが、価格を低減させるために、ここでは USB 接続のデジタルオシロスコープを用いてチャージアンプからの信号を直接 PC へと取り込み、PC 上でデジタルシェーピング及びヒストグラムの作成を行うことにした。PC の高性能化と一般家庭への普及によってこれが可能になっている。これによって、PC を除いて 6 万円弱で構成することが可能になった (図 2.3.5)。

また、放射能測定を行う際には、カウントレートと放射能との換算が必要となってくる。一般に被測定物は、マリネリビーカーと呼ばれる中心にシンチレータを入れるくぼみを備えた容器に詰めることになるが、これによってジオメトリを固定することで放射能の見積もりが可能になる。我々は Geant4 によるモンテカルロ・シミュレーションを行い、このカウントレートと放射能の換算係数を求めていった。また、マリネリビーカーの形状を最適化するために、直径や体積を変化させていった時に効率がどのように変わっていくのかを調べた。

回路やシェーピングアルゴリズムの改良により、現在のところ分解能 11 % (@662 keV) が得られている。これとバックグラウンド・レートの測定によって、検出限界として 30 Bq/L を達成することに成功した。この値は遮蔽などを行わないときの値であり、鉛による遮蔽などを行うことによって検出限界を引

き下げることが可能である。

実際に理学部一号館付近で採取した土を測定した結果、 ^{134}Cs からの 605 keV と ^{137}Cs からの 662 keV は重なって区別ができないが、 ^{134}Cs の 796 keV は分離して見えているため、それぞれの量を個別に見積もることも可能となっている。

今後は性能向上や低価格化を目指した装置のさらなる改良を行なっていく予定である。また、食品の違いによる自己遮蔽の効果なども取り入れる一方で、一般家庭での使用に耐えうるような使いやすいユーザーインターフェイスの開発が必要である。

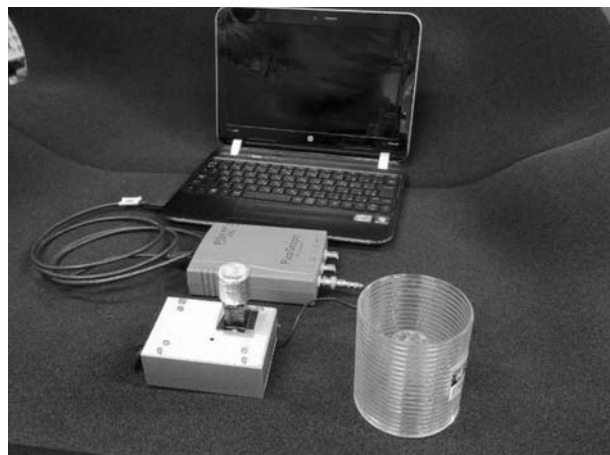


図 2.3.5: 食物放射能測定器

<報文>

(原著論文)

- [1] R. Ohta, Y. Akimoto, Y. Inoue, M. Minowa, T. Mizumoto, S. Moriyama, T. Namba, Y. Takasu, A. Yamamoto: The Tokyo Axion Helioscope, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A **670** (2012), 73–78, arXiv:1201.4622v1 [astro-ph.IM].

(会議抄録)

Y. Inoue, Y. Akimoto, R. Ohta, T. Mizumoto, T. Horie, A. Yamamoto, M. Minowa: Tokyo axion helioscope experiment, Proceedings of the XLVIth Rencontres de Moriond, 2011 Electroweak Interactions and Unified Theories, eds. E. Augé, J. Dumarchez, and J. Trân Thanh Vân, pp.395–400.

(学位論文)

- [2] 太田良介: Search for solar axions with mass below 1 eV using coherent conversion of axions into photons, 平成 24 年 1 月博士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻。
- [3] 堀江友樹: hidden sector photon 探索装置の改良、平成 24 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。

- [4] 加藤 陽: 原子炉由来反電子ニュートリノ検出器の開発、平成 24 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。

<学術講演>

(国際会議)

- [5] M. Minowa: Plastic Anti-Neutrino Detector Array (PANDA) at a nuclear power station in Japan, AAP2012(Applied Antineutrino Physics workshop 2011), Technische Universität Wien, Austria, 15 September 2011.
- [6] M. Minowa: Tokyo Axion Helioscope aka Sumico, ASK2011(2011 Axion Search in Korea), Seoul National University, Korea, 12 April 2011.

(国内会議)

一般講演

- [7] 井上 慶 純: Tokyo axion helioscope, RESCEU/DENET 「第 11 回 宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会・‘Dark Energy in the Universe’ サマースクール、熊本県阿蘇郡三愛高原ホテル、2011 年 7 月 25 日。
- [8] 太田良介: 質量 1eV 以上の太陽アクシオン探索、日本物理学会 2011 年秋季大会、弘前大学 2011 年 9 月 16 日。
- [9] 堀江友樹: エネルギー数 eV の太陽 Hidden Photon の探索—検出器の改良、日本物理学会 2011 年秋季大会、弘前大学 2011 年 9 月 16 日。
- [10] 小栗秀悟: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) による原子炉モニタリング [1] 浜岡原子力発電所における予備実験、日本物理学会 2011 年秋季大会、弘前大学 2011 年 9 月 18 日。
- [11] 黒田康浩: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) による原子炉モニタリング [2] 浜岡原子力発電所における実験システムとバックグラウンド測定結果、日本物理学会 2011 年秋季大会、弘前大学 2011 年 9 月 18 日。
- [12] 加藤陽: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) による原子炉モニタリング [3] 検出器の拡張に向けた設計、日本物理学会 2011 年秋季大会、弘前大学 2011 年 9 月 18 日。
- [13] 養輪 眞: Short baseline reactor anomaly and sterile neutrinos、ビッグバンセンター研究交流会、東京大学 2011 年 11 月 17 日。
- [14] 加藤陽: 原子炉由来反電子ニュートリノ検出器の開発、第 18 回素粒子物理国際センターシンポジウム、長野県白馬村 2012 年 2 月 21 日。
- [15] 加藤陽: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) による原子炉モニタリング [1] 検出器の開発と測定実験の概要、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学 2012 年 3 月 25 日。
- [16] 小栗秀悟: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) による原子炉モニタリング [2] PANDA36 による原子炉ニュートリノの測定結果、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学 2012 年 3 月 25 日。

- [17] 黒田康浩: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) による原子炉モニタリング [3] 原子炉近傍におけるバックグラウンドの評価、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学 2012 年 3 月 25 日.
- [18] 鈴木惇也: 安価な食品放射能測定器の開発、日本物理学会 2012 年第 67 回年次大会、関西学院大学 2012 年 3 月 25 日.
- [19] 太田良介: アクシオン望遠鏡を用いた実験について、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学 2012 年 3 月 27 日.
- [20] 堀江友樹: エネルギー数 eV の太陽 Hidden Photon の探索ー検出器の改良量 2、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学 2012 年 3 月 27 日.

セミナー

- [21] 蓑輪 眞: 原子炉ニュートリノモニター、文部科学省 核不拡散・保障措置室、2011 年 6 月 14 日.
- [22] 蓑輪 眞: 宇宙の話、第 96 回 WDC 勉強会、国際協力銀行、2011 年 12 月 8 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)、国立天文台すばる望遠鏡に搭載する超広視野 CCD カメラ(Hyper Suprime-Cam)によるダークエネルギーの研究、茨城県東海村に新しく建設された J-PARC 加速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、米国フェルミ国立加速器研究所でのニュートリノ-原子核反応測定実験(SciBooNE実験)、さらに、将来の研究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 Belle 実験

1999 年から運転を続けてきた KEK の B ファクトリー(KEKB 加速器/Belle 測定器)は、ルミノシティ増強のための高度化作業に伴い、2010 年 6 月 30 日に運転を停止した(図 2.4.1)。現在は、2014 年に予定される Super KEBK ファクトリーの始動まで、これまでに蓄積した約 11 億の B 中間子・反 B 中間子対に代表される高統計データを使って素粒子物理学の喫緊の課題である、標準理論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、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って新物理探索を行う研究を行っている。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約 9 億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 $\tau \rightarrow e\nu\nu\gamma$; 図 2.4.2 参照)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

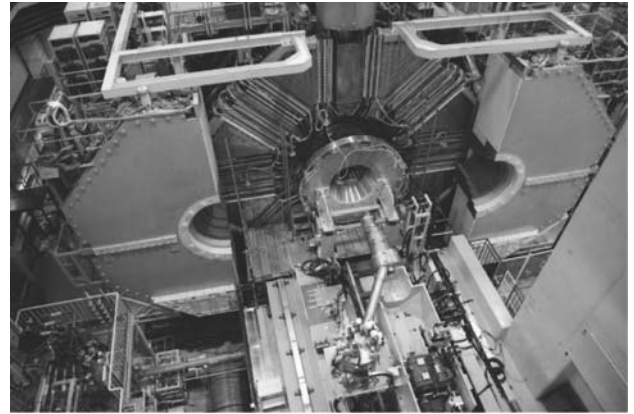


図 2.4.1: 改造するためにビームラインから引き出した Belle 測定器

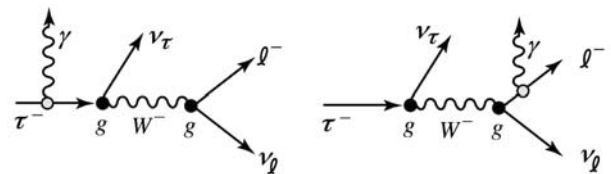


図 2.4.2: タウレプトンの輻射レプトン崩壊の最低次のファインマンダイアグラム

できる。

2.4.2 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、Super KEBK 加速器と Belle II 測定器の建設が進行中である。Super KEBK 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 2.4.3)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。

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。BelleII 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 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。

本研究室は本年度新たに Belle II 用 SVD 検出器(図 2.4.4)の開発・量産を主導することになった。本年度は東京大学 国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研

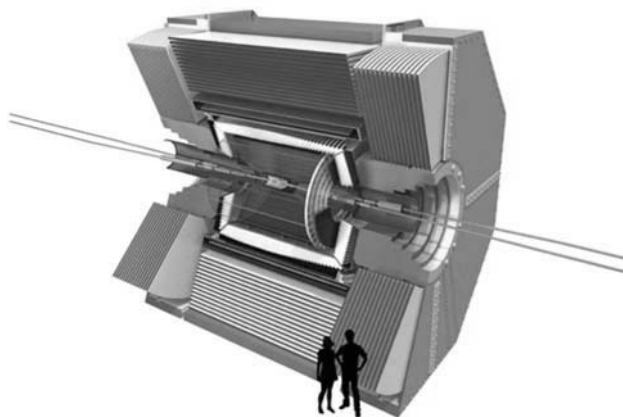


図 2.4.3: Belle II (バルツ) 測定装置の完成予想図

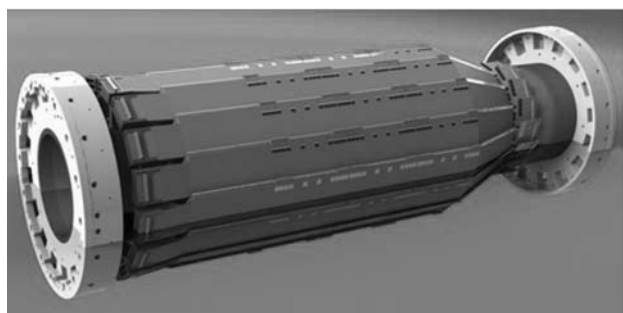


図 2.4.4: 当研究室で製作する、Belle II SVD 測定器の完成予想図

究機構 (Kavli IPMU) と KEK の協力を得て、Kavli IPMU 内に最新設備をもつ実験室を立ち上げ、SVD 検出器のラダーモジュール (図 2.4.5) の量産に向けた組み立て方法の研究開発を始めた。物理解析に必要なとなる崩壊点の位置再構成精度を得るために、ラダーの組立精度は $10\mu\text{m}$ 以下を目指す。また、新たに導入した三次元測定器を用いて量産過程でラダー組立精度を検査することにより、ラダー内センサーのミスアライメントを直接測定して補正することにより更なる崩壊点再構成精度の向上を図る。これにより 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されている $b \rightarrow s$ や $b \rightarrow s\gamma$ などの K_S を含む崩壊モードの検出効率の改善が期待される (図 2.4.6, 2.4.7)。来年度は最外層の SVD 検出器モジュールの量産方法の開発、検証、プロトタイプ製作を行い、本格的な量産体制を整える予定である。

また、本研究室では電子や γ を含む終状態の研究で決定的な役割を果たす電磁カロリメータのアップグレードに向け、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



図 2.4.5: Belle II SVD ラダーモジュールの完成予想図

晶などのシンチレータの試験を行っている。

2.4.3 HSC ダークエネルギー研究

宇宙の全エネルギーのうち、既知の物質はたった 4%であり、残りの 96%のうち 23%がダークマター、73%が現在の理論では説明のつかないダークエネルギーで占められることが明らかになっている。ダークエネルギーの正体は全く不明であり、現代物理学に突きつけられた超難問である。本研究室では、このダークエネルギーの正体の解明をめざして、超広視野深宇宙撮像探査実験計画を推進している。

この計画の遂行のために、本研究室では、国立天文台と共同ですばる望遠鏡の主焦点に設置する超広視野主焦点 CCD カメラ Hyper Suprime-Cam の開発を行ってきた。1.77 平方度の視野を 1.2 ギガピクセルでカバーするこのカメラにより、1500 平方度を非常に深く観測することが可能になり、探査領域に含まれる 1 億個程度の銀河の形状解析から、宇宙の大規模構造により引き起こされる弱重力レンズ効果 (cosmic shear) を測定することによって、ダークエネルギーの性質に制限を課し、その正体に迫ることができる。

図 2.4.8 に、2011 年度にハワイに送られた広視野補正光学システムと CCD カメラを示す。これらは、2012 年度中にすばる望遠鏡に設置され、ファーストライトを迎える予定である。今年度は、昨年度と同様にイメージング解析用プログラム群 (パイプライン) や弱い重力レンズ効果から cosmic shear を抽出する方法の開発などを進めた。さらに、Atacama Cosmology Telescope により発見された遠方 ($z = 0.81$) の巨大銀河団の弱重力レンズ効果の測定を、昨年度にすばる望遠鏡主焦点広視野カメラ Suprime-Cam により取得した撮像データを用いて行った。この際、前述の HSC 用のソフトウェアを用いてデータの 1 次処理 (弱重力レンズ効果を解析する直前までの較正のことをいう) および弱重力レンズ効果測定を行った。その結果、遠方の銀河団にも関わらず重力レンズ信号を検出し、その質量を測定することに成功した。また、この遠方巨大銀河団の存在は Λ CDM 宇宙論モデル

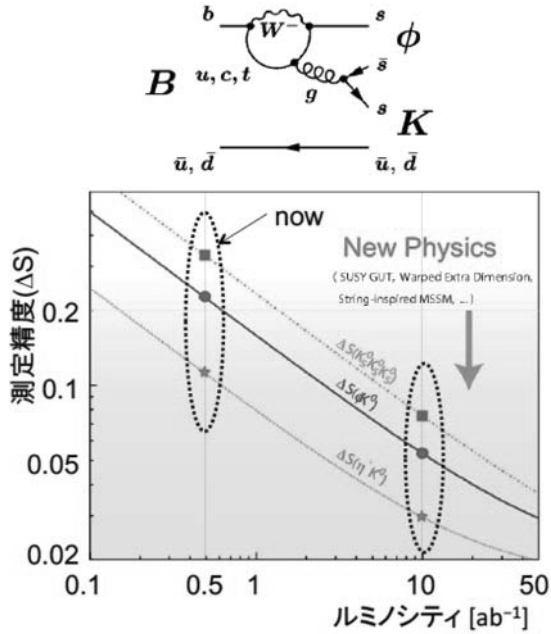


図 2.4.6: $b \rightarrow s$ 崩壊のダイアグラム (上) と Belle II 実験で期待される新物理に対する感度 (下)

と矛盾しないことを示した。本研究は、将来 Hyper Suprime-Cam を用いて $z \sim 1$ までの宇宙論パラメータに制限を課す研究の第一歩となるものである。この結果は、博士論文 [30] にまとめられ、現在投稿論文の準備中である。また、現在提唱されている 1 個の巨大銀河団を用いて Λ CDM 宇宙論モデルを検証する手法に、有限質量を持つニュートリノの効果を考慮に入れる研究も行った。

2.4.4 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、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、過去の実験よりも一桁以上よい感度でのミューニュートリノ消滅現象の精密測定 および 電子ニュートリノの発現現象の発見を狙う。中でも特に、電子ニュートリノ発現現象が観測されれば将来の実験で CP 対称性の破れの探索ができる可能性が高まるため、この測定は世界のニュートリノ研究の将来を決める実験として期待と注目を集めている。

2011 年 3 月 11 日までに取得した 1.43×10^{20} 個の照射陽子 (protons on target) に相当するデータを解析したところ、スーパーカミオカンデで観測したニュートリノ反応事象中に、電子ニュートリノ発現の候補事象を 6 事象観測した。図 2.4.9 に、そのうちの 1 事象のイベントディスプレイを示す。対して、

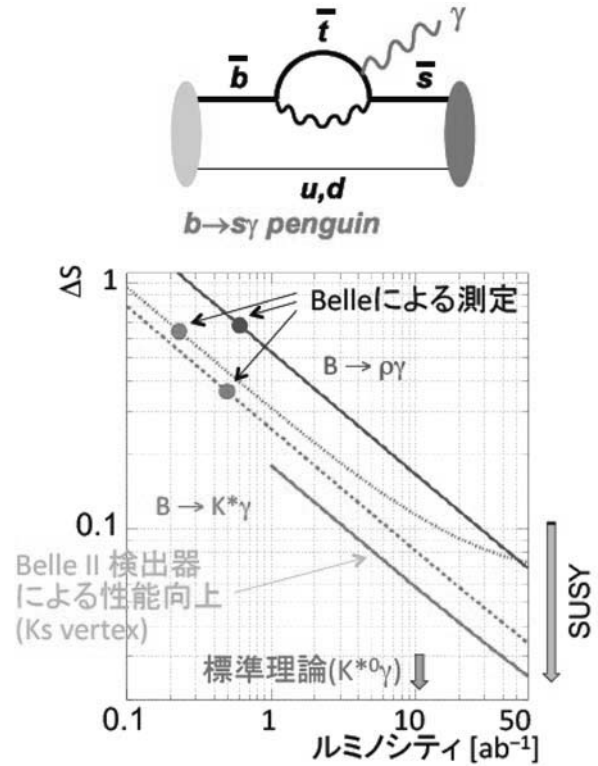


図 2.4.7: $b \rightarrow s\gamma$ 崩壊のダイアグラム (上) と Belle II 実験で期待される新物理に対する感度 (下)。標準理論では $b \rightarrow s(d)\gamma$ 過程からの光子はほぼ左巻きとなり、 CP 非対称度は < 0.02 と予想されている。一方、新物理による右巻きカレントがあると時間に依存した CP 非対称度が現れ、超対称性を仮定したモデルでは 10% 程度の CP 非対称度を预言するものもある。

電子ニュートリノ発現現象がないと仮定した時の背景事象は 1.5 ± 0.3 事象と見積もられ、統計的ふらつきにより 6 事象以上の候補事象が観測される確率は 0.7% であった (図 2.4.10)。2011 年 6 月に発表したこの結果 [18] は、素粒子物理で一般的に新現象が確立したとされるレベルには統計的有意度が満たないものの、電子ニュートリノ発現現象の存在を強く示唆する結果として受け止められ、その後のニュートリノ振動実験の計画に大きな影響を与えている。

また、ミューニュートリノ消滅現象の測定では、やはり 2011 年 3 月 11 日までのデータ中に得た 31 個の候補事象を使って、図 2.4.11 に示す通りニュートリノ振動パラメータに対する制限を得た [19]。この結果は、スーパーカミオカンデでの大気ニュートリノ観測や以前の加速器実験による精度を上回るものではないが、実験初期の結果として、T2K 実験の特徴である、ビームの中心方向をわざとずらすことでニュートリノ振動の研究に最適化されたエネルギー

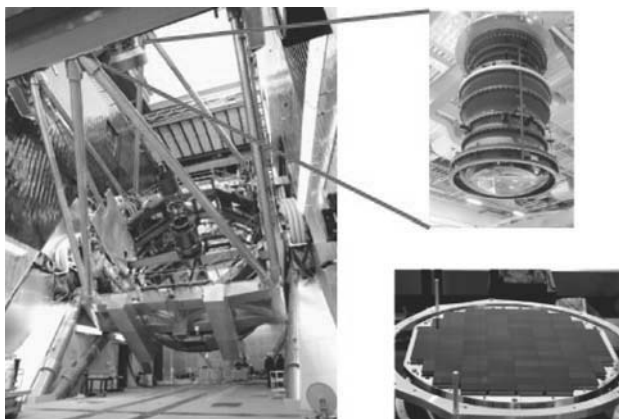


図 2.4.8: 完成した Hyper Suprime-Cam 補正光学システムと CCD カメラ

分布を持つニュートリノビームを作り出す「オフアクシスビーム法」の効果を十分に示しており、今後さらにデータを蓄積すればこれまでよりも一桁高い感度での測定が可能であることを実験的に示すことができたという意味をもつ。

T2K 実験は東日本大震災の影響で中断していたが、J-PARC 加速器・実験施設ともに復旧を終え、2012 年 3 月からデータ取得を再開した。再開後のデータを解析した結果、実験施設・検出装置はすべて震災前と変わらない性能を発揮していることを確認した。今後はさらにデータを蓄積し、電子ニュートリノ発現現象の確立、ニュートリノ振動パラメータの精密測定を目指す。さらに、本研究室では T2K 実験の拡張として反ニュートリノのビームを用いた実験計画の立案を行っている。

長基線ニュートリノ振動実験では、ニュートリノを検出装置内の物質と反応させ、生成された粒子を観測することでニュートリノの研究を行うため、ニュートリノと原子核の間の反応断面積の理解が重要であり、その不定性が系統誤差の主要な要因の一つとなっている。特に、ニュートリノ-原子核反応で生成された π 中間子は、標的原子核中で核力による散乱を受ける確率が大きく、その影響で終状態を誤認することがバックグラウンドの一つの要因となる。我々は π 中間子-原子核散乱の不定性を抑えることが将来の精密測定に重要であることにいち早く気づき、T2K 実験の関連実験として、カナダ TRIUMF 研究所で π 中間子と原子核の散乱断面積測定実験を行っている。この実験では、1.5 mm 角のシンチレーションファイバー 1024 本を標的兼検出器として用い、周りを NaI シンチレータで囲うことで $\pi^\pm$ の荷電交換反応による π^0 からの γ 線も捕まえられる構造とし、主に $\pi^\pm$ の原子核による吸収反応と荷電交換反応の断面積を測定しようとしている。データ収集は 2010 年と 2011 年の 2 回にわたって行い、現在データ解析を進めている。

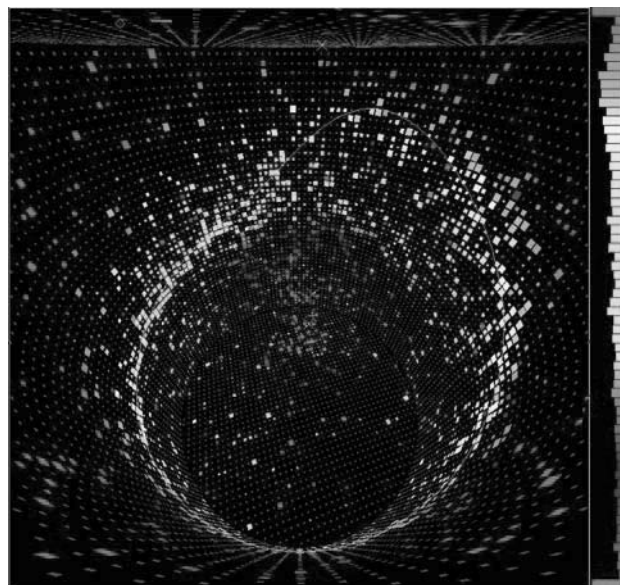


図 2.4.9: T2K 実験で、加速器ニュートリノビームによるニュートリノ反応によって生成された粒子がリング状に放つチェレンコフ光が、スーパーカミオカンデ検出器の内壁一面に取付けられた光電子増倍管で捉えられた様子を図示したもの。ミューオンニュートリノがニュートリノ振動によって変化した電子ニュートリノによる反応事象の候補。四角ひとつひとつが光電子増倍管を表し、大きさは検出された光の量を、色はそれぞれの光電子増倍管に信号が検出された時間を表す。

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計画

T2K 実験の最も大きな目標である電子ニュートリノ発現事象が観測され、ニュートリノ 3 世代間の振動が全て確立した場合、次の大きな目標はニュートリノ (レプトン) で CP 対称性 (粒子-反粒子間の非対称性) が破れているかどうかを確かめることである。クォークの CP 非対称性は、 B ファクトリーをはじめとする各種の実験で詳細に調べられているが、ニュートリノを含むレプトンでは実験的には全く未知の領域である。 CP 非対称性の測定をするための最も現実的で有望な方法は、電子ニュートリノ発現事象の頻度をニュートリノと反ニュートリノで比較することであるが、非対称性の有意な観測のためには 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 2.4.12) 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

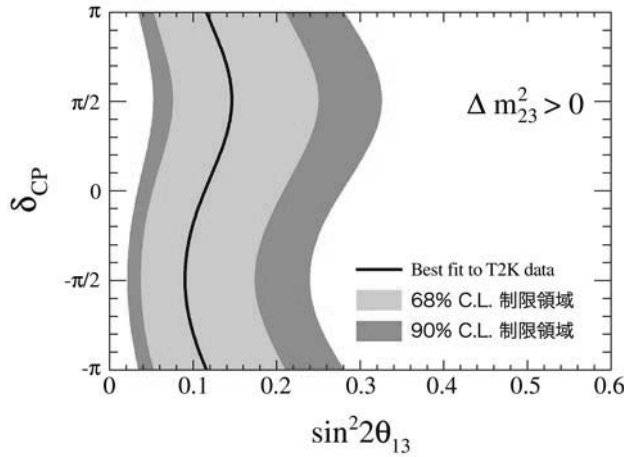


図 2.4.10: T2K 実験による、電子ニュートリノ発現現象に関連するニュートリノの混合角 θ_{13} に対する制限。電子ニュートリノ発現の確率は CP 対称性を破るパラメータ δ_{CP} にも依存するため、制限を $\sin^2 2\theta_{13}$ と δ_{CP} の二次元で表している。

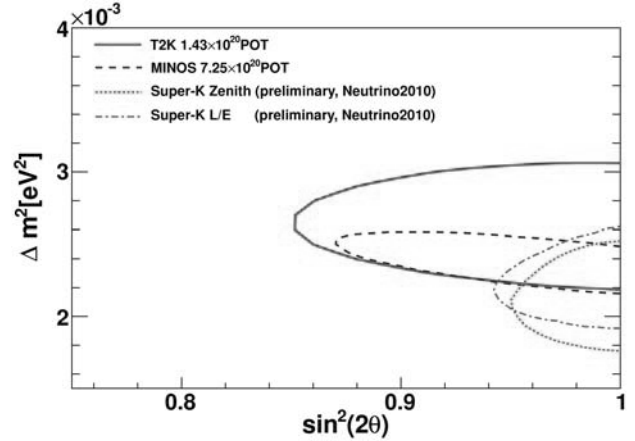


図 2.4.11: T2K 実験による、ミューニュートリノ消滅現象に関連するニュートリノ振動パラメータ Δm^2_{23} および $\sin^2 2\theta_{23}$ に対する制限 (実線)。スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノ観測からの制限 (点線・鎖線)、米国の加速器ニュートリノ実験 MINOS による制限 (破線) もともに示す。

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、素粒子の大統一理論で予言されている陽子崩壊の探索や、超新星からのニュートリノ検出などを世界最高感度で行うことのできる、宇宙と素粒子の分野にわたる幅広い研究を行うための実験装置である。

我々の研究室では、2009 年から宇宙線研、京都大学、名古屋大学などの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である、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いる。J-PARC からのニュートリノビームとハイパーカミオカンデを使った実験を想定したフルシミュレーションを行い、5 年の実験期間での感度を図 2.4.13 のように求めた。また、種々の系統誤差や、ニュートリノ質量の階層パターンの不定性が CP 非対称性の測定に与える影響を調べ、現実的なシナリオとして、T2K 実験の結果から示唆されるパラメータ領域で、ニュートリノにおける CP 対称性の破れに対する感度を十分に持った実験が可能であることを示した。

2011 年 9 月には、上記の結果を含む、検出器の基本設計と物理感度をまとめた文書を公開した。現在は、ハイパーカミオカンデ計画の実現に向けて後述のハイブリッド光検出器を中心とした光検出器の開発、空洞や構造体の設計の見直し、物理感度のさらに詳細な研究など、あらゆる角度から最適化を進め、実験計画の提案 (プロポーザル) に向けた準備を進めている。

2.4.6 次世代水チェレンコフ検出器のためのハイブリッド光検出器開発

当研究室は、新型光検出器である大口径 Hybrid Photo Detector (HPD) を開発している。大口径 HPD は、従来の光電子増倍管 (PMT) より優れた時間分解能を持ち、かつ安価に製作できる可能性を持つ。このため、大口径 HPD は、ハイパーカミオカンデをはじめとする次世代メガトン級水チェレンコフ検出器において、現在使用されている PMT に代わるデバイスとして期待されている。当研究室では、これまでに浜松ホトニクス、東大宇宙線研、KEK 素核研システムエレクトロニクスグループと共同で 13 インチ HPD の試作に成功し、PMT より優れた基本性

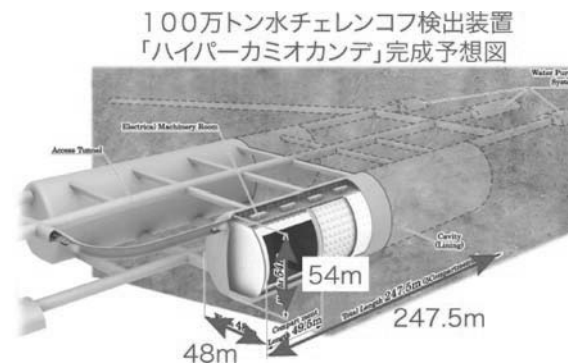


図 2.4.12: ハイパーカミオカンデ検出器の概念図。

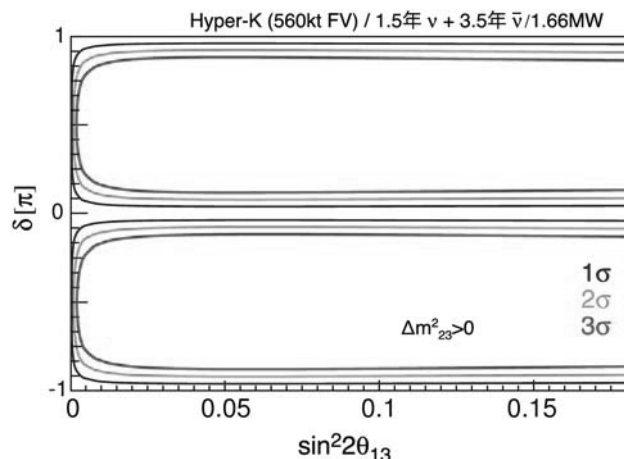


図 2.4.13: ハイパーカミオカンデ検出器を使った実験で予想される、 CP 非対称性への感度。曲線の内側の領域であれば、5 年間の実験でニュートリノ振動で CP 対称性が破れていることを示すことができると期待される。

能を確認した。2009 年度からは HPD の商業化を目指した開発に移行し、13 インチ口径より需要が見込める 8 インチ口径で、電源ケーブルとネットワークケーブルを接続するだけで信号がデジタルデータで取得できるデジタル HPD の開発を行ってきた。

HPD は光電面とアバランシェダイオード (AD) から成り、光電面から出た光電子を電場で加速し、AD に打ち込み増幅する。光電面と AD の間に、10 ~ 20kV の高印加電圧をかけることにより、AD 内に光電子あたり数千の二次電子が生成される。さらに、個々の二次電子は、AD のアバランシェ増幅により数十倍の電子に増幅される。この二段の増幅機構により、最終的に約 $O(10^5)$ の増幅が得られ、一光電子が検出可能となる。その結果、HPD には、i) 第一段の電子増倍過程における増幅率が大きく、かつ増幅率のばらつきが小さいため、波高分解能が PMT に比べてよくなる、ii) 電子増幅過程に PMT のようなダイノードを含んでいないため、電子走行時間のばらつきが存在せず、優れた時間分解能が達成できる、iii) 部品数が PMT の 1/10 ですみ安価である、などの特長がある。

8 インチ口径 HPD の開発では、低価格化を実現するために今までの金属フランジを用いた構造から、オールガラス製の構造に変更したが、この構造でもノイズと単一光電子の信号がきれいに分離し、単一光電子信号の波高分解能として今までの金属フランジを用いた HPD と同様の 20%(σ) が得られていることや、暗電流カウントレートにが同サイズの PMT の暗電流カウントレート同等であること、印加電圧値によって暗電流カウントレートに変化が見られないことを確認してきた。本年度は、8 インチ口径 HPD 開発の最終段階として、内蔵可能な小型電源の開発



図 2.4.14: オールガラス製 8 インチ HPD 試作機

を行い、プリアンプを内蔵したアナログタイプ、さらに信号処理回路をも内蔵したデジタルタイプの HPD の試作と試験を行って、ともに目標とする性能が得られていることを確認した。また、HPD の主な用途の一つである水チェレンコフ検出器での使用を想定し、防湿モールドの開発を行って、最終的に水中でも問題なく動作することを確認した。以上により、8 インチ口径 HPD の開発は成功したといえる。今後は、ハイパーカミオカンデでの使用を視野に入れた 20 インチ口径 HPD の開発を行う。

2.4.7 短基線ニュートリノ振動探索

米国フェルミ国立加速器研究所でのニュートリノ原子核反応断面積実験 SciBooNE(FNAL-E954) のデータを使って、同じビームラインの下流で実験を行っている MiniBooNE グループと共同でニュートリノ振動の探索を行った。LSND 実験や MiniBooNE 実験の結果を説明するシナリオのいくつかでは、他の物質と反応しないステライルニュートリノの存在を仮定し、ニュートリノ質量の二乗差 $1-10 \text{ eV}^2$ でのニュートリノ振動を预言するものがある。我々の測定はこの領域で世界最高精度の感度を持つ。特に、SciBooNE 実験での荷電カレント反応の反応率測定を用いることによって、ニュートリノ振動実験の大きな不定性源の一つであるニュートリノフラックスと断面積の不定性を大幅に削減し、ニュートリノ振動に対する感度を向上させることに成功した。今回の測定ではニュートリノ振動の有意な兆候は得られず、ニュートリノ振動のパラメータに制限を与えた。図 2.4.15 に、今回の測定 [21] で得られたニュートリノ振動パラメータに対する制限を示す。現在は、反ニュートリノビームでのニュートリノ振動の探索を進めている。

< 報文 >

(原著論文)

[1] H. Ha *et al.* [Belle Collaboration], “Measure-

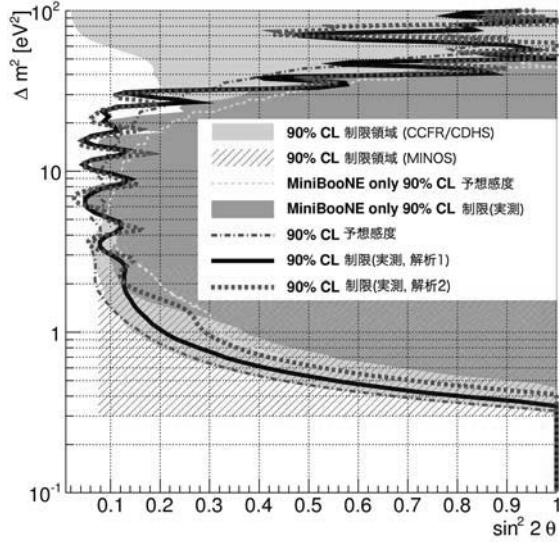


図 2.4.15: SciBooNE/MiniBooNE 実験による、ニュートリノ振動パラメータに対する制限。太い実線の右側が今回の測定で排除された領域を示す。

- ment of the decay $B^0 \rightarrow \pi^- \ell^+ \nu$ and determination of $|V_{ub}|$,” Phys. Rev. D **83**, 071101 (2011) [arXiv:1012.0090 [hep-ex]].
- [2] Y. Miyazaki *et al.* [Belle Collaboration], “Search for Lepton-Flavor-Violating tau Decays into a Lepton and a Vector Meson,” Phys. Lett. B **699**, 251 (2011) [arXiv:1101.0755 [hep-ex]].
- [3] M. Bischofberger *et al.* [Belle Collaboration], “Search for CP violation in $\tau \rightarrow K_S^0 \pi \nu_\tau$ decays at Belle,” Phys. Rev. Lett. **107**, 131801 (2011) [arXiv:1101.0349 [hep-ex]].
- [4] H. Aihara *et al.* [SDSS Collaboration], “The Eighth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Data from SDSS-III,” Astrophys. J. Suppl. **193**, 29 (2011) [Erratum-ibid. **195**, 26 (2011)] [arXiv:1101.1559 [astro-ph.IM]].
- [5] D. J. Eisenstein *et al.* [SDSS Collaboration], “SDSS-III: Massive Spectroscopic Surveys of the Distant Universe, the Milky Way Galaxy, and Extra-Solar Planetary Systems,” Astron. J. **142**, 72 (2011) [arXiv:1101.1529 [astro-ph.IM]].
- [6] J. Li *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of $B_s^0 \rightarrow J/\psi f_0(980)$ and Evidence for $B_s^0 \rightarrow J/\psi f_0(1370)$,” Phys. Rev. Lett. **106**, 121802 (2011) [arXiv:1102.2759 [hep-ex]].
- [7] I. Adachi *et al.* [Belle Collaboration], “First observation of the P -wave spin-singlet bottomonium states $h_b(1P)$ and $h_b(2P)$,” Phys. Rev. Lett. **108**, 032001 (2012) [arXiv:1103.3419 [hep-ex]].
- [8] Y. Horii *et al.* [Belle Collaboration], “Evidence for the Suppressed Decay $B^- \rightarrow \bar{\ell} DK^-$, $D^- \rightarrow \bar{\ell} K^- \pi^-$,” Phys. Rev. Lett. **106**, 231803 (2011) [arXiv:1103.5951 [hep-ex]].
- [9] A. Vossen *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of transverse polarization asymmetries of charged pion pairs in e^+e^- annihilation near $\sqrt{s}=10.58$ GeV,” Phys. Rev. Lett. **107**, 072004 (2011) [arXiv:1104.2425 [hep-ex]].
- [10] S. -K. Choi, S. L. Olsen, K. Trabelsi, I. Adachi, H. Aihara, K. Arinstein, D. M. Asner and T. Aushev *et al.*, “Bounds on the width, mass difference and other properties of $X(3872) \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$ decays,” Phys. Rev. D **84**, 052004 (2011) [arXiv:1107.0163 [hep-ex]].
- [11] O. Seon, Y. J. Kwon, T. Iijima, I. Adachi, H. Aihara, D. M. Asner, T. Aushev and A. M. Bakich *et al.*, “Search for Lepton-number-violating $B^+ \rightarrow \ell^+ D^- \ell^+ \ell^-$ Decays,” Phys. Rev. D **84**, 071106 (2011) [arXiv:1107.0642 [hep-ex]].
- [12] E. Won *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of $D^+ \rightarrow K^+ \eta^{(\prime)}$ and Search for CP Violation in $D^+ \rightarrow \pi^+ \eta^{(\prime)}$ Decays,” Phys. Rev. Lett. **107**, 221801 (2011) [arXiv:1107.0553 [hep-ex]].
- [13] P. Chen *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of $B^- \rightarrow \bar{p} \Lambda D^0$ at Belle,” Phys. Rev. D **84**, 071501 (2011) [arXiv:1108.4271 [hep-ex]].
- [14] X. L. Wang *et al.* [Belle Collaboration], “Search for charmonium and charmonium-like states in $\Upsilon(2S)$ radiative decays,” Phys. Rev. D **84**, 071107 (2011) [arXiv:1108.4514 [hep-ex]].
- [15] M. Staric *et al.* [Belle Collaboration], “Search for CP Violation in $D^\pm$ Meson Decays to $\phi \pi^\pm$,” Phys. Rev. Lett. **108**, 071801 (2012) [arXiv:1110.0694 [hep-ex]].
- [16] C. T. Hoi *et al.* [Belle Collaboration], “Evidence for Direct CP Violation in $B^\pm \rightarrow \eta h^\pm$ and Observation of $B^0 \rightarrow \eta K^0$,” Phys. Rev. Lett. **108**, 031801 (2012) [arXiv:1110.2000 [hep-ex]].
- [17] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “The T2K Experiment,” Nucl. Instrum. Meth. A **659**, 106 (2011) [arXiv:1106.1238 [physics.ins-det]].
- [18] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-produced Off-axis Muon Neutrino Beam,” Phys. Rev. Lett. **107**, 041801 (2011) [arXiv:1106.2822 [hep-ex]].
- [19] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “First Muon-Neutrino Disappearance Study with an Off-Axis Beam,” Phys. Rev. D **85**, 031103 (2012) [arXiv:1201.1386 [hep-ex]].
- [20] G. Cheng *et al.* [SciBooNE Collaboration], “Measurement of K^+ production cross section by 8 GeV protons using high energy neutrino interactions in the SciBooNE detector,” Phys. Rev. D **84**, 012009 (2011) [arXiv:1105.2871 [hep-ex]].

- [21] K. B. M. Mahn *et al.* [SciBooNE and Mini-BooNE Collaboration], “Dual baseline search for muon neutrino disappearance at $0.5\text{eV}^2 < \Delta m^2 < 40\text{eV}^2$,” *Phys. Rev. D* **85**, 032007 (2012) [arXiv:1106.5685 [hep-ex]].
- [22] T. Tanaka *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “An Indirect Search for WIMPs in the Sun using 3109.6 days of upward-going muons in Super-Kamiokande,” *Astrophys. J.* **742**, 78 (2011) [arXiv:1108.3384 [astro-ph.HE]].
- [23] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Search for Differences in Oscillation Parameters for Atmospheric Neutrinos and Antineutrinos at Super-Kamiokande,” *Phys. Rev. Lett.* **107**, 241801 (2011) [arXiv:1109.1621 [hep-ex]].
- [24] G. Mitsuka *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Study of Non-Standard Neutrino Interactions with Atmospheric Neutrino Data in Super-Kamiokande I and II,” *Phys. Rev. D* **84**, 113008 (2011) [arXiv:1109.1889 [hep-ex]].
- [25] K. Bays *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Supernova Relic Neutrino Search at Super-Kamiokande,” *Phys. Rev. D* **85**, 052007 (2012) [arXiv:1111.5031 [hep-ex]].

(その他)

- [26] K. Abe, T. Abe, H. Aihara, Y. Fukuda, Y. Hayato, K. Huang, A. K. Ichikawa and M. Ikeda *et al.*, “Letter of Intent: The Hyper-Kamiokande Experiment — Detector Design and Physics Potential —,” arXiv:1109.3262 [hep-ex].

(国内雑誌)

- [27] 相原博昭, 「ニュートリノ観測のための水中チェレンコフ光検出技術」『光学』第40巻第5号 最近の技術から平成21年5月.
- [28] 横山将志, 「ニュートリノでなにがわかるの?」『RikaTan 理科の探検』2011年11月号.
- [29] 阿部利徳, 相原 博昭, 田中 真伸, 河合 克彦, 「次世代大口径光検出器の開発」, 日本物理学会誌 2011年11月号.

(学位論文)

- [30] 宮武広直, 博士論文: “Subaru weak-lensing mass measurement of a high-redshift SZ cluster ACT-CL J0022 – 0036 discovered by the Atacama Cosmology Telescope Survey” (2011年12月)
- [31] 王佳寅, 修士論文: “Research and Development of a Digital Hybrid Avalanche Photo-Detector” (2012年2月)

(著書)

- [32] Hiroaki Aihara, “Hybrid Avalanche Photodiode Array Imaging,” in *Single-Photon Imaging*, Edited by Peter Seitz and Albert J. P. Theuwissen, Springer Series in Optical Sciences (2011).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [33] Masashi Yokoyama, “Status of Hyper-Kamiokande Detector R&D,” Technology and Instrumentation in Particle Physics 2011 (TIPP11), 9-14 June 2011, Chicago, IL, USA.
- [34] Hironao Miyatake, “Readout electronics for Hyper Suprime-Cam,” *ibid.*

招待講演

- [35] Masashi Yokoyama, “Set the scene : WG2 (neutrino scattering physics),” XIIIth International Workshop on Neutrino Factories, Super beams and Beta beams (NuFact11) 1-6 August 2011, Geneva, Switzerland.
- [36] H. Aihara, “SuperKEKB and SuperB projects — Super High-Luminosity Heavy Flavor Factories —,” The XXV International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies, August 22-27, 2011 at Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India.
- [37] H. Aihara, “Hyper-Kamiokande — The Next Generation —,” International Workshop on High Energy Geophysics 2011, October 27, 2011 Tokyo.
- [38] Masashi Yokoyama, “Hyper-Kamiokande: detector design and physics potential,” Fundamental Physics at the Intensity Frontier, Nov. 30 – Dec. 2, 2011, Rockville, MD, USA
- [39] Masashi Yokoyama, “Prospects for Measuring CP violation in the Neutrino Sector,” Nagoya University GCOE Winter School/Workshop 2011, Dec. 16, 2011.
- [40] H. Aihara, “Cosmology and Particle Astrophysics at IPMU,” LeCosPA 2012, LeCosPA Center, NTU, Taiwan, February 6, 2012.
- [41] Masashi Yokoyama, “Neutrino Oscillation : Past, present & future,” 4th Yonsei-Tokyo Joint Symposium, 17-18 Feb 2012.

(国内会議)

一般講演

- [42] 宮武広直, “Subaru weak lensing measurement of a high-redshift cluster discovered by the Atacama Cosmology Telescope Survey,” すばるユーザーズミーティング, 2012年2月28日-3月1日
- [43] 宮武広直, “スニャエフ・ゼルドビッチ効果で検出された最遠方銀河団の弱重力レンズ効果による質量測定” 日本天文学会 2012年春季大会, 2012年3月
- [44] 峯尾聡吾, “高赤方偏移、巨大銀河団の存在は有限質量ニュートリノ入りの宇宙モデルと矛盾しないか?” 日本物理学会第67回年次大会, 関西学院大学, 2012年3月

- [45] 宮武広直, “スニヤエフ・ゼルドビッチ効果で検出された最遠方銀河団の弱重力レンズ効果による質量測定” 同上

招待講演

- [46] 横山将志, 「ニュートリノの物理と (T2K の) 最新結果」, 高エネルギー物理 春の学校, 2011 年 5 月 14 日
- [47] 相原博昭, “SuperKEKB/Belle-II in context —インパクトのある仕事をするために—,” B workshop 2011, December 5-8, 2011, Bandaiatami, Fukushima.
- [48] 横山将志, 「大型水チェレンコフ検出器によるニュートリノ研究の展望」: シンポジウム「ニュートリノフロンティアの展望」, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月

(セミナー)

- [49] 横山将志, 「T2K ニュートリノ振動実験の最新結果」 首都大学東京 物理教室談話会, 2011 年 7 月 5 日
- [50] 横山将志, 「ニュートリノで探る素粒子から宇宙まで」 東京大学 物理学教室コロキウム, 2011 年 10 月 14 日
- [51] 宮武広直, “Subaru weak lensing measurement of a high-redshift cluster discovered by the Atacama Cosmology Telescope Survey,” IPMU ランチセミナー, 2012 年 2 月 14 日

(その他)

- [52] 相原博昭, 「素粒子と宇宙線分野の大型施設計画・大規模計画」 日本学術会議 「学術の大型研究計画検討分科会」 ヒアリング 2011 年 4 月 25 日.
- [53] 相原博昭, “Subaru Dark Energy Survey — Hyper Suprime-Cam (HSC) project —” 教室会議ランチトーク, 2011 年 6 月 24 日
- [54] H. Aihara, “SuperKEKB — Motivation and Significance —,” Groundbreaking Ceremony for the SuperKEKB Project, KEK, November 18, 2011.
- [55] H. Aihara, “Tune’s Impact on Japanese Particle Physics,” Symposium to celebrate the scientific accomplishments of Tune Kamae, December 3, 2011, SLAC, USA.
- [56] H. Aihara, “Princeton-Tokyo Partnership — Astronomy & Physics —,” Joint Princeton-Tokyo meeting, The University of Tokyo, Tokyo, January 17, 2012.

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いる。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、2010 年より重心系エネルギー 7TeV での運用が開始され、TeV (テラ電子ボルト) 領域の研究の新たな時代が始まった。これまでの標準理論の精密な研究、暗黒物質の研究などから、TeV 領域に新しい素粒子現象があることが確実視されており、LHC での発見により素粒子物理の新しいパラダイムが拓かれる。



図 2.5.1: LHC 加速器

2011 年 LHC 加速器は順調に調整が進み、最終的には当初の目標の約 4 倍の衝突輝度 ($3.7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) にまで達し、積算ルミノシティ、 5 fb^{-1} 以上のデータを観測した。本研究室は、新たなパラダイム転換を目指してヒッグス粒子と超対称性粒子の探索と、それらの発見で重要となる ATLAS 検出器のパフォーマンス評価の研究を行っている。

ヒッグス粒子に迫る

ヒッグス粒子は標準理論の枠組みの中で唯一未発見の粒子であり、素粒子の質量の起源と考えられている。2011 年の LHC 実験データに、ヒッグス粒子の可能性のある興味深い信号が観測された。まだ発見と言うには統計的には遠いレベルであるが、ATLAS と CMS 両検出器で、しかも複数の崩壊チャンネルの探索結果に無矛盾に観測され、発見への期待が高まっている。2012 年中には、ヒッグス粒子について

はっきりとした結論が得られる。ヒッグスの研究を通して、「真空がもつ豊かな構造」を解明され、素粒子研究における「真空」の役割が重要となるだろう。これまで、容れ物で脇役だった真空が研究の中心になる。

これまでの LEP や Tevatron での研究の結果、標準モデル・ヒッグス粒子は 115-140GeV にあると考えられている。この場合、ヒッグス粒子の崩壊パターン: $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow \tau\tau$, $H \rightarrow W^+W^- (\rightarrow l\nu l\nu)$, $H \rightarrow ZZ (\rightarrow 4l)$ の 4 つのチャンネルが重要な発見モードである。我々のグループは、 $\gamma\gamma, \tau\tau$ 及び WW の 3 つのモードに絞って研究を行いつついる。この 3 つのチャンネルは、ヒッグス粒子のスピンやフェルミオンとの湯川結合の存在の有無などいろいろな情報が含まれている。この 3 つモードのヒッグスの研究は、ヒッグスの発見のみならず、ヒッグス粒子の性質や標準理論の様々な素粒子の質量起源を解明する上で鍵となるものである。

図 2.5.2 に $H \rightarrow \gamma\gamma$ モードの探索結果を示す。観測された候補事象と、横軸は観測された γ 線の運動量から再構成した質量である。バックグラウンドは、連続分布になるのに対し、ヒッグス粒子の崩壊で出てきた場合は、ヒッグス粒子の質量に信号が観測される。 γ 線のエネルギー測定精度が高いため、質量測定の分解能が高く ($\sigma = 1.7 \text{ GeV}$)、シャープなピークが期待できる。2011 年のデータには、125~126GeV 付近に多少の超過が観測された。バックグラウンドは実験データをフィット (実線) して求めている。126GeV 付近の 3 つのビンで超過が見られている。まだ綺麗なピークと言うほどでないが、幅 3 ビンも期待される分解能と一致する。統計的にこの超過がバックグラウンドのふらつきである確率は 2.9 シグマである。

$H \rightarrow ZZ (\rightarrow 4l)$ も、 $\gamma\gamma$ 同様に質量測定の分解能が高く ($\sigma = 3 \text{ GeV}$)、シャープなピークが期待できる。更に、再構成された質量が 180GeV 以下の領域は、バックグラウンドが少なく (~ 0.5 事象/5GeV)、感度が高いチャンネルである反面、崩壊分岐比が少ないので多くのデータが必要である。2011 年のデータには、125GeV 付近に 3 事象観測され、バックグラウンドのふらつきである確率は 2.1 シグマである。

図 2.5.3 に $H \rightarrow W^+W^- (\rightarrow l\nu l\nu)$ モードの探索結果を示す。このチャンネルは、 ν が二つ放出されるため、不変質量を再構成できず、横方向質量 MT を用いる。このため綺麗なピークにならず広がった分布になり、感度が低くなる。一方、125GeV 程度の場合、崩壊分岐比が高く重要なモードである。二つのレプトン以外に、ジェットを伴わないもの (0jet モード) と 1 つジェットを伴うもの (1jet モード) に分けてある。0jet モードはグルオン融合過程 (GF) で生成された信号が主で、バックグラウンドは、 W^+W^- が主である。一方 1jet モードは、GF ばかりでなくベクターボソン融合過程 (VBF) の信号も寄与する。またバックグラウンドは、 W^+W^- ばかりでなくトップクォークペアー生成も効いてくる。異なるバックグラウンド環境である点が重要である。図 2.5.3 を見ると 0jet モード側はバックグラウンドの分布と実験データは一致する。1jet モードではデータが多めに観測されているが、まだ有意なレベルではない。

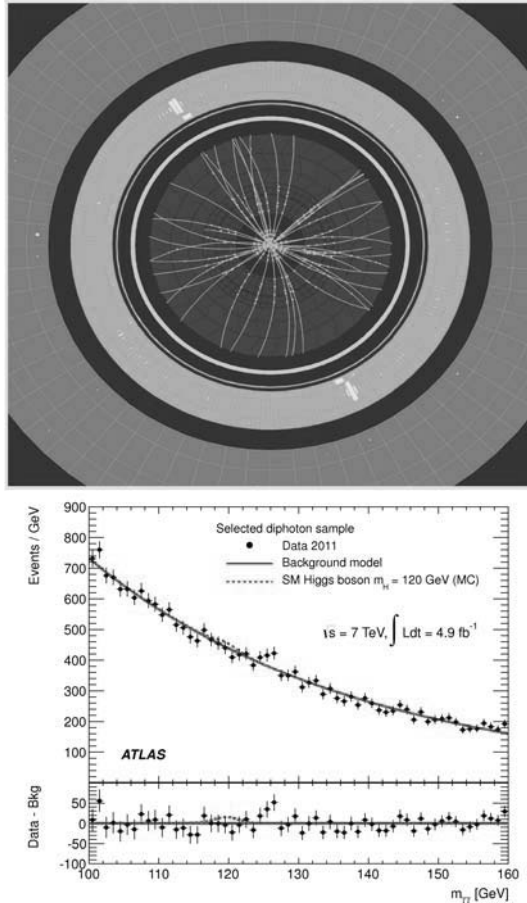


図 2.5.2: ヒッグス粒子が $\gamma\gamma$ に崩壊したモード：観測された事象、再構成した $\gamma\gamma$ 質量分布)

これら以外に、 $H \rightarrow \tau\tau, bb$ などに加えて求めた $\text{Local } P_0$ を示したのが図 2.5.4 である。 $\text{Local } P_0$ は、ヒッグス粒子の質量を仮定し、観測された事象を、ヒッグスの信号でなくバックグラウンドのふらつきである確率である。125~126 GeV 付近だけ P_0 が小さくなり 2.4 シグマになっている。統計的にはまだ不確実である。ただ、図中の点線は、標準モデルヒッグスがあった場合の期待される信号の強さであり、観測された小さな超過は、ヒッグス粒子の信号にはちょうどよい。

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。一番軽い超対称性粒子は宇宙の暗黒物質の良い候補であり、物質と反応しないで検出器を通り抜けてしまう。そのため横方向消失運動量 (mE_T と呼ぶ) が特徴であり、バックグラウンドと比べて超対称性粒子の信号は大きな mE_T を持っている。更に、信号

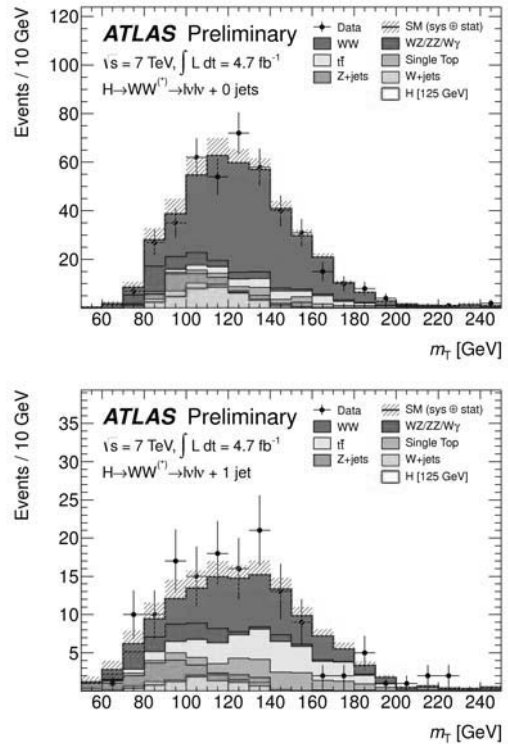


図 2.5.3: ヒッグス粒子が W^+W^- に崩壊した時の横方向質量分布 (a)0jet モード (b)1jet モード)

からは高い横向き運動量 (P_T) を持った複数のジェットが放出される特徴があるので、 mE_T とジェットの P_T のスカラー和 (M_{eff}) も、信号はバックグラウンドに比べて高くなる。

超対称性粒子の信号の特徴は、超対称性粒子質量スペクトラムや崩壊パターンでいろいろ考えられる。我々の研究室は、以下の 4 つの探索チャンネルの研究をおこなった。実験データからバックグラウンドを評価する方法を開発し、感度の高い探索を行った。

1. レプトンを含まず、ジェットと mE_T が信号
2. レプトンを含み、それ以外にジェットと mE_T が信号
3. b クォークを含む信号 (スカラークォーク)
4. 超対称性粒子の質量スペクトラムが縮退している場合。Initial State Radiation(ISR) ジェットとソフトレプトンが信号

図 2.5.5 にレプトンを含まず、ジェットと mE_T が信号の探索モードの結果を示す。もし、超対称性粒子 (グリーノ、スクォークの質量 1.2 TeV) が存在すると図中の点線に示す様に大きな M_{eff} 領域に信号が期待されるが、実験データはバックグラウンド (実線) の分布と一致しており、超対称性信号の兆候は去年のデータには無かった。

重要な 4 つの探索モード全てで、標準モデルからの有意なズレは観測されなかった。グリーノとス

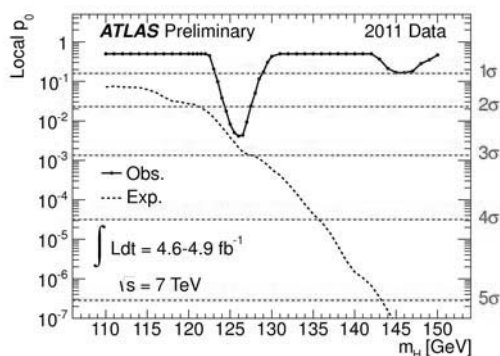


図 2.5.4: 観測された事象をバックグラウンドのふらつきで説明しようとする場合の確率)

カラークォークの質量が、約 1.4TeV 程度まで棄却された。図 2.5.6 にグルーイノとスカラークォークの質量等高線と 2011 年のデータで棄却した領域を示す。軽い (< 1TeV) の超対称性モデルはこれでかなり厳しくなった。ヒッグスの兆候とあわせて、超対称性のモデルやパラメーターを絞らだ。

長寿命粒子の発見能力の研究

超対称性モデルのうち、Anomaly-Mediated や Gauge-Mediated モデルは Gravity-Mediated モデルと並んで有望視されている。これらのモデルの特徴は、長寿命荷電粒子が含まれている点であり、長寿命粒子荷電粒子を発見し、寿命を測定することは、超対称性の破れのメカニズムを解明する鍵となる。

寿命が、O(1mm)-O(10cm) の比較的短い粒子は飛跡検出器内で崩壊するため、ハドロンコライダーでは発見が難しいとされていた。我々は、ATLAS 検出器の TRT 連続飛跡検出器を用いて、途中で崩壊した(曲がったり、消えたりするトラック)トラックが発見が可能であること示した。これにより、AMSB モデルでチャージノ 181GeV の制限が得られた。

モノジェットを用いた余剰次元探索

余剰次元サイズが比較的大きい場合 (ADD モデル) 重力子・グラビトンがいろいろなモードで結合しその結合強度が大きくエンハンスされる。天体現象の重力子は未だに発見されていないが、余剰次元がある場合、素粒子現象で重力子が先に観測される可能性がある。重力子が高いエネルギーの粒子にそのエネルギーに比例して結合するので高いエネルギー粒子から放出され、反跳した粒子 (主にクォークかグルオン) だけが観測され反対側に放出された重力子が見えなくなる (モノジェット) が期待される。モノジェット探索を 2011 年度データで行い、余剰次元の大きさ (長さとしては小ささ) が 4-2.4TeV (余剰次元

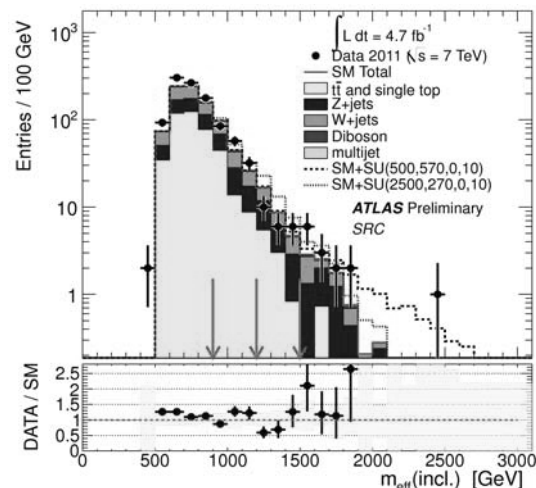


図 2.5.5: レプトンを含まない超対称性探索モードで期待される横方向消失運動量とジェットの横運動量のスカラー和分布 (Meff):共に黒点が 2011 年度実験したデータ、実線ヒストグラムがバックグラウンド (標準モデル過程)、点線が期待される信号

n=3-6) である制限が得られた。これは既存のものの中で最も厳しいものであり、ADD モデルに大きな影響を与えるものである。

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。

強力ミリ波源を用いたポジトロニウム超微細構造の直接測定

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 (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 0.84meV (203GHz) 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、いずれも静磁場を印加してゼーマン分裂し

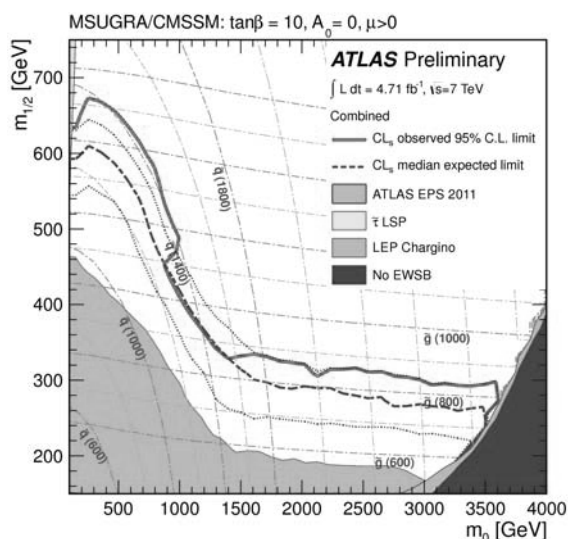


図 2.5.6: mSugra モデルで棄却された領域 縦軸/横軸は GUT でのゲージノ/スカラー粒子質量、LHC でのグルイーノとスカラークォークの質量等高線を点線で示してある。赤線の左側が今回棄却した領域 (95%CL)

た幅から間接的に得られた値である。このため、直接ミリ波を照射して Ps HFS 遷移をおこし、その値を測定する検出器を開発している。

検出器の概要を図 2.5.7 に示す。ジャイロトロンから出力されたミリ波をガウスモードに変換しつつファブリペロー共振器に導く。共振器中のガスに ^{22}Na の崩壊から放出された陽電子を照射し、Ps を生成する。生成された Ps のうちの o-Ps は共振器中に蓄積された大強度ミリ波によって p-Ps に遷移し、周囲のガンマ線検出器で 511 keV の単色ガンマ線の増加として観測される。

本年度は、この検出器を実際に運用し、Ps HFS の遷移を観測した。約一週間の測定を行い、バックグラウンド除去を行ったところ、ミリ波ありとなしで有意な差が見られた (図 2.5.8)。この差とミリ波の照射量から遷移確率を求めたところ、 $A = 3.1^{+1.6}_{-1.2} \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ となり、理論値 $A = 3.37 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ とコンシステントであった。また、遷移量のミリ波パワーに対する依存性なども調べ、シグナルが Ps HFS 遷移からくるものであることを確認した。この観測は、世界初の Ps HFS 直接遷移観測である。

今後、ジャイロトロンの発振周波数を可変にしミリ波強度も上げる改造を行うことで、Ps HFS 遷移の共鳴曲線を求め、Ps HFS の値を測定する予定である。

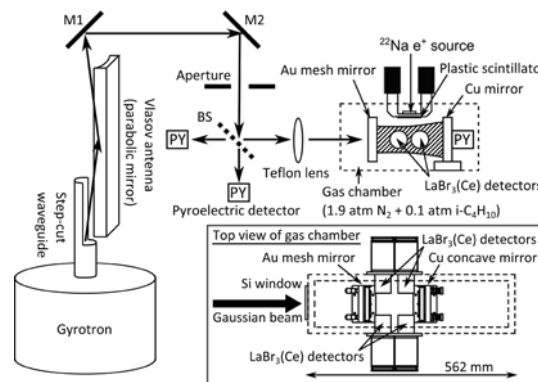


図 2.5.7: Ps HFS 直接測定のセットアップ, ジャイロトン

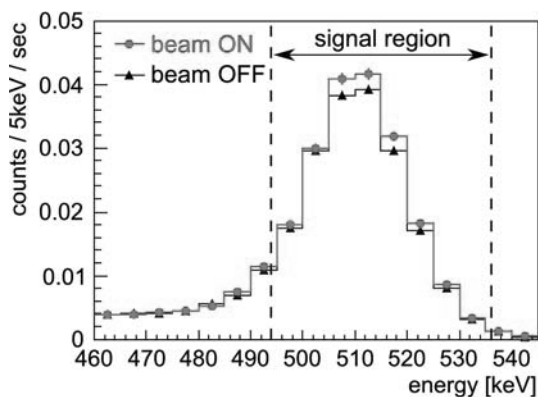


図 2.5.8: Ps 崩壊スペクトル。ミリ波ありとなしでの 511keV ガンマ線の差が HFS 遷移イベントに相当する。

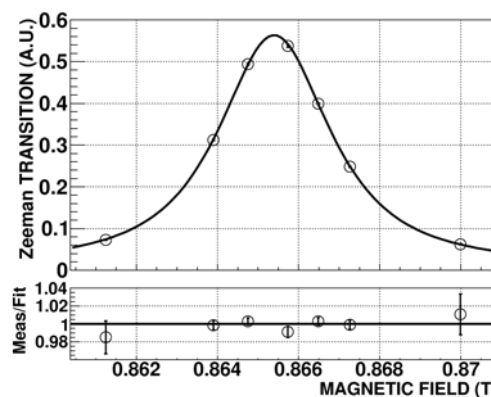


図 2.5.10: Ps ゼーマン共鳴曲線

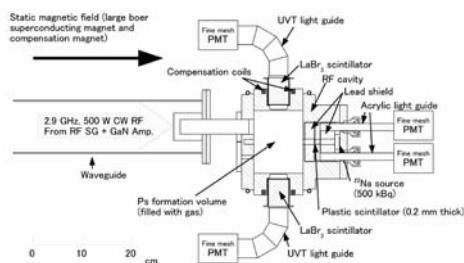


図 2.5.9: ゼーマン効果を使用した Ps HFS 測定セットアップ

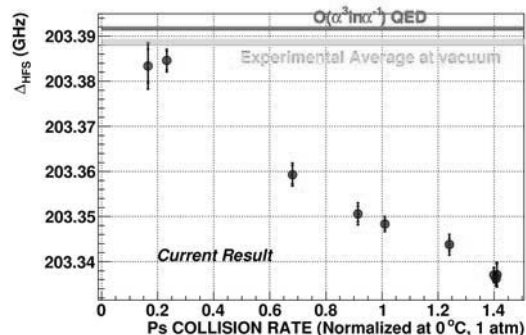


図 2.5.11: Ps HFS の値とキャビティ内のイソプタンガス圧との関係。真空での理論値と過去の測定値も併せて示した。

ゼーマン効果を利用したポジトロニウム超微細構造の精密測定

Ps HFS は、1980 年代にゼーマン効果を利用して ppm の精度で複数のグループによって測定されている。しかし、この測定値は束縛系 QED の理論計算によって得られた値と 15ppm (3.9σ) もズレており、未知の物理現象が寄与している可能性がある。このズレの原因を解明するために、考えられる系統誤差を排除した新しい測定を行っている。

この測定では、静磁場 (0.87 T) を印加してゼーマン分裂した o-Ps の準位差 (3 GHz) を測定する事で、間接的に Ps HFS の値を求める。ミリ波による直接測定と異なり、ゼーマン分裂を起こすための一様な静磁場は必要となるが、ゼーマン準位差がマイクロ波領域であるため、遷移用に照射する S バンドマイクロ波には既存の大強度用デバイスや測定デバイスを使用できる。われわれは、磁場の不定性を無くするために KEK 超伝導低温工学センターにある大型精密磁石 (ボア径 80cm、長さ 2m) 中に測定装置全体を設置し、さらにマイクロ波キャビティのまわりに補償コイルを巻いて Ps 生成領域で ppm の精度のよう

磁場を製作した (図 2.5.9)。印加マイクロ波を一定にしながら磁場を変更するとゼーマン共鳴が変化し Ps の崩壊時の $2\gamma/3\gamma$ 比が変わるため、これを測定して共鳴曲線を得た (図 2.5.10)。共鳴の中心値と印加磁場から Ps HFS の値が計算で得られるが、最終的な結果を得る上ではキャビティ内のガスが Ps HFS に与える影響が無視できない。このため、われわれは複数のガス圧でゼーマン共鳴曲線を測定し、Ps HFS の真空中での値を外挿によって得る。現在その測定中であり、今までに得たデータを図 2.5.11 に示す。最終的には、2012 年度までの測定で結論を出す予定である。

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。仮に、短寿命で軽い未知粒子が存在し小さな分岐比でその粒子への崩壊も起きている場合には、エネルギースペクトルに単色のピー

クが現れる。われわれはエネルギー分解能の良い半導体検出器を用いて崩壊エネルギースペクトルの精密測定を行った。スペクトルの 245 ~ 506 keV の範囲にそのようなピークが観測されなかったことから、質量領域 101 ~ 737 keV の未知粒子に対して、 3γ への崩壊に対して分岐比 1.5×10^{-4} 以下 (95% C.L.) の制限を得た。

放射光施設を用いた光と弱い結合を持つ粒子の探索

標準理論を超えた理論の中には、光子と弱い結合を持つ軽い粒子の存在を预言するものがいくつかあり、そのような粒子が仮に存在すれば、非常に高いエネルギーでの物理を反映していると考えられている。われわれは、そのような粒子としてアクシオンやパラフォトン、ディラトンを仮定し、放射光施設を用いて探索実験を行うセットアップを考えた。実験はいわゆる ‘light shining through a wall’ と呼ばれる方式であり、未知粒子を介して壁越しに光が伝播する現象を探索する。放射光施設は SPring-8 の BL19LXU ビームラインを仮定し、手持ちの半導体検出器と 10 T·m 程度の磁石があれば、eV 程度のアクシオンのような粒子に対して十分意味のある探索となることが分かった。このため、SPring-8 での探索の段取りをおこない、2012 年度の早い段階で測定に入ることとなった。

<受賞>

- [1] A. Miyazaki, “First Place outstanding student paper”, 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz2011), USA, October 2011.

<報文>

(原著論文)

- [2] S.Asai, Y.Azuma, , M.Endo, K.Hamaguchi, , S.Iwamoto, ” Stau Kinks at the LHC.”, JHEP 1112 041 (2011).
- [3] S.Asai et al., ”Direct Measurement of Positronium HyperFine Structure: - A New Horizon of Precision Spectroscopy Using Gyrotrons -”, J Infrared Milli Terahz Waves DOI 10.1007/s10762-011-9864-8.
- [4] The ATLAS Collaboration, ”Measurement of $t\bar{t}$ production with a veto on additional central jet activity in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector”, arXiv:1203.5015
- [5] The ATLAS Collaboration, ”Jet mass and substructure of inclusive jets in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with the ATLAS experiment”, arXiv:1203.4606
- [6] The ATLAS Collaboration, ”Measurement of the charge asymmetry in top quark pair production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector”, arXiv:1203.4211

- [7] The ATLAS Collaboration, ”Observation of spin correlation in $t\bar{t}$ events from pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector”, arXiv:1203.4081
- [8] The ATLAS Collaboration, ”Determination of the strange quark density of the proton from ATLAS measurements of the $W \rightarrow l\nu$ and $Z \rightarrow ll$ cross sections”, arXiv:1203.4051
- [9] The ATLAS Collaboration, ”Search for second generation scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, arXiv:1203.3172
- [10] The ATLAS Collaboration, ”Measurement of the production cross section of an isolated photon associated with jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, arXiv:1203.3161
- [11] The ATLAS Collaboration, ”Forward-backward correlations and charged-particle azimuthal distributions in pp interactions using the ATLAS detector”, arXiv:1203.3100
- [12] The ATLAS Collaboration, ”Measurement of the azimuthal anisotropy for charged particle production in $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV lead-lead collisions with the ATLAS detector”, arXiv:1203.3087
- [13] The ATLAS Collaboration, ”Measurement of the polarisation of W bosons produced with large transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment”, arXiv:1203.2165
- [14] The ATLAS Collaboration, ”Search for a light Higgs boson decaying to long-lived weakly-interacting particles in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, arXiv:1203.1303
- [15] The ATLAS Collaboration, ”Single hadron response measurement and calorimeter jet energy scale uncertainty with the ATLAS detector at the LHC”, arXiv:1203.1302
- [16] The ATLAS Collaboration, ”Search for new particles decaying to ZZ using final states with leptons and jets with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions”, arXiv:1203.0718
- [17] The ATLAS Collaboration, ”Search for FCNC single top-quark production at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, arXiv:1203.0529
- [18] The ATLAS Collaboration, ”Measurement of the azimuthal ordering of charged hadrons with the ATLAS detector”, arXiv:1203.0419
- [19] The ATLAS Collaboration, ”Search for down-type fourth generation quarks with the ATLAS detector in events with one lepton and high transverse momentum hadronically decaying W bosons in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions”, arXiv:1202.6540
- [20] The ATLAS Collaboration, ”Search for same-sign top-quark production and fourth-generation down-type quarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector”, arXiv:1202.5520

- [21] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the cross section for top-quark pair production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector using final states with two high-pt leptons", arXiv:1202.4892
- [22] The ATLAS Collaboration, "Search for anomaly-mediated supersymmetry breaking with the ATLAS detector based on a disappearing-track signature in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", arXiv:1202.4847
- [23] The ATLAS Collaboration, "Search for pair-produced heavy quarks decaying to Wq in the two-lepton channel at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", arXiv:1202.3389
- [24] The ATLAS Collaboration, "Search for pair production of a heavy quark decaying to a W boson and a b quark in the lepton+jets channel with the ATLAS detector", arXiv:1202.3076
- [25] The ATLAS Collaboration, "Search for the Standard Model Higgs boson in the decay channel $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$ with 4.8 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with ATLAS", Phys.Lett. B710 (2012) 383-402
- [26] The ATLAS Collaboration, "Combined search for the Standard Model Higgs boson using up to 4.9 fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector at the LHC", Phys.Lett. B710 (2012) 49-66
- [27] The ATLAS Collaboration, "Search for the Standard Model Higgs boson in the diphoton decay channel with 4.9 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with ATLAS", Phys. Rev. Lett. 108, 111803 (2012)
- [28] The ATLAS Collaboration, "Search for decays of stopped, long-lived particles from 7 TeV pp collisions with the ATLAS detector", arXiv:1201.5595
- [29] The ATLAS Collaboration, "Measurement of inclusive two-particle angular correlations in pp collisions with the ATLAS detector at the LHC", arXiv:1203.3549
- [30] The ATLAS Collaboration, "Search for excited leptons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", arXiv:1201.3293
- [31] The ATLAS Collaboration, "Rapidity gap cross sections measured with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", arXiv:1201.2808
- [32] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the top quark pair production cross-section with ATLAS in the single lepton channel", arXiv:1201.1889
- [33] The ATLAS Collaboration, "Study of jets produced in association with a W boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", arXiv:1201.1276
- [34] The ATLAS Collaboration, "Search for anomalous production of prompt like-sign muon pairs and constraints on physics beyond the Standard Model with the ATLAS detector", Phys. Rev. D 85, 032004 (2012)
- [35] The ATLAS Collaboration, "Jet energy measurement with the ATLAS detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", arXiv:1112.6426
- [36] The ATLAS Collaboration, "Measurement of inclusive jet and dijet production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector", arXiv:1112.6297
- [37] The ATLAS Collaboration, "Search for heavy vector-like quarks coupling to light quarks in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", arXiv:1112.5755
- [38] The ATLAS Collaboration, "Observation of a new χ_b state in radiative transitions to $\Upsilon(1S)$ and $\Upsilon(2S)$ at ATLAS", arXiv:1112.5154
- [39] The ATLAS Collaboration, "Search for first generation scalar leptoquarks in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector", Phys.Lett. B709 (2012) 158-176
- [40] The ATLAS Collaboration, "Search for contact interactions in dilepton events from pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", arXiv:1112.4462
- [41] The ATLAS Collaboration, "Measurement of $D^{*\pm}$ meson production in jets from pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Rev. D85 (2012) 052005
- [42] The ATLAS Collaboration, "Search for scalar bottom pair production with the ATLAS detector in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", arXiv:1112.3832
- [43] The ATLAS Collaboration, "Search for production of resonant states in the photon-jet mass distribution using pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV collected by the ATLAS detector", arXiv:1112.3580
- [44] The ATLAS Collaboration, "Search for the Higgs boson in the $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l^+ \nu l^- \bar{\nu}$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Rev. Lett. 108, 111802 (2012)
- [45] The ATLAS Collaboration, "Search for Extra Dimensions using diphoton events in 7 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector", arXiv:1112.2194
- [46] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the $W^\pm Z$ production cross section and limits on anomalous triple gauge couplings in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Lett. B709 (2012) 341-357
- [47] The ATLAS Collaboration, "Search for Diphoton Events with Large Missing Transverse Momentum in 1 fb^{-1} of 7 TeV Proton-Proton Collision Data with the ATLAS Detector", arXiv:1111.4116
- [48] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the production cross section for Z/γ^* in association with jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Rev. D85 (2012) 032009

- [49] The ATLAS Collaboration, " K_s^0 and Λ production in pp interactions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 7 TeV measured with the ATLAS detector at the LHC", oai:cds.cern.ch:1396511. Kshort and Lambda production in pp interactions at sqrt(s) = 0.9 and 7 TeV measured with the ATLAS detector at the LHC", Phys.Rev. D85 (2012) 012001
- [50] The ATLAS Collaboration, "Search for strong gravity signatures in same-sign dimuon final states using the ATLAS detector at the LHC", Phys.Lett. B709 (2012) 322-340
- [51] The ATLAS Collaboration, "A measurement of the material in the ATLAS inner detector using secondary hadronic interactions", JINST 7 (2012) P01013
- [52] The ATLAS Collaboration, "Searches for supersymmetry with the ATLAS detector using final states with two leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions", Phys. Lett. B709 (2012) 137-157
- [53] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the ZZ production cross section and limits on anomalous neutral triple gauge couplings in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 041804
- [54] The ATLAS Collaboration, "Electron performance measurements with the ATLAS detector using the 2010 LHC proton-proton collision data", Eur. Phys. J. C72 (2012) 1909
- [55] The ATLAS Collaboration, "Search for Massive Colored Scalars in Four-Jet Final States in $\sqrt{s}=7$ TeV proton-proton collisions with the ATLAS Detector", Eur.Phys.J.C 71 (2011) 1828
- [56] The ATLAS Collaboration, "Search for new phenomena in final states with large jet multiplicities and missing transverse momentum using $\sqrt{s}=7$ TeV pp collisions with the ATLAS detector", JHEP 1111 (2011) 099
- [57] The ATLAS Collaboration, "Performance of the ATLAS Trigger System in 2010", Eur.Phys.J. C72 (2012) 1849
- [58] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the inclusive and dijet cross-sections of b-jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Eur.Phys.J.C 71 (2011) 1846
- [59] The ATLAS Collaboration, "Search for supersymmetry in final states with jets, missing transverse momentum and one isolated lepton in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions using 1 fb⁻¹ of ATLAS data", Phys.Rev. D85 (2012) 012006
- [60] The ATLAS Collaboration, "Search for squarks and gluinos using final states with jets and missing transverse momentum with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions", Phys. Lett. B710 (2012) 67-85
- [61] The ATLAS Collaboration, "Search for the Standard Model Higgs boson in the decay channel $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$ with the ATLAS detector", Phys.Lett. B705 (2011) 435-451
- [62] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the jet fragmentation function and transverse profile in proton-proton collisions at a center-of-mass energy of 7 TeV with the ATLAS detector", Eur.Phys.J.C 71 (2011) 1795
- [63] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the inclusive $W^\pm$ and Z/γ cross sections in the electron and muon decay channels in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", arXiv:1109.5141
- [64] The ATLAS Collaboration, "Search for New Phenomena in $t\bar{t}$ Events With Large Missing Transverse Momentum in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector", Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 041805
- [65] The ATLAS Collaboration, "Search for the Higgs boson in the $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys.Rev.Lett. 107 (2011) 231801
- [66] The ATLAS Collaboration, "Search for a heavy neutral particle decaying into an electron and a muon using 1 fb⁻¹ of ATLAS data", Eur.Phys.J.C 71 (2011) 1809
- [67] The ATLAS Collaboration, "Search for a Standard Model Higgs boson in the $H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^- \nu\bar{\nu}$ decay channel with the ATLAS detector", arXiv:1109.3357
- [68] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the $W \rightarrow \tau\nu_\tau$ Cross Section in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS experiment", Phys.Lett. B706 (2012) 276-294
- [69] The ATLAS Collaboration, "Search for displaced vertices arising from decays of new heavy particles in 7 TeV pp collisions at ATLAS", Phys.Lett. B707 (2012) 478-496
- [70] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the cross section for the production of a W boson in association with b-jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys.Lett. B707 (2012) 418-437
- [71] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the cross-section for b-jets produced in association with a Z boson at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector", Phys.Lett. B706 (2012) 295-313
- [72] The ATLAS Collaboration, "Measurements of the electron and muon inclusive cross-sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys.Lett. B707 (2012) 438-458
- [73] The ATLAS Collaboration, "Search for New Physics in the Dijet Mass Distribution using 1 fb⁻¹ of pp Collision Data at $\sqrt{s} = 7$ TeV collected by the ATLAS Detector", Phys. Lett. B 708 (2012) 37-54

- [74] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the Transverse Momentum Distribution of W Bosons in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector", Phys.Rev. D85 (2012) 012005
- [75] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the centrality dependence of the charged particle pseudorapidity distribution in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector", Phys.Lett.B710 (2012) 363-382
- [76] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the pseudorapidity and transverse momentum dependence of the elliptic flow of charged particles in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector", Phys.Lett. B707 (2012) 330-348
- [77] The ATLAS Collaboration, "Search for the Standard Model Higgs boson in the two photon decay channel with the ATLAS detector at the LHC", Phys.Lett. B705 (2011) 452-470
- [78] The ATLAS Collaboration, "Performance of Missing Transverse Momentum Reconstruction in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS", Eur.Phys.J. C72 (2012) 1844
- [79] The ATLAS Collaboration, "Search for a heavy Standard Model Higgs boson in the channel $H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-q\bar{q}$ using the ATLAS detector", Phys.Lett. B707 (2012) 27-45
- [80] The ATLAS Collaboration, "A measurement of the ratio of the W and Z cross sections with exactly one associated jet in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS", Phys. Lett. B708 (2012) 221-240
- [81] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the top quark pair production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in dilepton final states with ATLAS", Phys.Lett. B707 (2012) 459-477
- [82] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the $Z \rightarrow \tau\tau$ Cross Section with the ATLAS Detector", Phys.Rev. D84 (2011) 112006
- [83] The ATLAS Collaboration, "Search for dilepton resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys.Rev.Lett. 107 (2011) 272002
- [84] The ATLAS Collaboration, "Search for a heavy gauge boson decaying to a charged lepton and a neutrino in 1 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector", Phys.Lett. B705 (2011) 28-46
- [85] The ATLAS Collaboration, "Inclusive search for same-sign dilepton signatures in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", JHEP 1110 (2011) 107
- [86] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the inclusive isolated prompt photon cross-section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using 35 pb^{-1} of ATLAS data", Phys.Lett. B706 (2011) 150-167
- [87] The ATLAS Collaboration, "Search for neutral MSSM Higgs bosons decaying to $\tau^+\tau^-$ pairs in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys.Lett. B705 (2011) 174-192
- [88] The ATLAS Collaboration, "Properties of jets measured from tracks in proton-proton collisions at center-of-mass energy $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Phys.Rev. D84 (2011) 054001
- [89] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the transverse momentum distribution of Z/γ^* bosons in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector", Phys.Lett. B705 (2011) 415-434
- [90] The ATLAS Collaboration, "Measurement of multi-jet cross sections in proton-proton collisions at a 7 TeV center-of-mass energy", Eur.Phys.J. C71 (2011) 1763
- [91] The ATLAS Collaboration, "Measurement of dijet production with a veto on additional central jet activity in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV using the ATLAS detector", JHEP 1109 (2011) 053
- [92] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the isolated diphoton cross section in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector", Phys.Rev. D85 (2012) 012003
- [93] The ATLAS Collaboration, "Search for Diphoton Events with Large Missing Transverse Energy with 36 pb^{-1} of 7 TeV Proton-Proton Collision Data with the ATLAS Detector", Eur.Phys.J. C71 (2011) 1744
- [94] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the $\Upsilon(1S)$ Production Cross-Section in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in ATLAS", Phys.Lett. B705 (2011) 9-27
- [95] The ATLAS Collaboration, "Search for new phenomena with the monojet and missing transverse momentum signature using the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions", Phys.Lett. B705 (2011) 294-312
- [96] The ATLAS Collaboration, "Search for Heavy Long-Lived Charged Particles with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", Phys.Lett. B703 (2011) 428-446
- [97] The ATLAS Collaboration, "Limits on the production of the Standard Model Higgs Boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector", Eur.Phys.J. C71 (2011) 1728
- [98] The ATLAS Collaboration, "Measurement of $W\gamma$ and $Z\gamma$ production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector", JHEP 1109 (2011) 072
- [99] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the W^+W^- cross section in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with ATLAS", Phys.Rev.Lett. 107 (2011) 041802
- [100] The ATLAS Collaboration, "Search for pair production of first or second generation leptoquarks

- in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV using the ATLAS detector at the LHC”, Phys.Rev. D83 (2011) 112006
- [101] The ATLAS Collaboration, “Search for Contact Interactions in Dimuon Events from pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector”, Phys.Rev. D84 (2011) 011101
- [102] The ATLAS Collaboration, “Measurement of the differential cross-sections of inclusive, prompt and non-prompt J/ψ production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, Nucl. Phys. B 850 (2011) 387-444
- [103] The ATLAS Collaboration, “Measurement of the Inelastic Proton-Proton Cross-Section at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS Detector”, Nature Commun. 2 (2011) 463
- (会議抄録)
- [104] T. Yamazaki, “First observation of o-Ps to p-Ps transition and first direct measurement of positronium hyperfine splitting with sub-THz light”, Hyperfine Interactions, Online First (arXiv:1105.4352) (2011).
- [105] A. Ishida, “Precise measurement of positronium hyperfine splitting using the Zeeman effect”, Hyperfine Interactions, Online First (arXiv:1105.4392) (2011).
- (国内雑誌)
- [106] 浅井祥仁, “LHC 実験: テラスケール物理の成果と展望”, 日本物理学会誌 66, 813-820 (2011).
- (学位論文)
- [107] 修士論文, 後藤嵩史, “LHC-ATLAS 実験における $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu qq$ モードを用いたヒッグス粒子の探索”
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [108] S. Asai, “Current Status of Higgs search at LHC”, Cold Antimatter and High Precision Physics (Pbar11), Japan, November 2011.
- [109] S. Asai, “The Latest Results of LHC Hint of Higgs and SUSY”, JGRG21, Japan, September 2011.
- 一般講演
- [110] T. Yamazaki, “First direct measurement of positronium hyperfine splitting with sub-THz light”, 10th International Conference on Low Energy Antiproton Physics (LEAP2011), Canada, April 2011.
- [111] A. Ishida, “Precise measurement of positronium hyperfine splitting using the Zeeman effect”, 10th International Conference on Low Energy Antiproton Physics (LEAP2011), Canada, April 2011.
- [112] A. Miyazaki, “Direct Measurement of Positronium Hyperfine Splitting”, 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz2011), USA, October 2011.
- [113] A. Ishida, “Precise measurement of positronium hyperfine splitting using the Zeeman effect”, Fundamental Physics Using Atoms 2011 (FPUA2011), Japan, October 2011.
- [114] A. Ishida, “Precision measurement of positronium hyperfine splitting using the Zeeman effect”, Cold Antimatter and High Precision Physics (Pbar11), Japan, November 2011.
- [115] T. Suehara, “The first observation of direct transition between o-Ps and p-Ps by sub-THz radiation”, Cold Antimatter and High Precision Physics (Pbar11), Japan, November 2011.
- [116] T. Yamazaki, “Direct Measurement of the Hyperfine Structure of the Ground State Positronium using High Power Sub-THz Radiation”, The 4th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2012 (FIRT2012), Japan, March 2012.
- [117] “SUSY searches with Displaced Vertices”, Berkeley Workshop on Searches for Supersymmetry at the LHC, USA, October 2011.
- [118] “Search for anomaly-mediated supersymmetry breaking based on a disappearing-track signature with ATLAS”, LHCC2012, Switzerland, March 2012.
- (国内会議)
- 招待講演
- [119] 浅井祥仁, “LHC results”, 基研研究会 標準理論を超えた素粒子理論にむけて: 京大基研 2012年3月.
- [120] 浅井祥仁, “LHC の最新結果、時空と真空を探る”, 研究会 超弦理論と宇宙: 大分県別府市 2012年2月.
- 一般講演
- 第 48 回アイソトープ・放射線研究発表会: 日本科学未来館: 2011 年 7 月
- [121] 大和田健太, “オルソポジトロニウム崩壊におけるガンマ線スペクトル測定”.
- [122] 石田明, “ポジトロニウム超微細構造の精密測定”.
- [123] 末原大幹, “サブミリ波を用いたポジトロニウム超微細構造の直接測定”.
- 日本物理学会秋季大会: 弘前大学: 2011 年 9 月
- [124] 山崎高幸, “サブテラヘルツ波を用いたポジトロニウム超微細構造の直接測定”.
- [125] 石田明, “ゼーマン効果を用いたポジトロニウム超微細構造の精密測定”.
- [126] 大和田健太, “オルソポジトロニウム崩壊におけるガンマ線スペクトル測定”.

- [127] 後藤 嵩史, “LHC-ATLAS 実験における $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu qq$ を用いたヒッグス粒子探索”.
- [128] 山口博史, “LHC-ATLAS 実験における Universal Extra Dimension の探索”.
- [129] 東裕也, “LHC-ATLAS 実験における長寿命荷電粒子の探索”.
- [130] 佐々木雄一, “LHC-ATLAS 実験における 1 レプトンモードでの超対称性粒子の探索”.
- 陽電子科学とその理工学への応用:京都大学原子炉研究所:2011 年 12 月
- [131] 宮崎彬, “ポジトロニウム超微細構造の直接測定 直接遷移の初観測及び超微細構造の測定へ向けて”.
- [132] 石田明, “ポジトロニウム超微細構造の精密測定”.
- [133] 大和田健太, “オルソポジトロニウムを用いた短寿命スカラー粒子の探索”.
- [134] 石田明, “ポジトロニウム超微細構造の精密測定”, 第 18 回東京大学素粒子物理国際研究センターシンポジウム, 長野, 2012 年 2 月.
- 日本物理学会:第 67 回年次大会:関西学院大学:2012 年 3 月
- [135] 山崎高幸, “ポジトロニウムにおける超微細構造間遷移の直接観測”.
- [136] 宮崎彬, “ポジトロニウム超微細構造の直接測定へ向けたミリ波光学デバイスの開発”.
- [137] 石田明, “ゼーマン効果を用いたポジトロニウム超微細構造の精密測定”.
- [138] 大和田健太, “オルソポジトロニウム崩壊におけるガンマ線スペクトル測定”.
- [139] 稲田聡明, “放射光施設を用いた弱結合未知粒子の探索”.
- [140] 山口博史, “ATLAS 実験における Universal Extra Dimension の探索”.
- [141] 東裕也, “LHC-ATLAS 実験におけるグルイーノ対生成過程を用いた長寿命荷電超対称性粒子の探索”.
- [142] 佐々木雄一, “LHC-ATLAS 実験における 1 レプトンモードでの超対称性粒子の探索”.
- [143] 森 永 真 央, “LHC-ATLAS 実験における $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow l\bar{l}\nu\nu$ を用いたヒッグス粒子の探索”.
- (セミナー)
- [144] 石田明, “ゼーマン効果を用いたポジトロニウムの超微細構造の精密測定”, KEK 超伝導工学センターセミナー, 茨城, 2011 年 9 月.
- [145] 浅井祥仁, “テラスケールの物理”, 理研コロキウム, 2012 年 1 月.
- [146] 浅井祥仁, “LHC 実験の現状と最新成果”, 首都大学東京, 2011 年 12 月.
- [147] 浅井祥仁, “The latest results of SUSY results @ LHC focusing on Dark Matter”, 名古屋大学, 2011 年 10 月.
- [148] 浅井祥仁, “Latest results of LHC Focusing on Higgs and SUSY”, 東北大学, 2011 年 9 月.
- [149] 浅井祥仁, “LHC の最新成果 ヒッグスと超対称性を中心に”, 京都産業大学, 2011 年 9 月.

3 物性理論

3.1 青木研究室

青木研では一貫して、「超伝導」、「強磁性」、「トポロジカル系」に代表される多体効果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」における新奇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

非平衡により誘起される超伝導の探求

強相関電子系は超伝導、磁性、Mott 転移などの多彩な相転移現象で知られる。辻、Werner (ETH Zürich)、岡、青木は、これらをレーザーなどの非平衡外場でコントロールし、発現させる方法を提案した [1, 2, 49, 53]。すなわち、強相関電子系や、光格子中の冷却原子系において、定常的なレーザー光を照射すると、一定の条件が満たされると粒子間相互作用を斥力から引力へと変換することが可能であるが理論的に示される [1]。このメカニズムは、レーザー光により粒子が光を着た (Floquet) 状態になるためにバンドが反転し、さらに、光を突然照射する (ac quench) すると負温度状態が実現するためである。負の温度状態の特性を調べるために動的平均場理論を用いて二重占有率の時間発展を見ると (図 3.1.1)、実際に引力系に特徴的な二重占有の増大が見られた。この結果は *Phys. Rev. Lett.* に発表され、Editors' Suggestion に選ばれるとともに、Viewpoint でも紹介された。

さらに、より現実的な単波長パルスを用いた斥力・引力転換も提案した [2]。

多バンド超伝導体における集団励起モード

鉄系超伝導体の発見および複数原子種からなる冷却原子系の実現可能性より、多バンド超伝導や多バンド超流動の研究の重要性が増している。太田、町田 (原研)、小山 (東北大) と青木は、多バンド (3 バンド以上) に亘りゲージ対称性が破れた場合、集団励起モードに単一バンドでは見られない特徴が存在

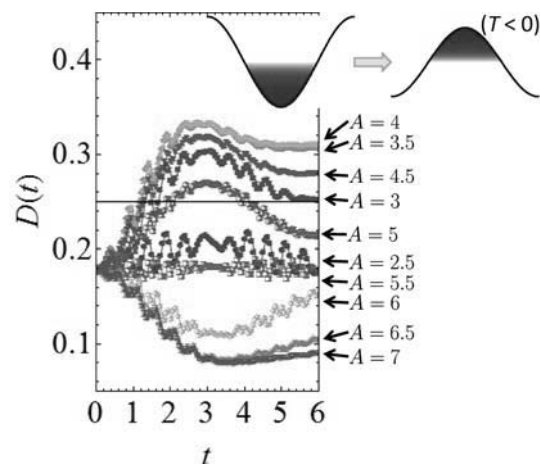


図 3.1.1: Double occupancy, D , in the Hubbard model obtained with nonequilibrium DMFT, plotted for various values of the laser intensity A [2]. Inset schematically depicts an inverted (negative- T) distribution.

することを理論的に明らかにした.[3]

銅酸化物高温超伝導体 — 物質依存性と圧力効果

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 をもつ銅酸化物を、現在の視野で再訪するのは意味が大きい。銅酸化物では、実験的に T_c が低い La_2CuO_4 と高い $\text{HgBa}_2\text{CuO}_4$ があり、前者のフェルミ面は弯曲が小さくネスティングが良く、後者では弯曲が大きいので、理論的には前者の方が高い T_c のはずで、この矛盾が謎となっていた。榊原、臼井、黒木 (電通大)、有田 (東大工) と青木は、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 軌道モデルを構築することにより、超伝導を調べた。[4, 18, 37, 50, 55] これにより、 La_2CuO_4 でネスティングが良いのは dz^2 軌道がエネルギー的に E_F に近いので強く混成するためであるが、 dz^2 軌道が混じると超伝導が抑制され、この効果がフェルミ面形状効果を凌駕することが分かり、さらに、頂点酸素の寄与も重要な因子であることを明らかにした (Fig.3.1.2)。

さらにこの結果を基に、上記の著者および Scalapino (UC Santa Barbara) は、この系を制御する方法として、銅酸化物に一軸性圧力を加えたときの効果を考察した。 $dx^2 - y^2, dz^2$ の 2 軌道は頂点酸素位置に支配され、このため a 軸圧を加えると T_c は上昇し、 c 軸圧では減少することを示した。この結果は、最近の Karlsruhe グループの一軸圧効果の実験結果とも整合する。

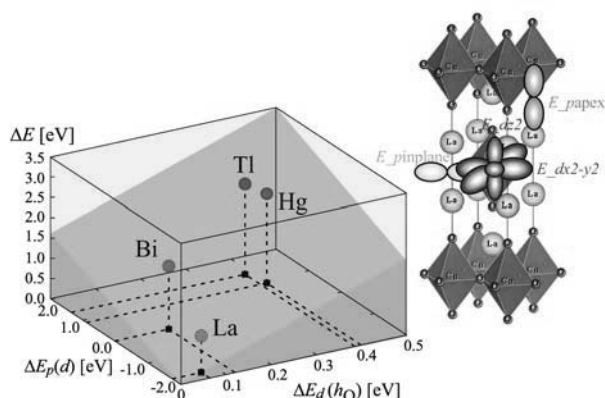


図 3.1.2: ΔE (level offset between $dx^2 - y^2$ and dz^2 Wannier orbitals) plotted against $\Delta E_p = E_{p\sigma} - E_{p\text{apex}}$ and $\Delta E_d = E_{x^2-y^2} - E_{z^2}$ for various cuprates[4]. The inset depicts the relevant orbits.

銅酸化物高温超伝導体 — 多層系

一方、銅酸化物の中でも最高の T_C をもつのは多層系である。西口、黒木、有田と青木は、多層系が一層系とどう異なるかを調べるために、 T_C のピークとなる 3 層系 ($\text{HgBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+2}$, $n = 1, 2, 3$) までに亘り、第一原理電子状態計算により、バンド構造とフェルミ面を求め、多層の効果が層間の一体ホッピングの効果では理解できず、層間のペア・ホッピングが大事であることを明らかにした [38, 39, 51, 56]。

芳香族新有機超伝導体の電子構造

カリウムをドーブした固体ピセン $\text{C}_{22}\text{H}_{14}$ が $T_C = 7-20\text{K}$ において超伝導転移することが久保園 (岡山大) らによって発見された。初めての芳香族超伝導物質である。超伝導機構の解明への第一歩として、小杉と青木は三宅、石橋 (産総研)、有田 (東大工) とともに、固体ピセンの電子状態を初めて第一原理計算により解析した (Fig.3.1.3)[6]。本年度は、 K_1picene から K_4picene に至る電子構造を系統的に求めた [5]。さらに、別の芳香族であるコロネンの電子構造を求め、ピセンとの類似点、相違点を、特に複数あるフェルミ面の異方性の観点から明らかにした [6, 7] (Editors' suggestion)。

また、上野 (千葉大) のグループが固体ピセン結晶の電子構造を UPS, LEED から求めた実験結果に理論解析を与えた (*Phys. Rev. Lett.* に出版予定) [8]。

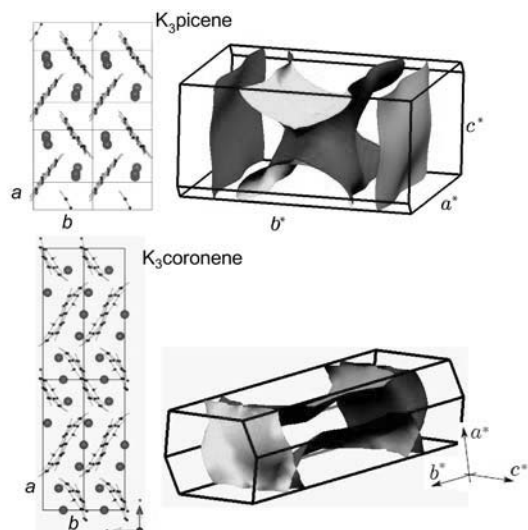


図 3.1.3: Crystal structures and Fermi surfaces of K-doped picene and coronene.[17]

3.1.2 磁性、スピン・ホール効果

近年、中性フェルミ原子における Stoner 強磁性に興味もたれているが、Stoner 強磁性は平均場由来であり、強相関由来の強磁性を中性フェルミ原子系で実現することは興味深い課題である。このため、電子相関からの強磁性について、今年度は、奥村、山田、町田 (原研) と青木は、two-leg ladder 光学格子の磁性を、厳密に評価できる密度行列繰り込み群法を用いて解析を行った [9]。その結果、トラップのための粒子密度が空間変化するために、スピン・インバランスが強い条件下では、各点の粒子密度に応じて、完全強磁性領域、部分偏極領域、非偏極領域に分離することを見出した。

見上、岡、青木は、パリティの異なる 2 軌道の電子模型において、軌道混成により、強誘電秩序を含む multiferroic 相が発現することを提案した。

また、様々な物質において、スピン・ホール効果 (スピン自由度に対するホール効果) に興味もたれているが、Pandey, 紺谷、平島 (名大)、有田、青木は、鉄系超伝導化合物において、バンド構造にディラック・コーンがあるために、鉄のスピン・軌道相互作用により、ホール・ドーブされた 122 系で大きなスピン・ホール効果が生じることを予言した。

3.1.3 トポロジカル系

グラフェンの量子ホール効果とカイラル対称性、指数定理

最近、原子一層のグラファイト (グラフェン) における特異な整数量子ホール効果が実験的に観測され

興味を集めているが、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。グラフェン量子ホール効のトポロジカルな性質の一つは、massless Dirac 粒子特有の $N = 0$ ランダウ準位であるが、不規則性を入れたときにも、カイラル対称性が保たれば、この準位はトポロジカルに安定に存在する。河原林 (東邦大)、初貝 (筑波大)、森本、青木は、より一般に、斜めになった Dirac cone も含めた場合に、「一般化されたカイラル対称性」が存在し、この存在条件は丁度指数定理の成立条件と一致するので、従来漠然と言われていたグラフェン量子ホール効果と指数定理の関連が厳密に示された。(Fig.3.1.4)[10, 19]。また、2層グラフェンの解析も行い、ここでもカイラル対称性のために特異なランダウ準位が存在することを示した [11]。また、渡辺、初貝 (筑波大)、青木は、Nielsen-二宮定理のために偶数個現れる Dirac cone のエネルギーを、nonabelian ゲージ場 (光格子中の冷却原子系で実現可能) を用いて操作できることを示した [22]。有川、初貝、青木は、端状態を議論した [23]。

また、濱本、初貝、青木は、多体効果を入れた場合も、特にカイラル凝縮体においてカイラル対称性がどの様に状態を支配するかを調べた。

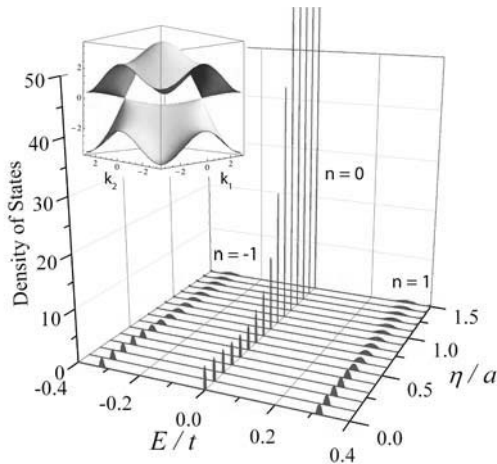


図 3.1.4: The density of states for Landau levels for a model of tilted Dirac cones in the presence of a spatially correlated random bonds for various values of the correlation length η/a . [10]

THz 領域における「光学ホール効果」

量子ホール系では静的ホール伝導度が量子化されるが、森本、初貝、青木は、光学 (ac) ホール伝導度 (興味ある周波数は数 T の磁場下では THz 域) がどうなるかに着目し、通常の量子ホール系およびグラフェンに対して光学ホール伝導度を計算し、ホール・プラトーが意外にも ac 領域でも残ることを見出した

(Fig.3.1.5)[33, 27]。本年度は、ac 領域でのプラトーが波動関数の局在に支配されることから、ダイナミカル・スケーリング [21] や 2 パラメータ・スケーリングである $\sigma_{xx}(\omega) - \sigma_{xy}(\omega)$ ダイアグラムを ac 領域に拡張し、その物理描像を明らかにした [12, 42, 43, 52]。森本は、これらの業績を博士論文にまとめた [58]。

実験的には、島野のグループは、量子ホール系の THz 帯におけるファラデー回転角の測定を行い、光学ホール伝導度におけるプラトー的に振舞いを観測した。本年度は、Cerne (SUNY Buffalo) のグループが、実験的に、サイクロトロン共鳴近傍で光学ホール伝導度のプラトー的振舞いを観測し、森本、青木はこの理論解析を行った。

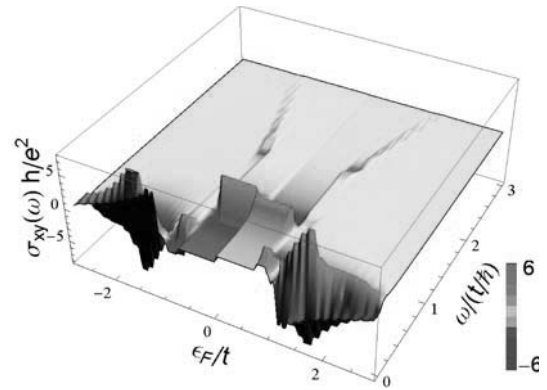


図 3.1.5: Optical Hall conductivity $\sigma_{xy}(\epsilon_F, \omega)$ plotted against Fermi energy ϵ_F and frequency ω for the honeycomb lattice model of graphene with a randomness that respects the chiral symmetry. [21]

光誘起されたゼロ磁場中グラフェン・ホール効果

岡、青木は、強い円偏光を照射するとグラフェン中の Dirac 粒子が光誘起 dc ホール効果を発現する可能性を発見した (Fig.3.1.6)[26, 40, 41]。光誘起ホール効果は既存のホール効果とは異なり無磁場で生じるものであり、円偏光の非線形効果に伴って電子の獲得するベリー位相の非平衡版 (Aharonov-Anandan 位相) によって発生する。光学実験によってこの現象を検証する方法についても提案を行った [20]。また、岡は北川 (Harvard 大) らとともに、光誘起ホール効果における電気伝導の量子化条件について調べた [15]。

グラフェン量子ドット

Maksym (Leicester 大) と青木は、グラフェン量子ドットを強磁場を加えると、Klein パラドックスを逃れることができることを示した。

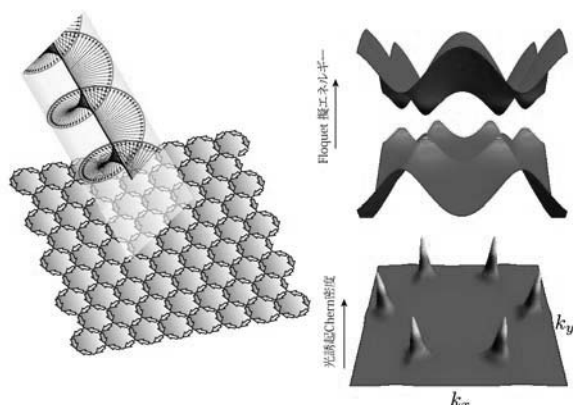


図 3.1.6: When a circularly-polarised light is irradiated onto graphene (left panel), a gap dynamically opens in Dirac cones (top right), which gives rise to an optically-induced Chern density in k-space (bottom right).[28]

ゼオライト鋳型炭素構造

近年、東北大学の京谷グループで合成された“ゼオライト鋳型炭素”は、グラフェンが曲面として3次元ナノ周期構造をなすものであり、その特異な性質に興味をもたれる。是常(東工大理工)、有田、青木は、理論の立場から第一原理的にこの物質の電子状態を明らかにした[44]。特に、価電子帯トップには、軌道磁性を伴う対称性の異なる2個の状態から構成されるという意味で「カイラル」であり、さらに構造が空間反転対称性を欠くことに起因して Γ 点まわりで非対称という興味深いバンド構造を実現し、このために新奇な軌道磁気輸送効果が予言される。

酸化物における分数量子ホール効果

酸化物は普通は絶縁体であるが、川崎(東大工)はMgZnO/ZnO界面に高移動度の2次元電子系を実現させることに成功していた。Maryenko(理研)、川崎のグループは、強磁場中のこの系で5/11など複雑な分数に至る分数量子ホール効果を観測し、小野田(秋田大)、青木はこれを理論的に解析することにより、分数量子ホール効果の標準理論である複合フェルミオン描像において、通常は複合フェルミオンは相互作用しないと見なすのに対し、この系では複合フェルミオン間が強く相互作用している示唆を得た。実験・理論合同の論文として、*Phys. Rev. Lett.* に出版された[13]。

3.1.4 非平衡・非線形現象

強相関電子系[57]やトポロジカル系における非平衡現象は、興味深い分野である。上記の様々な節で解説したが、本年度は以下も行った。

AdS/CFT 双対性による QCD における熱化現象

QCD は強相関電子系と非常によく似た特性を示すことが知られている。さらに AdS/CFT 双対性を用いることにより、閉じ込め・非閉じ込め相転移をまたぐ実時間のダイナミクスを解析することが可能となる。岡は橋本(RIKEN)、飯塚(CERN)と共に、閉じ込め相にあるシステムにおいて粒子数を突然変化させた時の系の振る舞いについて調べた。その結果、非閉じ込め相へと転移し、系が熱化することが示唆された[14]。熱化時間のクエンチ速度依存性を求めたが、RHICの実験で見られる高速なプロセスを裏付けるものとなった。

3.1.5 その他

青木研修士2年の渡辺悠樹さんが理学系学修奨励賞を受賞した。彼は Brauner (Bielefeld 大) とともに、南部・ゴールドストーン・ボソンの数と、自発的に破れた対称性の数の間の関係を明らかにし[16]、修士論文にまとめた[59]とともに、活躍の場を UC Berkeley にも広げている。

青木は、国際会議招待講演で、超伝導(銅酸化物、鉄系、芳香族の俯瞰[17]、軽元素超伝導[31, 32, 34]、BCS50年[29])、非平衡系のダイナミクス[30]について講演し、一般講演も行った[35, 36, 54]。また、量子ホール効果の総説[24]、グラフェンの編著[25]を著した。また、国内会議招待講演や解説を、相関電子系と冷却原子[46, 48]、グラフェンとディラック電子の理論[45, 47]について行った。岡、青木は強相関系の非平衡物理の解説を執筆した[28]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Naoto Tsuji, Takashi Oka, Philipp Werner and Hideo Aoki: Changing the interaction of lattice fermions dynamically from repulsive to attractive in ac fields, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 236401 (2011). (Editors' Suggestion; Viewpoint)
- [2] Naoto Tsuji, Takashi Oka, Hideo Aoki and Philipp Werner: Repulsion-to-attraction transition in correlated electron systems triggered by a mono-cycle pulse, *Phys. Rev. B* **85**, 155124 (2012).
- [3] Yukihiro Ota, Masahiko Machida, Tomio Koyama and Hideo Aoki: Leggett's collective modes in multiband superfluids and superconductors — Multiple dynamical classes, *Phys. Rev. B* **83**, 060507(R) (2011).

- [4] H. Sakakibara, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki: Origin of the material dependence of T_c in the single-layered cuprates, *Phys. Rev. B* **85**, 064501 (2012) (Editor's Suggestion).
- [5] Taichi Kosugi, Takashi Miyake, Shoji Ishibashi, Ryotaro Arita and Hideo Aoki: First-principles structural optimization and electronic structure of picene superconductor for various potassium-doping levels, *Phys. Rev. B* **84**, 214506 (2011).
- [6] Y. Kubozono, H. Mitamura, X. Lee, X. He, Y. Yamanari, Y. Takahashi, Y. Kaji, R. Eguchi, K. Akaike, T. Kambe, H. Okamoto, A. Fujiwara, T. Kato, T. Kosugig and H. Aoki: Metal-intercalated aromatic hydrocarbons — a new class of carbon-based superconductors, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **13**, 16476 (2011).
- [7] Taichi Kosugi, Takashi Miyake, Shoji Ishibashi, Ryotaro Arita and Hideo Aoki: Electronic structure of solid coronene: differences and commonalities to picene, *Phys. Rev. B* **84**, 020507(R) (2011). (Editors' Suggestion)
- [8] Q. Xin, S. Duhm, F. Bussolotti, K. Akaike, Y. Kubozono, H. Aoki, T. Kosugi, S. Kera and N. Ueno: Accessing the surface Brillouin zone and the band structure of picene single crystals, *Phys. Rev. Lett.*, to be published (arXiv:1204.4178).
- [9] M. Okumura, S. Yamada, M. Machida and H. Aoki: Phase-separated ferromagnetism in spin-imbalanced Fermi atoms loaded on an optical ladder: a DMRG study, *Phys. Rev. A* **83**, 031606(R) (2011).
- [10] Tohru Kawarabayashi, Yasuhiro Hatsugai, Takahiro Morimoto and Hideo Aoki: Generalized chiral symmetry and stability of zero modes for tilted Dirac cones, *Phys. Rev. B* **83**, 153414 (2011).
- [11] Tohru Kawarabayashi, Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Topologically protected Landau levels in bilayer graphene in finite electric fields, *Phys. Rev. B* **85**, 165410 (2012).
- [12] Takahiro Morimoto and Hideo Aoki: Two parameter flow of $\sigma_{xx}(\omega) - \sigma_{xy}(\omega)$ for the graphene quantum Hall system in ac regime, *Phys. Rev. B* **85**, 165445 (2012).
- [13] D. Maryenko, J. Falson, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Onoda, H. Aoki and M. Kawasaki: Temperature dependent magnetotransport around $\nu = 1/2$ in ZnO heterostructures, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 186803 (2012).
- [14] K. Hashimoto, N. Iizuka, and T. Oka: Rapid thermalization by baryon injection in gauge/gravity duality, *Phys. Rev. D* **84**, 066005 (2011).
- [15] T. Kitagawa, T. Oka, A. Brataas, L. Fu and E. Demler: Transport properties of non-equilibrium systems under the application of light — Photo-induced quantum Hall insulators without Landau levels, *Phys. Rev. B* **84**, 235108 (2011).
- [16] H. Watanabe and T. Brauner: Number of Nambu-Goldstone bosons and its relation to charge densities, *Phys. Rev. D* **84**, 125013 (2011).
- (国際会議録 (招待講演))
- [17] Hideo Aoki: A perspective of superconductivity as multiband phenomena — Cuprate, iron and aromatic systems, *Proc. STRIPE2011*, Rome, 2011 [J. Superconductivity and Novel Magnetism, DOI 10.1007/s10948-012-1564-7].
- (国際会議録 (一般発表))
- [18] Hirofumi Sakakibara, Hidetomo Usui, Kazuhiko Kuroki, Ryotaro Arita and Hideo Aoki: Two-orbital view on the origin of the material dependence of T_c in the single-layer cuprates, *Proc. LT 26*, to be published in *J. Phys.: Conf. Series*.
- [19] T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai, T. Morimoto and H. Aoki: Generalization of chiral symmetry for tilted Dirac cones, *Proc. Localisation 2011 [Int. J. Modern Phys.: Conf. Series]*, to be published].
- [20] Takashi Oka, and Hideo Aoki: All optical measurement proposed for the photovoltaic Hall effect, *J. Phys.: Conf. Ser.* **334**, 012060 (2011).
- [21] Takahiro Morimoto, Yshai Avishai and Hideo Aoki: Dynamical scaling analysis of the optical Hall conductivity in the graphene quantum Hall system with various types of disorder, *J. Phys.: Conf. Ser.* **334**, 012045 (2011).
- [22] H. Watanabe, Y. Hatsugai and H. Aoki: Manipulation of the Dirac cones and the anomaly in the graphene related quantum Hall effect, *J. Phys.: Conf. Ser.* **334**, 012044 (2011).
- [23] Mitsuhiro Arikawa, Hideo Aoki, Yasuhiro Hatsugai: Edge states in graphene quantum Hall system with bond vs potential disorder, *J. Phys.: Conf. Ser.* **334**, 012043 (2011).
- (編著書)
- [24] Hideo Aoki: Integer quantum Hall effect in P. Bhattacharya, R. Fornari and H. Kamimura (ed.): *Comprehensive Semiconductor Science & Technology* (Elsevier, 2011), pp.175-209.
- [25] Hideo Aoki and Mildred Dresselhaus (ed.): *Physics of Graphene* (Springer-Verlag, to be published).
- (国内雑誌)
- [26] 岡 隆史、青木秀夫：グラフェンのトポロジカルな性質とその光制御、*表面科学* **32**, 196 (2011)。
- [27] 森本 高裕、池辺 洋平、島野 亮、青木 秀夫：光で見る量子ホール効果、*日本物理学会誌* **66**, 365 (2011)。
- [28] 岡 隆史、青木秀夫：強相関係の非平衡物理、*日本物理学会誌* **67** 234 (2012)。
- [29] 青木秀夫：BCS — 50 years (書評)、*日本物理学会誌* **67** (2012)、印刷中。

< 学術発表 >

(国際会議)

招待講演・総合報告 (会議録掲載以外)

- [30] Hideo Aoki: Nonequilibrium electron dynamics — photovoltaic Hall effect and ac-induced repulsion-attraction conversion (Int. Conf. “Ultrafast Dynamics in Strongly Correlated Systems”, ETH Zürich, 4 Apr 2011).
- [31] Hideo Aoki: Theoretical outlook on light-element superconductivity (EU-Japan programme “LEMSUPER” workshop, Durham, 16 Oct 2011).
- [32] Hideo Aoki: First-principles electronic structure of aromatic superconductors — solid picene and coronene (Int Workshop “Nanospaces”, Sendai, 24 Nov 2011).
- [33] Takahiro Morimoto: Theory of optical responses in graphene quantum Hall systems (“Graphene synthesis and characterisation for applications”, Windermere, UK, Nov. 2011).
- [34] Hideo Aoki: Light-element superconductivity (EU-Japan programme “LEMSUPER” workshop, Tokyo, 31 Mar 2012).

一般発表 (会議録掲載以外)

- [35] Hideo Aoki: A perspective of superconductivity as multiband phenomena — Cuprate, iron and aromatic systems (Technische Universität Wien, CMS seminar, Vienna, 18 July, 2011).
- [36] Hideo Aoki: Organic superconductivity (Cavendish Laboratory, Cambridge, Optoelectronics seminar, 20 Oct. 2011).
- [37] H. Sakakibara, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki: Two-orbital analysis on the material dependence of T_c in the single-layered cuprates (APS March meeting, Boston, 2012).
- [38] K. Nishiguchi, K. Kuroki, R. Arita, H. Aoki: Theoretical Study of Superconductivity in Multi-layered Cuprates, (*XVI Training Course in the Physics of Strong Correlated Systems*, 14 Oct 2011, IIASS Viareggio sul Mare, Italy).
- [39] K. Nishiguchi, K. Kuroki, R. Arita, T. Oka, H. Aoki: Effect of Inter-layer single electron- and Pair-hopping on Superconductivity in Multi-layered Cuprates, (APS March meeting, Boston, 2012).
- [40] Takashi Oka: Theory of non-linear collective photoexcitations in a Mott insulator (CORPES, California, USA, July 2011).
- [41] Takashi Oka: Exact photo-carrier creation rate in the one-dimensional Mott insulator (*Workshop on Ultrafast Dynamics in Strongly Correlated Systems*, Zürich, April 2011).

- [42] Takahiro Morimoto, and Hideo Aoki: Flow diagram of the longitudinal, and Hall conductivities in ac regime in the disordered graphene quantum Hall system (*LT26*, Beijing, Aug. 2011).
- [43] Takahiro Morimoto, and Hideo Aoki: Two parameter flow diagram of the longitudinal, and Hall conductivities in ac regime in the disordered graphene quantum Hall system (*NQS 2011*, Kyoto, Dec. 2011).
- [44] T. Koretsune, R. Arita and Hideo Aoki: Electronic structures of possible zeolite-templated carbon $C_{36}H_9$ (Int Workshop “Nanospaces”, Sendai, 24 Nov 2011).

(国内会議)

招待講演

- [45] 青木秀夫: グラフェンとディラック電子の理論 (名古屋大学 物性談話会, 13 Sept 2011).
- [46] 青木秀夫: はじめに — 相関電子系と冷却原子を結び何が見えるか (日本物理学会、「冷却原子と相関電子系」シンポジウム、富山、22 Sept 2011).
- [47] 青木秀夫: グラフェンにおけるディラック電子 (日本物理学会、「ディラック電子系の物性」シンポジウム、富山、22 Sept 2011).
- [48] Hideo Aoki: Cold-atom vs correlated-electron systems — prospects and new facets (“Ultracold Fermi gas, superfluidity and strong correlation” workshop, Tokyo, 11 Jan 2012).

一般発表

- [49] 青木秀夫: 強 AC 電場中の低次元量子多体系における新奇非平衡現象 (「動的相関電子系の光科学」シンポジウム、京都、13 June 2011).
- [50] 榊原寛史、臼井秀知、黒木和彦、有田亮太郎、青木秀夫: 銅酸化物における超伝導転移温度の一軸性圧力効果の第一原理計算による解析 (日本物理学会、富山、Sept 2011).
- [51] 西口和孝、黒木和彦、有田亮太郎、青木秀夫: 多層銅酸化物高温超伝導体の層数効果と超伝導 (日本物理学会、富山、Sept 2011).
- [52] 森本高裕、青木秀夫: グラフェン量子ホール系における光学縦伝導度と光学ホール伝導度に対する $\sigma_{xx} - \sigma_{xy}$ ダイアグラム (日本物理学会、富山、Sept. 2011).
- [53] 青木秀夫: 強 AC 電場中の低次元量子多体系における新奇非平衡現象 (「動的相関電子系の光科学」シンポジウム、京都、6 Jan 2012).
- [54] 青木秀夫: 凝縮系における対称性自発的破れ — 超伝導を中心に (日立中央研究所セミナー、12 Dec 2011).
- [55] 榊原寛史、臼井秀知、黒木和彦、有田亮太郎、青木秀夫: 銅酸化物における d_{z^2} 軌道混成による超伝導抑制メカニズム (日本物理学会、神戸、March 2012).
- [56] 西口和孝、黒木和彦、有田亮太郎、岡隆史、青木秀夫: 多層銅酸化物高温超伝導体のペアホッピングと超伝導 (日本物理学会、神戸、March 2012).

- [57] 岡 隆史: モット絶縁体におけるダブロンホロン対の非線形光励起の理論 (日本物理学会、神戸、March 2012)。

(学位論文)

- [58] Takahiro Morimoto: Theory of optical responses in the ordinary and graphene quantum Hall systems (博士論文, 2011 年 12 月)。
- [59] Haruki Watanabe: Relation between the number of Nambu-Goldstone bosons and charge densities (修士論文, 2012 年 1 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のもとでの量子ダイナミクス、
 などについて研究を進めている。

協力現象の統計力学に関しては、いろいろな新しいタイプの相転移の発見、その機構解明に努めている。特に、23年度は、我々のグループが提案してきた、構成要素の体積変化によって生じる実効的長距離相互作用系での秩序形態、秩序形成や、熱力学的極限が取れない長距離相互作用系での特異な熱力学的振る舞い、さらにはエントロピー効果のため複数の秩序状態が混合して存在する混合相の機構などについて研究を進めた。

また、クーロン相互作用系での確率過程の数学的定式化についても研究を進めた。さらに、熱電効果など輸送現象の一般理論についても研究を行った。

量子統計力学に関しては、外場による駆動と散逸過程の競合、あるいは相乗効果によって引き起こされる実時間量子ダイナミクスの機構解明・制御、非平衡相転移を研究した。また、高次スピン系での可解モデルでの境界条件に関する研究も行った。

3.2.1 相転移協力現象の研究

相転移現象は、統計力学の最も興味深い現象の一つであり、これまで低次元性、フラストレーション、ランダムネス、量子効果、格子自由度などによる大きなゆらぎを持つ系での相転移の特徴を調べてきた。(S. Miyashita, Phase transition in spin systems with various types of fluctuations, Proceedings of the Japan Academy, Series B 86, 643-666 (2010)、演習形式で学ぶ相転移・臨界現象 [22] 参照)

23年度は以下のテーマに関する研究を進めた。

長距離相互作用のもとでの協力現象の研究

スピントロニクス物質、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場合、それらの状態の間のスイッチを磁場や光、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。これらの系はこれまで、その双安定性を表すイジングモデルでモデル化でき、強磁性体の相図を用いて、平衡状態、準安定状態がどのように温度の関数として表されるかについての系統的な分類に成功し、隠れた相の発見に成功してきた。[55] さらに、これらの系の新しい特徴として、通常のイジングモデルとは異なり、局所状態によって格子構造が異なり、格子変形による弾性相互作用により実効的な長距離相互

作用が生じることを発見し、その特徴を調べてきている。[23]

長距離相互作用の特徴の一つは、空間的に不均一なクラスターを作らないことである。しかし、格子変形による長距離相互作用系と最近接相互作用が共存する場合には、後者のために局所的なクラスター化が引き起こされる。特に、臨界点直上での相関長は前者だけの場合はゼロであるが、後者の場合には無限大である。この二つの相互作用の強さの割合の変化に伴う秩序形態の移り変わりについて、まず、固定した格子上で完全な長距離相互作用と最近接相互作用が共存する系において調べた。相転移自身は少しでも長距離相互作用が入ると長距離相互作用系のものになり、臨界点直上でも相関長は発散しないという特徴を持つ。しかし、短距離相間は最近接相互作用の大きさに応じて増大する。この様子を表すスケーリング関係を導き、詳しいモンテカルロ法を用いて検証した。[3] 図 3.2.1 に、ビンダーパラメータと呼ばれる量を用いた臨界点の同定の様子を示す。系が大きくなるに従って、交点が短距離的な値 (0.6 付近) から長距離系での値 (0.27 付近) へ移行する様子がわかる。長距離相互作用が実効的に現れる弾性相互作用モデルでも同様な関係が成立することも明らかにした。[8, 55, 21]

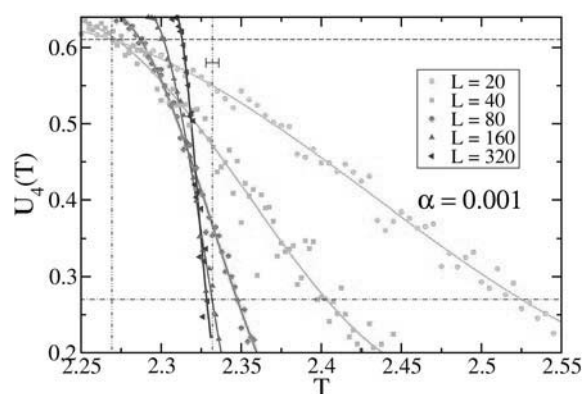


図 3.2.1: 長距離相互作用と最近接相互作用が共存する系でのビンダーパラメータの温度依存性

長距離相互作用のもとでは系の均一化が起こり、平均場理論が成り立つことが期待される。確かに、無限レンジモデルでは厳密に平均場近似が成り立ち、そうでない場合にも非加法的な相互作用を持つ系では、秩序変数が保存しない場合の平衡状態に関しては自由エネルギーが繰り込まれたパラメータをもつ平均場理論の自由エネルギーと厳密に一致する。しかし、格子ガスモデルなど秩序変数が保存する場合には、一般に二相共存など巨視的な不均一が起こる。このような場合は平均場理論での二つの巨視的な安定状態の和として表されてきたが、長距離相互作用系ではそのような描像が成り立たない領域があることを発見した。この領域では、カノニカル集団とミクロカノニカル集団での熱力学的振る舞いが異なるという熱力学的に異常な状況となっており、その特徴につ

いて詳しく調べた。また、スピングラス系などランダム系への拡張も行った。[11]

上でも述べたように、長距離相互作用の特徴の一つは、空間的に不均一なクラスターを作らないことであるが、完全な長距離相互作用系（Husimi-Temperley 模型）以外では、マクロな境界の影響で、双安定の状態間でのスイッチ（スピノーダル現象）時の移行過程では巨視的なドメイン構造が現れる。そのドメイン（臨界核）の構造は、短距離相互作用系では系全体の大きさに依らないミクロなものであるのに対し、長距離系では系の大きさに比例することを発見した。このことは、スイッチ時の系の移行が系の大きさに依らず相似的なものになることを意味し、巨視的核生成（macroscopic nucleation）と名付けた。[38, 54, 6] 同様な、巨視的振る舞いはドメイン壁構造についても現れること（図 3.2.2）や、その伝搬についても研究を進めた。さらに、ストレスによる亀裂発生機構についても研究を進めている。[55, 21] ま

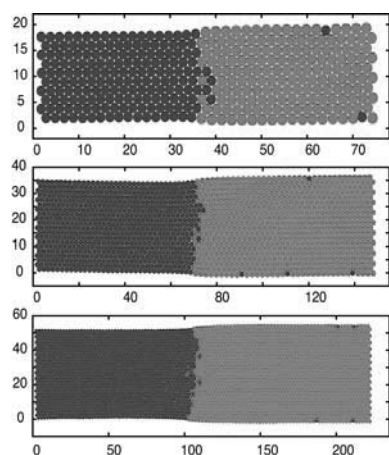


図 3.2.2: 弾性相互作用双安定系でのドメイン壁構造のサイズ依存性

た、このような長距離相互作用系での秩序形成ダイナミクスをマスター方程式の立場からの研究も進めてきた。本年度は、特に、この系でのゆらぎのあり方に関しての考察を行った。[4]

長距離相互作用である双極子相互作用と近接強磁性相互作用の競合によるスピン秩序構造として、実験的に実現されている中空の球殻での強磁性体の秩序構造についても解析した。双極子相互作用が強い極限では、スピンは緯線にそった環状の構造を示し、近接強磁性相互作用が増加するにつれて経線方向にそうように変化することが明らかになった。[20]

エントロピー効果による混合相の研究

熱力学的な相の形成に関するエントロピー効果についても研究を進めた。エネルギー構造に擬縮退構造がある場合、複数個の状態が混合した相が現れることが 3 次元 6 状態クロックモデルやアスキンのテ

ラー模型などで明らかになっており、三角格子反強磁性体でのいわゆる部分無秩序相との関連が明らかにされている。しかし、このような混合相は通常の均一相とは性格が異なりその統一的な理解が無かった。そこで、Zn 対称性を持つスピン系のエネルギー構造を一般的に考察し、混合状態が独立した熱力学的な相として現れる一般的な機構を調べた。特に、より多くの状態の混合相の存在や、混合相間の逐次相転移などを明らかにし、混合相の相図を制御する方法について明らかにした。図 3.2.3 に 6 状態クロック模型で、近接する状態、次近接、次々近接の相互作用が 1:10:100 の場合に、高温から、無秩序状態、3 状態の混合状態、2 状態の混合状態、強磁性状態と逐次相転移が起こる様子を示す。[20]（図 3.2.4）。

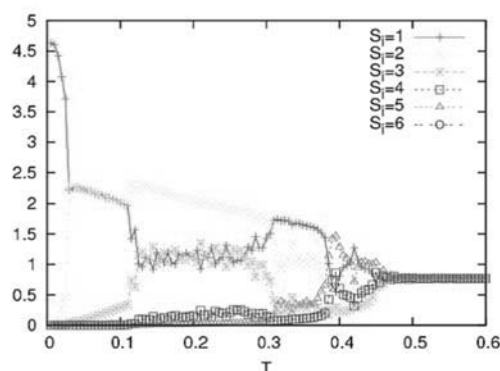


図 3.2.3: 一般化された 6 状態クロック模型での混合相の逐次相転移

確率過程

Dunkl operators と呼ばれる微分差分演算子によって、多次元ブラウン運動の一般化が定義できる。そういった確率過程が Dunkl processes と呼ばれ、数学的な研究対象として盛んに調べられている。この模型は確率過程の Dyson's Brownian motion model などの様々なモデルとの深い関係を持っているおり、その物理的な解釈、特徴、応用などを調べている。この演算子は Calogero-Moser 系などの可積分系に応用されているが、それらとの関係についても研究を進めている。[36, 42, 52]

輸送現象

非平衡統計力学は、最近非平衡揺らぎの分類に関して目覚ましい進展をみせている。揺らぎの定理はその典型である。我々は近年の揺らぎの定理を量子輸送現象で検証することを試みている。[12]

またそれを超えた詳細な重要性質としての候補が相加性原理であり、それを検証発展させる試みも行った。エネルギーやエントロピーなどに関する相加性は、平衡熱力学を支える大事な性質の一つである。こ

ここでいう非平衡系の相加性は、エントロピー生成の分布を考える時に得られる大偏差関数に関する相加性である。この相加性を仮定すると、巨視系の拡散的輸送現象におけるカレントゆらぎの性質が、定量的に決定されてしまう。その意味で大事な概念であるがその妥当性をめぐって十分な検討がなされていないのが現状である。そこで、様々な輸送形態を与えることが分かっている3次元調和格子を使ってこの相加性の妥当性にせまった。[15]

また、平衡系でのクラウジウスの表現を自然に拡張し、量子非平衡状態でのエントロピーを提案した。[14] この非平衡エントロピーは平衡に近い非平衡系で定義されるものであるが、これがどのように意味があるかを理解するためには、今後の研究が必要である。

非平衡定常状態を理解する上で、定常分布がどのように与えられるかを考えるのは、非常に重要である。一般にはそのような研究は難しいが、ハミルトニアンが2次形式で与えられる時の非平衡系では可能である。特にボソン系で考えると、系の物理量に対するコバリアンス行列と定常状態の密度行列は、シンプレクティック行列で結びついていることが分かった。[16]

近年、微小系熱力学において重要性を増している熱効率の一般論を展開し、カルノー効率と仕事率の関係を考察した。具体的なモデルで考察するために磁場反転に関してゼーベック係数が非対称になるモデルの提案を行った。[13, 17]

3.2.2 量子統計力学の研究

量子相

量子系では、不確定性関係を反映して古典系では見られない新奇な状態が現れる。特に、相互作用に競合があるフラスレート系では、量子効果と相乗して多様な状態が出現する。この典型例として、かごめ格子上の反強磁性体ハイゼンベルク模型がある。さらに、スピン状態の量子的混合をもたらすジャロシンスキー・守谷相互作用がある場合が注目を集めている。われわれは、スピンの大きさが副格子上で異なる場合の基底状態、低励起状態を調べた。[5]

また、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に関する研究を進めてきており、非磁性・磁性転移の断熱変化などを研究してきた。特に、化学ポテンシャルの制御による転移機構を発見し、新しい分子磁性モデルを提案している。[2]

量子応答

また、量子系では動的現象にもトンネル現象など特徴ある振る舞いが現れる。それらの発見とその機構の解明を進めてきた。量子系のコヒーレントな運動は、古典的にはない様々な特徴を備えており、その積極的制御は新しい情報操作（量子情報）におい

て重要な役割をする。われわれはこれまで、動的な外場に対する量子力学的応答をミクロな立場から研究し、離散準位系の状態変化における Landau-Zener 理論の役割、またそこでの散逸効果などを調べてきた。また、外場に対する応答は最も重要なテーマの一つであり、これまで強く相互作用している系の共鳴スペクトルなどに関する直接数値計算法の開発や、非平衡系での量子マスター方程式の定式化などを行ってきた。[2]

今年度は、光と物質の相互作用という観点から興味を持たれている物質のエネルギー準位と共振器 (cavity) の光子との結合に関して研究を進めた。キャビティ内のスピンあるいは原子間に直接的な相互作用がない場合でも、光子との結合によってこの系には興味深い協力現象が現れる。量子マスター方程式を用いて、多数のスピン（原子）を含む系が外部からの駆動に対してどのように応答するか、それが駆動力の強さによってどう変わるかを調べた。弱い外場でのいわゆる真空ラビ分離と呼ばれる強結合量子状態から、強い外場での古典的なラビ振動状態への移行機構について明らかにした。[10] 図 3.2.4 に、共振器内の光子数の変動の様子を示す。

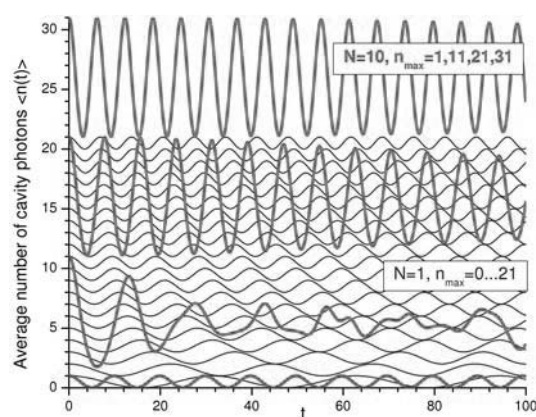


図 3.2.4: 共振器内の光子数の変動の様子：下から真空ラビ分離領域、移行領域、古典的なラビ振動領域

多数のスピン（原子）を含む場合、密度行列を扱う量子マスター方程式では数値計算の際、記憶領域に困難が生じるが、新しいアルゴリズムを開発し、かつパラレル化を進めることで大きな系が扱えるプログラムをスーパーコンピュータ「京」のプロジェクトとして開発した。(ナノ統合シミュレーションソフトウェアライブラリ: Portal site for Application Software Library: quantum-dynamics-simulator)[56]

さらに、巨視的なスピン（原子）を含む系で起こる相転移現象として、駆動力と散逸項のバランスが不連続に変わる非平衡相転移である光双安定性 (optical bistability) と呼ばれる現象と、光子・物質の相互作用によって引き起こされる平衡状態の相転移である Dicke 相転移が知られている。これらの相転移を統一的に理解するため、これまでの簡便な量子マスター

方程式を改め、強い相互作用、かつ強い駆動力のもとでの現象を扱うことのできる量子マスター方程式を構築した。それを用いて、パラメータ全域での定常状態の相図を求め、強相間、強励起下での新しい現象を明らかにした。[37, 43]

量子系における散逸、緩和現象、操作

量子準位間のラビ振動の緩和機構に関して、各原子が置かれた環境（磁場分布、磁気異方性）の効果を取り入れたシュレディンガー方程式を直接計算法によって研究をすすめ、緩和時間と駆動力強度の関係を明らかにし、さらに多数の原子を含む系での磁気原子間の双極子相互作用によるデコヒーレンスを大規模な数値計算によって明らかにした。[7] また、量子力学における個別イベントに関する確率解釈に関して、古典的な機構との違いを明らかにするための実験スキームを提案した。[9]

大きなスピンを持つ可解系の研究

相互作用する多体系において、熱力学的性質に関して分配関数や量子系での基底状態を厳密に求める可解模型に関する研究も進めている。代数的ベータ仮設法を用い、自由境界の効果について、スピン1の系での基底状態の様子を明らかにした。また、超対称サイン・ゴルドン模型を用いて、量子可積分系における境界条件が基底状態におよぼす影響を調べた。基底状態中に含まれる境界束縛状態の様子が明らかになった。さらに、離散系における非線形方程式と超対称サイン・ゴルドン模型の状態との対応関係を明らかにした。[19]

<受賞>

- [1] Seiji Miyashita: Docteur Honoris Causa: Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (France), 18 Octobre 2012.

<報文>

(原著論文)

- [2] S. Miyashita, Quantum Dynamics under Time-Dependent External Fields, *J. Comput. Theor. Nanoscience* **8**, 919-936, (2011).
 [3] T. Nakada, P. A. Rikvold, T. Mori, M. Nishino, and S. Miyashita, Crossover between a short-range and a long-range Ising model, *Phys. Rev. B* **84**, 054433(2011).
 [4] I. Gudyma, A. Maksymov and S. Miyashita, Noise effects in a finite-size Ising-like model, *Phys. Rev. E* **84**, 031126 (2011).
 [5] S. Mohakud, K. Hijii, S. Miyashita and S. K. Pati, Effect of Dzyaloshinskii-Moriya Interactions on Kagome Antiferromagnetic Clusters, *J. Phys. Chem. Sol.* **73**, 374-383 (2012).

- [6] M. Nishino, C. Enachescu, S. Miyashita, P. A. Rikvold, K. Boukheddaden, and F. Varret, Macroscopic nucleation phenomena in continuum media with long-range interactions, *Scientific Reports* **1**, 162 (2011).
 [7] H. De Raedt, B. Barbara, S. Miyashita, K. Michielsen, S. Bertaina and S. Gambarelli, Quantum simulations and experiments on Rabi oscillations of spin qubits: Intrinsic vs extrinsic damping, *Phys. Rev. B* **85**, 014408 (2012).
 [8] T. Nakada, T. Mori, S. Miyashita, M. Nishino, S. Todo, W. Nicolazzai and P. A. Rikvold, Critical temperature and correlation length of an elastic interaction model for spin-crossover materials, *Phys. Rev. B* **85**, 054408 (2012).
 [9] K. Michielsen, T. Lippert, M. Richter, B. Barbara, S. Miyashita and H. De Raedt, Proposal for an Interference Experiment to Test the Applicability of Quantum Theory to Event-Based Processes, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 034001 (2012).
 [10] S. Miyashita, T. Shirai, T. Mori, H. De Raedt, S. Bertaina, and I. Chiorescu, Photon and spin dependence of the resonance lines shape in the strong coupling regime, *J. Phys. B* (2012) in press.
 [11] T. Mori, Instability of the mean-field states and generalization of phase separation in long-range interacting systems, *Phys. Rev. E* **84**, 031128 (2011).
 [12] S. Nakamura, Y. Yamauchi, M. Hashisaka, K. Chida, K. Kobayashi, T. Ono, R. Leturcq, K. Ensslin, K. Saito, Y. Utsumi and A.C. Gossard, Fluctuation Theorem and Microreversibility in a Quantum Coherent Conductor, *Phys. Rev. B* **83**, 155431 (2011).
 [13] G. Benenti, K. Saito and G. Casati, Thermodynamic Bounds on Efficiency for Systems with Broken Time-reversal Symmetry, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 23602 (2011).
 [14] K. Saito and H. Tasaki, Extended Clausius Relation and Entropy for Nonequilibrium Steady States in Heat Conducting Quantum Systems, *J. Stat. Phys.* **145**, 1275-1290 (2011).
 [15] K. Saito and A. Dhar, Additivity Principle in High-dimensional Deterministic Systems, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 250601 (2011).
 [16] A. Dhar, K. Saito and P. Hanggi, Nonequilibrium density matrix description of steady state quantum transport, *Phys. Rev. E*, **85**, 011126 (2012).
 [17] K. Saito, G. Benenti, G. Casati and T. Prosen, Thermopower with broken time-reversal symmetry, *Phys. Rev. B*, **84**, 201306 (2011).
 (国内雑誌)
 [18] 宮下精二, 熱統計力学における物理イメージと数式表現: 状態量とエントロピー, 数理科学 No.576 特集: 物理イメージと数式表現 発想と思考の補助線をたどる, pp20-26.

(学位論文)

- [19] Chihiro Matsui, Quantum inverse scattering method for higher spin systems, Doctoral thesis, The University of Tokyo (2012).
- [20] Shun Kamatsuka: Master thesis, Incompletely Ordered Phase in three dimensional ferromagnetic system, The University of Tokyo (2012).
- [21] Taro Nakada: Properties of phase transitions due to an elastic interaction, Master thesis, The University of Tokyo (2012).

(著書)

- [22] 宮下精二、轟木義一、演習形式で学ぶ相転移・臨界現象、サイエンス社 (SCG ライブラリー 84) pp.1-220.
- [23] C. Enachescu, M. Nishino, S. Miyashita, Theoretical descriptions of spin-transitions in bulk lattices, Wiley (2012), in press.

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [24] C. Matsui, Boundary bound states in spin-1 XXZ model and SUSY sine-Gordon model with Dirichlet boundary conditions, Workshop on Integrability and its Breaking in Strongly Correlated and Disordered Systems, Trieste, 2011/05
- [25] M. Nishino, C. Enachescu, S. Miyashita, P. A. Rikvold, K. Boukheddaden, F. Varret, Macroscopic nucleation and scale free phenomena in long-range elastic interaction systems, International Workshop on Recent Developments of Studies on Phase Transitions, Tokyo, 2011/06/09
- [26] T. Mori, Exactness of the MF theory in long-range interacting systems for various ensembles, International Workshop on Recent Developments of Studies on Phase Transitions, Tokyo, 2011/06/09
- [27] T. Nakada, Ordering process in a short-range Ising and elastic interaction hybrid model, International Workshop on Recent Developments of Studies on Phase Transitions, Tokyo, 2011/06/09
- [28] S. Kamatsuka, Phase transitions of mixed states, International Workshop on Recent Developments of Studies on Phase Transitions, Tokyo, 2011/06/09
- [29] C. Matsui, Boundary bound states in spin-1 XXZ model and SUSY sine-Gordon model with Dirichlet boundaries, Correlation Functions on Quantum Integrable Models, Dijon, 2011/09
- [30] C. Matsui, Boundary bound states in spin-1 XXZ model and SUSY sine-Gordon model with Dirichlet boundaries, CFT AND INTEGRABLE MODELS, Bologna, 2011/09

- [31] T. Mori, T. Shirai, and S. Miyashita, Cooperative Effect of Independent Spin Ensemble under Cavity Photons, International Workshop on Simulation and Manipulation of Quantum Systems for Information Processing (SMQS-IP2011), Juelich, Germany, 2011/10/17-19

招待講演

- [32] K. Saito, Additivity principle in high-dimensional deterministic systems, Noise in Non-Equilibrium Systems: From Physics to Biology, Dresden, Germany, 2011/04
- [33] S. Miyashita, Quantum dynamics and decoherence in the spin ensemble driven by AC field, 7th International Workshop on Nanomagnetism and Superconductivity, Coma-Ruga2011, Coma-Ruga, Spain, 2011/07/03-07.
- [34] S. Miyashita, Dynamical response of paramagnetic system to AC external field, ICC-IMR Workshop on Development of Functionalized Molecule-based Magnetic Materials, Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai, 2011/09/12-13.
- [35] K. Saito, Additivity principle in high-dimensional deterministic systems, Foundations and Applications of Non-Equilibrium Statistical Mechanics, Stockholm, Sweden, 2011/09
- [36] S. Andraus, Dyson's Brownian Motion Model as a Special Case of Dunkl Processes and Dunkl's Intertwining Operator, Recent Topics of Statistical Mechanics and Probability Theory, 中央大学, 2012/03/29
- [37] T. Shirai, T. Mori, H. De Raedt, and S. Miyashita, Cooperative phenomena of paramagnetic systems in a cavity driven by an AC external field, Internal Workshop on simulation and Manipulation of Quantum Systems for Information Processing (SMQS-IP2011), Juelich Supercomputing Centre, 2011/10
- [38] S. Miyashita, Entropy and Phase transitions, Les 20 ans de l'UVSQ au sein de l'UFR des sciences, Université de Versailles, 2011/10/19

(国内会議)

一般講演

- [39] 宮下精二, 光子を媒介とする実効的相互作用のもとでの独立2準位系間のダイナミクス, 基研研究会 2011 非平衡系の物理 —ミクロとマクロの架け橋, 京都大学基礎物理学研究所 湯川記念館パナソニックホール, 2011/08/18-20
- [40] 中田太郎, 短距離相互作用から作られる長距離相互作用とその動的過程, 基研研究会 2011 非平衡系の物理 —ミクロとマクロの架け橋, 京都大学基礎物理学研究所 湯川記念館パナソニックホール, 2011/08/18-20
- [41] 森 貴司, 長距離相互作用系における平均場理論の厳密性, 基研研究会 2011 非平衡系の物理 —ミクロとマクロの架け橋, 京都大学基礎物理学研究所 湯川記念館パナソニックホール, 2011/08/18-20

- [42] S. Andraus, Intertwining Operator for Dyson's Model, 基研研究会 2011 非平衡系の物理 —ミクロとマクロの架け橋, 京都大学基礎物理学研究所 湯川記念館パナソニックホール, 2011/08/18-20
- [43] 白井達彦, 量子ダイナミクスのもとの Optical bistability, 基研研究会 2011 非平衡の物理 —ミクロとマクロの架け橋, 京都大学基礎物理学研究所, 湯川記念パナソニックホール, 2011/08/18-20
- [44] 遠藤祐介, 長距離相互作用系でのドメイン壁の運動, 基研研究会 2011 非平衡の物理 —ミクロとマクロの架け橋, 京都大学基礎物理学研究所, 湯川記念パナソニックホール, 2011/08/18-20
- [45] 西野正理, 宮下精二, C. Enachescu, K. Boukheddaden, F. Varret, スピントロニクスオーバーモデルにおける 長距離弾性相互作用がもたらすスケールフリーな緩和現象, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 2011/09/21
- [46] 森貴司, ミクロカノニカル分布による長距離相互作用スピン系の解析, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 2011/09/21-24
- [47] 松井千尋, 超対称サイン・ゴルドン模型における境界束縛状態, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 2011/09
- [48] 鎌塚俊, 球面上における双極子-双極子相互作用のあるハイゼンベルグモデル, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 2011/09/22
- [49] 宮下精二, 藤堂眞治, 散逸環境での量子ダイナミクスシミュレーションの開発と応用, 第 2 回次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェア説明会, 学士会館, 2012/01/26
- [50] 宮下精二, 中田太郎, 藤堂眞治, 格子変形を伴う双安定状態間相転移シミュレーションの開発と応用, 第 2 回次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェア説明会, 学士会館, 2012/01/26
- [51] 森貴司, 長距離相互作用の働く量子スピン系の解析, 日本物理学会 第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012/03/24-27
- [52] S. Andraus, Intertwining Operator of Dunkl Processes Arising from Dyson's Model, 日本物理学会 第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012/03/24-27
- [53] 白井達彦, 森貴司, 宮下精二, 外部 AC 場によって駆動された Tavis-Cummings model の平衡・非平衡相転移, 日本物理学会 第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012/03/24-27
- [54] 西野正理, 宮下精二, 中田太郎, 遠藤祐介, スピントロニクスオーバー系におけるスピンと格子自由度の時間スケールの相違により発現する緩和ダイナミクス, 日本物理学会 関西学院大学, 2012/03/24-27.
- [55] 宮下精二, 中田太郎, 遠藤祐介, 西野正理, 格子変形を伴う双安定状態間の相転移ダイナミクス, 日本物理学会 関西学院大学, 2012/03/24-27.

招待講演

- [56] 宮下精二, 散逸環境での量子ダイナミクスシミュレーションの開発と応用, 第 2 回次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェア説明会, 東京, 2012/01/26.

(セミナー)

- [57] S. Miyashita, ESR and Nonlinear response of cavity-photon systems, SPring 8, 2011/05/02
- [58] S. Miyashita, Phase transitions of spin-crossover materials and related materials, Department lunch talk, 2011/07/07
- [59] S. Miyashita, Introduction to phase transitions and critical phenomena, UTRIP, 2011/07/20
- [60] S. Miyashita, Cooperative dynamics of independent two-level systems via photons in a cavity driven by an external AC field, Saclay, 2011/09/16
- [61] S. Miyashita, Quantum dynamics and response of spin systems, Florida State Univ., 2011/12/01
- [62] K. Saito, Several fundamental problems on heat transport, Stuttgart University, 2012/02/08
- [63] S. Miyashita, Cooperative phenomena of spins in the cavity interacting via an effective interaction due to photons, CNRS Grenoble, 2012/03/09
- [64] K. Saito, Additivity principle in high-dimensional deterministic systems, Stuttgart University, 2012/03/21
- [65] 森貴司, 長距離相互作用系の統計力学と平均場モデル, お茶の水女子大学, 2011/12/22
- [66] 森貴司, 長距離相互作用の働くスピン系と平均場モデルの等価性条件, 東京工業大学, 2012/01/17

(集中講義)

- [67] 齊藤圭司, 非平衡統計力学の基礎と最近の進展, お茶の水女子大学理学部, 2012/01/16-18

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

モット金属絶縁体転移の理論

高温超伝導は、モット絶縁体に動けるキャリアを導入することによって発現するので、超伝導と絶縁体との関係は強相関電子系における最も興味ある研究の1つである [14, 22, 50, 54]。これを理解するために、スピンをもたない ($S = 0$) ボース・ハバードモデルを用いて金属絶縁体転移を詳しく調べた。この系は反強磁性などの磁性を持たないために、磁性による絶縁体化の影響を受けない理想的な系である。我々は電子相関を十分考慮した波動関数を仮定し、変分モンテカルロ法によって正方格子や三角格子上での基底状態を調べた。その結果、1次相転移としての金属絶縁体転移が実現し、モット転移に関する新しい描像を得ることに成功した。[5, 15, 38]

電子相関が強い領域で、系は絶縁体状態となるが、この場合2つの粒子が同時に占有するサイト (doublon) と、穴の開いたサイト (holon) とが束縛状態を作ることがわかる。さらに波動関数の特徴を調べることによって、この絶縁体状態は、doublon-holon 束縛状態の特徴的な距離 ξ_{dh} が平均 doublon 間距離 ξ_{dd} より短くなる場合に生じることが明かになった (図 3.3.1 参照)。逆に、 ξ_{dh} が ξ_{dd} より長くなると、doublon-holon 束縛状態どうしが重なるようになって金属化するという描像が成立する。高温超伝導体は、このようなモット絶縁体領域にキャリアが導入されたときに生じると考えられる。これに関する我々の論文は J. Phys. Soc. Japan の Editors' Choice に選ばれた。[5]

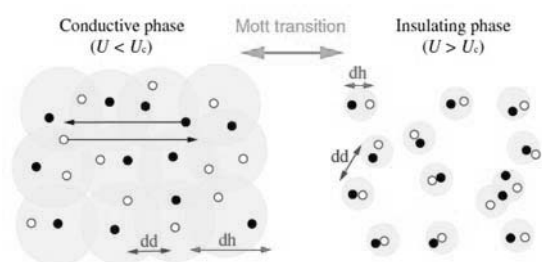


図 3.3.1: 黒丸が doublon、白丸が holon を表す。右図は束縛状態を作った絶縁体状態で、左図は束縛状態が重なり合って金属となった状態。[5]

多層系銅酸化物超伝導体の理論

銅酸化物高温超伝導体は、2次元平面をなす CuO_2 面におけるキャリアが超伝導になると考えられている。さらに、unit cell 内の CuO_2 面の数が1枚のもの、2枚のもの、3枚のものなどというように異なる物質も合成されている。この CuO_2 面の枚数によって、超伝導転移温度や、相図中での反強磁性相と超伝導相の位置関係などが異なることが知られている。この問題に対して、多層系の t - J モデルを考え、RVB 平均場理論をもとに相図や超伝導転移温度、反強磁性との関連などを調べた。得られた結果は、(1) 反強磁性秩序がスピンスングレット秩序変数と競合して、スピンスングレット形成温度を低下させること、(2) 磁性がリエントラントな変化を示している。

3.3.2 鉄砒素系超伝導体に関する理論

2008 年の発見以来、世界的に注目を集めている鉄砒素系超伝導体に関して、いくつかの角度から超伝導や特徴のある磁性に関する理論的研究を行っている。

鉄系超伝導体における不純物効果の研究

鉄系超伝導体においては、磁気揺らぎによる超伝導、いわゆる s_{+-} 状態が実現しているかどうかのひとつの大きな焦点となっている。これに関して、今までの我々の理論研究で、非磁性不純物近傍の局所状態密度の測定が s_{+-} 状態の検証に有効であることを示した。[23, 31, 32]

この結果を踏まえ、さらに非磁性不純物と磁性不純物の違いについての研究を行った [52]。具体的には、 s_{+-} 状態と s_{++} 状態 (磁気揺らぎ由来でない通常の超伝導) 及び両者の中間的な状態を記述できる最も単純なモデルを用いて解析的な計算を行い、不純物由来のギャップ内束縛状態の数を調べた。結果として、純粋な s_{+-} や s_{++} 超伝導の場合には磁性不純物と非磁性不純物との違いはあまりないが、両者の中間的な状態の場合には磁性不純物と非磁性不純物とで明確な違いが現れることがわかった。中間的な状態の場合、非磁性不純物近傍には束縛状態が2つ、磁性不純物近傍には4つ現れる (純粋な s_{+-} や s_{++} の場合には2つ)。この結果は、これまでにあまり研究されていなかった s_{+-} と s_{++} の中間的な状態において、新しい現象が出現しうることを示唆している。

以上の解析計算による研究に加え、数値計算による研究も進展させた。これについては、STMの実験研究者とも協力しつつ、鉄系超伝導体の FeAs 面に導入された Co 不純物近傍の局所状態密度の計算を行い (図 3.3.2 参照)、超伝導ギャップ関数の構造についての知見を与えることができた。[12]

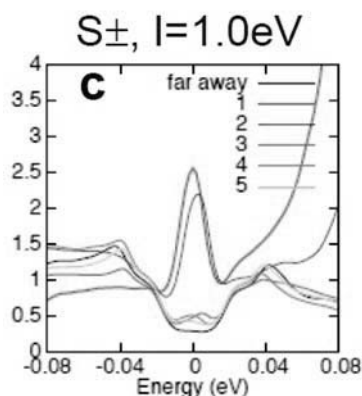


図 3.3.2: 5 軌道モデルで計算された不純物近傍での局所状態密度。1 から順に、不純物から遠ざかっていく鉄サイト上の局所状態密度を示す。[12]

超伝導状態における軌道自由度と結晶場エネルギー

鉄砒素系化合物の電子状態における、鉄の 3d 軌道の役割および格子の自由度の役割を理解するために、orthorhombic なひずみで結びついている d_{xz} 軌道と d_{yz} 軌道の 2 つに着目し、反強磁性状態および超伝導状態の理論解析を行った。まず鉄の 5 軌道の tight-binding モデルから出発し、 d_{xz} 軌道と d_{yz} 軌道との間の交換相互作用が超伝導を引き起こすメカニズムであると仮定して、平均場近似による超伝導状態の解析を行った。結晶構造として、テトラ相およびオルソ相を考慮した。その結果、パラメータ全領域でフルギャップの s_{+-} 波が安定になること、オルソ相での T_c はテトラ相でのそれより低くなること、オルソ相での超伝導ギャップが大きな異方性をもつことを示した。これらの結果は、多軌道系の超伝導状態において、結晶場のエネルギーが超伝導転移温度や超伝導ギャップを決定するのに重要な役割を果たしていることを示唆している。[10]

3.3.3 有機導体に関する理論

有機導体（分子性導体）は関連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。[6] はレビューである。

鉄-フタロシアニン化合物の局所電子状態の理論

鉄-フタロシアニン (Pc: 図 3.3.3) 化合物 $\text{TPP}[\text{FePc}(\text{CN})_2]_2$ は、3/4 フィリングの Pc の分子軌道 (π 軌道) が一次的につなぎ、同時に鉄の d 軌道に $S = 1/2$ の局在スピンがある系である。この系は伝導電子と局在スピンが相互作用する 1 次元物質として、多彩な興味深い性質を示す。例えば、この系は低温で巨大な負の磁気抵抗を示す。また、 π 電子による電荷秩序や d 電子による磁気秩序が現れることも知られ

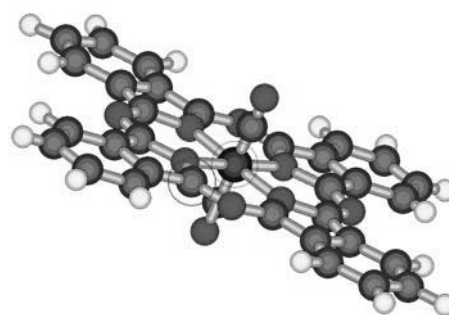


図 3.3.3: 鉄-フタロシアニン (Pc)。中央にあるのが鉄元素で、そのまわりがフタロシアニン。この大きな分子が 1 次的に並んだ構造をもつ。

ている。この系に関して以下の二つの研究を行った。

(A) π - d 相互作用の発現機構とその符号の解明

Pc の π 軌道と鉄の d 軌道間の π - d 相互作用は、負の磁気抵抗の原因の一つである。しかし、 π - d 相互作用の微視的発現機構は解明されていない。このような状況のため、我々は、Pc の π 軌道と鉄の d 軌道を含んだ有効モデルを構築し、 π - d 相互作用の発現機構について研究した。その結果、「 d 軌道と Pc 分子軌道間の超交換相互作用」と「 d 電子内・分子内でのフント結合」によって、反強磁性的な相互作用と強磁性的な相互作用の両方が生じることを摂動論的な計算により明らかにした。これらの π - d 相互作用のメカニズムは、直交した軌道間の相互作用なので、不純物アンダーソンモデルでの伝導電子- f 電子間の相互作用 (混成による c - f 相互作用) とは本質的に異なり、分子の自由度のために生じる新規のメカニズムである。

さらに、相互作用の大きさを摂動論的な方法や数値対角化の方法を用いて見積もった。その結果、現実的なパラメータの範囲で、 π - d 相互作用は強磁性的にも反強磁性的にもなり得ることがわかった。さらに、 π - d 相互作用の有効モデルを導出し、帯磁率の温度依存性を数値くりこみ群を用いて求めて実験との比較を行った。その結果、 π - d 相互作用が反強磁性的である場合のみ、実験を説明できることを示した。[8, 34, 44, 46, 47, 48, 55]

(B) CN 基の超微細構造定数の異常な振る舞い

Fe-Pc 化合物の低温での鉄の d 電子の電子状態を調べるために、CN 基中の炭素サイト (C)・窒素サイト (N) での NMR 測定が最近行われた。その結果、常磁性状態 (電荷秩序や磁気秩序が起こるより高温) では、炭素サイトと窒素サイトで、超微細結合定数の符号が異なることが明らかになった。この実験結果は、分子軌道に基づいた単純な考え方では理解できない現象であり、その微視的なメカニズムは謎であった。我々は、この微視的なメカニズムを明らかにするため、CN 基の分子軌道と C,N の核スピン、

Fe の d 軌道と d 軌道内での多体効果を取り入れた有効模型を構築し、摂動論を用いて解析した。解析の結果、「Fe の d 軌道と CN 基の分子軌道間の超交換相互作用」と「 d 軌道内でのフント相互作用」により、C,N 各々のサイトでスピン密度の符号が異なるというパラメータ領域が現れることが分かった。スピン密度の符号は超微細構造定数の符号に直接的に反映されるので、このパラメータ領域では超微細構造定数の符号が C,N 上で異なり、実験事実をよく説明できることが分かった。[39, 46, 47, 48, 55]

ベンゼン-ダイアニオン ($(C_6H_6)^{2-}$) の LUMO 間の反強磁性的な相互作用

多くの芳香族炭化水素には、縮退した最低非占有軌道 (LUMO) がある。このような分子にさらに 2 つの電子を加えた時、その 2 電子は縮退した LUMO を占有する。その時、2 電子間に強磁性的な相互作用が働くか反強磁性的な相互作用が働くかは自明ではない。ベンゼン (C_6H_6) は 2 重縮退をした LUMO をもつ。ベンゼンに 2 つの電子を加えた時 (ベンゼン-ダイアニオン: $(C_6H_6)^{2-}$) の相互作用が強磁性的か反強磁性的かは明らかにはなっていない。我々は、ベンゼンの有効模型である拡張ハバード模型を構築し、数値対角化を用いてその基底状態の電子状態を調べた。その結果、現実的なパラメータ領域で、 $S = 0$ の基底状態が現れることがわかった。その基底状態を解析した結果、LUMO 間の相互作用は反強磁性的になることが分かった。[7, 40, 48]

異方的三角格子スピン系における時間反転対称性の破れたスピン液体状態

フラストレーションを持つスピン系では磁気秩序が発達しにくいと、「スピン液体状態」と呼ばれる特異な磁気無秩序状態が実現する可能性が指摘されてきた。実際 κ -(BEDT-TTF) $_2$ Cu $_2$ (CN) $_3$ や EtMe $_3$ Sb[Pd(dmit) $_2$] $_2$ という有機物質でこの可能性が議論されている。等方的な三角格子スピン系の基底状態は、隣接したスピンの 120 度ずつ傾いた長距離秩序状態をもつと考えられている。しかし、この状態は正三角格子のときに特異的に実現するものであり、空間的異方性や長距離相互作用などによって、この磁気秩序は溶けてスピン液体状態が生じ得る。実際、空間的異方性が僅かにでもあると、フラストレーションを緩和するために相互作用の異方性が実効的に強まり、一次元化や正方格子化が生じる可能性がある。

我々は、三角格子の基底状態の候補の一つである $d+id$ 波 RVB 状態と呼ばれる複素ギャップ関数を持つスピン液体状態を調べている。この状態に異方性を導入し、それを一般的な三角格子上の試行波動関数として変分モンテカルロ法による解析を行った。その結果、三角格子の異方性がごく僅かであるにもかかわらず、非常に異方的な複素ギャップ関数を持つスピン液体状態が安定となることが示された。これは、強いフラストレーションを緩和するために相互作用の異方性が実効的に強まり、僅かな空間的異方性から一次元化や正方格子化が生じた結果であると

考えられる。さらに、このスピン液体状態のギャップ関数が複素成分を持つことは時間反転対称性が破れていることを意味しており、三角格子スピン系における非自明な物理の可能性を示唆している。[49]

3.3.4 超伝導の理論

二次元 FFLO 超伝導における空間変調パターン

FFLO 超伝導とは、並進対称性が自発的に破れ、空間的に変調した秩序変数を持つ超伝導状態である。この状態は理論的に昔から予言されていたが、現実の物質でその可能性が見出されてきたのは、ごく最近の CeCoIn $_5$ の低温高磁場超伝導相が発見されてからである。理論的には、空間変調パターンとしてストライプ型、正三角形、正方形、正六角形などが議論されている。先行研究では、解析の容易な転移点近傍でのパターンが調べられているが、転移点から離れた十分低温でのパターン等ははまだ明らかにされていない。そこで我々は絶対零度での空間変調のパターンを、Bogoliubov-de Gennes 方程式に基づいて調べた。その結果、同じパターンであっても転移点近傍とは形状が異なり、また、多くのパターンがエネルギー的に縮退する傾向があることを明らかにした。[16, 20, 37, 45]

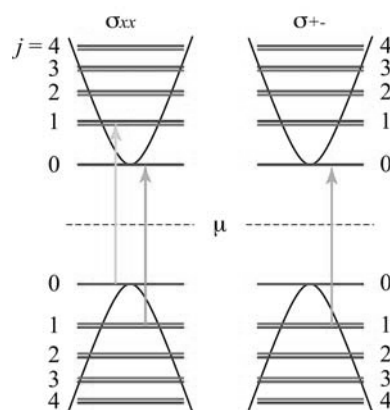


図 3.3.4: ビスマスの分散関係と磁場中のランダウ準位間遷移。(左) σ_{xx} (右) σ_{+-} の場合の可能なランダウ準位間遷移。

3.3.5 ディラック電子系

最近発見された単層グラファイト (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。こうした固体中のディラック電子は、これまでにない新しい伝導現象を生み出すると予想され、新たな電子

状態として非常に興味を持たれている。[13]

我々はこれまでに、ビスマスにおいて特殊な輸送現象が生じることを明らかにし、例えばバンド間ホール伝導度が特殊な性質を持ち、反磁性電流と密接な関係を持っていることを見出してきた。またこのバンド間ホール伝導度は不純物の影響をほとんど受けず、エネルギー散逸が非常に小さいことが期待される。

ディラック電子によるスピン偏極電流

ディラック電子系ではバンド間磁場効果が顕著になると考えられるので、スピン-軌道相互作用が強いビスマスのディラック電子系を取り上げ、磁気光学応答を調べた。その結果をもとに、ディラック電子を用いて完全スピン偏極した磁気光学電流を実現する新しいメカニズムを提唱した。まず、等方的 Wolff 模型において磁場中 ac 電流相関関数を久保公式を用いて計算し、ディラック電子特有の選択則を導いた。とくに円偏光を用いれば、スピン分極した最低ランダウ準位のみに電子を励起することが可能となり、その結果スピン偏極した電流を発生することができることがわかった (図 3.3.4 の右図の σ_{+-} の場合)。さらに、ディラック電子の正確な磁気モーメントの定義を導出し、これをもとにスピン流相関関数を計算し、円偏光のスピン偏極度を求めた。これまでスピン偏極度の理論限界は 50% であったが、今回のディラック電子を用いた新しいスピン偏極電流の発生メカニズムを用いればスピン偏極率を 100% にすることが可能であることを示した。この結果は、光の制御によりスピン流を生み出すことができることを意味し、スピントロニクス分野で新たな展開を可能とするものである。[4, 17, 24, 57]

ディラック電子のスピンホール効果

ビスマス中で実現するディラック電子は、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。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、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は、理論・実験ともにこれまでほとんど調べられていなかった。

我々は久保公式に基づいてディラック電子系のスピンホール伝導度を計算した。その結果、バンド間効果が生むスピンホール伝導度の表式と反磁性の表式とが (係数を除いて) 厳密に一致することを見出した。特に絶縁体領域では、スピンホール伝導度と反磁性が簡単な関係式 ($\sigma_{syx} = (3mc^2/2e)\chi$) で結びつけられていることが分かった。このことは、ビスマスにおいて顕著なスピンホール効果が観測されることを予測しただけでなくとどまらず、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。[17]

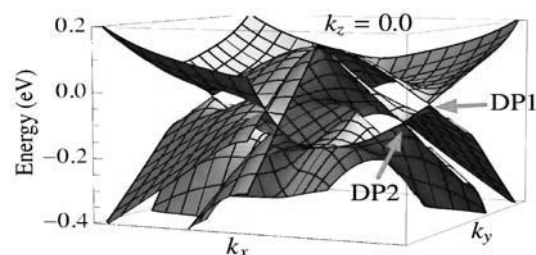


図 3.3.5: Ba_3SnO のフェルミエネルギー近傍の分散関係。DP1 と DP2 が 2 つの Twin Dirac 点を示している。

Ca_3PbO におけるディラック電子の研究

グラフェンやビスマスなどで実現されているディラック電子系は、多くの興味深い性質を示すことが知られている。そこで、ディラック電子系を持つ新しい物質を発見することは、当該分野における重要課題のひとつである。

我々は、第一原理電子状態計算を用いて、立方晶逆ペロブスカイト物質 Ca_3PbO (及びその関連物質) を新しいディラック電子系として提案した [2, 18]。第一原理計算によると、 Ca_3PbO のディラック電子は、ごく小さい質量項を持ち、3 次元的である。このとき、ディラック電子の線形分散の中心、すなわちディラック点が、まさにフェルミエネルギーのところに位置する。さらに、第一原理計算で得られたバンド構造を再現するタイトバインディングモデルを構成した [2, 3, 28, 30, 33, 56]。得られたモデルを解析することによって、低エネルギーの有効ハミルトニアンが確かにディラックハミルトニアンになっていること、ディラック電子を構成するバンドが Pb 6p 軌道と Ca 3d 軌道に由来していること、ディラック電子の出現にはそれらの軌道の対称性が重要な役割を果たしていることなどを明らかにした。このようなディラック電子の起源に関する知見は、新しいディラック電子系を探索するための重要なヒントを与えるものである。

また、上述のタイトバインディングモデルを用いて表面状態の研究も行なった [3, 18]。その結果、バルクの状態とは異なる非自明な表面バンドが出現することを明らかにした。この表面バンドは 2 重縮退 (スピン縮退) を持たないことが重要であり、この表面状態を用いたスピン制御の可能性など今後の研究が期待される。

Twin Dirac 電子系の発見

Ca_3PbO の関連物質である Ba_3SnO に対しても、第一原理計算に基づく電子状態の詳細な解析を行った。その結果、非常に興味深い結果を得た。すなわち、 Ba_3SnO においては 2 つのディラック点がエネルギー・運動量空間できわめて近接して現れることを見出した (図 3.3.5 参照)。我々はこれを Twin Dirac 電子と呼んだ。この特殊な構造のために、ドーピングなどで化学ポテンシャルを人工的に調節すること

ができれば、フェルミ面の形状がトポロジカルな変化を含んで特異的な変化をすることがわかった。このため、たとえば電子の軌道帯磁率が特異な振舞いをするのが実験的に確かめられるはずであるということを提唱した。[18, 41]

3.3.6 重い電子系および近藤効果

ペアホッピング機構による電荷近藤効果の理論

タリウムイオンは1+と3+の形式価数を取り、2+を飛ばすことが知られている。また、錫イオンや鉛イオンは、2+, 4+の価数はとるが3+の価数を飛ばす。これらと同様な現象はヒ素やビスマスでも確認されていて、バレンススキッピングと呼ばれている。この現象を説明するために、原子内機構や原子間機構など多くのメカニズムが提案されている。また、この現象はイオン原子上での引力相互作用 (negative- U) とみなすことができる。

最近、タリウムを少量ドーブした PbTe において近藤効果が確認されて注目を集めている。タリウムイオンはバレンススキッピングをする元素なので、タリウムの電荷の自由度を使った近藤効果 (『電荷近藤効果』) である可能性がある。この電荷近藤効果の起源を明らかにするため、negative- U アンダーソン模型が提案されて電子状態が調べられているが、negative- U (つまりバレンススキッピング) の微視的な起源は明らかではない。我々はバレンススキッピングの起源と電荷近藤効果を説明するために、不純物イオンと伝導電子間のペアホッピング相互作用を含んだ拡張アンダーソン模型を提案し、数値くりこみ群を用いて電子状態を解析した。その結果、ペアホッピング相互作用によって低温で電荷近藤効果が引き起こされることが分かった。同時に、電荷近藤効果が起こる高温では、不純物イオンサイトはバレンススキッピングをしていることが分かった。[9, 25]

遷移金属化合物における軌道自由度に依存した重い電子

通常、大きな有効質量をもつフェルミ準粒子である重い電子は、Ce 化合物や U 化合物のような局在性の良い f 電子系において実現される。しかし、f 電子系に比べて遍歴性が強い d 電子系においても重い電子が形成されることがある。その一つとして、ペロブスカイト型の結晶構造をもつ $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ が挙げられる。この物質では、Sr が Ca に置き換わることによって RuO_6 の八面体がひずむ。たとえば、 $0.5 \leq x < 1.5$ の組成では rotation と呼ばれる RuO_6 八面体の c 軸まわりの格子ひずみが生じ、電子比熱係数が $x = 0.5$ の組成で最大値 255 mJ/mol K^2 に達する。この値は、 Sr_2RuO_4 のバンド計算で得られる値の約 25 倍に対応する。

この重い電子的挙動の起源を解明するため、Ru の t_{2g} 軌道に対する 3 軌道ハバード模型を用いた解析を行った。電子状態に対する rotation の効果は、Ru-O 間の dp 混成の変化として取り入れた。まず、重い電

子系を記述するのに簡便な方法のひとつであるグッツヴィラー近似による変分計算を用いて、 $0.5 \leq x \leq 2$ の組成における有効質量の変化を調べた [19, 21, 27, 29, 36]。さらに、 $0.5 \leq x \leq 2$ の組成における電荷ゆらぎおよびスピンゆらぎを乱雑位相近似を用いて考察した [42]。その結果、この系の重い電子的な挙動は以下の2つの効果によって生じていることがわかった。(1) $d_{xz/yz}$ 軌道の電子が、電子相関による金属絶縁体転移への臨界性として大きな有効質量をもつこと、(2) d_{xy} 軌道のスピンゆらぎが増強されることによって、電子・正孔の臨界的な散乱に伴う有効質量が増大することの2つである。つまり、rotation による軌道に依存した電子状態の変化と電子相関との相乗効果が、 $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ における重い電子的な挙動を引き起こしているといえる。

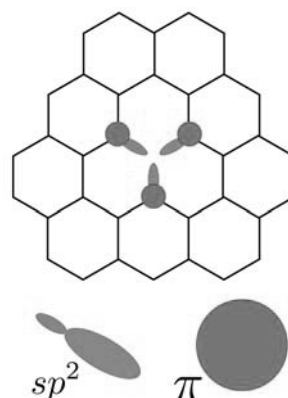


図 3.3.6: グラフェン中の点欠陥とその周りの sp^2 軌道と π 軌道

グラフェンにおける欠陥誘起近藤効果の理論

最近、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。この近藤効果のメカニズムを考え、実験事実 (近藤温度のゲート電圧依存性や通常に比べて大きな負の磁気抵抗) を説明することができるかどうかについて調べた。まずグラフェン中の欠陥周辺での電子状態を考察し、点欠陥ならば磁性不純物のように振舞うことがわかった。さらに、この系を記述する微視的モデルを提案し (図 3.3.6)、数値くりこみ群を用いてその基底状態を解析した。その結果、このモデルによって実験で得られているような近藤温度のゲート電圧依存性を説明することができることを示した。[11, 26, 43, 51]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] M. Ogata: to appear in Physica C. "Stripe states in t - t' - J model from a variational viewpoint"

- [2] T. Kariyado and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 083704-1-4 (2011). “Three-Dimensional Dirac Electrons at the Fermi Energy in Cubic Inverse Perovskites: Ca_3PbO and Its Family”
- [3] T. Kariyado and M. Ogata: to appear in J. Phys. Soc. Jpn. “Low-Energy Effective Hamiltonian and the Surface States of Ca_3PbO ”
- [4] Y. Fuseya, M. Ogata and H. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 013704-1-4 (2012). “Spin-Polarization in Magneto-Optical Conductivity of Dirac Electrons”
- [5] H. Yokoyama, T. Miyagawa, M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 084607-1-16 (2011). “Effect of Doubly-Holton Binding on Mott transition — Variational Monte Carlo Study of Two-Dimensional Bose Hubbard Models”
- [6] A. Ardavan, S. Brown, S. Kagoshima, K. Kanoda, K. Kuroki, H. Mori, M. Ogata, S. Uji, and J. Wosnitzer: J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 011004-1-27 (2012). “Recent Topics of Organic Superconductors”
- [7] H. Matsuura, K. Miyake, and H. Fukuyama: in preparation. “Antiferromagnetic Exchange Interaction between Electrons on Degenerate LUMOs in Benzene Dianion”
- [8] H. Matsuura, M. Ogata, K. Miyake, and H. Fukuyama: submitted to J. Phys. Soc. Jpn. “Theory of Mechanism of π -d interaction in Iron-Phthalocyanine”
- [9] H. Matsuura, and K. Miyake: in preparation. “Theory of Charge Kondo Effect on Pair Hopping Mechanism”
- [10] N. Arakawa and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 0747041-1-11 (2011). “Orbital-Selective Superconductivity and the Effect of Lattice Distortion in Iron-Based Superconductors”
- [11] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: to appear in J. Phys. Soc. Jpn. “Theory of Defect-induced Kondo Effect in Graphene: Numerical Renormalization Group Study”
- [12] H. Yang, Z. Wang, D. Fang, T. Kariyado, G. Chen, M. Ogata, T. Das, A. V. Balatsky, and Hai-Hu Wen: arXiv:1203.3123. “Unexpected weak spatial variation of local density of states induced by individual Co impurity atoms in $\text{Na}(\text{Fe}_{0.95}\text{Co}_{0.05})\text{As}$ as revealed by scanning tunneling spectroscopy”
- (会議抄録)
- [13] H. Fukuyama, Y. Fuseya, M. Ogata, A. Kobayashi, and Y. Suzumura: Proceedings of the International Workshop on Electronic Crystals (ECRYS-2011) (Cargese, 15-27 August 2011), Physica B **407**, 1943-1947 (2012). “Dirac electrons in solids”
- [14] H. Yokoyama, S. Tamura, T. Miyagawa, K. Kobayashi, and M. Ogata: Proceedings of the 24th International Symposium on Superconductivity (ISS2011) (Tokyo, Japan, October 24-26, 2011), Physics Procedia **27**, 60-63 (2012). “Strongly correlated nature of d -wave superconductivity in cuprates”
- [15] H. Yokoyama, T. Miyagawa, and M. Ogata: Proceedings of the 23rd International Symposium on Superconductivity (ISS2010) (Tsukuba, Japan, 1-3 November 2010), Physica C **471**, 730-734 (2011). “Mechanism of superfluid-insulator transition in two-dimensional Bose Hubbard model”
- [16] T. Kanao and M. Ogata: to be published in J. Phys.: Conf. Ser. (2012). “Spatial Modulation Patterns in Two-Dimensional Fulde-Ferrel-Larkin-Ovchinnikov Superconductivity”
- (国内雑誌)
- [17] 伏屋雄紀、小形正男、福山秀敏: to appear in 固体物理 “ビスマスにおけるディラック電子の理論”
- (学位論文)
- [18] 荻宿俊風: “Three-Dimensional Dirac Electron Systems in the Family of Inverse-Perovskite Material Ca_3PbO ” (逆ペロブスカイト Ca_3PbO とその類似物質における 3 次元ディラック電子系) (東京大学大学院理学系研究科・博士論文)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [19] N. Arakawa and M. Ogata: The 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26) (Beijing, China, August 10–17, 2011). “Theoretical Study of Electronic States in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ ”
- [20] T. Kanao and M. Ogata: The 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26) (Beijing, China, August 10–17, 2011). “Spatial Modulation Patterns in Two-Dimensional Fulde-Ferrel-Larkin-Ovchinnikov Superconductivity”
- [21] N. Arakawa and M. Ogata: International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (Cambridge, UK, August 29–September 3, 2011). “Theoretical Study of Electronic States in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ ”
- [22] H. Yokoyama, S. Tamura, T. Miyagawa, K. Kobayashi, and M. Ogata: 24th International Symposium on Superconductivity (ISS2011) (Tokyo, Japan, October 24–26, 2011). “Strongly correlated nature of d -wave superconductivity in cuprates”
- [23] M. Ogata: The 26th Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop “Novel Quantum States in Condensed Matter 2011” (NQS2011) (Kyoto, Japan, November 7–December 9, 2011). “Impurity bound-state as a probe of order-parameter symmetry in iron-pnictide superconductors”

- [24] Y. Fuseya, M. Ogata and H. Fukuyama: The 26th Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop “Novel Quantum States in Condensed Matter 2011” (NQS2011) (Kyoto, Japan, November 7–December 9, 2011). “Interband effects on quantum transport phenomena of Dirac electrons in bismuth”
- [25] H. Matsuura, and K. Miyake: International Workshop on Heavy Fermions, TOKIMEKI 2011 (Osaka, Japan, November 23–26, 2011). “Theory of Charge Kondo Effect on Pair Hopping Mechanism”
- [26] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: International Workshop on Heavy Fermions, TOKIMEKI 2011 (Osaka, Japan, November 23–26, 2011). “Theoretical Study on Defect-induced Kondo Effect in Graphene”
- [27] N. Arakawa and M. Ogata: International Workshop on Heavy Fermions, TOKIMEKI 2011 (Osaka, Japan, November 23–26, 2011). “Origin of the Heavy-Fermion behavior in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ ”
- [28] T. Kariyado and M. Ogata: American Physical Society 2012 March Meeting (Boston, USA, February 27–March 2, 2012). “Three-Dimensional Massive Dirac Fermion in the Bulk Band Structure of Cubic Inverse Perovskite Ca_3PbO ”
- [29] N. Arakawa and M. Ogata: American Physical Society 2012 March Meeting (Boston, USA, February 27–March 2, 2012). “Origin of the Heavy-Fermion behavior in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ ”
- 招待講演
- [30] M. Ogata and T. Kariyado: ICC-IMR International Workshop “Search for New Physics in Transition Metal Compounds by Spectroscopies” (IMR, Sendai, July 28–30, 2011). “New three-dimensional Dirac electron systems: Ca_3PbO and its family”
- [31] M. Ogata and T. Kariyado: The 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26) (Beijing, China, August 10–17, 2011). “Impurity bound-state as a prove of order-parameter symmetry in iron-pnictide superconductors”
- [32] M. Ogata and T. Kariyado: Nordic Conference on Correlated Electron Systems (NCES2011) (Enköping, Sweden, August 23–25, 2011). “Impurity bound-state as a prove of order-parameter symmetry in iron-pnictide superconductors”
- [33] M. Ogata and T. Kariyado: A3 Foresight Program “Joint Research on Novel Properties of Complex Oxides” (Hainan Island, China, December 17–21, 2011). “New three-dimensional Dirac electron systems: Ca_3PbO ”
- (国内会議)
- 一般講演
- [34] 松浦弘泰、小形正男、三宅和正、福山秀敏：日本物理学会、富山大学 2011, 9.21–9.24 (秋季大会) “鉄-フタロシアニン化合物における磁化率の温度依存性の理論”
- [35] 苅宿俊風、小形正男：日本物理学会、富山大学 2011, 9.21–9.24 (秋季大会) “立方晶逆ペロブスカイト物質 Ca_3PbO におけるディラック電子”
- [36] 荒川直也、小形正男：日本物理学会、富山大学 2011, 9.21–9.24 (秋季大会) “ $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ の電子状態解析”
- [37] 金尾太郎、小形正男：日本物理学会、富山大学 2011, 9.21–9.24 (秋季大会) “2次元 FFLO 超伝導における空間変調パターン”
- [38] 横山寿敏、田村駿、小林憲司、小形正男：日本物理学会、関西学院大学 2012, 3.24–3.27 (年次大会) “ドーピングされたモット絶縁体の性質”
- [39] 松浦弘泰、小形正男：日本物理学会、関西学院大学 2012, 3.24–3.27 (年次大会) “遷移金属-フタロシアニン化合物の局所電子状態の理論”
- [40] 山口宏信、松浦弘泰、三宅和正：日本物理学会、関西学院大学 2012, 3.24–3.27 (年次大会) “ $\text{V}_2(\text{C}_6\text{H}_6)_3$ 化合物の磁性発現に関する理論研究”
- [41] 苅宿俊風、小形正男：日本物理学会、関西学院大学 2012, 3.24–3.27 (年次大会) “立方晶逆ペロブスカイト物質 Ba_3SnO の電子状態”
- [42] 荒川直也、小形正男：日本物理学会、関西学院大学 2012, 3.24–3.27 (年次大会) “ $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ の重い電子形成に対する量子ゆらぎの役割”
- [43] 金尾太郎、松浦弘泰、小形正男：日本物理学会、関西学院大学 2012, 3.24–3.27 (年次大会) “グラフェンにおける欠陥誘起近藤効果”
- [44] 松浦弘泰、小形正男、三宅和正、福山秀敏：新学術領域研究「分子自由度が拓く新物質科学」第5回領域会議 (東大小柴ホール、2011, 6.8–6.9) “鉄フタロシアニン化合物における g 因子の異方性と π - d 相互作用の起源に関する理論的研究”
- [45] 金尾太郎：第5回 G-COE RA 自主研究会、(静岡、熱海、2011, 6.14–6.16) “2次元 FFLO 超伝導における空間変調パターン”
- [46] 松浦弘泰、小形正男、三宅和正、福山秀敏：強相関電子系理論の最前線 — 若手によるオープン・イノベーション — (和歌山、紀伊勝浦、2011, 12.6–12.8) “遷移金属-フタロシアニン化合物の局所電子状態の理論”
- [47] 松浦弘泰、小形正男、三宅和正、福山秀敏：新学術領域研究「分子自由度が拓く新物質科学」第6回領域会議 (宮城、秋保温泉、2012, 1.5–1.7) “遷移金属-フタロシアニン化合物の局所電子状態の理論”
- [48] 松浦弘泰：第5回東北大学 G-COE 研究会 (宮城、東北大学、2012, 1.20–1.22) “有機分子-遷移金属化合物の磁性理論：Fe-Pc と $\text{V}_n\text{Bz}_{n+1}$ ”
- [49] 林 勇太、小形正男：次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開発 第2回ソフトウェア説明会 (東京、学士会館、2012, 1.26) “スピン液体状態の探索”

- [50] 小形正男、横山寿敏：東京大学物性研究所 共同利用スーパーコンピュータ成果報告会 “計算科学の課題と展望”（東京大学物性研、2012, 2.20–2.21）“2 次元ハバードモデルの変分モンテカルロ計算”
- [51] 金尾太郎、松浦弘泰、小形正男：次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開発 第 6 回公開シンポジウム（兵庫、神戸、2012, 3.5–3.6）“グラフェンにおける欠陥誘起近藤効果”

招待講演

- [52] 荻宿俊風、小形正男：京都大学基礎物理学研究所研究会「鉄系高温超伝導の物理」（京都大学、2011, 6.16–6.17）“鉄系超伝導体の秩序変数と不純物束縛状態の理論”
- [53] 小形正男：日本物理学会、富山大学 2011, 9.21–9.24（秋季大会）領域 8 シンポジウム「高温超伝導体研究の最近の進展：波数空間と実空間プローブから探る擬ギャップと超伝導ギャップの関係」“まとめ・理論”
- [54] 小形正男：第 56 回 物性若手夏の学校（山梨県富士吉田・ホテルエバーグリーン富士、2011, 8.1–5）“相関の強い電子系における超伝導”
- [55] 松浦弘泰：有機固体若手の会 冬の学校 2011（北海道定山溪温泉、2011, 12.16–12.17）“ π - d 系の磁性理論：鉄-フタロシアニン化合物における π - d 相互作用のメカニズム”
- [56] 荻宿俊風、小形正男：新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」ワークショップ ～多自由度強相関系の新しい量子相～（新潟大学、2011 11.11–11.12）“立方晶逆ペロブスカイト Ca_3PbO におけるディラック電子”

(セミナー)

- [57] 伏屋雄紀、小形正男、福山秀敏：東京大学、駒場物性セミナー（2011, 11）“ビスマス中ディラック電子による新しい輸送現象を目指して”

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巨大な生体分子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、超高压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

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

固体の第一原理電子状態計算にとって最も重要な課題のひとつに、高精度計算の実現がある。最もよく用いられる密度汎関数法理論 (DFT) における LDA や GGA といった簡単な近似には、バンドギャップの評価や強相関系の記述などにおいて精度上の問題点が存在するだけでなく、系統的に近似精度を向上させる方法が明確でない。そこで我々はトランスコリレイティッド (TC) 法と呼ばれる、DFT の枠組みによらない第一原理電子状態計算手法の開発を行ってきた。

TC 法における多体波動関数はスレーター行列式とジャストロウ因子 $F = \exp[-\sum_{i<j} u_{ij}]$ (u_{ij} は二体関数) の積として表される。多体ハミルトニアン H の相似変換により得られる有効ハミルトニアン $H_{TC} = F^{-1} H F$ を用いることで、多体問題をこの (電子相関効果の取り込まれた) 有効ハミルトニアンの下での「平均場近似」に帰着し、得られる 1 粒子方程式を自己無撞着に解くことで、スレーター行列式に含まれる一電子軌道およびその軌道エネルギーが求まる。従って固体のバンド理論と相性が良く、さらに摂動論や配置間相互作用法 (Configuration Interaction) を用いた精度向上の道筋が明らかである。しかし従来の固体計算では、スレーター行列式のみが最適化され、ジャストロウ因子の最適化は行われていなかった。

今年度、我々は昨年度に引き続きジャストロウ因子最適化のための新手法開発を行った。具体的には、TC 法の枠組みの中で計算可能な「擬分散」という量を定義し、その最小化を指導原理としてジャストロウ因子最適化を行う。近距離部分が多項式展開されたジャストロウ関数 $u(x_i, x_j)$ に対してこの手法を適用することにより、バルクシリコンのジャストロウ因子を最適化することに成功した。ただし、現在のところ計算精度が十分でないなどの問題点があり、手法のさらなる改善が今後の課題である。

第一原理波動関数理論のための擬ポテンシャルの開発

トランスコリレイティッド法 (TC 法) による第一原理電子状態計算では、密度汎関数理論の局所密度近似 (LDA) に基づく擬ポテンシャルが用いられてきた。LDA の擬ポテンシャルを用いた TC 法の計算では、実験にかなり近いバンド構造が得られるが、格子定数を小さく見積もってしまう傾向があり、その原因の一部は擬ポテンシャルにあると考えられる。そこで我々は TC 法に向けた擬ポテンシャルとして、TC 法と同じ第一原理波動関数理論であるハートリー・フォック (HF) 法の擬ポテンシャルを作成し、TC 法に適用した。固体 Si の計算では、格子定数の実験値からのずれが 2% (LDA 擬ポテンシャル) から 0.4% (HF 擬ポテンシャル) へと、大幅に改善されるという結果が得られた。

第一原理に基づく固定端シリコンナノワイヤの熱伝導解析

シリコンナノワイヤの熱伝導率はバルクシリコンの値から大幅に減少することが知られている。その低い熱伝導率のおかげで熱電変換性能 $ZT = \sigma S^2 T / \kappa$ が大きく向上することが実験で確かめられ、次世代の熱電変換材料として注目を集めている。理論的な立場から ZT に代表されるデバイス特性を最適化するためには、電子の輸送特性だけではなく格子熱伝導率の高精度計算が必須となる。そこで、本研究では第一原理計算に基づいた格子熱伝導率の計算手法を開発し、固定端シリコンナノワイヤにおける熱伝導特性の解析を行った。

格子熱伝導率の計算手法としては表面効果の取り扱いが容易な非平衡分子動力学法 (NEMD) を用いた。NEMD では系の両端に異なる温度の熱浴を付けてダイナミクスを実行し、その際に系に生じる温度勾配 ∇T と熱流 j から Fourier の法則を用いて熱伝導率 ($\kappa = -j / \nabla T$) を評価する。信頼性の高い計算結果を得るためには長時間・大規模計算を実行する必要があるため、各ステップで各原子に働く力を第一原理計算から導くことは計算コスト上不可能である。そこで我々は汎用的な原子間相互作用モデルを考案し、そのモデルポテンシャルを用いて NEMD 計算を実行した。モデルに含まれるパラメータは第一原理計算に基づいて決定されており、第一原理計算から導かれる原子間力を高精度に再現可能である。

格子熱伝導率の断面積依存性を解析した結果、断面積の減少に従って熱伝導率が低下するという結論が得られた (図 3.4.1)。これは、断面積が小さいほど表面によるフォノン散乱効果が顕著になるためであると考えられる。熱伝導率の値はバルクよりも小さくなっており、例えば 300K では、1.08nm×1.08nm シリコンナノワイヤの熱伝導率はバルクシリコンの 8 分の 1 程度となった。また、個別のナノワイヤにおける熱伝導率の温度依存性は $\kappa \propto T^{-1}$ により記述できるため、3-フォノン Umklapp 散乱が支配的であることも明らかになった。本研究では、熱流に垂直方向の境界条件を固定端とすることで表面効果の取

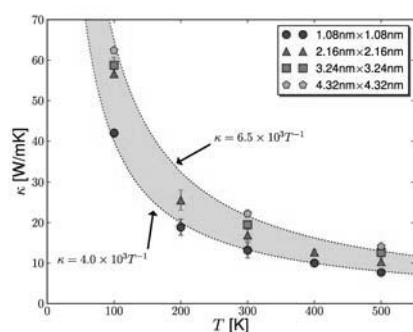


図 3.4.1: 固定端ナノワイヤにおける格子熱伝導率の断面積および温度依存性

り込みを試みた。より現実 に即した自由端表面への適用と表面におけるフォノン散乱の詳細な解析は今後の目標である。

超伝導物性の第一原理計算

物質の基本的な情報 (組成比やブラベー格子など) から種々の物理量を計算する第一原理計算において、超伝導体の転移温度や準粒子励起スペクトル等の超伝導物性を求めることはグランドチャレンジの一つである。我々は近年開発された超伝導密度汎関数理論 (SCDFT) に基づく超伝導物性の第一原理計算をめざし、プログラムの開発を行っている。

SCDFT では多体の波動関数を求めるかわりに超伝導秩序変数の汎関数としてグランドポテンシャル汎関数を定義し、これの最小化を指導原理として秩序変数、及びその温度変化から転移温度を求める。また、実用上は BCS 理論で得られるものと類似のギャップ関数を解く問題に帰着され、計算コストも比較的少ない。ただし、BCS 理論とは異なり電子フォノン結合や電子間の Coulomb 斥力の効果を第一原理から取り入れることが出来る。

本年度はこの手法を用いたプログラムの開発を行い、テスト計算として Al、Nb、 MgB_2 といった比較的単純な物質にこの手法を適用した。Al、Nb では転移温度、ギャップ関数ともに実験値と定量的に一致する結果が得られ、また MgB_2 においては電子フォノン結合の著しい異方性に由来する準粒子励起スペクトルの 2 重ピーク構造を第一原理から定性的に再現した。

今後は電子間の Coulomb 斥力の効果の局所性を取り込みより高精度な計算をすると共に、さまざまな新奇超伝導体への適用を目指している。

フラグメント分子軌道法に基づくタンパク質の全系電子状態計算手法 FMO-LCMO 法の開発

FMO(Fragment Molecular Orbital) 法は、巨大な生体分子をフラグメント分割して電子状態計算を行

うことで、全系のエネルギーや電子密度分布を高速かつ簡便に得る手法である。この FMO 法を土台に LCMO(Linear Combination of Molecular Orbitals) の考え方を適用し、第一原理に基づいて生体分子全系の電子軌道とエネルギースペクトルを得る手法が、当研究室で開発している FMO-LCMO 法である。今年度はより高精度な FMO3-LCMO 法のプログラム実装と高速化、計算結果の可視化ソフトウェアの開発を行い、ソフトウェア公開の準備を進めた。

3.4.2 第一原理電子状態計算の応用

固液界面の電気二重層とそのキャパシタンスに関する第一原理計算

固液界面に生じる電気二重層は電気化学反応の基礎としてやデバイス利用など、基礎・応用の双方で非常に重要な系であり、その研究は古くからなされている。その理論によると電気二重層がもつ静電容量は、Helmholtz 層と呼ばれる、急激な電圧降下が生じている界面近傍の領域でほとんど決まっていると考えられている。しかし Helmholtz 層の静電容量は経験的パラメータとして取り扱われており、また電極材料などの特性も考慮されていなかった。

そこで本研究では Helmholtz 層の静電容量を非経験的に決定し、電気二重層の構造や静電容量の大きさを決める要因をナノスケールから理解する事を目的とした。固液界面のシミュレーションは密度汎関数法に基づく第一原理分子動力学と有効遮蔽媒質法を組み合わせで行った。

電極から溶液内に電場を印加すると、外部電場は分子中の電子と水分子が持つ電気双極子によって遮蔽される。その結果生じる水内部に誘起された静電ポテンシャルを評価するために、本研究では電子と電気双極子による遮蔽効果を個別に扱って、graphene- Na^+ , graphene- Cl^- , platinum- Na^+ 水溶液界面の解析を行った。その結果、いずれの系でも界面近傍のみ大きなポテンシャル変化が生じている事がわかった (図 3.4.2)。このポテンシャル変化に基づいて静電容量を見積もると、それぞれ 11, 7.3, 13 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ という値が得られ、実験で得られているオーダーに一致し、非経験的に Helmholtz 層の静電容量を求めることに成功した。さらに電気二重層における急激なポテンシャル変化は電極-イオン間ではなく、電極-水分子間にある空間で生じている、という新しい電気二重層のモデルを構築することができた。

新しいモデルから、静電容量は電極表面と電極に最近接した水分子の構造に大きく依存することがわかり、電極表面の形状や疎水・親水性などといった特徴から静電容量の大きさを制御できる可能性を示唆することができた。

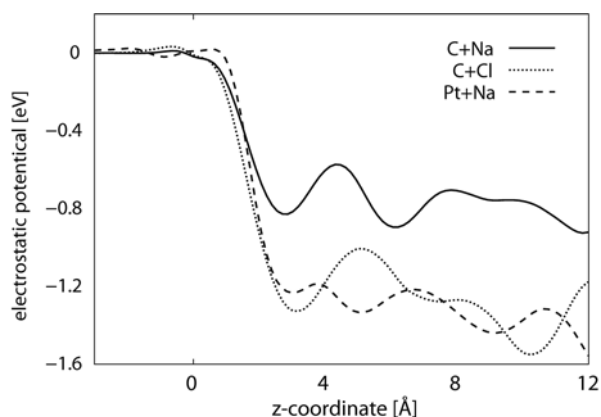


図 3.4.2: 界面近傍での graphene- Na^+ (実線), graphene- Cl^- (点線), platinum- Na^+ (破線) の静電ポテンシャル分布。これらは極表面平行面内で平均化されている。いずれも界面近傍 $2\text{\AA}$ 程度で急激に変化していることが分かる。

結晶成長に伴う基盤グラフェンの構造相転移

グラフェンは基礎的興味のみならず、ナノエレクトロニクスにおける応用においても期待されている。グラファイト基盤上に GaN をパルスレーザー堆積法により成長させた実験が最近報告されており、グラファイト/GaN 界面からグラフェン/GaN 界面を力学的引きはがしやレーザー照射等により得る事は可能であると考えられる。グラファイトあるいはグラフェンと GaN の界面に対して第一原理計算は既に報告されているものの、グラフェン/GaN 界面としては 1×1 周期しか考慮されていない。そこで、本研究では様々な周期構造を第一原理計算により検討し、最安定構造を予測した。

第一原理計算は密度汎関数理論 (DFT) の一般化密度勾配近似 (GGA) による PBE 汎関数により OpenMX コードを用いて行った。まず様々な周期構造に対する安定性を比較検討した。グラフェンは 2 次元物質であるため、その上における GaN の成長に伴い GaN の格子定数に応じて引っ張りの応力を受ける。この状況はグラファイトにおいても、グラファイト層間の相互作用が弱いと同様である。本研究による検討の結果、グラフェン/GaN 界面においてはこの引っ張り応力によりグラフェンの C-C 結合が一部切断され、C-N-C 結合が形成される事が分かった (図 3.4.3)。この圧力誘起構造相転移はグラフェン/AlN 界面では起こらない事も分かった。また、これら両界面の電子基底状態はスピン分極するものの、GaN/MgB₂ 界面と異なり強磁性は安定化しないと結論づけられた。

チタン酸バリウム (BaTiO_3) の強誘電の起源

チタン酸バリウム (BaTiO_3) はエレクトロニクス分野で最も応用が進んでいる強誘電体酸化物の一つであるが、高度な産業応用の発展に比べ強誘電性

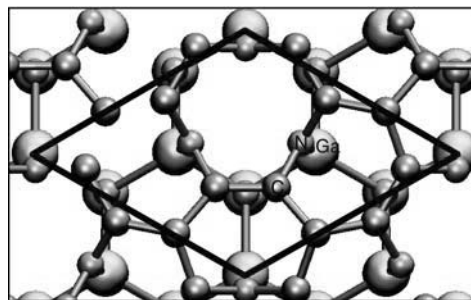


図 3.4.3: GaN 界面の GaN 格子定数における最安定構造

発現メカニズムの理論的解明は未だに乏しい。これまでの研究で我々は BaTiO_3 の強誘電歪が様々なドナードーピング (キャリアドーピング) により消失することを第一原理計算により示してきたが、これらの計算結果をベースに強誘電性発現メカニズムを探る研究を行った。

理論計算は密度汎関数理論 (DFT) をベースにした第一原理計算コード TAPP (Tokyo Ab-initio Program Package) を用いて行った。電子キャリアによる強誘電歪消失の起源を探るために、DFT の全エネルギーを運動エネルギーとクーロンエネルギー項に分割し ($E_{\text{Total}} = E_{\text{Kinetic}} + E_{\text{Coulomb}}$)、それぞれのエネルギー項が強誘電歪ポテンシャルに与える寄与を計算した。図 3.4.4 に示す計算結果から、強誘電歪ポテンシャルは運動エネルギーとクーロンエネルギーのせめぎ合いで生じる非常に僅かなエネルギー差として生じる事と、電子キャリアを導入してゆくと強誘電歪を与えるポテンシャルの極小値消失により強誘電歪が消失することが分かる。中性状態と電子ドーピング状態の強誘電歪ポテンシャルの差分 (図 B) から、強誘電性消失の起源は電子キャリアによるクーロンエネルギー利得低下が主要因である事が分かる。これらの計算結果は、強誘電歪の安定化は長距離クーロン力によって引き起こされるという従来の予想を第一原理的に裏付けている。

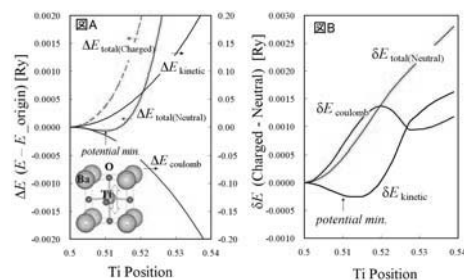


図 3.4.4: BaTiO_3 の強誘電歪ポテンシャル (A) と電子キャリアによる変化 (B)

新しい磁石材料探索へ向けた α ”型窒化鉄の第一原理計算

ハイブリッド自動車のモータのような高温状況下でも使用できる高い保磁力、転移温度を持つ永久磁石は、産業において重要な役割を持つ。現在使われている最も強力な永久磁石はネオジム磁石であるが、これには希少元素であるジスプロシウムが含まれており、資源枯渇などのリスクを抱えている。そのため希少元素を含まない新しい磁石材料が求められている。

希少元素を含まない永久磁石材料として期待されている物質に α ”型窒化鉄がある。 α ”型窒化鉄は磁気モーメントが非常に大きい物質であるが、保磁力がく、永久磁石として産業上の応用には至っていない。そこで α ”型窒化鉄に対し、保磁力の最も根本的な要因である結晶磁気異方性エネルギーの評価を第一原理計算から行い、保磁力を向上させる要因を調べた。結晶格子の歪みに対する結晶磁気異方性エネルギーの変化から、結晶の非対称性と鉄3d電子の状態による結晶磁気異方性エネルギーへの依存性が確認された。保磁力の向上には結晶の非対称性のみならず電子状態の詳細を理解する必要があるといえる。

<受賞>

- [1] 安藤康伸, 第2回計算物質科学イニシアティブ (CMSI) 研究会 優秀ポスター賞「第一原理分子動力学法による固液界面の電気二重層キャパシタンスに関する研究」, 計算科学イニシアティブ, 2012年1月31日.

<報文>

(原著論文)

- [2] Y. Gohda and S. Tsuneyuki, “Structural phase transition of graphene caused by GaN epitaxy”, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 053111 (2012).
- [3] M. Ochi, K. Sodeyama, R. Sakuma, and S. Tsuneyuki, “Efficient algorithm of the transcorrelated method for periodic systems”, *J. Chem. Phys.* **136**, 094108 (2012).
- [4] S. Muratsugu, K. Sodeyama, F. Kitamura, S. Tsukada, M. Tada, S. Tsuneyuki and H. Nishihara, “Normal and Inverted Redox Potentials and Structural Changes Tuned by Medium Effects in $[M_2Mo(\eta^5-C_5Me_5)_2(S_2C_6H_4)_2(CO)_2](M: Co, Rh)$ ”, *Chem. Sci.*, **2** (2011) 1960-1968.

(会議抄録)

- [5] Y. Gohda and A. Oshiyama, “First-principles calculations on spin polarization of vacancies in nitride semiconductors”, *AIP Conf. Proc.* **1399**, 83 (2011).

(学位論文)

- [6] (博士論文) 安藤康伸: “Ab initio molecular dynamics study of the electric double-layer and its capacitance formed on solid-liquid interfaces” (固液界面に生じる電気二重層とそのキャパシタンスの第一原理分子動力学による研究), 東京大学.

- [7] (修士論文) 山本良幸: 「第一原理波動関数理論に基づく擬ポテンシャルの開発」, 東京大学.

- [8] (修士論文) 見澤英樹: 「侵入型鉄化合物における決勝磁気異方性の第一原理的解析」, 東京大学.

- [9] (修士論文) 河村光晶: 「超伝導密度汎関数理論による超伝導転移温度の第一原理的予測」, 東京大学.

(著書)

- [10] 合田 義弘 (分担執筆), 「GaN 中不純物のシミュレーション」, シミュレーション辞典, (コロナ社、東京、2012).
- [11] 岩崎 誉志紀 (分担執筆), 「第一原理計算～構造最適化に向けた材料デバイス別事例集～」, (強誘電体の第一原理計算), (情報機構、東京、2012).

(解説)

- [12] 常行真司「次世代スパコン「京」前夜の計算物質科学」, 日本の科学者 vol.46, No.5 (通算 520 号) 986-991 (2011).
- [13] 常行真司「スパコンで未来社会への競争力を築くー計算物質科学イニシアティブ (CMSI) について」, 工業材料 vol.60, No.4, 18-22 (2012).
- [14] 合田 義弘、押山 淳、常行 真司: 「磁性元素が関与しない磁性? 界面・点欠陥の役割を予測」, 日本物理学会誌 **66**, 836 (2011).
- [15] 岩崎 誉志紀: 「BaTiO₃ の還元処理に対する第一原理計算からの考察」, 日本セラミックス協会誌, **46**, 500 (2011).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [16] Y. Gohda and S. Tsuneyuki, “Possibility of two-dimensional ferromagnetism at nitride-boride interfaces”, The 13th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-13) (Praha, Czech Republic, Jul. 5, 2011).
- [17] Y. Gohda and S. Tsuneyuki, “Structure and electronic properties of nitride interfaces”, The 14th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN14), (Tokyo, Japan, Nov. 1, 2011).
- [18] Y. Gohda and S. Tsuneyuki, “Magnetism at interfaces consisting of nonmagnetic materials”, International Focus Workshop on Quantum Simulations and Design (QSD2011) (Dresden, Germany, Sep. 27, 2011).
- [19] Y. Ando, Y. Gohda, and S. Tsuneyuki: “First-principles study of the electric double-layer capacitance of water/Al interfaces” International Conference on the formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI), Prague, Czech Republic, Jul. 3-8, 2011.

- [20] Y. Ando, Y. Gohda, and S. Tsuneyuki: First-principles study of the electric double-layer capacitance at water-graphene interfaces” The 14th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, Tokyo, Japan, Oct. 31-Nov. 2, 2011.
- [21] Y. Ando, Y. Gohda, and S. Tsuneyuki: “Ab initio molecular dynamics study of the electric double-layer capacitance at solution- electrode interfaces” APS March meeting, Boston, MA, USA, Feb. 27-Mar. 2, 2012.
- [22] T. Tadano, Y. Gohda and S. Tsuneyuki: Thermal conductivity calculations of semiconductors from first-principles anharmonic lattice model, The 14th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN-14), Tokyo, Japan, Nov. 1, 2011.
- [23] T. Tadano, Y. Gohda and S. Tsuneyuki: Non-equilibrium heat transfer simulation with first-principles anharmonic lattice model, 7th US-Japan Joint Seminar on Nanoscale Transport Phenomena, Mie, Japan, Dec. 12, 2011.
- [24] M. Ochi, K. Sodeyama, R. Sakuma, and S. Tsuneyuki, “Efficient algorithm of the transcorrelated method for periodic systems; feasible wavefunction-based approach for solids -” 7th Congress of the International Society for Theoretical Chemical Physics (ISTCP-VII), (Tokyo, Japan, Sep. 4, 2011).
- [25] M. Ochi and S. Tsuneyuki, “Optimization of the Jastrow factor based on pseudo-variance minimization by the transcorrelated method for solids”, The 14th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN14), (Tokyo, Japan, Nov. 1, 2011).
- [26] M. Ochi and S. Tsuneyuki, “New method of optimizing the Jastrow factor for solids with the transcorrelated method”, American Physical Society March Meeting 2012, (Boston, USA, Feb. 27, 2012).
- [27] Mitsuaki Kawamura, Yoshihiro Gohda, and Shinji Tsuneyuki: “Ab initio prediction of superconducting transition temperature based on density functional theory for superconductors”, The 14th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations(ASIAN-14), The University of Tokyo, November. 1, 2011.
- [28] Tomoki Kobori, Takao Otsuka, Makoto Taiji and Shinji Tsuneyuki: Electronic Structure Analysis of FKBP-ligands system based on FMO-LCMO, The 14th Asian Workshop on First-principles Electronic Structure Calculations, Tokyo, Japan, Nov. 1, 2011.
- [29] Y. Iwazaki, Y. Mizuno and S. Tsuneyuki, “First-principles calculation of donor-type defects in perovskite-type oxides generated under hydrogen annealing”, 15th US-Japan Seminar on Dielectric and Piezoelectric Ceramics (Kagoshima, Nov.6-9, 2011).
- 招待講演
- [30] Shinji Tsuneyuki, “Electronic Structure Calculation of Solids with a Similarity-Transformed Hamiltonian”, 4th JCS Symposium on Theoretical Chemistry, Chateau Liblice, Czech, May 18-20, 2011.
- [31] Shinji Tsuneyuki, “First-Principles Electronic Structure Calculation of Solids with a Similarity-Transformed Hamiltonian”, Quantum Simulations and Design 2011, MPIPKS Dresden, Germany, September 27-29, 2011.
- (国内会議)
- 一般講演
- [32] 常行真司 「計算物質科学研究センターの概要」, 計算物質科学シンポジウム (物性研究所, 2011 年 9 月 12 日)
- [33] 合田 義弘、常行 真司: 「第一原理計算による希薄窒化物 GaNP の光学伝導度」日本物理学会第 67 回年次大会 関西学院大学 (西宮市) 2012 年 3 月 26 日
- [34] 合田 義弘、常行 真司: 「窒化物半導体界面の構造と磁性」超低速ミュオン顕微鏡が拓く物質・生命・素粒子科学のフロンティア第 1 回領域会議 ホテル春日居 (笛吹市) 2012 年 1 月 9 日
- [35] 合田 義弘、常行 真司: 「窒化物界面における遍歴強磁性の第一原理計算」日本金属学会 2011 年度秋季大会 沖縄コンベンションセンター (宜野湾市) 2011 年 11 月 8 日
- [36] 合田 義弘、常行 真司: 「非磁性元素界面における磁性の可能性」日本物理学会 2011 年秋季大会 富山大学 (富山市) 2011 年 9 月 23 日
- [37] 合田 義弘、常行 真司: 「窒化物半導体との界面におけるグラフェンの構造相転移」文科省科研費新学術領域「コンピューティクスによる物質デザイン: 複合相関と非平衡ダイナミクス」平成 24 年度研究会 東京大学 (東京都文京区) 2012 年 3 月 17 日
- [38] 合田 義弘、常行 真司: 「窒化物半導体成長によるグラフェンの構造相転移」次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開発第 6 回公開シンポジウム ニチイ学館 (神戸市) 2012 年 3 月 6 日
- [39] 合田 義弘、常行 真司: 「窒化ガリウムのエピタキシャル成長に伴うグラフェンの圧力誘起構造相転移」計算科学の課題と展望 東京大学 (柏市) 2012 年 2 月 20 日
- [40] 安藤康伸, 合田義弘, 常行真司: “水-金属界面系の電気二重層キャパシタンスに関する第一原理計算” 日本物理学会秋季大会, 富山大学五福キャンパス (富山), 2011 年 9 月 21-24 日.
- [41] 安藤康伸, 合田義弘, 常行真司: “第一原理分子動力学法による固液界面の電気二重層キャパシタンスに関する研究” 第 2 回計算物質科学イニシアティブ (CMSI) 研究会, 東北大学金属材料研究所 (宮城), 2012 年 1 月 30-31 日.

- [42] 安藤康伸, 合田義弘, 常行真司: “第一原理分子動力学計算による電気二重層キャパシタンスの非経験的評価” 物性研究所共同利用スパコン成果報告会「計算科学の課題と展望」, 東京大学物性研究所 (千葉), 2012 年 2 月 20-21 日.
- [43] 安藤康伸, 合田義弘, 常行真司: “電気二重層キャパシタンスの第一原理計算とその新しいモデル” 次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開発 (ナノ統合)・次世代生命体統合シミュレーションソフトウェアの研究開発 (ライフ) 公開シンポジウム, ニチイ学館 神戸ポートアイランドセンター (兵庫), 2012 年 3 月 5-6 日.
- [44] 只野 央将, 合田 義弘, 常行 真司: 「第一原理非調和格子モデルを用いたナノワイヤの熱伝導率計算」日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学 (富山市), 2011 年 9 月 24 日.
- [45] 只野 央将, 合田 義弘, 常行 真司: 「第一原理に基づく固定端シリコンナノワイヤの熱伝導解析」, 次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開発第 6 回公開シンポジウム, ニチイ学館 (神戸市), 2012 年 3 月 6 日.
- [46] 只野 央将, 合田 義弘, 常行 真司: 「第一原理分子動力学法を用いた非調和力定数の決定と熱伝導率計算への応用」文科省科研費新学術領域「コンピューティクスによる物質デザイン: 複合相関と非平衡ダイナミクス」平成 24 年度研究会, 東京大学 (東京都文京区), 2012 年 3 月 17 日.
- [47] 越智正之、常行真司: 「トランスコリレイティッド法による固体の第一原理計算: ジャストロウ因子最適化の手法とその効果」日本物理学会 2011 年秋季大会 富山大学 (富山市) 2011 年 9 月 21 日
- [48] 越智正之、常行真司: 「第一原理トランスコリレイティッド法に基づくジャストロウ因子最適化の手法」ナノ・ライフ公開シンポジウム ニチイ学館 (神戸市) 2012 年 3 月 6 日
- [49] 越智正之、常行真司: 「トランスコリレイティッド法による固体の第一原理計算: ジャストロウ因子最適化の手法とその計算量」日本物理学会第 67 回年次大会 関西学院大学 (西宮市) 2012 年 3 月 25 日
- [50] 山本良幸、合田義弘、常行真司: 「ハートリー・フォック擬ポテンシャルの作成とそのトランスコリレイティッド法への適用」文科省科研費新学術領域「コンピューティクスによる物質デザイン: 複合相関と非平衡ダイナミクス」平成 24 年度研究会 東京大学 (東京都文京区) 2012 年 3 月 17 日
- [51] 河村光晶, 合田義弘, 常行真司: 「超伝導密度汎関数理論による超伝導転移温度の第一原理的予測」, 日本物理学会 秋季大会, 富山大学, 2011 年 9 月 21 日.
- [52] 河村光晶, 合田義弘, 常行真司: 「電子フォノン結合異方性を考慮した第一原理超伝導物性予測」, 第 2 回計算物質科学イニシアティブ (CMSI) 研究会, 東北大学金属材料研究所, 2012 年 1 月 30 日.
- [53] 河村光晶, 合田義弘, 常行真司: 「超伝導密度汎関数理論に基づく数値計算コードの開発」, 物性研究所共同利用スパコン成果報告会, 東京大学物性研究所, 2012 年 2 月 5 日.
- [54] 河村光晶, 合田義弘, 常行真司: 「超伝導密度汎関数による第一原理からの物性予測」, 次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開発公開シンポジウム, ニチイ学館 神戸ポートアイランドセンター, 2012 年 3 月 6 日.
- [55] 河村光晶, 合田義弘, 常行真司: 「超伝導密度汎関数計算における電子-フォノン結合の軌道依存性からの寄与」, 日本物理学会 年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 27 日.
- [56] 小堀知輝, 大塚教雄, 泰地真弘人, 常行真司: FMO-LCMO 法: フラグメント分子軌道 (FMO) 法に基づいた全系電子状態計算手法, 第 2 回次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェア説明会, 東京, 2012 年 1 月 26 日
- [57] 岩崎 誉志紀、水野 洋一、常行 真司: 「BaTiO₃ の還元処理過程で生じる欠陥種の第一原理計算」, 日本セラミックス協会第 24 回秋季シンポジウム, 北海道大学 (札幌市), 2011 年 9 月 26 日
- [58] 吉澤 香奈子、合田 義弘、常行 真司: 「平面波基底第一原理計算コード (TAPP/QMAS) の比較」第 2 回計算物質科学イニシアティブ (CMSI) 研究会東北大学 (仙台市) 2012 年 1 月 30 日.

招待講演

- [59] 常行真司 「誘電体の酸素欠陥と不純物水素: ミュオン実験への期待」, 日本中間子科学会ワークショップ「超低速ミュオン顕微鏡」(東京工業大学, 2011 年 5 月 29 日).
- [60] 常行真司 「将来のスーパーコンピューティングへの挑戦」(パネリスト), 「これからのスーパーコンピューティング技術の展開を考える」シンポジウム (東大・武田先端ビル, 2011 年 6 月 28 日).
- [61] 常行真司 「熱伝導現象の第一原理計算」, 日本物理学会 2011 年秋季大会シンポジウム (富山大学, 2011 年 9 月 23 日).
- [62] 常行真司 「ナノ構造体の熱伝導計算に向けて」(2011.11.6 計算材料科学研究拠点第 2 回シンポジウム, 東北大学金属材料研究所)
- [63] 常行真司 「ペロフスカイト型酸化物における不純物水素の荷電状態とダイナミクス」, TCCI 研究会 (京都大学, 2011 年 11 月 10 日).
- [64] 常行真司 「第一原理波動関数理論に基づく固体の電子励起状態計算の試み」, 科研費新学術領域「半導体における動的相関電子系の光科学」(DYCE) シンポジウム (京大化研, 2012 年 1 月 6 日)
- [65] 常行真司 「第一原理計算」, 応用物理学会特別シンポジウム (早稲田大学, 2012 年 3 月 15 日).
- [66] 常行真司 「元素戦略における計算物質科学の役割」, 日本物理学会シンポジウム「物理学における新・元素戦略」(関西学院大学, 2012 年 3 月 24 日)
- [67] 岩崎 誉志紀、常行 真司: 「SrTiO₃、BaTiO₃ の酸素欠陥と不純物水素状態」, 第三回 MLF シンポジウム, いばらき量子ビーム研究センター (東海村), 2012 年 1 月 20 日

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) 等の高エネルギー分光を用いて強相関電子系の電子状態の研究を行っている。遷移金属化合物、磁性半導体などの複雑物質が示す高温超伝導、スピン依存伝導、金属-絶縁体転移、界面新奇物性等の発現機構解明をめざしている。実験室光源を用いた測定の他に、紫外光から X 線に至る高輝度放射光 (高エネルギー加速器研究機構フォトン・ファクトリー, SPring-8, 広島大放射光, スタンフォード放射光, 台湾放射光) を用い実験を行っている。

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っていない世紀の難問である。また、反強磁性絶縁体相と超伝導相の間に出現する「擬ギャップ相」の起源解明に対しても、超伝導機構解明に匹敵する努力が払われてきた。さらに、近年発見された鉄化合物高温超伝導体はより複雑な電子構造を持ち、銅酸化物と共通点を持つ一方で、多くの相違点を有している。我々は、これらの超伝導物質における超伝導の発現機構解明や異常な物性の発現機構解明を目指して、電子状態研究の最も有力な手段である ARPES を用いて電子状態を調べている。

銅酸化物超伝導体における超伝導ギャップ、フェルミアーク、 T_c の間の普遍的な関係

BCS 理論によれば、超伝導体の臨界温度 T_c は超伝導ギャップの大きさ Δ に比例する。一方、銅酸化物高温超伝導体の T_c は超流動密度 n_s に比例することが磁場侵入長の実験で見つかり、エキゾチックな超伝導機構を示唆する実験事実のひとつと考えられて来た。我々は、3 層系超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ の測定結果および過去の我々の実験結果や文献から、多くの高温超伝導体で T_c がフェルミアーク (フェルミ面のうちで擬ギャップの開いていない部分) の端における超伝導ギャップの大きさ Δ_{sc} に比例することを見出した (図 4.1.1)。 Δ_{sc} の大きさと超流動密

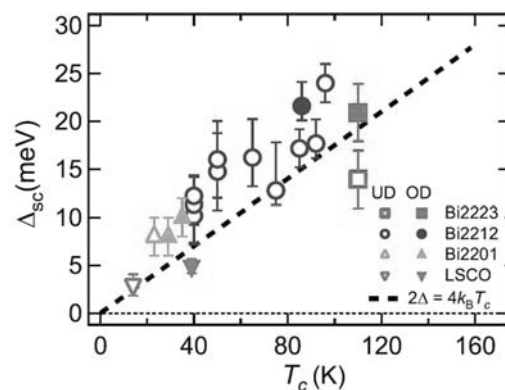


図 4.1.1: ARPES で求めた様々な銅酸化物超伝導体のフェルミアーク端における超伝導ギャップの大きさ Δ_{sc} と臨界温度 T_c の関係 [12].

度の両方に比例すると考えられるので、BCS 超伝導とエキゾチック超伝導を共通の見方で捉えられることを示唆している [12].

1111 型鉄系高温超伝導体のバンド構造とフェルミ面

ARPES を用いた鉄系超伝導体の研究の多くは 122 型と呼ばれる結晶構造に集中しており、最初に高温超伝導が発見され、最も T_c が高い 1111 型は研究例が非常に限られていた。その大きな理由は、電氣的に中性なへき開面がなく、ARPES で観測するへき開面に余分なキャリアがドーピングされてしまうことにある。我々は、典型的な 1111 型高温超伝導体である PrFeAsO_{1-x} の ARPES 測定を行い、同じく 1111 型で T_c の低い超伝導体 LaFePO と比較した。 T_c の違いの原因と考えられている結晶構造 (Fe 面と As/P 面の距離) の違いから来るバンド構造の違いを観測した (図 4.1.2) [5].

銅酸化物超伝導体の超伝導状態における長距離反強磁性ゆらぎ

高温超伝導機構や擬ギャップ形成機構を解明するためには、高温超伝導と磁性の関係 (競合か協奏か) を明らかにする必要がある。このため我々は、超伝導と反強磁性の共存の可能性が指摘されている電子ドーピング型高温超伝導体について、ARPES 実験を行った。電子ドーピング型高温超伝導体 $\text{Sm}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_{4-\delta}$ のレーザーを用いた超高分解能 ARPES 測定を行い、超伝導ギャップと同時に現れる反強磁性によるバンドの折り畳み構造を解析し、反強磁性ゆらぎの相関長が 150 nm を越える非常に長距離であることを見出した [2].

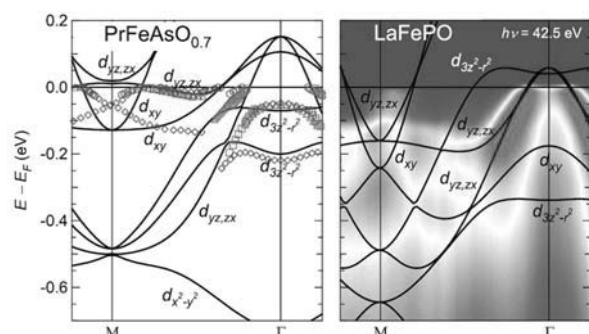


図 4.1.2: 1111 型鉄系高温超伝導体の角度分解光電子 (ARPES) スペクトル [5].

4.1.2 強相関界面・スピントロニクス

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, 100% スピン偏極した電子を取り出せずハーフメタル, 半導体に遷移金属原子をドーブした希薄磁性半導体とこれらの物質の作る極薄膜・界面は, 従来のエレクトロニクスにスピンの自由度を導入した“スピントロニクス”の材料として期待されている. これらの物質の電子状態に対する界面効果, 閉じ込め効果, 基板圧力効果を光電子分光を用いて調べ, 元素選択的磁性・局所的磁性を XMCD を用いて調べている.

絶縁体同士の界面 $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ に生じる金属状態の起源

2 種の絶縁体 LaAlO_3 , SrTiO_3 がつくる界面は金属性伝導を示し, さらに超伝導や強磁性も観測されたことから, 近年大きな注目を集めている. 金属伝導の起源を説明するため, 極性表面をもつ LaAlO_3 が発生する巨大な電場を打ち消すように電荷が移動して金属状態が出現するというモデルが提唱され, これを支持する実験・理論と否定する実験・理論の間で論争が続いてきた. 我々は, LaAlO_3 の膜厚や極性を系統的に変えた試料で内殻光電子分光実験を行い, 電気伝導から予想されるよりはるかに高濃度の界面伝導電子を観測し, 大部分の電子が界面に局在していることを見出した. また, 界面への電荷移動が金属伝導の臨界膜厚以下で起こっていること, 界面への電荷移動が表面状態に敏感であることを見出した [9].

Cu をドーブした ZnO ナノワイヤーの強磁性

酸化物半導体 ZnO に遷移金属をドーブした物質は室温で強磁性を示すことが理論的に予測され, 盛んに物質開発が行われているが, 強磁性不純物の析出が起こる可能性が常にある. 遷移金属として Cu を

ドーブした ZnO の強磁性は, 強磁性元素を含まないのでその心配がなく注目されている. 我々は, 室温で強磁性を示す Cu ドープ ZnO ナノワイヤーの電子状態と磁性を軟 X 線吸収分光, XMCD を用いて元素選択的に調べた. 表面敏感な全電子収量検出法をバルク敏感な蛍光収量検出法と併用した結果, ナノワイヤー内部の Cu^{3+} , Cu^{2+} イオンの一部が強磁性を担っていることが明らかになった [7].

強相関金属 SrVO_3 薄膜の量子井戸状態

金属伝導を示す強相関酸化物を薄膜化すると, ある臨界膜厚以下で絶縁体に転移することが最近の研究で明らかになってきた. パウリ常磁性を示す金属である SrVO_3 も膜厚 4 分子層以下で絶縁体化する. 我々は, 金属的な SrVO_3 薄膜の ARPES を行い, バンド構造が量子化準位を形成し量子井戸状態になることを見出した. 3 重縮退した V 3d 軌道から由来するフェルミ面付近の 3 つのバンドのうち, 試料表面に垂直方向に分散を持つバンドが量子化し, 試料面内にはのみ分散するバンドには薄膜化の影響が見られなかった. また, サブバンドに依存した質量くり込みも観測された [4].

<受賞>

- [1] 出田真一郎: 第 29 回 PF シンポジウム (つくば, 2012 年 3 月 15-16 日) ポスター発表奨励賞.

<報文>

(原著論文)

- [2] A. F. Santander-Syro, M. Ikeda, T. Yoshida, A. Fujimori, K. Ishizaka, M. Okawa, S. Shin, B. Liang, A. Zimmers, R.L. Greene, and N. Bonchamps: Two-Fermi-surface superconducting state and a nodal d -wave energy gap of the electron-doped $\text{Sm}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_{4-\delta}$ cuprate superconductor, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 197002-1-4 (2011); arXiv:1104.2617.
- [3] Y.-H. Lin, M. Kobayashi, R. Zhao, G.S. Song, C.-W. Nan, S. Li, W.-S. Yan, J.I. Hwang, Y. Ooki, A. Fujimori, Y. Takeda, S.I. Fujimori, K. Terai, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, and C. Gao: Tunable ferromagnetism in $\text{Ni}_{0.97-x}\text{Mn}_x\text{O}$ thin films with hole doping and their electronic structures, *Phys. Rev. B* **83**, 193105-1-4 (2011).
- [4] K. Yoshimatsu, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Yoshida, A. Fujimori, and M. Oshima: Metallic quantum well states in artificial structures of strongly correlated oxide, *Science* **333**, 319-322 (2011).
- [5] I. Nishi, M. Ishikado, S. Ideta, W. Malaeb, T. Yoshida, A. Fujimori, Y. Kotani, M. Kubota, K. Ono, M. Yi, D. H. Lu, R. Moore, Z.-X. Shen, A. Iyo, K. Kihou, H. Kito, H. Eisaki, S. Shamoto, and R. Arita: Angle-resolved photoemission spectroscopy study of $\text{PrFeAsO}_{0.7}$: Comparison with

- LaFePO, Phys. Rev. B **84**, 014504–1-5 (2011); arXiv:1102.4907
- [6] Y.-H. Lin, B. Zhan, C.-W. Nan, R. Zhao, X. Xu, and M. Kobayashi: Ferromagnetism in antiferromagnetic NiO-based thin films, J. Appl. Phys. **110**, 043921–1-4 (2011); A. Fujimori added to the author list [Erratum, J. Appl. Phys. **110**, 089902 (2011)].
- [7] T. Kataoka, Y. Yamazaki, V.R. Singh, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, and C.T. Chen, G.Z. Xing, J.W. Seo, C. Panagopoulos, and T. Wu: Ferromagnetic interaction between Cu ions in the bulk region of Cu-doped ZnO nanowires, Phys. Rev. B **84**, 153203–1-4 (2011); arXiv:1110.3481.
- [8] T. Kataoka, Y. Yamazaki, V. R. Singh, Y. Sakamoto, A. Fujimori, Y. Takeda, T. Ohkuchi, S.-I. Fujimori, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Tanaka, M. Kapilashrami, L. Belova, and K. V. Rao: Ferromagnetism in ZnO co-doped with Mn and N studied by soft x-ray magnetic circular dichroism, Appl. Phys. Lett. **99**, 132508–1-3 (2011); arXiv:1201.0006.
- [9] M. Takizawa, S. Tsuda, T. Susaki, H. Y. Hwang, and A. Fujimori: Electronic charges and electric potential at LaAlO₃/SrTiO₃ interfaces studied by core-level photoemission spectroscopy, Phys. Rev. B **84** 245124–1-5 (2011); arXiv:1106.3619.
- [10] N. Hayashi, T. Yamamoto, H. Kageyama, M. Nishi, T. Kawakami, A. Fujimori, and M. Takano: BaFe⁴⁺O₃: A new member of the *d*⁴ high-spin perovskite system featured by a negative charge transfer energy, Angewandte Chemie **50**, 12547-12550 (2011)
- [11] S.-I. Fujimori, T. Ohkuchi, I. Kawasaki, A. Yasui, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagami, Y. Haga, E. Yamamoto, Y. Tokiwa, S. Ikeda, T. Sugai, H. Ohkuni, N. Kimura, and Y. Onuki: Electronic structure of heavy Fermion uranium compounds studied by core-level photoelectron spectroscopy, J. Phys. Soc. Jpn. **81** 014703 (2012); arXiv:1110.6689.
- [12] S. Ideta, T. Yoshida, A. Fujimori, H. Anzai, T. Fujita, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, Z.-X. Shen, K. Takashima, K. Kojima, and S. Uchida: Energy scale directly related to superconductivity in high-*T*_c cuprates: Universality from the temperature-dependent angle-resolved photoemission of Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+δ}, Phys. Rev. B **85**, 104515–1-5 (2012); arXiv:1104.0313.
- [13] T. Kataoka, Y. Sakamoto, V.R. Singh, Y. Yamazaki, A. Fujimori, Y. Takeda, T. Ohkuchi, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, and A. Tanaka: X-Ray Magnetic circular dichroism study of the *π-d* molecular ferromagnet *β*-Mn phthalocyanine, Solid State Commun. **152**, 806-809 (2012); arXiv:1201.4076.
- (会議抄録)
- [14] N. Kamakura, T. Okane, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, A. Fujita, S. Fujieda, and K. Fukamichi: Electronic structure of La(Fe_{0.88}Si_{0.12})₁₃, MRS Proceedings **1262**, W06-03 (2010).
- [15] S.-i. Fujimori, T. Ohkuchi, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagami, Y. Haga, E. Yamamoto, and Y. Onuki: Angle resolved photoemission study on uranium compounds, *Proceedings of ACTINIDES 2009*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering **9**, 012045–1-8 (2010).
- [16] T. Yoshida, I. Nishi, A. Fujimori, M. Yi, R. Moor, D.-H. Lu, Z.-X. Shen, K. Kiho, P.M. Shirage, H. Kitob, C.-H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, and H. Harima: Fermi surfaces and quasi-particle band dispersions of the iron pnictides superconductor KFe₂As₂ observed by angle-resolved photoemission spectroscopy, *Proceedings of 9th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2010)*; J. Phys. Chem. Solids **72**, 465-468 (2011); arXiv:1007.2698.
- [17] T. Okane, I. Kawasaki, A. Yasui, T. Ohkuchi, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, Y. Matsumoto, N. Kimura, T. Komatsubara, and H. Aoki: Resonant angle-resolved photoelectron spectroscopy of substitutional solid solutions of CeRu₂Si₂, *Proceeding of the International Conference on Heavy Electrons (ICHE2010)*; J. Phys. Soc. Jpn. **80**, SA060–1-3 (2011).
- [18] T. Shimojima, F. Sakaguchi, K. Ishizaka, Y. Ishida, W. Malaeb, T. Yoshida, S. Ideta, A. Fujimori, T. Kiss, M. Okawa, T. Togashi, C.-T. Chen, S. Watanabe, Y. Nakashima, A. Ino, H. Anzai, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Ohgushi, S. Kasahara, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, M. Nakajima, S. Uchida, K. Kihou, C.-H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, A. Chainani, and S. Shin: Angle-resolved photoemission study on the superconducting iron-pnictides of BaFe₂(As,P)₂ with low energy photons, *Proceedings of International Workshop on Novel Superconductors and Super Materials 2011 (NS² 2011)*; Solid State Commun. **152**, 695-700 (2012).
- (綜説, 解説, その他)
- [19] A. Fujimori: Gates using mysterious ‘ionic liquids’ to achieve high surface charge density and superconductivity on an atomically flat film, Journal Club for Condensed Matter Physics, <http://www.condmatjournalclub.org/?p=1125>.
- [20] A. Fujimori: Electric field control of high-*T*_c cuprates in the entire doping range, Journal Club for Condensed Matter Physics, <http://www.condmatjournalclub.org/?p=1513>.

- [21] T. Yoshida, M. Hashimoto, I. M. Vishik, Z.-X. Shen, and A. Fujimori: Pseudogap, superconducting gap, and Fermi arc in high- T_c cuprates revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy, *J. Phys. Soc. Jpn.* **26**, 011006–1–10 (2012); arXiv:1203.0600.

(学位論文)

- [22] Vijay Raj Singh: X-ray magnetic circular dichroism study of oxide-based magnetic materials and half-metallic alloys (博士論文)
- [23] 出田真一郎: Electronic structure and its relationship to superconductivity in iron-based and cuprate high- T_c superconductors studied by angle-resolved photoemission spectroscopy (博士論文)
- [24] 芝田悟朗: X-ray magnetic circular dichroism study of ferromagnetic $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ thin films (修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [25] T. Yoshida, S. Ideta, I. Nishi, A. Fujimori, T. Shimojima, W. Malaeb, S. Shin, Y. Nakashima, H. Anzai, A. Ino, M. Arita, 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: Three-dimensional Fermi surfaces and their nesting properties in the iron pnictide superconductor $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, *8th International Conference on Stripes and High T_c Superconductivity (STRIPE 11)* (Rome, July 10-16, 2011).
- [26] A. Fujimori: Possibility of spectroscopic imaging of correlated electron systems using XFEL, *RIKEN-POSTECH Joint Workshop on Spectroscopy Using Synchrotron and FEL Radiation* (SPRING-8, July 1-2, 2011).
- [27] A. Fujimori: Photoemission spectroscopy of oxide interfaces, *4th Workshop for Emergent Materials Research (Joint Workshop of Max-Planck POSTECH Center for Complex Phase Materials and Asia Pacific Center for Theoretical Physics)* (Pohang, July 11 - 13, 2011).
- [28] A. Fujimori: Fermi surfaces, electron correlation, and superconducting gap in Fe pnictides studied by ARPES, *Workshop on Search for New Physics in Transition Metal Compounds by Spectroscopies* (Tohoku University, July 28-30, 2011).
- [29] A. Fujimori: Pseudogap, superconducting gap, and strong correlation effect in cuprates revealed by ARPES, *International Conference on Novel Superconductivity 2011 (ICNSCT2011)* (Tainan, August 3-9, 2011).
- [30] T. Yoshida: An energy scale directly related to superconductivity in the high- T_c cuprate superconductors: Universality from the Fermi arc picture, *26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26)* (Beijing, August 11-15, 2011).
- [31] A. Fujimori: Thickness dependences of the electronic and magnetic properties of perovskite oxide thin films, *Tokyo-Cologne Workshop on Strongly Correlated Transition-Metal Compounds* (Cologne, September 7-10, 2011).
- [32] A. Fujimori: Thickness dependence of the electronic and magnetic properties of perovskite oxide thin films, *International Conference on Physics of Novel and Emerging Materials* (Kolkata, November 15-17, 2011).
- [33] S.-i. Fujimori, T. Ohkochi, I. Kawasaki, A. Yasui, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagami, Y. Haga, E. Yamamoto, and Y. Onuki: Electronic structure of heavy Fermion uranium compounds: Soft x-ray photoelectron spectroscopy study, *International Workshop on Heavy Fermions* (Osaka, November 23-26, 2011).
- [34] A. Fujimori: Thickness dependence of the electronic properties of transition oxide thin films, *New Frontiers in the Physics of Two Dimensional Electron Systems* (Buenos Aires, November 23-25, 2011).
- [35] A. Fujimori: Thickness-dependent electronic and magnetic properties of oxide thin films, *FIRST-QS2C Workshop on "Emergent Phenomena of Correlated Materials"* (Okinawa, December 12-15, 2011).
- [36] A. Fujimori: Thickness dependence of the electronic structure of oxide thin films, *UK-Japan Meeting 2012 in Tokyo on Novel Quantum Matter in Correlated Oxides* (University of Tokyo, January 9-10, 2012).
- [37] A. Fujimori: Thickness dependent electronic and magnetic properties of transition-metal oxide thin films, *One day conference on "Strongly Correlated Systems"* (Indian Institute of Science, Bangalore, February 21, 2012).
- [38] A. Fujimori: Possibility of hole-induced ferromagnetism in transition-metal-doped ZnO nanostructures, *Physics and Chemistry of Spintronics Materials* (Coorg, India, February 22-26, 2012).
- [39] A. Fujimori: Carrier doping versus impurity effects in Fe pnictide superconductors studied by ARPES, *12-th Korea-Japan-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Systems (KJT12)* (National Sun Yat-Sen University, Kaohsiung, March 16-18, 2012).

一般講演

- [40] S. Ideta, T. Yoshida, M. Hashimoto, A. Fujimori, H. Anzai, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, Z.-X. Shen, K. Takashima, K. M.

- Kojima, and S. Uchida: Anomalous kink energy scales in the tri-layer high- T_c cuprate superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ observed by ARPES, *International Workshop on Strong Correlations and Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy (CORPES11)* (Berkeley, July 18-22, 2011).
- [41] T. Kadono, V. R. Singh, V.K. Verma, K. Ishigami, G. Shibata, A. Fujimori, D. Asakura, T. Koide, G. Li, T. Ishikawa, and M. Yamamoto: Effects of chemical composition of Co_2MnSi thin films facing an MgO barrier on the magnetic states of Mn and Co atoms, 5th International Workshop on Spin Currents (Sendai, July 25-28, 2011).
- [42] V. K. Verma, V. R. Singh, K. Ishigami, G. Shibata, T. Kadono, A. Fujimori, T. Koide, K. Ishikawa, K. Kanazawa, and S. Kuroda: X-ray magnetic circular dichroism study of CdMnCrTe thin films, 6th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (SPIN-TECH6) (Matsue, August 1-5, 2011).
- [43] T. Yoshida, S. Ideta, I. Nishi, A. Fujimori, T. Shimojima, W. Malaeb, S. Shin, Y. Nakashima, H. Anzai, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, M. Kubota, 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: Three-dimensional Fermi surfaces and their nesting properties in the iron pnictide superconductor $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26) (Beijing, August 11-15, 2011).
- [44] K. Yoshimatsu, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Yoshida, A. Fujimori, and M. Oshima: Metal-insulator transition and two-dimensional electron liquid in SrVO_3 ultrathin films, *Workshop on Oxide Electronics (WOE18)* (Napa Valley, USA, September 26-28, 2011).
- [45] M. Furuse, M. Okano, S. Fuchino, A. Uchida, J. Fujihira, S. Fujihira, T. Kadono, A. Fujimori, and T. Koide: Design and fabrication of HTS coils for a vector magnet, 22nd International Conference on Magnet Technology (Marseille, France, September 12-16, 2011).
- [46] K. Yoshimatsu, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Yoshida, A. Fujimori, and M. Oshima: Metallic quantum well states in artificial structures of strongly correlated oxide, *FIRST-QS2C Workshop on "Emergent Phenomena of Correlated Materials"* (Okinawa, December 12-15, 2011).
- [47] T. Yoshida, S. Ideta, I. Nishi, A. Fujimori, T. Shimojima, W. Malaeb, S. Shin, Y. Nakashima, H. Anzai, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, M. Kubota, 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: Superconducting gap of $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ studied by angle-resolved photoemission spectroscopy, Workshop for A3 Foresight Program on Novel Properties of Complex Oxides (Hainan Island, China, December 17-21, 2011).
- [48] S. Ideta, H. Suzuki, T. Yoshida, I. Nishi, A. Fujimori, H. Kotani, M. Kubota, K. Ono, M. Hashimoto, D.H. Lu, Z.-X. Shen, Y. Nakashima, M. Matsuo, T. Sasagawa, M. Nakajima, K. Kihou, Y. Tomioka, C.H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Ito, S. Uchida, and R. Arita: Carrier doping versus impurity potential effect in transition-metal-substituted Fe pnictide superconductors, *ibid.*
- [49] T. Yoshida: Superconducting gap of $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ studied by angle-resolved photoemission spectroscopy, *UK-Japan Meeting 2012 in Tokyo on Novel Quantum Matter in Correlated Oxides* (University of Tokyo, January 9-10, 2012).
- [50] H. Suzuki: Electronic structure of $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{As}_2$ studied by photoemission and x-ray absorption spectroscopy, *ibid.*
- [51] K. Ishigami: Soft x-ray photoemission study of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ thin films, *ibid.*
- [52] T. Kadono: Investigation of FePt nano-particles using x-ray magnetic circular dichroism, *ibid.*
- [53] T. Harano: X-ray magnetic circular dichroism study of $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ with enhanced coercivity by Ru, *ibid.*
- [54] G. Shibata: Thickness-dependent phase transition of $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ thin films studied by soft x-ray magnetic circular dichroism, *ibid.*
- [55] S. Ideta, T. Yoshida, A. Fujimori, T. Shimojima, W. Malaeb, S. Shin, M. Nakajima, S. Uchida, Y. Nakashima, H. Anzai, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, Y. Tomioka, T. Ito, K. Kihou, C.H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, S. Kasahara, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, H. Ikeda, and R. Arita: Anisotropy of the superconducting gap in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, 16th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation (Hiroshima University, March 1-2, 2012).
- [56] G. Shibata, V. R. Singh, V. K. Verma, K. Ishigami, T. Harano, T. Kadono, A. Fujimori, T. Koide, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.-J. Huang, K. Yoshimatsu, E. Sakai, H. Kumigashira, M. Oshima, and A. Sawa: Thickness-dependent phase transitions of $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ thin films studied by soft x-ray magnetic circular dichroism. 12-th Korea-Japan-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Systems (KJT12) (National Sun Yat-Sen University, Kaohsiung, March 16-18, 2012).
- [57] L. C. C. Ambolode II, H. Suzuki, S. Ideta, T. Yoshida, A. Fujimori, K. Ono, H. Kumigashira, L. Liu, M. Takahashi, T. Kakeshita, and S. Uchida:

Electron correlation in FeTe studied by photoemission spectroscopy, *ibid.*

(国内会議)

招待講演

- [58] 吉田鉄平：基研研究会「鉄系高温超伝導の物理」（京大基研，2011年6月16－17日）。
- [59] 藤森淳：軟 X 線磁気円二色性による磁性ナノ構造の研究，PF 研究会「軟 X 線分光・散乱測定を用いた物性研究の現状と展望」（高エネ研，2011年9月13－14日）
- [60] 吉田鉄平：角度分解光電子分光法による銅酸化物高温超伝導体の研究（若手奨励賞受賞講演），日本物理学会 2011 年秋季大会（富山大学，2011 年 9 月 21-24 日）。
- [61] 吉田鉄平：超伝導ギャップと擬ギャップ，シンポジウム「高温超伝導体研究の最近の進展：擬ギャップ状態に対する理解」，同上。
- [62] 藤森淳：XMCD を用いた磁性薄膜，ナノ構造の研究，PF 研究会「磁性薄膜・多層膜を究める：キャラクターゼーションから新奇材料の創製へ」（高エネ研，2011 年 10 月 14－15 日）

一般講演

- [63] 出田真一郎，吉田鉄平，西一郎，藤森淳，小谷佳範，久保田正人，小野寛太，中島裕司，松尾明寛，笹川崇男，中島正道，木方邦宏，富岡泰秀，李哲虎，伊豫彰，永崎洋，伊藤利充，内田慎一，有田亮太郎：角度分解光電子分光による $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{TM}_x)_2\text{As}_2$ ($\text{TM} = \text{Ni}, \text{Cu}$) の電子構造研究：基研研究会「鉄系高温超伝導の物理」（京大基研，2011 年 6 月 16－17 日）。
- [64] M. Furuse, M. Okano, S. Fuchino, A. Uchida, J. Fujihira, S. Fujihira, T. Kadono, A. Fujimori and T. Koide: Design and fabrication of HTS coils for a vector magnet, 第 85 回低温工学・超電導学会（金沢，2011 年 11 月 9 日-11 日）。
- [65] 出田真一郎，吉田鉄平，西一郎，藤森淳，中島正道，内田慎一，小谷佳範，久保田正人，小野寛太，中島裕司，松尾明寛，笹川崇男，木方邦宏，富岡泰秀，李哲虎，伊豫彰，永崎洋，伊藤利充，有田亮太郎：角度分解光電子分光による電子ドーブ型鉄系高温超伝導体 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{TM}_x)_2\text{As}_2$ ($\text{TM} = \text{Ni}, \text{Cu}$) の Fe サイト置換効果の観測，日本物理学会 2011 年秋季大会（富山大学，2011 年 9 月 21-24 日）。
- [66] 吉田鉄平，西一郎，出田真一郎，藤森淳，下志万貴博，Walid Malaeb, 辛埴，中島陽介，安斎太陽，井野明洋，有田将司，生天目博文，谷口雅樹，小野寛太，笠原成，寺嶋孝仁，芝内孝禎，松田祐司，中島正道，内田慎一，富岡泰秀，伊藤利充，木方邦宏，李哲虎，伊豫彰，永崎洋，池田浩章，有田亮太郎： $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ のフェルミ面と超伝導ギャップ，同上。
- [67] 芝田悟朗，V.R. Singh, V.K. Verma, 石上啓介，門野利治，藤森淳，小出常晴，吉松公平，坂井延寿，組頭広志，尾嶋正治： $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ の磁性の膜厚依存性の軟 X 線磁気円二色性による研究，同上。
- [68] 鈴木博人，吉田鉄平，出田真一郎，藤森淳，橋本信，D.H. Lu, Z.-X. Shen, 小野寛太，松尾明寛，笹川崇男：磁性不純物ドーブ系 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{As}_2$ の角度分解光電子分光，同上。
- [69] V. K. Verma, V. R. Singh, K. Ishigami, G. Shibata, T. Kadono, A. Fujimori, T. Koide, K. Ishikawa, K. Kanazawa, and S. Kuroda: X-ray magnetic circular dichroism study of Cr-doped $\text{Cd}_{0.80}\text{Mn}_{0.20}\text{Te}$ thin films, 同上。
- [70] 吉松公平，堀場弘司，組頭広志，吉田鉄平，藤森淳，尾嶋正治： SrVO_3 の極薄膜化による低次元電子状態，同上。
- [71] 岡根哲夫，矢野一雄，竹田幸治，山上浩志，藤森淳，西村克彦，石川義和，佐藤清雄： $\text{Ce}_{0.2}\text{Gd}_{0.8}\text{Ni}$ における Ce の磁性状態とスピンフロップの XMCD による元素選択的観測，同上。
- [72] K. Yoshimatsu, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Yoshida, A. Fujimori, and M. Oshima: Metal-insulator transition and two-dimensional electron liquid states in artificial structure of strongly correlated oxide, 物構研シンポジウム'11「量子ビーム科学の展望」（つくば，2011 年 12 月 6-7 日）。
- [73] 門野利治，V. R. Singh, V. K. Verma, 石上啓介，芝田悟朗，原野貴幸，山本真平，高野幹夫，竹田幸治，岡根哲夫，斎藤祐児，山上浩志，藤森淳：軟 X 線磁気円二色性を用いた FePt ナノ粒子の研究，第 25 回日本放射光学会年會放射光科学合同シンポジウム（鳥栖，2012 年 1 月 6-9 日）。
- [74] 原野貴幸，石上啓介，Virendra Kumar Verma, 芝田悟朗，門野利治，藤森淳，竹田幸治，岡根哲夫，斎藤祐児，山上浩志，山田浩之，澤彰仁，川崎雅司，十倉好紀：Ru 置換により保磁力を増強した $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 薄膜の X 線磁気円二色性，同上。
- [75] 吉田鉄平，出田真一郎，西一郎，鈴木博人，藤森淳，下志万貴博，石坂香子，Walid Malaeb, 辛埴，中島陽介，安斎太陽，井野明洋，有田将司，生天目博文，谷口雅樹，小野寛太，組頭広志，笠原成，寺嶋孝仁，芝内孝禎，松田祐司，中島正道，内田慎一，富岡泰秀，伊藤利充，木方邦宏，李哲虎，伊豫彰，永崎洋，池田浩章，有田亮太郎： $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の超伝導ギャップの異方性，同上。
- [76] 原野貴幸，石上啓介，V. K. Verma, 芝田悟朗，門野利治，藤森淳，竹田幸治，岡根哲夫，斎藤祐児，山上浩志，山田浩之，澤彰仁，川崎雅司，十倉好紀，田中新：Ru 置換により保磁力を増強した $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 薄膜の X 線磁気円二色性，第 29 回 PF シンポジウム（つくば，2012 年 3 月 15-16 日）。
- [77] 出田真一郎，吉田鉄平，西一郎，藤森淳，久保田正人，小野寛太，中島正道，木方邦宏，富岡泰秀，李哲虎，伊豫彰，永崎洋，伊藤利充，中島裕司，松尾明寛，笹川崇男，内田慎一，有田亮太郎：電子ドーブ型鉄系超伝導体 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{T}_x)_2\text{As}_2$ ($\text{T} = \text{Ni}, \text{Cu}, \text{Zn}$) の Fe サイト置換効果，同上。
- [78] 門野利治，Vijay Raj Singh, Virendra Kumar Verma, 石上啓介，芝田悟朗，原野貴幸，藤森淳，竹田幸治，岡根哲夫，斎藤祐児，山上浩志，山本真平，

- 高野幹夫：巨大な保磁力をもつ FePt ナノ粒子の軟 X 線磁気円二色性，同上。
- [79] 吉松公平，堀場弘司，組頭広志，吉田鉄平，藤森淳，尾嶋正治：酸化物量子井戸構造による強相関電子の 2 次元閉じ込め第 59 回応用物理学関係連合講演会（早稲田大学，2012 年 3 月 15-18 日）。
- [80] 吉田鉄平，出田真一郎，西一郎，鈴木博人，藤森淳，下志万貴博，品田慶，石坂香子，Walid Malaeb，辛埴，中島陽介，安斎太陽，井野明洋，有田将司，生天目博文，谷口雅樹，組頭広志，小野寛太，笠原成，寺嶋孝仁，芝内孝禎，松田祐司，中島正道，内田慎一，富岡泰秀，伊藤利充，木方邦宏，李哲虎，伊豫彰，永崎洋，池田浩章，有田亮太郎：BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ の超伝導ギャップの異方性，日本物理学会第 67 回年次大会（関西学院大学，2012 年 3 月 24-27 日）。
- [81] 出田真一郎，吉田鉄平，西一郎，藤森淳，中島正道，内田慎一，小谷佳範，久保田正人，小野寛太，組頭広志，中島裕司，松尾明寛，笹川崇男，木方邦宏，李哲虎，伊豫彰，永崎洋，有田亮太郎：電子ドーピング型鉄系超伝導体 Ba(Fe_{1-x}T_x)₂As₂ (T = Ni, Cu, Zn) におけるリジッドバンドモデルの破れの観測，同上。
- [82] 門野利治，Vijay Raj Singh，Virendra Kumar Verma，石上啓介，芝田悟朗，原野貴幸，藤森淳，竹田幸治，岡根哲夫，斎藤祐児，山上浩志，山本真平，高野幹夫：SiO₂ 被覆された FePt ナノ粒子の軟 X 線円磁気二色性，同上。
- [83] 芝田悟朗，V.R. Singh，V.K. Verma，石上啓介，原野貴幸，門野利治，藤森淳，小出常晴，竹田幸治，岡根哲夫，斎藤祐児，山上浩志，吉松公平，坂井延寿，組頭広志，尾嶋正治，澤彰仁：軟 X 線磁気円二色性による La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃ 薄膜の膜厚依存相転移の研究，同上。
- [84] 原野貴幸，石上啓介，Virendra Kumar Verma，芝田悟朗，門野利治，藤森淳，竹田幸治，岡根哲夫，斎藤祐児，山上浩志，山田浩之，澤彰仁，川崎雅司，十倉好紀：Ru 置換により保磁力を増強した La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃ 薄膜の X 線磁気円二色性，同上。
- [85] 鈴木博人，吉田鉄平，出田真一郎，藤森淳，小野寛太，小林達也，宮坂茂樹，田島節子：SrFe₂(As_{0.65}P_{0.35})₂ の角度分解光電子分光，同上。
- [86] V.K. Verma，V.R. Singh，K. Ishigami，G. Shibata，T. Harano，T. Kadono，A. Fujimori，F.-H. Chang，H.-J. Lin，D.-J. Huang，C.T. Chen，Yuanhua Lin，and Ce-Wen Nan: X-ray absorption spectroscopy and magnetic circular dichroism study of BaTiO₃/(NiFe₂O₄/BaTiO₃)_n multilayer thin films，同上。
- [87] 石上啓介，V.K. Verma，芝田悟朗，原野貴幸，門野利治，藤森淳，V.R. Singh，小出常晴，竹田幸治，岡根哲夫，斎藤祐児，山上浩志，吉松公平，組頭広志，尾嶋正治：SrRuO₃ 薄膜界面の X 線磁気円二色性測定，同上。
- [88] L.C.C. Ambolode II，H. Suzuki，S. Ideta，T. Yoshida，A. Fujimori，K. Ono，H. Kumigashira，L. Liu，M. Takahashi，T. Kakeshita，S. Uchida: Resonant photoemission study of FeTe，同上。
- [89] 小林正起，丹羽秀治，原田慈久，尾嶋正治，竹田幸治，藤森淳，田中新，仙波泰徳，大橋治彦，大矢忍，田中雅明：軟 X 線共鳴非弾性散乱による希薄磁性体 Ga_{1-x}Mn_xAs における電子構造解析，同上。
- [90] 岡根哲夫，竹田幸治，山上浩志，藤森淳，松本裕司，木村憲彰，小松原武美，青木晴善：CeRu₂Si₂ 並びに CeRu₂Ge₂ の Ce M_{4,5} 吸収端での X 線吸収磁気円二色性測定，同上。

4.2 内田研究室

研究室およびその活動の概要。

4.2.1 2011 年度の研究その 1

研究 1-1

高温超伝導 Cu 酸化物を代表とする低次元強相関電子系においては、電子の「分裂」や「自己組織化」による新しい秩序形成が起こり、それが高温超伝導のような目覚ましい現象を引き起こすと考えられるようになってきた。我々は、高温超伝導体を主体に、1, 2 次元構造 Cu 酸化物と 2008 年に発見された FeAs 系化合物を対象とし、電子のもつ電荷とスピンそしてフォノン自由度が織りなす現象と秩序形成の探求を行っている。ドーピング、構造制御、そして電子輸送現象、遠赤外分光という物性測定を両輪として研究を遂行し、電荷・スピン・フォノン自由度のダイナミックスやそれらが作り出す集団励起モードと高温超伝導発現との関係を調べている。特に μ SR、中性子散乱、光電子分光、そして STM での国際共同研究を推進しており、世界的な研究ネットワークから数多くの epoch-making かつ新たな研究の流れを形成する成果を生産し続けている。これまでの、代表的な研究テーマと成果は、

- 1) 正孔ドーピング可能な梯子型 Cu 酸化物における超伝導相を含む電子相図の全貌を明らかにした (Phys. Rev. Lett. (1997)(1998)(1999)(2003)(2006). Science (2002))。
- 2) 高温超伝導秩序と競合するストライプ秩序/擬ギャップ状態における対称性の破れを発見 (Nature (1995)(2008)(2010), Science (1999)(2007), Phys. Rev. Lett. (2000)(2001)(2002)(2008))。
- 3) 高温超伝導体のナノスケール不均一性と超伝導準粒子の量子力学干渉により生ずるナノスケール現象の観測 (Nature (2000)(2001)(2002)(2003)(2008)), Science (2002)(2005)(2007), Phys. Rev. Lett. (2000)(2005))。
- 4) T_c より高温の「正常状態」においても超伝導状態と同様に磁束が存在することの発見 (Nature (2000), Science (2003)(2009), Phys. Rev. Lett. (2002)(2005))。
- 5) 高温超伝導体におけるフォノンの寄与の再発見 (Nature (2001)(2003)(2006))。

研究の最終目標は、高温超伝導機構の解明と室温超伝導の可能性を明らかにすることである。発見後 25 年経った現在でもメカニズムが未解明なのは、高温超伝導発現におけるスピン・電荷・フォノン自由殿役割、複数の競合する秩序が自己組織的に作るどのような「構造」が高温超伝導をもたらしているのかわかっていないためであると考えられる。それを明らかにする為、高温超伝導と競合する秩序の同定、そして競合を制御するパラメーターの追及を行う。これらは、室温超伝導実現への 1 つの道でもある。

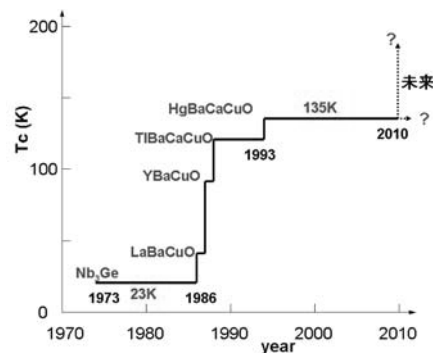


図 4.2.1: 超伝導体 T_c の上昇の歴史 (1973 年以降)

4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相

クーパー対形成のメカニズムがわかれば高温超伝導メカニズムが解明されたとはならない。第 1 に、超伝導状態の特徴、a) d 波クーパー対、b) 低超流動密度 (クーパー対密度)、c) 強い 2 次元性、のどれもが超伝導を不安定にする要因となること、第 2 に、 CuO_2 面の電子状態そして高温超伝導状態がこれまで考えられていたよりはるかに複雑で、超伝導相と競合する「擬ギャップ相」と呼ばれる未解明の相の存在が明らかになったからである。

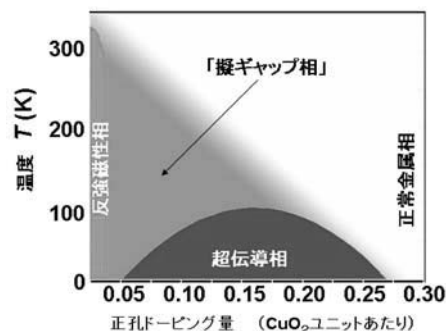


図 4.2.2: 高温超伝導体の電子相図

擬ギャップ相の解明に向けて

この「擬ギャップ相」では、光電子分光、中性子散乱など様々なスペクトルにエネルギーギャップが観測されるのでこの名がついた。「ギャップ」は、超伝導ギャップや電荷密度波 (CDW) ギャップのように、結晶全体に及ぶ長距離の秩序形成を支えるエネルギーとなる。「擬」という言葉には、長距離の秩序形成に至らず、秩序が局所的 (短距離) にしか発達していないという意味と、ギャップをもつものの基本的には金属であるという意味合いがある。擬ギャップ状態は、従来、低ドーピング域の、 T_c と「擬ギャップ温度」 T^* と

の間の温度領域で実現している異常な常伝導状態を指して使われていた。最近では、超伝導状態においても超伝導相との共存が確認された。更には、スピンガラス相と呼ばれている稀薄ドーピング域、La系の長距離ストライプ秩序をも包括した呼称となっている。ストライプ相はLa系における特殊事情により「擬ギャップ」が形を変えたものである考えられる。研究室では、研究の焦点を「擬ギャップ相」の解明にあてている。「擬ギャップ相」は、高温超伝導相図の大部分を覆っており、影のように「超伝導相」につきまとっている。ドーピング不足で超伝導相形成に至らないとき、温度を上げて T_c で超伝導秩序を壊したとき、また磁場をかけて、磁束芯の近くの超伝導秩序を弱めたとき、更には、 CuO_2 面を3枚以上もつ多層系の内側の CuO_2 面で、必ず「擬ギャップ相」が顔を出す。この「擬ギャップ相」の起源と「超伝導相」とのかかわりを理解しなければ高温超伝導のメカニズムの解明には至らないであろう。

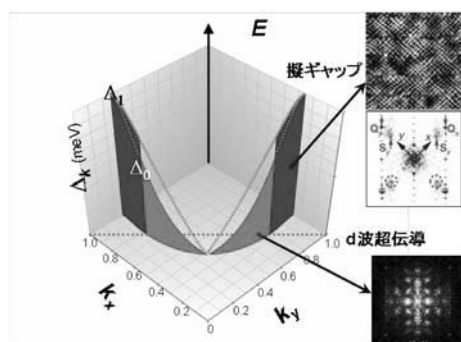


図 4.2.3: 超伝導相と擬ギャップ相の運動量空間における共存状態と擬ギャップ相の空間構造

ここ数年、STM/STS、ARPES、中性子散乱等の詳細な実験により、「擬ギャップ相」の電子構造と、超伝導秩序との共存形態が明らかにしてきた：(1) 様々なスペクトルに、大きさの異なる2つのエネルギーギャップが超伝導状態で観測される。大きい方(Δ_1)が擬ギャップ、小さい方が(Δ_0)超伝導ギャップと解釈される。(2) STM/STS実験で一時、ナノメートルスケールで不均一な超伝導状態の観測が報告され、 CuO_2 面で超伝導相と「擬ギャップ相」がミクロに相分離しているのではないかとされた。その後、新たな解析手法の開発により、超伝導相も「擬ギャップ相」もほぼ均一に CuO_2 面上に共存していることがわかってきた。(3) 両者は CuO_2 面で一様に共存しているが、運動量空間では棲み分けを行っている。図に示すフェルミ面の中心を含む領域は超伝導ギャップが、その外側では擬ギャップが観測される。温度を上げたり、ドーピング量を減らすと超伝導領域が減少し、擬ギャップ領域が拡大する。STM/STSでは、前者は準粒子干渉パターンとして、後者は、複雑な電子密度の濃淡パターンとして観測される。高温超伝導状態は、「擬ギャップ相」と超伝導相が実空間で一様に共存し、運動量空間で「相分離」している前例のない状態と言えるであろう。

対称性の破れ

最近、多くの実験プローブで発見されたのは「擬ギャップ状態」における対称性の破れである。中性子散乱のスピン励起や電子輸送現象は、正方4回対称の CuO_2 面内に異方性が現れることを示している。電子系が自発的に回転対称性を破り、4回対称の格子の上に、対称性の低い2回対称の電子構造が実現しているようにみえるのである。 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ に対するSTM/STSでも、1-2 nmの領域で、およそ格子の4倍周期のストライプ状の電子密度の濃淡が観測される。実際は、Bi系の結晶乱れにより、ストライプ構造の向きは乱雑になっている。電子液体状態が方向性をもつに至るということから、擬ギャップ状態を「電子液晶」と呼ぶ。スピン偏極中性子散乱実験では、擬ギャップ状態で CuO_2 単位胞内で時間反転対称性を破る弱い反強磁性磁気秩序の存在が報告されている。この磁気構造は、電子のスピンによるものではなく、単位胞内のCuとO原子にまたがる電子の軌道運動電流が誘起するものとされる。空間対称性、あるいは時間反転対称性の破れは、擬ギャップ状態が超伝導秩序の前駆的なものではなく、それ自体が超伝導とは別の何らかの秩序を伴った相であることを強く示唆している。STM/STSの空間分解能を上げて、擬ギャップ相における電子濃度パターンと CuO_2 面内の原子との相関を見ると、対称性の破れを引き起こしている原因が浮かび上がってきた。4回対称から2回対称へと対称性を低下させているのは、本来等価な CuO_2 単位胞内の2つの酸素原子、 O_x と O_y 、が電子的に非等価になっているからである。それがどのような非等価性であるのか未だわからない。しかし、上述の時間反転対称性の破れを引き起こしていると考えられる電子軌道電流による反強磁性秩序モデルにおいても、単位胞内の2つの酸素原子は非等価になっており、対称性の破れのミクロなメカニズムを解明するヒントを与えていると考えられる。

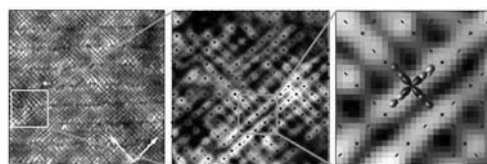


図 4.2.4: 「擬ギャップ相」励起がつくる空間電子密度変調パターン。明るい部分ほど密度が高い。空間分解能を上げていくと、黒くマークした銅原子に挟まれた左右、上下の位置で密度が異なっている。そこには酸素原子があり、酸素原子が電子的に非等価になっていることがわかる。

擬ギャップに関する基本的な問題のうち、擬ギャップの状態は「相」といえるのか？ d波超伝導相とどのように共存・競合しているのかについては、かなり明らかになってきた。では、高温超伝導メカニズ

ムに関わる問題、高温超伝導にとって必要な存在か、高い T_c の実現に「擬ギャップ相」はどのような寄与をしているのか、についての理解はどこまで進んでいるのであろうか。La 系で実現しているストライプ相では超伝導 T_c が著しく低下する。この意味では、ストライプ秩序は超伝導秩序とは明白な競合関係にある。しかし、ストライプ相でも CuO_2 面内では超伝導秩序が高い温度から発達していることがわかってきた。ストライプは面内の電子対形成を邪魔していないが、面間の位相が揃うのを妨げて T_c を低下させているのであろうと推察できる。同様に、 T_c より高温の擬ギャップ状態においても、面内に超伝導秩序が形成されているとすれば理解できる現象が発見されている。実際、アンダードープ Bi2212 ($T_c=37\text{K}$) の STM/STS 実験で、 CuO_2 面内の超伝導準粒子の干渉が $T=55\text{K}$ まで観測される。但し、 T_c 以下の超伝導状態と比べて、運動量空間において超伝導相の占める領域は縮小している。擬ギャップ相は電子対形成を妨げるものではなく、その位相が試料全体で揃うのを邪魔しているといえるであろう。このことは、低温超伝導体と違って高温超伝導体では、超伝導ギャップよりも超流動密度 ρ_s が T_c を支配するパラメーターになっていることと関連している。銅酸化物では ρ_s が低温超伝導体に比べ1桁以上も小さくなっている。 ρ_s は超伝導の位相の硬さを表わす尺度でもあるので（粒子数とその位相との量子力学的不確定性関係、 $\Delta N \cdot \Delta \theta \sim 1$ 、に由来する）、 ρ_s の小さい超伝導体では必然的に位相が軟らかく（位相ゆらぎが大きく）なり、位相が揃う温度 T_c が低下する。一方、「擬ギャップ相」の存在が対形成を強固にしていることを示唆する実験結果を藤森研との共同研究で得ている。3層系の $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$ ($T_c=110\text{K}$) に対する ARPES 実験から、3枚の CuO_2 面のうち外側の2枚の CuO_2 面は正孔が過剰ドープの状態であるのに対して、内側の1枚では、正孔濃度が希薄であることがわかった。1層系、2層系なら、外側の面は超伝導ギャップが縮小した超伝導相となり、内側は超伝導領域の縮小した擬ギャップ相優勢の状態となるはずである。実験結果は、外側の面では、超伝導ギャップの大きさが予想より著しく増大し、内側の面では、超伝導ギャップ領域が運動量空間で大幅に広がっていることを示している。超伝導相と擬ギャップ相が近接し、強く結合することにより、これが $T_c=100\text{K}$ 超の超伝導実現の要因であると推測される。

4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現

2008年2月、予想外の物質から8番目の高温超伝導体が現れた。鉄 (Fe) と砒素 (As) とを主元素とする化合物である（鉄ニクタイド系化合物と呼ばれている）。東工大・細野グループの $\text{LaFeAsO}_{1-y}\text{F}_y$ という組成での $T_c=26\text{K}$ から始まり、僅か1ヶ月の間に T_c は 56K にまで跳ね上がったのである。銅酸化物の履歴を辿るように、 T_c の上昇は La を他の希土類元素 (Nd あるいは Sm) に置換することにより実現した。その後、いくつかの結晶構造の異なる鉄-砒素化合物で超伝導が確認されたが、現在の T_c

の最高値は上記の 56K である。多種の結晶構造が存在し、多様な元素置換が可能であるという意味で、銅酸化物と共通点をもった物質群が形成されつつある。銅酸化物群の共通要素が CuO_2 面であったのと同様、この物質群は鉄と砒素がつくる原子層である。

鉄を他の遷移金属元素、コバルトやニッケル、更には銅、に置き換えた物質は高温超伝導を示さない。また、砒素をリン (P) に換えても同様である。従って、FeAs 層が CuO_2 面と同様、高温超伝導の舞台であり、鉄と砒素の組み合わせが特別な状況を作り出していると考えられた。しかし、その後、砒素を周期表の隣の VI 族セレン (Se) に置き換えた FeSe_{1-y} (あるいは Fe_{1+x}Se) という化合物でも超伝導が観測され、高圧下ではあるが T_c が 27K まで上昇した。この高温超伝導体の主舞台は鉄の二次元正方格子らしいのである。但し、鉄の層は、極極性の高い砒素やセレンの原子層に挟まれていなければならない。銅酸化物とは異なり、鉄層の電子構造の特徴は、5本の d 軌道のすべてが電気伝導、そして超伝導に関与していると予想されている。層状の結晶構造と周期表で同じ周期に位置する鉄と銅という元素が主役であるという以外、銅酸化物との共通点は見あたらない。未だ発見後2年にも満たないため、鉄と砒素 (セレン) の組み合わせの何が特殊なのかも見えてきていない。また、この系の超伝導機構を云々できる段階ではない。しかし、よく知られているように、鉄単体を含めて多くの鉄化合物は磁性体である。その意味で、鉄の化合物の中に高温超伝導体があるというのは、銅酸化物のとき以来の驚きといえる。鉄化合物の高温超伝導発見は、より高い T_c の超伝導/室温超伝導を目指す道が銅酸化物の一本だけではなく、他の道もあることを示したものと認識されている。

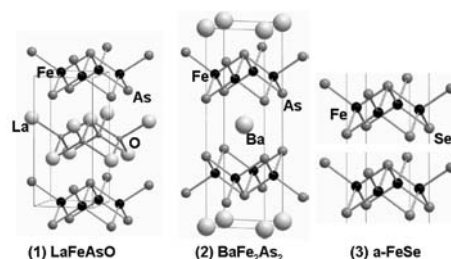


図 4.2.5: Fe 系化合物の結晶構造

精密なエネルギー分解プローブである電子輸送現象と光学スペクトルから、磁気秩序相、超伝導相の電子励起、準粒子ダイナミックスの情報を得ることができる。電子輸送現象から電荷キャリアを散乱させる不純物（欠陥）、ボソン励起を考察し、超伝導 T_c との相関を見出した。光学スペクトルからは、磁気秩序 (SDW) に伴うエネルギーギャップの性質、詳細なスペクトルの温度依存性、ドーピング依存性から鉄系の磁気秩序相における電子相関、軌道自由度の寄与の重要性が明らかにした。

電子輸送現象

キャリアを散乱する物は、その系の特徴的な結晶構造、電子構造あるいはそれぞれの励起状態を反映するはずである。LnFeAsO_{1-y} (Ln: La, Pr, Ce, Nd) 1111系に対する電気抵抗率、磁気抵抗率の温度依存性、ドーピング (y) 依存性の測定から、Fe 系の磁気秩序相、超伝導相を特徴づけるキャリア散乱を明らかにした。超伝導ドーピング域の電気抵抗率の温度依存性 (非弾性散乱)、 $\rho \sim T^n$ 、のベキ n と T_c が相関していることを見出した。

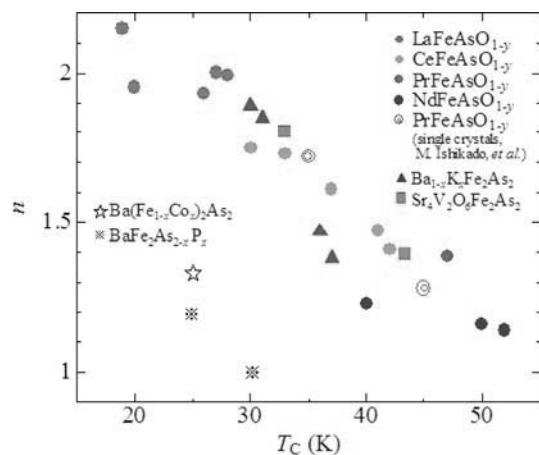


図 4.2.6: 様々な鉄系物質の電気抵抗率の温度依存性のベキ n と T_c の相関

比較的低い T_c をもつ物質の n は 2 に近く、 T_c が 40 K 超の物質の n は 1 に近づく。同じ結晶構造をもつ物質で n が変化することから非弾性散乱体励起 (ボソン) はフォノンではなく磁気 (軌道) 励起である可能性が高い。 $\rho \sim T$ を示す物質ではキャリアとボソンとの結合が強く、キャリアが激しく散乱されていることが磁気抵抗率の大きさからも明らかであり、高い T_c と密接に関係していることがわかる。

光学スペクトル

Ba(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂ 単結晶 ($0 \leq x \leq 0.08$) を育成し、面内光学スペクトルを測定した。磁気秩序相での光学スペクトルは低エネルギー域で 2 成分に分解でき、その 1 成分にギャップが開いていることがわかった。金属伝導 (Drude 項) は、もう 1 成分が担っている。このギャップはフェルミ面のネスティングにより開く SDW ギャップと考えられてきたものであるが、その大きさは 0.1 eV 以上と巨大である。このような巨大なギャップは、SDW ギャップというより強い電子相関に起因する可能性が高い。また、スペクトルにギャップを示さない金属成分が残ることは、Fe の複数の 3 d 軌道成分が、電気伝導及び光学励起にそれぞれ別の役割を担っていることを示唆し

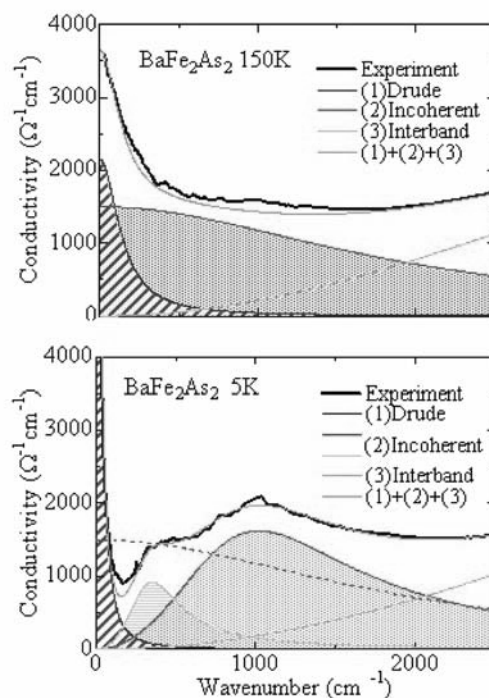


図 4.2.7: BaFe₂As₂ の光学伝導度スペクトルとその成分分解、磁気構造転移温度 $T_s=140$ K でスペクトルは劇的に変化する。

ている。ドーパされた結晶の面内電気抵抗率の温度依存性も 2 つの成分の寄与の変化として説明できる。

4.2.4 T_c は上がるか?

高温超伝導の舞台は CuO₂ 面であり、CuO₂ 面は、La 系であろうと Y 系であろうと殆ど同じなので、 T_c は各ドーピング量に対して唯一つに決まっているはずである。しかし、現実の銅酸化物の T_c は、物質により大きく異なり、各物質の T_c の最大値は 30 K から 135 K の間に分布している。明らかに、CuO₂ 面の外の環境が T_c に大きな影響を与えているのである。幸いにも、メカニズムに比べ、 T_c がどのような因子で決定されているのか、かなりわかってきている。従って、 T_c を決める因子が CuO₂ 面の電子状態にどのような影響を与えているのかを探ることは、メカニズムの解明にも関係しており、 T_c を向上させるための方策にもつながると考えられる。

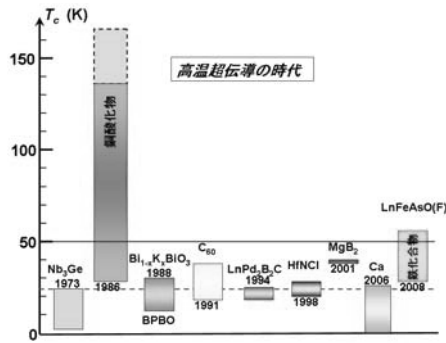


図 4.2.8: 1986 年以降に発見された高温超伝導体

T_c を向上させるには？

上に述べたことに、T_c を向上させるためのヒントが 2 つ含まれている。1 つは、結晶乱れを少なくすることである。典型例として Bi 系物質、Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} (Bi2212) を挙げると、CuO₂ 面の電子状態と T_c とに目に見える影響を与えるのは、頂点酸素ブロック (SrO ブロック) の乱れである。乱れの主因は Sr²⁺ のイオン半径が小さいために、Sr サイトに Bi³⁺ イオンが侵入し易いことにある。実際、物性実験の試料として用いられている Bi2212 の T_c (通常 90K) を、Sr サイトから Bi を追い出すことにより、98.5K まで上昇させることができた。また、同様な操作をすれば、超伝導線材として用いられる 3 層 (Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+δ}) の T_c を 125K まで向上させることができると予測される。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] "Charge-induced vortex lattice instability", A. M. Mounce, S. Oh, S. Mukhopadhyay, W.P. Halperin, A. P. Reyes, P. L. Kuhns, K. Fujita, M. Ishikado, and S. Uchida, *Nature Physics* **7**, 125-128 (2011).
- [2] "Doping dependence of the (π , π) shadow band in La-based cuprates studied by angle-resolved photoemission spectroscopy", R. H. He, X. J. Zhou, M. Hashimoto, T. Yoshida, K. Tanaka, S. K. Mo, T. Sasagawa, N. Mannella, W. Meevasana, H. Yao, M. Fujita, T. Adachi, S. Komiyama, S. Uchida, Y. Ando, F. Zhou, Z. X. Zhao, A. Fujimori, Y. Koike, K. Yamada, Z. Hussain, and Z. -X. Shen, *New J. of Phys.* **13**, 013031 (2011).
- [3] "The Nodal SDW Gap and the Superconducting Gap in BaFe_{2-x}Co_xAs₂", S. Sugai, Y. Mizuno, R. Watanabe, T. Kawaguchi, K. Takenaka, H. Ikuta, K. Kiho, M. Nakajima, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, and S. Uchida, *J. of Superconductivity and Novel Magnetism* **24**, 1185-1189 (2011).
- [4] "Doping effect on the carrier scattering in iron-pnictide superconductors studied by charge transport", S. Ishida, M. Nakajima, M. Ishikado, Y. Tomioka, T. Ito, K. Miyazawa, C. H. Lee, H. Kito, S. Shamoto, A. Iyo, H. Eisaki, K. M. Kojima, T. Kakeshita, and S. Uchida, *J. of Phys. and Chem. Solids* **72**, (Sp. Iss) 407-409 (2011).
- [5] "Effect of uniaxial pressure and annealing on the resistivity of Ba(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂", T. Liang, M. Nakajima, K. Kihou, Y. Tomioka, T. Itoh, C. H. Lee, H. Kito, A. Iyo, H. Eisaki, T. Kakeshita, and S. Uchida, *J. of Phys. Chem. Solids* **72**, (Sp. Iss) 418-419 (2011).
- [6] "Superconducting gap in iron pnictides studied by optical spectroscopy", M. Nakajima, S. Ishida, T. Liang, K. Kihou, Y. Tomioka, T. Ito, C. H. Lee, H. Kito, A. Iyo, H. Eisaki, K. M. Kojima, T. Kakeshita, and S. Uchida, *J. of Phys. and Chem. Solids* **72**, (Sp. Iss) 511-513 (2011).
- [7] "Electronic structure of the cuprate superconducting and pseudogap phases from spectroscopic imaging STM", A. R. Schmidt, K. Fujita, E. A. Kim, M. J. Lawler, H. Eisaki, S. Uchida, D. H. Lee, and J. C. Davis, *New J. of Physics* **13**, 065014 (2011).
- [8] "Topological Defects Coupling Smectic Modulations to Intra-Unit-Cell Nematicity in Cuprates", A. Mesaros, K. Fujita, H. Eisaki, S. Uchida, J.C.Davis, S. Sachdev, J. Zaanen, M. J. Lawler, and E. -A. Kim, *Science* **333**, 426-430 (2011).
- [9] "Unprecedented anisotropic metallic state in undoped iron arsenide BaFe₂As₂", M. Nakajima, T. Liang, S. Ishida, Y. Tomioka, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Kakeshita, T. Ito, and S. Uchida, *Proc. Nat. Acad. Sciences* **108**, 12238-12242 (2011).
- [10] "Li(Zn, Mn) As as a new generation ferromagnet based on a I, II, III, semiconductor", Z. Deng, C. Q. Jin, Q. Q. Liu, X. C. Wang, J. L. Zhu, S. M. Feng, L. C. Chen, R. C. Yu, C. Arguollo, T. Goko, F. L. Ning, J. S. Zhang, Yayu Wang, A. A. Aczel, T. Munsie, T. J. Williams, G. M. Luke, T. Kakeshita, S. Uchida, W. Higemoto, T. U. Ito, B. Gu, S. Maekawa, G. D. Morris, and Y. J. Uemura, *Nature Communications* **2**, 422(1-5) (2011).
- [11] "Complete Fermi Surface in BaFe₂As₂ Observed via Shubnikov-de Haas Oscillation Measurements on Detwinned Single Crystals", T. Terashima, N. Kurita, M. Tomita, K. Kihou, C. -H. Lee, Y. Tomioka, T. Ito, A. Iyo, H. Eisaki, T. Liang, M. Nakajima, S. Ishida, S. Uchida, H. Harima, and S. Uji, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 176402 (2011).
- [12] "Manifestations of multiple-carrier charge transport in the magnetotstructurally ordered phase of BaFe₂As₂", S. Ishida, T. Liang, M. Nakajima, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Kakeshita, T. Kida, M. Hagiwara, Y. Tomioka, T. Ito, and S. Uchida, *Phys. Rev. B* **184**, 184514 (2011).
- [13] "Comparison of stripe modulations in La_{1.875}Ba_{0.125}CuO₄ and La_{1.48}Nd_{0.4}Sr_{0.12}CuO₄", S. B. Wilkins, M. P. M. Dean, J. Fink, M. Hucker,

- J. Geck, V. Soltwisch, E. Schierle, E. Weschke, G. Gu, S. Uchida, N. Ichikawa, J. M. Tranquada, and J. P. Hill, *Phys. Rev. B* **84**, 195101 (2011).
- [14] "Spectroscopic Imaging Scanning Tunneling Microscopy Studies of Electronic Structure in the Superconducting and Pseudogap Phases of Cuprate High-Tc Superconductors", K. Fujita, A. R. Schmidt, E. A. Kim, M. J. Lawler, D. -H. Lee, J. C. Davis, H. Eisaki, and S. Uchida, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 011005(1-17) (2012).
- [15] "Forefront in the Elucidation of the Mechanism of High-Temperature Superconductivity", S. Uchida, *Jpn. J. Appl. Phys.* **51**, 010002 (2012).
- [16] "Structural Quantum Criticality and Superconductivity in Iron-Based Superconductor $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ ", M. Yoshizawa, D. Kimura, T. Chiba, S. Simayi, Y. Nakanishi, K. Kihou, C. -H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, M. Nakajima, and S. Uchida, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 024604 (2012).
- [17] "Effect of out-of-plane disorder on superconducting gap anisotropy in $\text{Bi}_{2+x}\text{Sr}_{2-x}\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ as seen via Raman spectroscopy", N. Murai, T. Matsui, M. Ishikado, S. Ishida, H. Eisaki, S. Uchida, and S. Tajima, *Phys. Rev. B* **85**, 020507 (2012).
- [18] "Correlation between the interlayer Josephson coupling strength and an enhanced superconducting transition temperature of multilayer cuprate superconductors", Y. Hirata, K. M. Kojima, M. Ishikado, S. Uchida, A. Iyo, H. Eisaki, and S. Tajima, *Phys. Rev. B* **85**, 054501 (2012).
- [19] "Energy scale directly related to superconductivity in high-Tc cuprates: University from the temperature -dependent-angle-resolved photoemission of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ ", S. Ideta, T. Yoshida, A. Fujimori, H. Anzai, T. Fujita, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, Z. -X. Shen, K. Takashima, K. M. Kojima, and S. Uchida, *Phys. Rev.* **B85**, 104515(2012).
(学位論文)
- [20] 石田茂之：鉄系高温超伝導体の電子輸送現象（博士論文）
- [21] 中島正道：鉄系高温超伝導体の光学スペクトル：磁気・構造秩序相の面内電子異方性（博士論文）
- [22] 田中貴英：光学スペクトルによる高温超伝導鉄-砒素化合物の特殊性の追求（修士論文）
- [23] 高橋正圭：鉄カルコゲン化合物の合成と輸送現象（修士論文）
- [24] 鈴木諒：梯子型鉄セレン化合物の合成と物性（修士論文）
- [25] 梁田： $\text{Ba}(\text{Fe},\text{Co})_2\text{As}_2$ の異方的面内電気伝導（修士論文）高温超伝導体のストライプ秩序（修士論文）
< 学術講演 >
(国際会議)
招待講演
- [26] S. Uchida, Forefront for the Quest of Mechanism of High-Temperature Superconductivity (2011 Spring Physics Colloquium in Seoul National University, Seoul, Korea, May 25, 2011).
- [27] S. Uchida, Multiple Broken Symmetries in the Cuprate Pseudogap Phase (ICC- IMR International Workshop on Search for New Physics in Transition Metal Compounds by Spectroscopies, Sendai, Japan, July 28, 2011)
- [28] S. Uchida, Electronic Nematicity in Iron Pnictides and Cuprates (International Conference on Novel Superconductivity in Taiwan- ICNSCT, Tainan, Taiwan, August 5, 2011).
- [29] S. Uchida, In- Plane Electronic Anisotropy in Iron-Arsenides (The 26th International Conference on Low Temperature Physics - LT26, Beijing, China, August 11, 2011).
- [30] S. Uchida, In- Plane Electronic Anisotropy in Iron-Arsenides (The 2nd ASRC International Workshop, Tokai, Japan, January 13th, 2012).
- [31] S. Uchida, What is "Doping" in the Phase Diagram of Substituted Iron- Pnictides? (The 12th Korea-Japan-Taiwan Symposium, Kaohsiung, Taiwan, March 16, 2012).
- [32] M. Nakajima, Anisotropic charge dynamics in BaFe_2As_2 studied by optical spectroscopy (European Materials Research Society-EMRS-Fall Meeting, Warsaw, September 23, 2011).
(国内会議)
一般講演
- [33] 岩井志帆, 清水直, 椋田秀和, 北岡良雄, 石田茂之, 内田慎一, P. M. Shirage, 鬼頭聖, 伊豫彰：三層型銅酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\chi}$ 及び $\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_6(\text{F},\text{O})_2$ の Cu-NMR 日本物理学会 2011 年秋季大会, (富山大学, 2011 年 9 月 22 日) .
- [34] 石田茂之, 中島正道, 梁田, 齊藤拓, 木方邦宏, 石角元志, 李哲虎, 社本真一, 宮沢喜一, 鬼頭聖, 伊豫彰, 永崎洋, 富岡泰秀, 伊藤利充, 掛下照久, 内田慎一: 鉄ニクタイト系化合物の輸送特性とドーピング依存性 4 日本物理学会 2011 年秋季大会, (富山大学, 2011 年 9 月 22 日) .
- [35] 寺嶋太一, 栗田伸之, 富田恵生, 宇治進也, 木方邦宏, 李哲虎, 富岡泰秀, 伊藤利充, 伊豫彰, 永崎洋, 梁田, 中島正道, 石田茂之, 内田慎一, 播磨尚朝: BaFe_2As_2 のフェルミ面 日本物理学会 2011 年秋季大会, (富山大学, 2011 年 9 月 22 日) .
- [36] 田中貴英, 中島正道, 石田茂之, 木方邦宏, 富岡泰秀, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 伊藤利充, 掛下照久, 内田慎一: BaT_2Pn_2 ($\text{T}=\text{Fe},\text{N}$; $\text{Pn}=\text{As},\text{P}$) の光学スペクトル比較による BaFe_2As_2 の特殊性の探求 日本物理学会 2011 年秋季大会, (富山大学, 2011 年 9 月 24 日) .
- [37] 中島正道, 石田茂之, 富岡泰秀, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 掛下照久, 伊藤利充, 内田慎一: BaFe_2As_2 における光学スペクトルの面内異方性 III 日本物理学会 2011 年秋季大会, (富山大学, 2011 年 9 月 24 日) .

- [38] 吉田鉄平, 出田真一郎, 西一郎, 鈴木博人, 藤森淳, 下仕万貴博, 石坂香子, Walid Malaeb, 辛埴, 中島陽佑, 安斎太陽, 井野明洋, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 小野寛太, 笠原成, 寺嶋孝仁, 芝内孝禎, 松田祐司, 中島正道, 内田慎一, 富岡泰秀, 伊藤利充, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 池田浩章, 有田亮太郎, : $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ のフェルミ面と超伝導ギャップ 日本物理学会 2011 年秋季大会, (富山大学, 2011 年 9 月 24 日) .
- [39] 園部竜也, 下志万貴博, 坂野昌人, 大川万里生, ワリッドマラエブ, 富樫格, 渡部俊太郎, 辛埴, 石田茂之, 中島正道, 内田慎一, 富岡泰秀, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 伊藤利充, 石坂香子: レーザー光電子分光によるデツインされた BaFe_2As_2 の電子状態の研究 2 日本物理学会 2011 年秋季大会, (富山大学, 2011 年 9 月 24 日) .
- [40] 出田真一郎, 吉田鉄平, 西一郎, 藤森淳, 中島正道, 内田慎一, 小谷佳範, 久保田正人, 小野寛太, 中島祐司, 松尾明寛, 笹川崇男, 木方邦宏, 富岡泰秀, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 伊藤利充, 有田亮太郎: 角度分解光電子分光による電子ドーブ型鉄系高超伝導体 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{TM}_x)_2$ ($\text{TM}=\text{Ni}, \text{Cu}$) の Fe サイト置換効果の観測 日本物理学会 2011 年秋季大会, (富山大学, 2011 年 9 月 24 日) .
- [41] 古澤正人, シャラムジャン・スマイ, 坂野幸平, 千葉泰司, 木村大地, 中西良樹, 中村光輝, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 中島正道, 内田慎一: 鉄系超伝導 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ の軌道秩序転移に伴う弾性異常 日本物理学会 2011 年秋季大会, (富山大学, 2011 年 9 月 24 日) .
- [42] 村井直樹, 増井孝彦, 田島節子, 石角元志, 石田茂之, 永崎洋, 内田慎一: 面外乱れを導入した Bi2212 の超伝導電子ラマン散乱 日本物理学会 2011 年秋季大会, (富山大学, 2011 年 9 月 24 日) .
- [43] 安斎太陽, 井野明洋, 藤田泰輔, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 藤森淳, Z.X. Shen, 藤田和博, 石角元志, 石田茂之, 内田慎一: Bi2212 の結合スペクトルのホール濃度依存性: 低エネルギー放射光角度分解光電子分光 日本物理学会 2011 年秋季大会, (富山大学, 2011 年 9 月 24 日) .
- [44] 中島正道, 田中貴英, 石田茂之, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 掛下照久, 中島正道, $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の光学スペクトル 日本物理学会 2012 年春季大会, (関西学院大学, 2012 年 3 月 24 日) .
- [45] 石田茂之, 中島正道, 梁田, 齊藤拓, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 富岡泰秀, 伊藤利充, 掛下照久, 内田慎一: BaFe_2As_2 の面内電気抵抗率の異方性のドーピング依存性 日本物理学会 2012 年春季大会, (関西学院大学, 2012 年 3 月 24 日) .
- [46] 蒲田幸広, 加賀山朋子, 清水克哉, 伊豫彰, 内田慎一: Hg 系銅酸化物の超伝導転移温度の圧力依存性 日本物理学会 2012 年春季大会, (関西学院大学, 2012 年 3 月 25 日) .
- [47] 古澤正人, シャラムジャン・スマイ, 坂野幸平, 竹澤遼, 中西良樹, 中村光輝, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 中島正道, 内田慎一: 鉄系超伝導体 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ における C_{33} 弾性定数の特異な振る舞い 日本物理学会 2012 年春季大会, (関西学院大学, 2012 年 3 月 25 日) .
- [48] 出田真一郎, 吉田鉄平, 西一郎, 藤森淳, 中島正道, 内田慎一, 小谷佳範, 小野寛太, 組頭広志, 中島祐司, 松尾明寛, 笹川崇男, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 有田亮太郎: 電子ドーブ型鉄系超伝導体 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{T}_x)_2\text{As}_2$ ($\text{T}=\text{Ni}, \text{Cu}, \text{Zn}$) におけるリジットバンドモデルの破れの観測 日本物理学会 2012 年春季大会, (関西学院大学, 2012 年 3 月 27 日) .
- [49] 吉田鉄平, 出田真一郎, 西一郎, 鈴木博人, 藤森淳, 下志万貴博, 石坂香子, Walid Malaeb, 辛埴, 中島陽佑, 安斎太陽, 井野明洋, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 組頭広志, 小野寛太, 笠原成, 寺嶋孝仁, 芝内孝禎, 松田祐司, 中島正道, 内田慎一, 富岡泰秀, 伊藤利充, 木方邦宏, 李哲虎, 伊豫彰, 永崎洋, 池田浩章, 有田亮太郎, : $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の超伝導ギャップの異方性 日本物理学会 2012 年春季大会, (関西学院大学, 2012 年 3 月 27 日) .
- [50] W. Malaeb, T. Shimojima, Y. Ishida, K. Okazaki, Y. Ota, K. Ohgushi, K. Kihou, T. Saito, C. H. Lee, S. Ishida, M. Nakajima, S. Uchida, H. Fukazawa, Y. Kohori, A. Iyo, H. Eisaki, C. T. Chen, S. Watanabe, H. Ikeda, and S. Shin: Abrupt change in the superconducting gap size with hole doping in $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ 日本物理学会 2012 年春季大会, (関西学院大学, 2012 年 3 月 27 日) .
- [51] Hakuto Suzuki, Shinichiro Ideta, Teppei Yoshida, Atsushi Fujimori, Kanta Ono, Hiroshi Kumigashira, Liang Liu, Masayoshi Takahashi, Teruhisa Kakeshita, Shinichi Uchida: Resonant Photoemission Study of FeTe 日本物理学会 2012 年春季大会, (関西学院大学, 2012 年 3 月 27 日) .

4.3 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として相谷昌紀と福居直哉が新しくメンバーに加わった。3月には、上田洋一と山田学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。おもにシリコン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、それらナノスケール低次元系に固有の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。最近は、ビスマス系合金結晶に表れるというトポロジカル表面状態やグラフェン、モノレイヤー超伝導などの研究も行っている。このようなナノマテリアルの原子配列構造や原子層成長の制御・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、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。

4.3.1 表面電子輸送

モノレイヤー超伝導体

純粋な2次元系の物質は超伝導転移を起こさないというのが理論の示唆するところである。しかし、半導体基板上に形成される金属モノレイヤーにおいては、金属と基板との相互作用により超伝導状態が実現される可能性は十分にあり、実際にSi(111)上の単原子層PbおよびIn ($\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -Pbやstriped incommensurate(SIC)-Pb, $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In表面超構造)の走査トンネル分光法観察で超伝導転移を示唆するエネルギーギャップが低温で開くことが報告されていた。また $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -Inにおいては、マクロな電極法により電気抵抗ゼロの報告が昨年あった。

そこで本研究では、今年度までに新しく開発した「超高真空高磁場下サブケルビン・マイクロ4端子プローブ装置」を用いて、 $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -Inだけでなく、より T_c の低いと思われるSIC-Pbの超伝導転移や、それらの臨界磁場を含めたより包括的な研究を行った。その結果、図4.3.1に示すように超伝導転移を観測でき、また、サンプルの作成方法によって T_c や臨界磁場が変動すること、 $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -InとSIC-Pbで絶対零度でのコヒーレンス長は同オーダーであること、また、両者でピン止め力が大きく異なることという結果を得た。今後は、表面原子ステップの影響や、さらに T_c の低い $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -Pbの研究、磁性不純物を吸着させたときの超伝導・近藤効果の競合の研究などの余地が残されている。

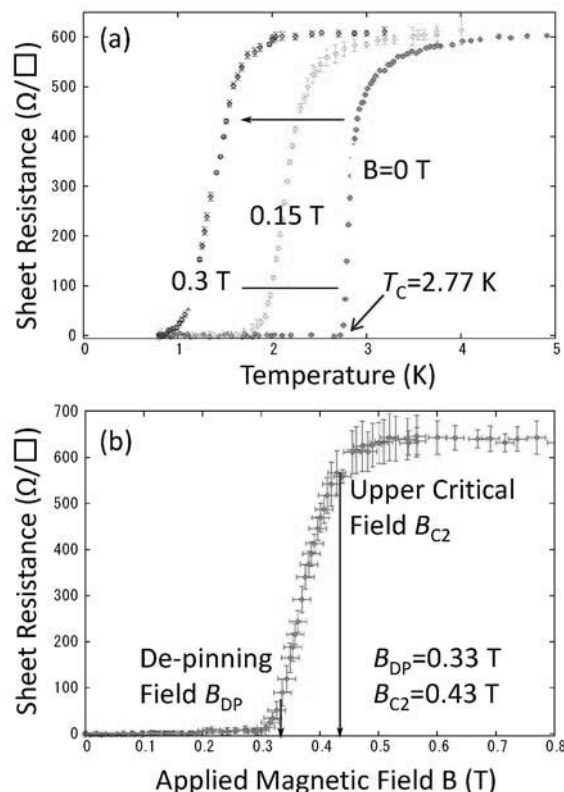


図 4.3.1: インジウム・モノレイヤー超伝導 (Si(111)- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面構造) (a) 面抵抗の温度依存性と (b) 印加磁場依存性。

Bi 超薄膜における電流誘起スピン偏極の検出

Bi(111) 結晶表面ではラシュバ効果によってスピン分裂した表面状態を持つことがスピン分解光電子分光などから報告されている。このような系に電流を流すと電流と表面に垂直な方向にスピンの偏極することが理論的に予言されており、「電流誘起スピン偏極」と呼ばれている。しかし、表面系においてこの現象を検出した例はまだない。磁性体を電気伝導測定の探針として用いると、探針の磁化と電流のスピンの向きに依存して電圧の測定値が変化し、4端子法において成り立つ相反定理が破れると考えられる。本研究では、シリコン基板上の成長させたBi超薄膜において電気伝導測定を行い、磁性体探針を用いた時のみに相反定理が実際に破れることを確かめ、電流誘起スピン偏極現象を実験的に検出することに成功した。今後は、Bi超薄膜の膜厚依存性などから、表面状態の寄与を見積もる予定である。

Bi 超薄膜の微細加工による1次元伝導

メゾスコピック物理の分野ではしばしば試料の加工やエッチングを ex situ で施される場合が多いが、

表面物理学では表面構造の保護するために大気中での加工が行えないので、微細加工した表面の物性研究は少ない。我々は、一昨年立ち上げた超高真空対応集束イオンビーム (FIB) 装置と 4 探針 STM 複合装置を用いて、厚さ数十原子層の Bi(111) 超薄膜を Si 基板上にエピタキシャル成長した後、in situ で細線状に加工し、その電気伝導度測定を行った。図 4.3.2 には、Bi 細線の電気抵抗の距離依存性の測定結果を示す。抵抗は電圧パッドの間隔に対して線形に増大し、明確な 1 次元性を示している。細線状に加工していない「ベタ膜」の電気抵抗は、探針間隔に依存せず一定値であり、2 次元性を示した。これらの結果により、FIB の照射により Bi が除去された「溝」が電流の漏れを防ぐ障壁となることを示し、任意の形状をした領域の表面電気伝導の測定が可能であることを意味している。ただし、FIB による表面損傷や加工深さと電気特性との関係はさらに定量的に調べる必要がある。

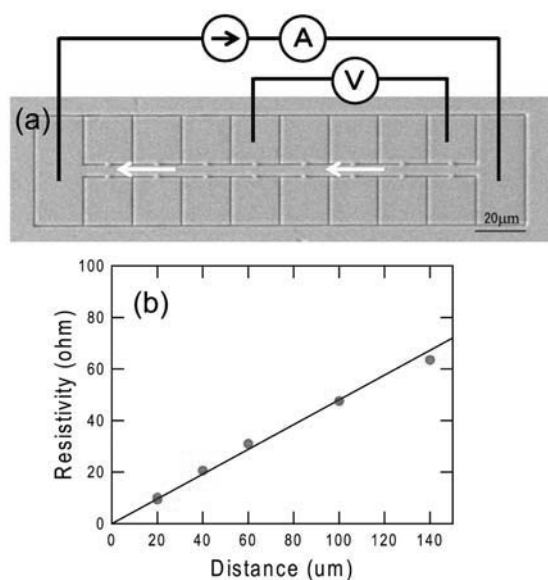


図 4.3.2: (a) FIB によって厚さ数十原子層の Bi(111) エピタキシャル超薄膜上に作成したパターンの SEM 像。黒い線状の部分が FIB 照射で掘った絶縁性の溝。中央に 5 μm 幅の細線が横たわり、複数のパッドが接続されている。(b) 細線の抵抗の長さ依存性。

Si(110)2 $\times$ 5-Au 表面の 1 次元伝導

Si(110)2 $\times$ 5-Au は理想的な擬 1 次元金属的な電子状態をもつことが角度分解光電子分光の測定から知られていた。Si(111)4 $\times$ 1-In、Si(553)-Au、Si(557)-Au など、過去に研究がなされてきた他の擬 1 次元金属系とは異なり、Si(110)2 $\times$ 5-Au は原子鎖間の相関がきわめて弱く、しかも低温においてもパイル

ス転移せずに金属性を維持するなどの特徴を持つことから電子の非フェルミ液体的な振る舞いが観測されることが期待できる。そこで本研究では、4 探針 STM 装置による正方 4 探針法を用いて、金属原子に平行方向と直角報告の伝導度を独立に測定した。石坂-白木法による Si 基板表面の清浄化を行って下地基板の表面空間電荷層の影響を低減させた場合、探針間隔が数十 μm 以上では異方的な 2 次元伝導であるが、それ以下の探針間隔では、金属鎖に平行方向の伝導が 1 次元的になることがわかった。伝導次元の詳細な解析によりフラクタル次元が実現していることがわかった。今後伝導度の温度依存性を測定して伝導のメカニズムを明らかにする予定である。

4.3.2 表面ナノ構造

トポロジカル絶縁体 Bi₂Te₃ の超薄膜成長制御と Pb ドープによる電子状態の変化

トポロジカル絶縁体は、絶縁性のバルク結晶の表面上にスピン偏極した金属的な表面電子状態をもつ物質であり、近年大いに注目されている。とくに、その (スピン偏極した) 表面電気伝導を測定することは、スピントロニクス応用としても興味深いテーマとなっている。ところが実際の結晶では欠陥によってバルクが絶縁体ではないため、表面のみの伝導測定のためには、フェルミ準位を制御してバルク内部を絶縁体化する必要がある。本研究では、Pb ドープ、および超薄膜成長時の基板温度制御によるフェルミ準位の制御を試み、角度分解光電子分光法により電子状態の in situ 測定を行った。基板温度が高い場合、Te のサイトが Bi で置換される欠損が増え、フェルミ準位が下がる傾向が見られた。高い基板温度で Pb をドープするとフェルミ準位はわずかに下がったあとに増加する傾向が見られ、電子状態も変化していることがわかった。この変化は Pb, Bi, Te の 3 元化合物結晶が成長しているためと思われる。低温で Pb をドープするとフェルミ準位が大きく下がり、Bi に対して 14% 以上加えるとフェルミ準位をバルクバンドギャップ内に移動して絶縁体化することがわかった。この場合も電子状態が少し変化しており、三元化合物結晶に構造変化していると思われる。また、in-situ 伝導度測定も行い、フェルミ準位の位置の変化に対応する増減が見られた。(分子研との共同研究)

単一バイレイヤー Bi 超薄膜の作成とその電子状態

単一バイレイヤー Bi は 2 次元トポロジカル絶縁体であると理論的に示されていた。しかしこれは単一の炭素の層であるグラフェンと同じで結晶がとり得る最小の薄さであり、これまでのところ実験的に作製された例はなかった。本研究では 3 次元トポロジカル絶縁体 Bi₂Te₃ 結晶と Bi が同じ結晶構造でさらに格子定数が 3% しか変わらないことに着目し、Bi₂Te₃(111) 表面上に Bi を成長させた。その結果、確かに Bi が単一バイレイヤーから成長していることが明らかに

なった。その電子状態を角度分解光電子分光で測定したところ、この Bi/ Bi₂Te₃ の系では、Bi₂Te₃(111) 面の電子状態が保たれており、それと Bi 単一バイレイヤーのバンド構造が重なり合っていることが明らかになった。また第一原理計算でもその分散はよく再現された。今後は現在製作中の超高真空低温強磁場型走査トンネル顕微鏡を用いて、この Bi 膜のアイランドの端の状態密度を測定し、エッジ状態の有無を調べる予定である。(ドイツユーリッヒ研、分子研との共同研究)

Bi₂Te₃(111) 結晶表面および、その上に成長させた単一バイレイヤー Bi の原子配列の決定

トポロジカル絶縁体の表面電子状態は光電子分光等で詳細に研究されてきたが、表面の原子配列は調べられていなかった。当研究室では物性研究所高橋研究室と共同で LEED-IV 解析によって、これらトポロジカル絶縁体結晶の表面原子配列を決定した。その結果、Bi₂Te₃(111) 結晶表面には特筆すべき緩和はなかったが、その上に成長させた単一バイレイヤー Bi は、バルク Bi 結晶に比べて表面平行方向に 3.5% 収縮し、垂直方向に 7% 伸展しており、強いひずみが生じていることが分かった。お茶の水女子大小林研究室の第一原理計算により、ひずみの無い単一バイレイヤー Bi のバンドギャップが約 0.1 eV であるのに対して、ひずみの生じた単一バイレイヤー Bi では約 0.4 eV に広がることも分かり、表面緩和とトポロジカル表面状態とが密接に関連していることを明らかにした。(東大物性研およびお茶ノ水女子大との共同研究)

ひずみによる Bi 超薄膜のトポロジカル相転移

上述のように Bi₂Te₃ 基板上に Bi を単一バイレイヤー (BL) から成長可能であることが分かった。その厚さ 7BL の超薄膜の電子状態を、これまで知られていたバルクの格子定数を持つ Si(111)-7×7 表面上の Bi 薄膜と比較したところ、同じ膜厚にも関わらずバンド構造が異なっていることが分かった。この起源を明らかにするために Bi₂Te₃(111) 表面上に成長させた Bi 膜の LEED-IV 構造解析を行ったところ、この薄膜はバルクに比べて面内格子定数が 3% 縮み、面直格子定数が 3% 伸びていることが明らかになった。第一原理計算でも面内格子定数を縮めて Bi スラブのエネルギー最適化を行った結果、面直方向に伸びた構造がエネルギー的に最も安定であることが分かり、計算されたバンド分散は実験結果をよく再現した。さらにこの決定された格子定数を用いて Bi の Z₂ トポロジカル数を計算したところ、歪みによって電子状態が変わったことで、本来 trivial なものが topological に相転移することが分かった。そしてその転移による表面状態の分散の変化は実験で測定されたものと一致していた。これまで、trivial な物質にひずみを導入することによってトポロジカル相転移を起こすことができると理論的には示されていた

が、実際に実験的に明らかにしたのは初めてのことである。(東大物性研、お茶の水大学、分子研との共同研究)

4.3.3 新しい装置・手法の開発

超高真空強磁場下サブケルビン・マイクロ 4 端子プローブ装置の開発

当研究室では、表面電気伝導測定に特化したマイクロ 4 端子プローブ装置が稼働中であったが、最低到達温度は 10K 程度が限界であった。また、最低到達温度 1.8K の極低温 4 探針 STM 実証機でも電気伝導測定時には極低温を安定に保つことは容易ではない。そこでモノレイヤー超伝導体の検出を実現するため、新たにソーブションポンプ方式の冷却系を持ち、1 K 以下の極低温を保って表面電気伝導測定が可能で、超伝導マグネットによって 7 T までの高磁場を印加できる「高磁場下サブケルビン・マイクロ 4 端子プローブ装置」の開発を昨年度から進めて来た。本年度はプローブのサンプルへの自動アプローチ機構を実装し、また電流プローブと電圧プローブの組み合わせを変える dual configuration 法を採用し、プローブの破壊や測定値のばらつきをさらに軽減させた。その結果、図 4.3.1 に示すようにモノレイヤー超伝導の電気伝導や臨界磁場を測定することができた。

超高真空低温強磁場下における走査トンネル顕微鏡の開発

表面 Rashba 系のスピン依存伝導現象を観察するためにはナノスケール領域でのスピン依存伝導現象を高精度で測定することが必要になる。そこで新たにスピン依存の電位分布を原子スケールで測定する走査トンネルポテンシオメトリ測定が可能な装置を開発した。この装置は通常の走査トンネル顕微鏡の探針に加えて試料に電流を流すことが可能な二つのプローブを実装している。本年度は装置の設計と建設を行い、超高真空 (10⁻¹¹ Torr)・極低温 (~2.5 K) の極限環境を実現し、グラファイトやシリコンの清浄表面の原子分解能像を得ることに成功した。今後、試料面直に 8T の磁場が印加可能な超伝導磁石を導入し、ポテンシオメトリ測定用回路の作成、スピン偏極探針の開発と合わせて研究を進めていく。

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 「ミリケルビン・マイクロ 4 端子プローブ法の開発とモノレイヤー超伝導の探索」(代表 長谷川修司)
- ・日本学術振興会 科研費 挑戦的萌芽研究 「ナノスケール伝導用スピンプローブの開発とそれによる表面ラッシュバ系のスピン流の研究」(代表 平原徹)
- ・日本学術振興会 科研費 若手研究 (A) 「ピン偏極

走査ポテンショメトリ装置の開発と微細加工した表面ラシュバ系のスピン伝導」(代表 平原徹)

<受賞等>

- [1] 相谷昌紀、福居直哉 :: 表面科学技術者資格認定 (公益社団法人日本表面科学会、2011 年 8 月)

<報文>

(原著論文)

- [2] T. Hirahara, G. Bihlmayer, Y. Sakamoto, M. Yamada, H. Miyazaki, S. Kimura, S. Bluege, and S. Hasegawa: *Interfacing 2D and 3D topological insulators: Bi(111) bilayer on Bi₂Te₃*, Phys. Rev. Lett. **107**, 166801 (Oct, 2011).
- [3] M. D' Angelo, R. Yukawa, K. Ozawa, S. Yamamoto, T. Hirahara, S. Hasegawa, M.G. Silly, F. Sirotti, and I. Matsuda: *Hydrogen-induced surface metallization of SrTiO₃(001)*, Phys. Rev. Lett. **108**, 116802 (Mar, 2012).
- [4] N. Miyata, H. Narita, M. Ogawa, A. Harasawa, R. Hobara, T. Hirahara, P. Moras, D. Topwal, C. Carbone, S. Hasegawa, and I. Matsuda: *Enhanced spin relaxation in a quantum metal film by the Rashba-type surface*, Phys. Rev. B **83**, 195305 (May, 2011).
- [5] N. Fukui, T. Hirahara, T. Shirasawa, T. Takahashi, K. Kobayashi, and S. Hasegawa: *Surface Relaxation of Topological Insulators: Influence on the Electronic Structure*, Phys. Rev. B **85**, 115426 (Mar, 2012).
- [6] Y. Saisyu, T. Hirahara, R. Hobara, and S. Hasegawa: *Magnetic anisotropy of Co ultrathin films*, Journal of Applied Physics **110**, 053902 (Sep, 2011).
- [7] Y. Fukaya, I. Matsuda, M. Hashimoto, K. Kubo, T. Hirahara, W. H. Choi, H. W. Yeom, S. Hasegawa, A. Kawasuso, and A. Ichimiya: *Atomic structure of two-dimensional binary surface alloy: Si(111)- $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ superstructure*, Surface Science **606**, 919 (Feb, 2012).

(総説)

(国内雑誌)

- [8] 長谷川修司、平原徹 : トポロジカル絶縁体は本当か—実験から見て—, 表面科学 **32**, 216 (Apr, 2011).
- [9] 長谷川修司 : 波と量子, 数理科学 No. 576, pp. 34-40 (Jun, 2011).
- [10] 長谷川修司 : Au 吸着 Si 表面から何を学んだか, 表面科学 **33**, 118 (Mar, 2012).

(著書)

- [11] S. Hasegawa (分担執筆) : *Reflection High-Energy Electron Diffraction in Characterization of Materials*, ed. Elton N. Kaufmann (Wiley 2012), 印刷中.

- [12] 長谷川修司 (分担執筆) : 電子的・電気的特性 (第3章) in 表面物性の基礎 (現代表面科学シリーズ) 日本表面科学会編集 (共立 2012), 印刷中.

(学位論文)

- [13] 上田洋一 : 金原子吸着誘起擬 1 次元金属表面における電子輸送の研究 (修士論文).
- [14] 山田学 : 高磁場下サブケルビン・マイクロ 4 端子プローブ装置の開発とそれによるモノレイヤー超伝導体の研究 (修士論文) .

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [15] S. Hasegawa: *Charge/spin injection and penetration into surfaces*, The 29th Barnd Ritchie Workshop, 2011 年 5 月 14 日 (<にびきメッセ, 松江) .
- [16] S. Hasegawa: *Electronic and spin transport at surfaces and nanostructures measured by four-tip STM*, International Workshop on Atomic Scale Interconnection Machines, 2011 年 6 月 28 日 (IMRE, Singapore) .
- [17] S. Hasegawa: *Electronic and spin transport at surfaces and nanostructures*, 2011 International Workshop on Nanomaterials & Nanodevices, 2011 年 7 月 3 日、Institute of Physics (CAS, 北京, 中国) .
- [18] S. Hasegawa: *Electronic and spin transport at surfaces and nanostructures measured by four-tip STM*, 2011 International Workshop on Nanomaterials & Nanodevices, 2011 年 7 月 4 日 (Xiangtan University, 湖南省, 中国) .
- [19] S. Hasegawa: *Surface nanomaterials -Structures and properties-*, Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials, 2011 年 8 月 22 日 (Vladivostok, Russia) .
- [20] S. Hasegawa: *Charge and spin transports at surfaces of strong electron-phonon-/spin-orbit coupling materials*, The 11th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces, and Nanostructures (ACSIN-11), 2011 年 10 月 4 日 (St. Petersburg, Russia) .
- [21] T. Hirahara : *Ultrathin films of topological insulators*, The 15th International Conference on Thin Films, 2011 年 10 月 8 日 (Kyoto, Japan).
- [22] S. Hasegawa: *Charge and spin transports at surfaces of strong electron-phonon-/spin-orbit coupling materials*, AVS 58th International Symposium & Exhibition, 2011 年 10 月 31 日 (Nashville, USA) .
- [23] S. Hasegawa: *Electronic and spin transport at surfaces—Strong Electron-Phonon-/Spin-Orbit-Couplings Materials—*, The 6th International Symposium on Surface Science (ISSS-6), 2011 年 12 月 14 日 (船堀, 東京).

- [24] T. Hirahara : *Ultrathin films of topological insulators*, The first SRC Winter Workshop on Topological Matter, 2012 年 1 月 30 日 (Phoenix Park, Korea).

一般講演

- [25] T. Tono, T. Hirahara, and S. Hasegawa: In situ measurements of current induced spin polarization in ultrathin bismuth films, The 13th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-13), 2011 年 7 月 4 日 (Prague, Czech Republic).
- [26] T. Hirahara, Y. Sakamoto, M. Yamada, H. Miyazaki, Y. Takeichi, S. Kimura, I. Matsuda, A. Kakaizaki, S. Hasegawa: *Ultrathin Films of Topological Insulators*, The 13th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI13), 2011 年 7 月 4 日 (Prague, Czech Republic).
- [27] M. Yamada, T. Hirahara, R. Hobara, S. Hasegawa: *Monolayer superconductivity measured by a UHV sub-Kelvin micro-four-point-probe system under high magnetic field*, Symposium on Surface and Nano Science (SSNS) 2012, 2012 年 1 月 10 日 (雫石, Japan).
- [28] T. Hirahara : *Ultrathin films of topological insulators*, Symposium on Surface and Nano Science (SSNS) 2012, 2012 年 1 月 11 日 (雫石, Japan).
- [29] T. Hirahara, G. Bihlmayer, Y. Sakamoto, M. Yamada, H. Miyazaki, S. Kimura, S. Bluegel, and S. Hasegawa : *Interfacing 2D and 3D topological insulators: Bi(111) bilayer on Bi₂Te₃*, APS March meeting, 2012 年 2 月 (Boston, USA).

• **The 6th International Symposium on Surface Science (ISSS-6)**, 2011 年 12 月 11-15 日 (船堀, 東京)

- [30] S. Hasegawa : *Introductory Talk at Topical Session "Spins at Surfaces"*.
- [31] T. Hirahara, G. Bihlmayer, Y. Sakamoto, M. Yamada, H. Miyazaki, S. Kimura, S. Bluegel, and S. Hasegawa : *Interfacing 2D and 3D topological insulators: Bi(111) bilayer on Bi₂Te₃*.
- [32] T. Tono, T. Hirahara, and S. Hasegawa: In situ measurements of current induced spin polarization in ultrathin bismuth films.
- [33] N. Fukui, R. Hobara, T. Tono, T. Uetake, Y. Ueda, N. Nagamura, T. Hirahara, T. Nagamura, S. Hasegawa : *Development of the low-temperature independently-driven four-tip STM with Focused Ion Beam for in-situ microfabrication on surfaces*.
- [34] M. Aitani, T. Hirahara, Y. Sakamoto, M. Yamada, H. Miyazaki, S. Kimura, and S. Hasegawa : Fermi level control and conductivity measurements of Pb-doped topological insulator Bi₂Te₃ ultrathin films.

- [35] M. Yamada, T. Hirahara, R. Hobara, and S. Hasegawa: *Development of a micro-four-point-probe conductivity measurement system at sub-kelvin under high magnetic field*.

(国内会議)

招待講演

- [36] 長谷川修司: ナノワールドのイメージング, 日本物理学会平成 23 年度科学セミナー「イメージングの科学」, 2011 年 7 月 26 日 (東京大学).
- [37] 長谷川修司: 地震波から電子波まで 一波の基本と最先端科学一, (社) 日本表面科学会中部支部主催 / (社) 応用物理学会東海支部 市民講座「やさしい表面科学」波・振動と表面科学 ーミクロな電子波からマクロな地震波までー, 2011 年 7 月 30 日 (名古屋工業大学).
- [38] 平原徹: 非磁性体表面の磁性現象, 物性若手夏の学校分科会 2011 年 8 月 3 日 (ホテルエバー富士).
- [39] 平原徹: ラシユバ・トポロジカル表面系の輸送特性, 日本物理学会 2011 年秋季大会シンポジウム「多彩な表面系における電子輸送現象」, 2011 年 9 月 24 日 (富山大学).
- [40] 平原徹: トポロジカル絶縁体超薄膜の電子状態と輸送特性, UVSOR ユーザーミーティング, 2011 年 11 月 18 日 (岡崎コンファレンスセンター).
- [41] 平原徹: トポロジカル絶縁体超薄膜の電子状態と輸送特性, 第 31 回表面科学学術講演会, 2011 年 12 月 16 日 (船堀, 東京).
- [42] 平原徹: トポロジカル絶縁体超薄膜の電子状態と輸送特性, 東京大学物性研究所短期研究会「トポロジカル絶縁体の表面電子状態」, 2012 年 2 月 24 日 (東大物性研).

一般講演

- [43] 山田学, 平原徹, 保原麗, 長谷川 修司: モノレイヤー超伝導の検出 — In/Si(111) —, 平成 23 年度通研共同プロジェクト研究「ナノスケールのゆらぎ・電子相関制御に基づく新規ナノデバイス」, 2011 年 10 月 21 日 (秋保, 仙台) .
- [44] 福居直哉, 保原麗, 東野剛之, 植竹智哉, 上田洋一, 永村直佳, 平原徹, 長村俊彦, 長谷川修司: *FIB* 複合型低温独立駆動 4 探針 STM の開発, 第 31 回日本表面科学会学術講演会, 2011 年 12 月 14 日 (船堀, 東京).
- [45] 相谷昌紀, 平原徹, 坂本裕介, 山田学, 宮崎秀俊, 木村真一, 長谷川修司: トポロジカル絶縁体 Bi₂Te₃ 超薄膜への Pb ドープによるフェルミ準位制御と電気伝導度測定, 第 31 回日本表面科学会学術講演会, 2011 年 12 月 15 日 (船堀, 東京).
- [46] ・東野剛之, 平原徹, 長谷川修司: ビスマス超薄膜の表面状態における電流誘起スピン偏極の測定, 表面科学学術講演会, 2010 年 12 月 16 日 (船堀, 東京).
- [47] 山田学, 平原徹, 保原麗, 長谷川修司: 高磁場下サブケルビン・マイクロ 4 端子プローブ装置の開発, 第

31 回日本表面科学会学術講演会, 2011 年 12 月 16 日 (船堀, 東京) .

- 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 23-26 日 (富山大学)

- [48] 東野剛之, 平原徹, 長谷川修司: ビスマス超薄膜の表面状態における電流誘起スピン偏極の測定.
- [49] 平原徹, G. Bihlmayer, 坂本裕介, 山田学, 宮崎秀俊, 木村真一, S. Bluegel, 長谷川修司: 三次元トポロジカル絶縁体上への二次元量子スピンホール相単一 Bi パレイヤーの成長.
- [50] 福居直哉, 保原麗, 東野剛之, 植竹智哉, 上田洋一, 永村直佳, 平原徹, 長村俊彦, 長谷川修司: *FIB* 複合型低温独立駆動 4 探針 *STM* の開発.
- [51] 植竹智哉, 平原徹, 永村直佳, 上田洋一, 保原麗, 長谷川修司: Si(111)-4 × 1-In 表面の異方的表面電気伝導度の温度依存性.
- [52] 山田学, 平原徹, 保原麗, 長谷川修司: 高磁場下サブケルビン・マイクロ 4 端子プローブ装置の開発.
- [53] 上田洋一, 平原徹, 植竹智哉, 最首祐樹, 長谷川修司: 擬 1 次元金属表面 Si(110)-2 × 5-Au 表面の *STM* 観察及び電気伝導測定
- [54] 並木雅俊, 有山正孝, 北原和夫, 二宮正夫, 原田勲, 長谷川修司: 第 7 回全国物理コンテスト・物理チャレンジ 2011 全体報告

- 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24-27 日 (関西学院大学).

- [55] 平原徹, 福居直哉, 白澤徹郎, 山田学, 相谷昌紀, 宮崎秀俊, 松波雅治, 木村真一, 高橋敏男, 小林功佳, 長谷川修司: Bi₂Te₃ 上の Bi 超薄膜の電子状態と表面構造解析.
- [56] 福居直哉, 平原徹, 白澤徹郎, 高橋敏男, 小林功佳, 長谷川修司: Bi₂Te₃ 超薄膜および 1 BL Bi の *LEED-IV* 構造解析.
- [57] 相谷昌紀, 平原徹, 坂本裕介, 山田学, 宮崎秀俊, 松波雅治, 木村真一, 長谷川修司: Pb ドープによるトポロジカル絶縁体 Bi₂Te₃ 超薄膜の電子状態制御と電気伝導度.
- [58] 山田学, 平原徹, 保原麗, 長谷川修司: In, Pb モノレイヤー超伝導体の超伝導転移および臨界磁場測定.

(セミナー)

- [59] 平原徹: *Spin-orbit coupling effects at surfaces*, 名古屋大学工学研究科物性基礎工学研究グループセミナー, 2011 年 6 月 6 日 (名古屋大学).
- [60] S. Hasegawa: *Charge and spin transports at surfaces of strong electron-phonon-/spin-orbit coupling materials*, CNMS DISCOVERY Seminar Series, 2011 年 10 月 28 日 (Oak Ridge National Laboratory, TN, USA) .

- [61] S. Hasegawa: *Charge and Spin Transports at Surfaces of Strong Electron-Phonon-/Spin-Orbit-Couplings Materials*, Physics Colloquium at Department of Physics, 2011 年 11 月 22 日 (復旦大学, 上海, 中国).

- [62] S. Hasegawa: *Charge and Spin Transports at Surfaces of Strong Electron-Phonon-/Spin-Orbit-Couplings Materials*, Physics Colloquium at Department of Physics, 2011 年 11 月 23 日 (上海交通大学, 上海, 中国).

- [63] 長谷川修司: 表面物理の最近の進展 — ナノサイエンス・スピントロニクスへ, 日立基礎研究所セミナー, 2011 年 12 月 5 日 (鳩山, 埼玉).

- [64] 長谷川修司: 見えないものを見る — ナノワールドを覗く —, 平成 23 年度理学部名誉教授の会, 2011 年 12 月 9 日 (小柴ホール).

(講義等)

- [65] 平原徹: 非磁性体表面の磁性現象, 東京工業大学総合理工学研究科材料物理学専攻材料物理学特別講義第四, 2011 年 6 月 1 日 (東京工業大学).

- [66] 長谷川修司: 兵庫県立大学理学部集中講義「表面科学」2011 年 8 月 29 日-31 日 (兵庫県立大学) .

- [67] 長谷川修司, 平原徹, 相谷昌紀 (TA), 福居直哉 (TA): 物理学実験 I (3 年生) 電子回折, 2011 年度冬学期 (本郷) .

- [68] 長谷川修司: 理科教育 (教育学部) 2011 年度夏学期 (本郷) .

- [69] 長谷川修司, 小森文夫: 物性物理学特論 (学部 4 年生講義)・表面物理学 (大学院共通講義) 2011 年度冬学期 (本郷) .

4.4 福山研究室

液体や固体などの凝縮系物質の温度を絶対零度に向けて下げてゆくと、それまで熱攪乱で覆い隠されていた相互作用の効果が顕わになり、多くの場合、相転移現象を伴って、それぞれの物質固有の基底状態に向かってゆく。我々は、こうして低温で実現する超流動・超伝導、強相関効果、磁気フラストレーション、量子ホール効果などの量子現象や相転移現象について研究している。特に空間次元を2次元あるいはゼロ次元に制限したときに現れる新奇な量子相に注目している。対象となる実験系は、2次元の量子液体・固体として代表的な液体および固体ヘリウムの超薄膜、炭素の単原子層シートであるグラフェンである。前者では、単原子層の層数や ^3He (フェルミ粒子)と ^4He (ボース粒子)の違いで現れる豊富な量子物性、後者では色々な原子・分子や超伝導体で表面修飾したときの新奇物性に興味をもっている。

これら多彩な低温量子相を、比熱、核磁気共鳴(NMR)、ねじり振子、走査トンネル顕微鏡/分光法(STM/S)、電子輸送特性、低速電子線回折(LEED)など、様々な実験手法で調べている。特に、市販の実験装置では到達できないような極・超低温度域でこれらの測定を行うために、3台のユニークかつ高性能な実験装置を自主開発して用いている。一つは銅核スピンの断熱消磁冷凍機で、50 μK までヘリウム単原子層膜や金属試料を冷却して、比熱やNMR測定ができる。二つ目は30 mKの超低温、13 Tの高磁場、 10^{-8} Pa以下の超高真空という多重極限環境下で原子レベルの空間分解能と100 μeV 近いエネルギー分解能をもつ超低温走査トンネル顕微鏡(ULT-STM)である。この装置は試料や探針の交換に要する時間が短く、超高真空中で様々な表面処理や評価ができる汎用性も併せもつ。三つ目は、液体ヘリウムなどの液体寒剤を補充することなく12 mKの低温を持続可能な無冷媒希釈冷凍機で、現在、ヘリウム単原子層膜の比熱測定に使用している。低温真空槽が存在しないという無冷媒冷凍機の特質を生かして、この冷凍機にmK温度域でLEED測定が可能な超低温LEED装置を装着するための設計・製作が現在進んでいる。

4.4.1 グラファイト上2次元 ^3He の量子相図

グラファイト表面に物理吸着した単原子層 ^3He や ^4He は、強く相互作用する2次元のフェルミ粒子系あるいはボース粒子系のモデル物質である。この系の特徴は、 He の面密度(ρ)を変えることで、乱れを導入することなく粒子相関を広範囲かつ自在にコントロールできる点である。また He 吸着膜はlayer-by-layerで形成され、少なくとも1-3層目まではそれぞれ独立な単原子層として振る舞うので、層毎に基板からの吸着ポテンシャルの大きさが異なり、またそのために下層の He 固体層の密度すなわち周期ポテンシャルも異なるという豊富なバリエーションがある。

2次元 ^3He の自己凝縮現象: 最も低密度な液体の発見

He は原子質量が小さいのでゼロ点振動が大きく、原子間相互作用も小さいので、原子・分子の中では量子パラメータが最も大きい。そのため常圧下のバルク状態では、絶対零度でも固化せず液体に止まる。一方、空間次元を3次元から2次元に下げると、ゼロ点振動の運動エネルギーが増して、液化すら起こらない可能性がでてくる。2次元 ^4He は1 K以下で液化することが知られているが、より量子性の高い2次元 ^3He は、これまで絶対零度でも基底状態として液化しない唯一の物質であろうと長く考えられてきた。昨年度までに我々は、グラファイト表面に ^4He を第1層目として吸着させて基板の不均一効果を軽減した上で、第2層目と第4層目に吸着させた ^3He 単原子層において、気液相転移が存在(液化)することを縮退温度域の熱容量測定から示してきた。今年度は、グラファイト基板ポテンシャルの影響が最も強く、基板の不均一部分の効果も陽に現れる吸着第1層目の ^3He 単原子層についても同様の測定を行った。

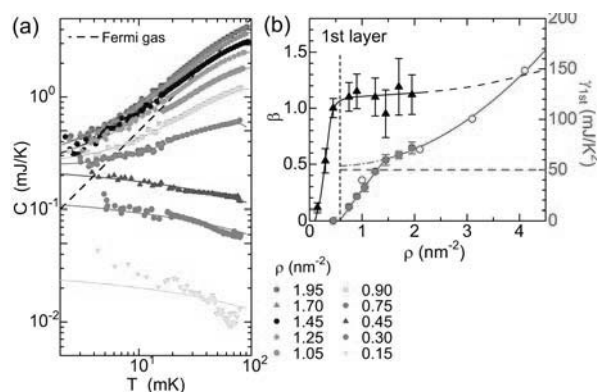


図 4.4.1: (a) グラファイト上吸着第1層目 ^3He の熱容量の温度依存性。(b) (a)の熱容量から求まるフェルミ液体成分 γ_{1st} と不均一成分 β の面密度依存性。面密度と共に不均一成分がはじめて成長し、それが飽和すると同時に、フェルミ液体成分が現れ、面密度に対して線形に成長する。○はPhys. Rev. Lett. 65, 64 (1990)より引用。

観測された熱容量は、図4.4.1(a)に示すように、面密度の増加と共に、はじめは温度にあまり依存しない成分が成長し、次いで温度にほぼ比例するフェルミ液体の成分が成長してくる。図中の実線で表されるように、 0.3 nm^{-2} 以上の全ての密度の試料で、その温度依存性は $C = \gamma T - \alpha T^2 + \beta C_A(T)$ でよく表せる。ここで、右辺の最初の2項が基板の均一部分に吸着した2次元フェルミ流体の熱容量で、初項の係数 γ は有効質量と ^3He が占める面積に比例し、第2項は2次元フェルミ系のスピン揺らぎに由来する。一方、右辺第3項($C_A(T)$)は、不均一部分に吸着したアモルファス状 ^3He の核スピン由来の熱容量である。 γ と β の面密度依存性を図4.4.1(b)に示した。不

均一成分が成長し終わった後に、均一部分のフェルミ液体が成長する様子が明瞭に捉えられている。均一部分の γ 値の密度依存性は、吸着第2層と第3層の振る舞いと酷似しており、一定密度幅にわたる線型増加とキックを伴った密度依存性の減少が見られる。前述した通り、それぞれの層の ^3He は閉じ込めポテンシャルや下地の周期ポテンシャルそして基板の不均一効果などの点で、置かれた環境が大きく異なっている。このことから、我々の実験で観測した自己凝縮(液化)現象は、純粋な2次元の ^3He 系の本質的な性質であること示している。その液体密度の最低値は 0.6 nm^{-2} 程度と非常に小さく、これまで知られている中で元も希薄な液体であろう(図4.4.2)。これは束縛エネルギーの低さの表れでもある。この実験結果は、現存する量子多体計算の結果を否定しており、今後の理論研究の進展を促すものである。

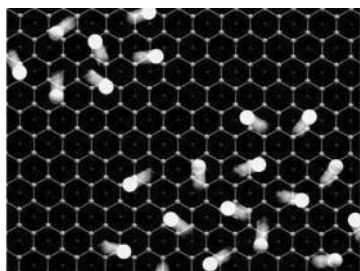


図 4.4.2: グラファイト上に形成された ^3He 自己凝縮相のイメージ図。ハニカム構造を成す白/灰丸がグラファイトの炭素原子、動き回りつつも、お互いに創刊する黄色が ^3He 原子を示している。

グラファイト基板の不均一部分の定量的評価

グラフォイルなど大きな表面積($\sim 20 \text{ m}^2/\text{g}$)を内包する exfoliated graphite は、原子レベルで清浄かつ平坦な大表面が得られるので、2次元吸着系の実験研究には最適の基板である。しかし、その表面には結晶粒界を中心に格子欠陥などの不均一部分が少なからず存在するので、その定量的な評価は重要であるが、これまでその取り扱いには任意性が残っていた。

前節で述べた我々の実験では、アモルファス状 ^3He の核スピン由来の熱容量($C_A(T)$)が均一部分のそれから精度良く分離できており、その大きさや温度依存性は、多孔質ガラスや焼結銀粉など全表面が乱れた基板に吸着した ^3He の熱容量と定量的にもよく一致する。その緩やかな温度依存性は、格子間距離に広い分布があるため、交換相互作用にも同様の分布ができることで説明できる。このように、アモルファス成分は均一部分に先んじてより深い吸着ポテンシャルに束縛されるので、その後に吸着が進む均一部分とは空間的に分離して存在すると推定でき、全測定量から差し引くことができることが分かったことは、実験的に大きな進展である。我々の基板の場合、均

一部分の1層目に形成される $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ の周期性をもつ整合固相(1/3整合相)の約10%の粒子がアモルファスを形成していると評価できる。

4.4.2 低密度2次元固体 ^4He の実現

グラファイト上に吸着した第2層目 He は、第1層目の4/7の面密度で整合固相(4/7相)を形成する。4/7相は、もし1層目 He の作る周期ポテンシャルが存在しなければ、局在できないような低密度の固体であり、隣接粒子同士が非常に頻繁にトンネル交換する量子性の高い結晶である。 ^3He の4/7層では、新奇なギャップレススピン液体の核スピン磁性状態が生じている。ところが、 ^4He 系では4/7相は安定化しないことが、最近の経路積分モンテカルロ計算で指摘されて以来、この整合相の存在に関して論争が続いている。そこで、グラファイト上ヘリウムの構造相転移に注目して、グラファイト上吸着 ^4He の熱容量と蒸気圧を測定した。ここで、これまでの研究結果に不確定要素があったのは、吸着基板として、比表面積は大きい($\sim 20 \text{ m}^2/\text{g}$)が、単結晶子サイズが小さい($\sim 10 \text{ nm}$)グラフォイルと呼ばれるグラファイトを用いていたことに依るところが大きい。そのために、熱容量に寄与する原子交換相互作用のサイズ効果や相転移での熱容量ピークのぼやけなどが現れていた。そこで本研究では比表面積は1/10程度に小さくなるが、およそ10倍大きな単結晶子サイズをもつZYXというグラファイトを用いた。実際、吸着第1層における $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 整合相の熱容量を測定したところ、 $T \sim 2.9 \text{ K}$ の熱容量の鋭いピークはグラフォイルを基板としたものよりも、約2倍の高さ、およそ1/2の幅をもち、サイズ効果によってぼやけていた整合固相形成に伴う相転移をより精密に測定することが可能になった。

図4.4.3に4/7相より低密度側(a)と高密度側(b)で測定された熱容量の温度依存性を示す。低面密度では、面密度の増加と共に、 $T \sim 0.9 \text{ K}$ の流体相に由来するピークが減少すると同時に、 $T \sim 1.4 \text{ K}$ に4/7相のピークが成長していく様子が観測される。一方、高密度側では $T \sim 1.4 \text{ K}$ のピークは高温側にシフトしながら減少し、同時に不整合相に由来するピークが低温側から成長していく。この結果は、4/7相の面密度に向けて整合固相が成長していき、その後、不整合相が部分的に混じった中間密度域を経て不整合相に至る描像を示唆している。

4/7相の存在は蒸気圧の密度依存性からより明瞭に確認される。図4.4.3(c)に示すように、蒸気圧の等温曲線には、4/7整合相に対応する面密度よりも低面密度側にサブステップが観測された。このようなサブステップは面密度の異なる構造が互いの面積の割合を変化させながら成長しているときや、整合固相の面積が面密度と共に増大しているときに観測される。ここで熱容量ピークの面密度依存性は2相共存ではうまく説明できないことから、このサブステップは4/7相の成長に伴うものだと考えられる。また、蒸気圧の温度依存性から吸着熱の面密度依存性を評価したところ、4/7相の面密度では吸着熱は

まだ面密度に対して変化している途中であり、2層目の成長過程であることが分かった。以上のことから、吸着第2層の整合固相が、確かに第1層の4/7の面密度で実現することが分かった。

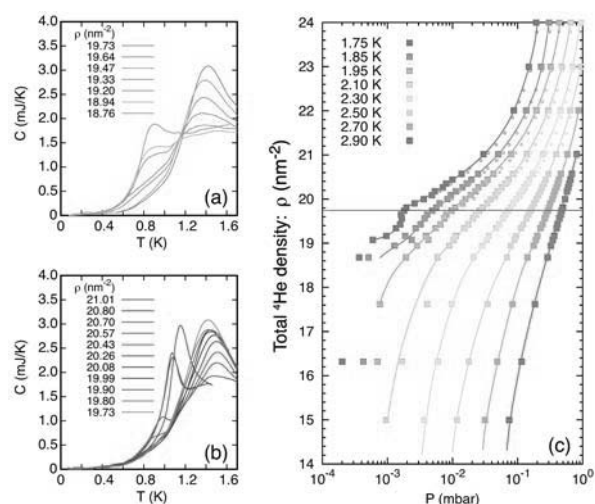


図 4.4.3: (a)(b) グラファイト上吸着第2層 ^4He において $4/7$ 相が期待される $\rho_{4/7} = 19.74 \text{ nm}^{-2}$ よりも低面密度側 (a) と高面密度側 (b) の熱容量の温度依存性。(c) 様々な温度における蒸気圧の面密度依存性。低温の蒸気圧曲線には赤線で示す $\rho_{4/7}$ に向けて $4/7$ 相の成長を示唆するサブステップが観測される。

4.4.3 極低温 LEED の設計

$4/7$ 相の吸着構造に関して直接的な情報を得るため、300 mK 以下の温度で動作する超低温 LEED 装置を開発している。低エネルギーの電子線は表面数原子層で選択的に後方散乱されるので、一般に吸着構造を決定する場合、LEED は中性子線回折や X 線回折よりも有利である。しかし、2次元 He の局在転移温度は $1 \sim 3 \text{ K}$ にあるので、従来の低温 LEED 実験の最低温度 $T = 5 \text{ K}$ より 1 桁低い 0.5 K 以下の測定が必要になる。そのために、以下のような設計上の特色を有している。(i) 電子銃フィラメントからの熱輻射を抑えるために偏向電子銃を使用する。(ii) 入射電子線による脱離や発熱を防ぐため、これを fA オーダーまで小さくする必要がある。そのため、LEED 光学系には 2 枚の光電子増倍管 (MCP; Micro-Channel Plate) と DLD (Delay Line Detector) 型の検出器を使用する。(iii) グリッドを含む光学系からの熱輻射を防ぐため、これらを 80 K 近くまで冷却する。(iv) 試料の吸着量を精密にコントロールするために大表面積をもつグラフォイルを LEED 測定用の単結晶グラファイトとともに試料セル内に設置する。(v) 吸着試料作成時は閉、電子線導入時は開となる低温動作弁を試料セルに設ける。

この装置は約 1 年後の完成とテスト実験開始を目指している。

4.4.4 グラフェンへのバンドギャップ誘起

グラファイトは炭素原子のハニカム構造のシートが積層したものであるが、その単原子層シートをグラフェンと呼ぶ。単層のグラフェンはディラック点で線形に交わるバンド構造をもち、伝導を担う電子や正孔が質量ゼロの相対論的ディラック粒子として振る舞うことが知られている。そのため半整数量子ホール効果など、半導体ヘテロ構造などに得られる 2 次元電子系とは大きく異なる物性を示す。 sp^2 軌道がハニカム状に共有結合した結晶構造は、極めて丈夫かつ柔軟であることに加えて、不純物をほとんど含まないので原子レベルで極めて清浄であり、既存の半導体よりもはるかに高い移動度 ($\sim 2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) を示すため、次世代の電気デバイスへの応用も期待されている。ところが単層グラフェンはバンドギャップを持たないため、高い消光比を期待できないという電気デバイスとしては致命的な欠点も併せ持つ。

我々は、単層から数層のグラフェン、グラフェンの母物質たるグラファイトを舞台として起こる新奇な物性を走査トンネル顕微/分光法 (STM/S) や伝導度測定を用いて研究している。グラフェンはいく通りかの方法で作成できるが、我々は母物質であるグラファイトを SiO_2 上に劈開剥離して得られる“劈開グラフェン”と、 SiC 基板を加熱処理することで得られる“ SiC グラフェン”の 2 種類を研究に応じて使い分けている。前者は基板からの電界効果によってフェルミ・エネルギーを操作することができる上、基板との相互作用が弱いためにグラフェン本来の性質を得やすい反面、試料サイズは高々数 $10 \mu\text{m}$ 四方と限られている。それに対して後者は基板全面に渡る大表面積のグラフェンが得られるが、基板との相互作用が強く、グラフェンの電子状態もその影響を強く受け得る。

希ガスで修飾したグラフェンの STM/S 観測

将来のデバイス応用を見据えて、グラフェンへバンドギャップを誘起する様々な方法が議論されている。例えば基板との格子定数のミスマッチを利用してグラフェンの結晶に歪みを誘起したり、2層グラフェンに垂直電場を印加してサイト間の対称性を破ることによって、バンドギャップを誘起できることが知られている。我々は、グラフェンに原子を吸着させることでケクレ構造の電子状態をつくり、バンドギャップを誘起する可能性に注目して研究を進めている。バンドギャップが形成されたことは STM/S によるフェルミ・エネルギー付近の電子状態密度の直接観測と、電気伝導度測定による抵抗の変化から確かめる。今年度は希ガスである Kr 原子を吸着させたグラフェンについて研究を進めた。

まず STM/S 観測では、我々の ULT-STM/S は走査範囲が低温で $1 \mu\text{m}$ 四方と小さく、また STM 探針

位置を目視で確認できないので、試料面積に限られる劈開グラフェンに対する研究は容易ではない。そこで本研究では SiC グラフェンを用いた。SiC 基板を加熱処理して作成される SiC グラフェンでは、SiC 結晶とグラフェン結晶のミスマッチから、グラフェンのハニカム構造に加えて、その 6 倍周期の凹凸が STM で観測されることが知られている。この 6×6 構造の振幅はグラフェンの層数が厚くなるほど小さくなる。図 4.4.4 に単層グラフェンと 2 層グラフェンの境界付近の STM 像 (a) とその微分像 (b) を示す。微分像では表面の凹凸を明瞭にみることができ、2 層グラフェン (像の右側) の方が単層グラフェン (左側) よりも凹凸が小さいことが分かる。またこの単層と 2 層の境界を拡大したところ、炭素原子が境界を跨いでつながっている様子が観測された。これはグラフェンが SiC 基板表面から結晶成長してくるために、最表面のグラフェンは層数の違いによる段差を跨いでカーペット状に存在するためである。

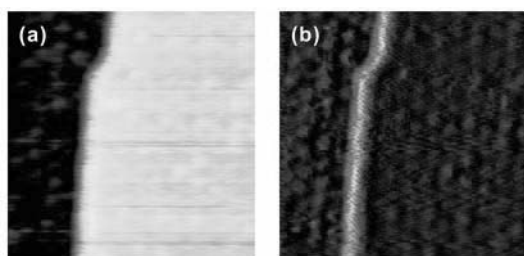


図 4.4.4: SiC グラフェンの $20 \times 20 \text{ nm}^2$ の STM 像 (a) とその微分像 (b)。図中央の境界を挟んで、左側が単層、右側が 2 層のグラフェンになっている。表面に見える凹凸は SiC 基板由来の 6×6 構造であり、その振幅は薄いグラフェンほど大きい。 $T = 2.5 \text{ K}$, $B = 8 \text{ T}$, $U_g = 200 \text{ mV}$, $I_t = 0.2 \text{ nA}$ 。

ここで Kr 吸着試料は、室温に置かれた超高真空チャンパー内で、試料ステージの温度とチャンパー内の Kr の分圧を一定に保つことで作成する。作成された吸着試料は既に 2 K 程度まで冷却されている STM に素早く輸送される。こうした試料作成は、試料作成のための予冷ステージをもった超高真空チャンパーを有し、*in-situ* で試料の輸送が可能な我々の ULT-STM ならではの方法である。

吸着量の異なる 2 種類の試料について STM 観測を行ったところ、本研究では Kr の原子像を得ることはできなかった。しかし、Kr の吸着量を増す毎に 6×6 構造の振幅が大きくなり、一方で表面の仕事関数が小さくなる様子が観測された。これは Kr 原子が SiC グラフェン表面ではなく、グラフェンと SiC 基板の間に入り込んでいる可能性を示唆している。グラファイト上では Kr 原子の吸着構造が観測されることから、これはグラフェン (特には SiC グラフェン) に特徴的な振舞いと考えられる。

なお本研究で用いた SiC グラフェンは NTT 物性科学基礎研究所・機能物質科学研究部・低次元構造

研究グループの日比野浩樹氏より提供いただいた。

希ガスで修飾したグラフェンの伝導度測定

希ガス吸着によってグラフェンにバンドギャップを誘起する可能性は、上述の STM/S に加えて伝導度測定によっても調べている。この場合、基板の影響が小さくグラフェン本来の性質を得やすい劈開グラフェンを吸着基板として用いた。ここで、吸着試料の作成には吸着面の清浄度が重要になる。電極を付けるための従来の微細加工では、基板を溶液 (レジスト) に浸すが、その残留物がグラフェンの伝導特性に小さくない寄与を及ぼすことが知られている。そこで我々は顕微鏡下でインジウムの細線を直接グラフェンに取り付けた (図 4.4.5(b))。この方法を用いることによって、グラフェン表面の汚染を極力避けることができるし、電極のパターンを臨機応変に変えられるので、 SiO_2 絶縁膜の亀裂に起因するゲート電圧のリークも防ぐことができる。図 4.4.5(a) に単層および 2 層グラフェンの電気抵抗のゲート電圧依存性を示す。バンド構造を反映して、ディラック点を中心とした対称なゲート電圧依存性が観測されている。単層グラフェンの方が 2 層グラフェンよりも鋭い電界効果が観測されているのが分かる。

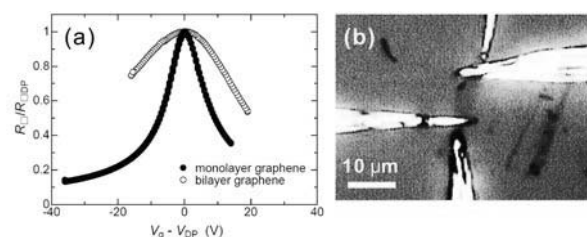


図 4.4.5: (a) 単層 (●) および 2 層 (○) グラフェンの抵抗率のゲート電圧依存性。横軸、縦軸はグラフェンのディラック点のエネルギー、ディラック点における抵抗率で規格化してある。(b) (a) で測定した単層グラフェンの光学顕微鏡写真。グラフェンが見えやすいようにコントラストを調節してある。中央にある単層グラフェンに対して、インジウムの細線で電極を取り付けてある。

ここで吸着表面は高々数 $10 \mu\text{m}$ 四方であるので、吸着量の精密なコントロールは容易ではない。そこで、同じ測定セル内におよそ 39 m^2 の表面積をもつ積層グラファイトを用意し、グラファイトに対して Kr 導入量を制御することで、吸着量をコントロールした。単層、2 層のグラフェンについて、こうした方法で Kr 吸着量を変えながら電気抵抗のゲート電圧依存性を測定した。しかしゲート電圧依存性には変化は現れず、バンドギャップが形成される様子は今のところ観測されていない。これが本質的なものなのか、あるいは今回の実験系による別の要因のためか

調べることが今後の課題である。

4.4.5 超伝導ナノ粒子のSTM/S観測

超伝導体と常伝導金属を接続すると、その界面付近では、超伝導側で超伝導性が減衰し、金属側では超伝導性が誘起される。こうした超伝導近接効果は、クーパー対の波動関数の常伝導側への浸み出し、あるいはアンドレーエフ反射として理解されるが、常伝導金属として半金属かつ長い平均自由行程をもつグラフェンを用いると、より長いクーパー対の染み出しが期待できる。我々は昨年度、3層グラフェン上にSnを蒸着した試料において、およそ20 nmの間隔を隔てて存在する直径300~500 nmの超伝導Snナノ粒子がグラフェンを介して接続されることで、2次元系における超伝導転移(Kosterlitz-Thouless 転移)を起こすことを伝導度測定から示した。一方、単一の超伝導ナノ粒子に注目した場合、その大きさをコヒーレンス長やロンドン侵入長に対して小さくしていくと、表面や熱的な揺らぎの効果、クーパー対の局在のために、超伝導ナノ粒子にはバルクとは異なる超伝導性が現れる。STM/Sでは局所的な電子状態を測定できるので、超伝導ナノ粒子近傍でのクーパー対浸み出しの効果や、ナノメートルスケールの超伝導の電子状態を直接的に測定することができる。今年度は、グラフェンの母物質であるグラファイト上にインジウムの超伝導ナノ粒子を作成し、その電子状態をSTM/Sにより観測した。ただし本研究ではインジウムのクラスターが付着した探針を使用している。そのために、図4.4.6(a)に $B = 0$ Tでの状態密度を示すように、同種超伝導のトンネル接合による状態密度のピークが $V = 0$ mVに現れている。

図4.4.6(a)に直径40 nm程度のナノ粒子上で測定された状態密度を示す。ゼロ磁場ではクーパー対形成に伴うエネルギーギャップと、その外側にクーパー対のコヒーレンスを示すコヒーレンスピークが観測される。ただし、インジウム(バルク)の超伝導転移温度 $T_c^{\text{bulk}} = 3.4$ Kに対して、本研究の試料温度が $T = 2$ Kであることを考えると、このギャップ構造は通常の場合よりも大きな状態密度の落ち込みと、それに比して小さなコヒーレンスピークを示していることが分かる。実際、一般的な超伝導に対するBCS理論に基づく表式では、この構造を再現することはできない。

コヒーレンスピークの高さ(R)と $V = 0$ mV(即ち、フェルミ・エネルギー E_F)でのトンネルコンダクタンス(ZBC)の温度依存性では、温度と共に T_c^{bulk} に向かって R はゼロに向かうが、ZBCは $T > T_c^{\text{bulk}}$ でも常伝導の値($ZBC = 1$)まで回復しない。これはクーパー対は存在しているが、そのコヒーレンスが失われているためと考えられる。そのために $T > T_c^{\text{bulk}}$ ではコヒーレンスピークはないが、クーパー対形成に伴うギャップが擬ギャップとして残る状態密度が得られる。ここで、コヒーレンスが失われるのは、クーパー対の局在によると考えられるが、このことはナノ粒子依存性によく現れる。いくつかのナノ粒子で測定した結果、小さく、孤立したナノ粒子ほど、小

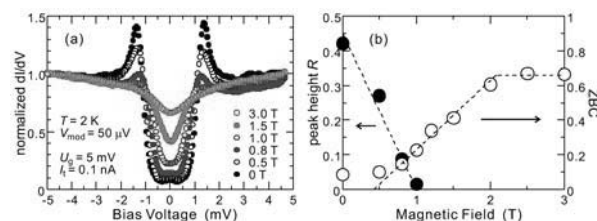


図 4.4.6: 直径約 40 nm の In ナノ粒子上で測定された磁場中の微分トンネルコンダクタンス (a) と、コヒーレンスピーク高さ (R) と $V = 0$ mV での微分トンネルコンダクタンス (ZBC) の磁場依存性 (b)。磁場と共にまずコヒーレンスピークがなくなるが、ギャップ構造は $B > 1$ T でも擬ギャップとして残る。しかし、高磁場でも ZBC は常伝導の値まで回復せず、 $B > 2$ T ではほぼ一定の ZBC に飽和する。

さなコヒーレンスピークが得られた。

この超伝導ナノ粒子に磁場を表面に対して垂直に印加すると、超伝導ギャップが壊れていく様子が観測された(図4.4.6(a))。このとき R と ZBC の磁場依存性は、温度依存性とよく似ている(図4.4.6(b))。ナノ粒子では表面の効果が重要になるので、臨界磁場はバルクの値(0.0293 T)よりも大きくなる。ただし、擬ギャップは高磁場でも完全にはなくならず、およそ2 T 以上でも常伝導状態のおよそ70 %でほぼ一定となる。これは局在したクーパー対と同時に、電子間相互作用が擬ギャップ形成に寄与しているためと考えられる。磁場を大きくすると、クーパー対のコヒーレンスは $B \sim 1$ T で失われる。 $B > 1$ T では擬ギャップが残るが、 $B \sim 2$ T でクーパー対は壊され、 $B > 2$ T では電子間相互作用による状態密度の落ち込みのみが観測されると考えられる。

<受賞>

- [1] K. Matsui : Best Poster Presentation award in the 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), (August 17, 2011).

<報文>

(原著論文)

- [2] D. Sato, K. Naruse, T. Matsui and Hiroshi Fukuyama : Spin-spin Relaxation Time Measurements of 2D ^3He on Graphite, Journal of Physics: Conference Series (in press).
- [3] S. Nakamura, K. Matsui, T. Matsui and Hiroshi Fukuyama : New Heat-Capacity Measurements of the Possible Order-Disorder Transition in the 4-7-phase of 2D Helium, Journal of Physics: Conference Series (in press).
- [4] K. Matsui, S. Nakamura, T. Matsui, H. Fukuyama : Millikelvin LEED apparatus: a feasibility study, International Conference on Low Temperature

Physics (LT26), Journal of Physics: Conference Series (in press).

(国内雑誌)

- [5] 日本物理学会誌福山 寛: 超低温で量子現象を”みる”、東京大学理学系研究科・理学部ニュース (2011 年 5 月号) .

(学位論文)

- [6] 佐藤 大輔: Two-dimensional Quantum Phases of Helium Three on Graphite (グラファイト上ヘリウム 3 の 2 次元量子相) (博士論文) .
- [7] 武井 英人: 超伝導体および希ガス原子で修飾したグラファイト表面の STM/S 観測 (修士論文) .
- [8] 成瀬 公暁: Heat-capacity and NMR measurements of two-dimensional helium-3 system (修士論文) .

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [9] D. Sato, K. Naruse, T. Matsui, H. Fukuyama : Spin-spin Relaxation Time Measurements of 2D ^3He on Graphite, The 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), (Beijin, China, August 10-17, 2011).
- [10] S. Nakamura, K. Matsui, T. Matsui, H. Fukuyama : New Heat-Capacity MEasurements of the Possible Order-Disorder Transition in the 4-7-phase of 2D Helium, The 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), (Beijin, China, August 10-17, 2011).
- [11] K. Matsui, S. Nakamura, T. Matsui, H. Fukuyama : Millikelvin LEED apparatus: a feasibility study, The 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), (Beijin, China, August 10-17, 2011).
- [12] Y. Shibayama, H. Fukuyama, K. Shirahama : Hysteresis of non-Classical rotational inertia in 2D ^4He films on graphite, The 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), (Beijin, China, August 10-17, 2011).
- [13] K. Naruse, D. Sato, T. Matsui, H. Fukuyama : Self-Condensed State and Spin Fluctuations in Two-Dimensional ^3He System, International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT2011) -New Frontiers of Low Temperature Physics-, (Daejeon, Korea, August 19-22, 2011).
- [14] xD. Sato, K. Naruse, T. Matsui, H. Fukuyama : Pulsed-NMR Studies of Density Variation in the Second Layer ^3He on Graphite, International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT2011) -New Frontiers of Low Temperature Physics-, (Daejeon, Korea, August 19-22, 2011).

招待講演

- [15] H. Fukuyama : Frustrated Nuclear Magnetism of 2D Helium Three, The 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), (Beijin, China, August 10-17, 2011).

(国内会議)

一般講演

- [16] 松井 朋裕: 超伝導近接効果のトンネル分光測定文科省 新学術領域「トポロジカル量子現象」 第 7 回集中連携研究会「奇周波数クーバー対」(名古屋大学、2011 年 9 月 8-10 日) .
- [17] 福山 寛: 走査トンネル分光法で探るグラフェンとグラファイト表面の電子状態、日本物理学会 2011 年秋季大会 (富山大学、2011 年 9 月) .
- [18] 柴山 義行、福山 寛、白浜 圭也: グラファイト上の 2 次元 ^4He 固体における超流動的振る舞いの速度依存性、日本物理学会 2011 年秋季大会 (富山大学、2011 年 9 月) .
- [19] 佐藤 大輔、成瀬 公暁、松井 朋裕、福山 寛: 2 次元におけるヘリウム 3 の自己凝縮現象、ISSP 短期研究会「量子凝縮系における defect と topology」(東京大学物性研究所、2012 年 1 月 5 日) .
- [20] 柴山 義行、福山 寛、白浜 圭也: c グラファイト表面の ^4He 薄膜の非古典的回転慣性、ISSP 短期研究会「量子凝縮系における defect と topology」(東京大学物性研究所、2012 年 1 月 5 日) .
- [21] 佐藤 大輔、成瀬 公暁、松井 朋裕、福山 寛: 2 次元平面に束縛したヘリウム 3 は液化するか?、平成 23 年度 東京大学低温センター研究交流会 (東京大学、2012 年 3 月 5 日) .
- [22] 成瀬 公暁、佐藤 大輔、松井 朋裕、福山 寛: 2 次元ヘリウム 3 における自己凝縮液体の研究 IV、日本物理学会 第 67 回年次大会 (関西学院大学、2012 年 3 月) .
- [23] 佐藤 大輔、成瀬 公暁、松井 朋裕、福山 寛: グラファイト基板の不均一部分に局在したヘリウム 3 の成長過程、日本物理学会 第 67 回年次大会 (関西学院大学、2012 年 3 月) .
- [24] 中村 祥子、松井 幸太、松井 朋裕、福山 寛: グラファイト上 2 次元ヘリウム 4/7 相の熱容量測定、日本物理学会 第 67 回年次大会 (関西学院大学、2012 年 3 月) .

招待講演

- [25] 松井 朋裕: STS observations of Landau quantization and edge states on graphite、第 35 回日本磁気学会学術講演会 (新潟、2011 年 9 月 27-30 日) .

(セミナー)

- [26] 福山 寛 : ヘリウム 3 超流動転移のダイナミクスー Baked Alaska から Kibble-Zurek 機構までー、京都大学大学院理学研究科第一教室談話会 (京都大学、2011 年 7 月 20 日) .
- [27] 福山 寛 : 2 次元ヘリウム 3 の磁性と強相関効果、京都大学大学院理学研究科第一教室特別講義 1 (京都大学、2011 年 7 月 19-21 日) .

4.5 岡本 研究室

本研究室では、半導体2次元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。

4.5.1 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、これまですべ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、Ag などを蒸着して得られた劈開表面では整数量子ホール効果が観測されている。

走査型トンネル顕微鏡システムの始動

これまで、劈開表面に堆積させる金属の種類や蒸着条件を変えて電気伝導測定を行い、様々な物理現象を観測してきたが、実験結果を正しく理解するためには走査型プローブ顕微鏡を用いた表面観察が不可欠である。また、マクロな電気伝導測定系と走査プローブを組み合わせることで、量子ホール状態における電流分布を直接調べるなど新しい研究の展開が期待できる。昨年度、枅富が中心となり走査型トンネル顕微鏡 (STM) を組み込んだ実験システムが構築された。金属蒸着機構、劈開機構、試料ホルダー、STMヘッドは、すべて直径 50 mm の断熱真空管の中に収まる設計となっており、研究室保有の2インチ15テスラ超伝導コイルなどを用いた液体ヘリウム温度 (4.2 K) での実験が可能である。本年度より、鳥山と枅富によって実験が開始された。

最初の実験として、蒸着金属量と電子密度との間の関係を調べた。以前の研究 (辻他 APL 2005) では、低温で蒸着された金属原子は低密度領域においてクラスターや鎖などを作らず、ほぼ独立して存在しているものと仮定して議論を行ったが、今回、表面観察を行うことによってそのことを直接確かめることができた。また、表面原子密度と磁気抵抗振動から求めた電子濃度との対応関係は、辻らの結果と良い一致を示し、低蒸着領域においては1個の蒸着原子が1個の電子を半導体に供給するとした仮定が正しいことが確認できた。次に、トンネル分光測定を行った。今回用いた試料では、縦抵抗の解析から第

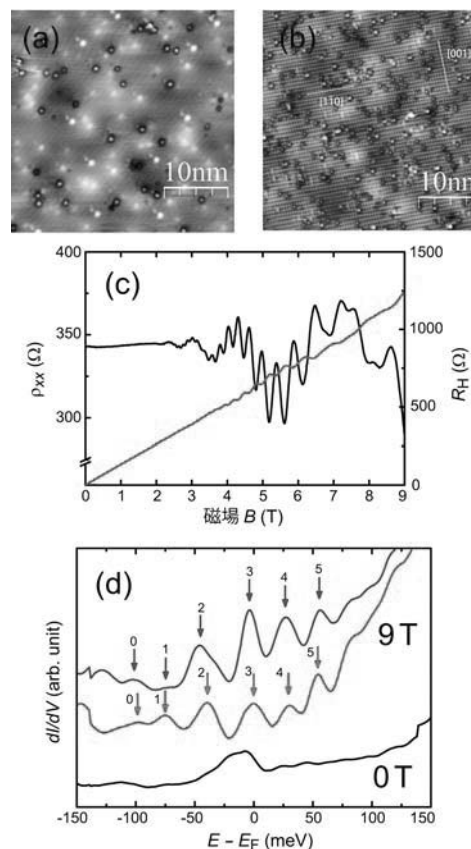


図 4.5.1: (a)(b) ヘリウム温度で劈開した InAs 表面に (a) 0.004ML の Ag、(b) 0.022ML の Fe を蒸着したときの STM 像。(c) Ag 原子の蒸着 ((a) の試料) により誘起された2次元電子系の縦抵抗および Hall 抵抗の磁場依存性。振動周期から2次元電子密度を見積もることができる。(d) トンネル分光測定の結果 (試料は (a)(c) と同じ)。9 T の強磁場下においてランダウ準位が明瞭に観測された。青線は1点のみの局所状態密度。赤線は、 $7.2 \text{ nm} \times 7.2 \text{ nm}$ の範囲で平均化した dI/dV 図である。

2 サブバンドまで電子が入っていることが予想されたが、実際、ゼロ磁場で状態密度を測定すると各サブバンドにおける最低エネルギーに対応すると思われる立ち上がり (図 (d) の -120 meV と 0 meV) が観測された。磁場中においては、ランダウ準位に起因する明瞭な振動が観測された。低エネルギー側はやや不明瞭であるがフェルミエネルギーまでに4つのピークが見られた。電気伝導測定から求められる9テスラの磁場中におけるランダウ準位充填率は $\nu = 7.4$ であり、 dI/dV の測定結果と合致する。また、低エネルギー側のピーク間隔から求められる有効質量は約 $0.03m_e$ であり、InAs の伝導帯端における有効質量 $0.026m_e$ とほぼ一致している。高エネルギー側に

いくにつれてピーク間隔が狭くなっていくのはバンドの非放物線性により有効質量が大きくなっていくためだと解釈している。

4.5.2 金属超薄膜の超伝導

InAs および InSb の劈開表面 2 次元電子系に対して開発された電気伝導測定技術を応用した、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が関原を中心として行われた。

単原子層膜での超伝導

Pb および Bi の薄膜において超伝導が観測された。特に Pb 超薄膜においては、単原子層以下の原子密度においてもゼロ抵抗状態が観測されている。先行研究よりも絶縁体に転移する臨界膜厚が低い理由として、我々が用いた劈開表面が非常に平坦であることが挙げられる。

磁場依存性

膜厚が 0.22 nm の Pb 超薄膜に対して詳細に磁場依存性を調べた。まず、二次元面に平行に強磁場を加え電気抵抗と温度の関係を測定したところ、8.5 T の強磁場中においても磁場による影響はほとんど見られなかった。次に、温度を 0.53 K に保った状態で、試料を回転させて垂直磁場依存性を調べたところ、軌道効果によって超伝導が壊れていく振舞いが観測されたが、9 T の面内磁場の有無による違いはほとんど見られなかった。単原子層膜は二次元系と見なすことができるため、面内磁場が軌道効果に寄与しないことは当然であるが、Pauli 常磁性による対破壊効果が現れないことは予想外であった。Pauli 効果による臨界磁場を BCS 近似に基づく理論から見積もとるとゼロ磁場での超伝導転移温度を用いて $H_P(T) = 1.84T_c(K)$ と書ける。これに $T_c = 0.9$ K を代入すると $H_P \approx 1.7$ T となるが、実験は H_P の数倍の磁場中でも超伝導が影響を受けないことを示している。

重元素である Pb はスピン軌道相互作用が非常に強く、基板上の超薄膜は空間反転対称性が強く破れているので、Rashba 効果によるスピン分裂が起こっていると考えるのが自然である。他の基板上の Pb 超薄膜に対する ARPES の実験結果などから Rashba 分裂の大きさは 100 meV のオーダーだと予想されるが、超伝導ギャップの大きさよりも 2～3 桁大きい。今回観測した、面内磁場に対する「鈍感さ」が、Rashba 分裂したエネルギーバンドに強く関連していることが考えられる。

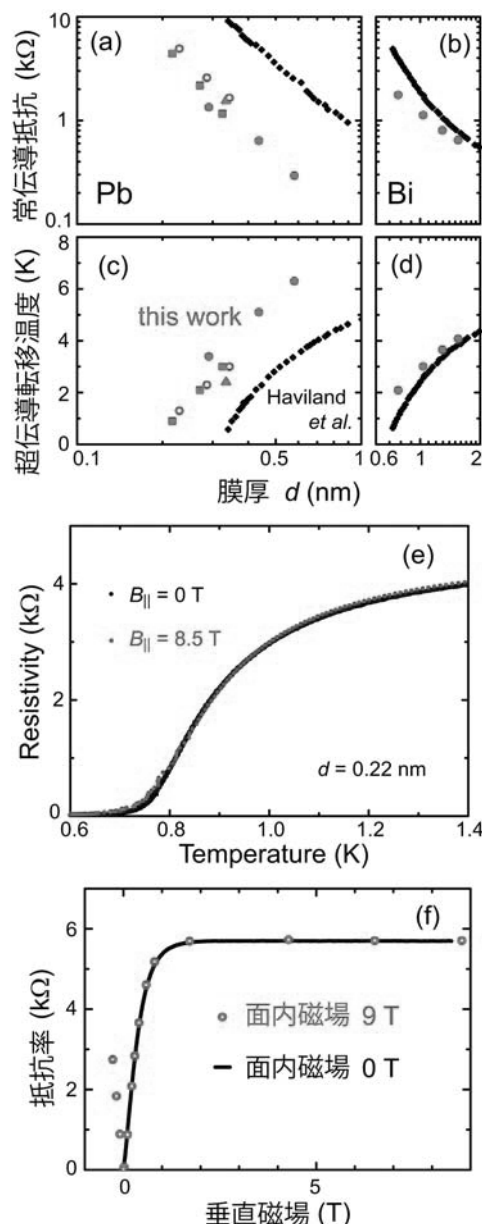


図 4.5.2: (a)-(d) Pb および Bi の超薄膜の常伝導抵抗と超伝導転移温度の膜厚依存性。1 原子層は、約 0.3 nm の膜厚に相当。(e) 電気抵抗率 (= シート抵抗) の温度依存性。8.5 T の面内磁場の印加の有無による違いはほとんど見られない。(f) 電気抵抗率の垂直磁場依存性 ($T = 0.53$ K)。9 T の面内磁場の影響はほとんど見られない。

4.5.3 強相関 2 次元電子系

単純なバンド理論では動き回る電子同士に働く力を考えないが、実際にはクーロン斥力が働いている。

電子の運動エネルギーと比べて相関のエネルギーが強い電子系は、強相関系と呼ばれ、現代物理学の重要なキーワードの一つである。半導体2次元系は、磁場や電子密度などにより相関の強さを自由に変えることができることなどから、強相関物理の理想的な舞台の一つとなっており、分数量子ホール効果など他の系では見られない現象も観測されている。

近年、我々のグループでは都市大白木先生と澤野博士より提供いただいた非常に高い移動度をもつ Si/SiGe 量子井戸試料に対して研究を行っている。

二次元金属相におけるサイクロトロン共鳴

シリコンの電子系や GaAs の正孔系の低電子密度領域においては、ゼロ磁場下でも、粒子間の平均クーロンエネルギーがフェルミエネルギーよりも一桁程度大きくなる強相関2次元系が実現される。これらの系では、電子（正孔）密度をパラメータとして金属・絶縁体転移が観測されるが、その機構は未解明であり、2次元電子分野の重要なテーマとなっている。また電子間相互作用パラメータ r_s に対する有効質量、 g 因子、スピン帯磁率などの依存性を調べるための理想的な系としても盛んに研究が行われている。我々のグループでは磁気抵抗効果の角度依存性からスピン自由度の重要性を明らかにする研究を先駆的に行ってきた。

一方で、最近では金属的温度依存性の機構解明の手がかりを得るために、サイクロトロン共鳴の測定を行っている。これまで、共鳴吸収線幅から得られるサイクロトロン緩和時間 $\tau_{CR} = B/(\omega\Delta B)$ が直流極限の電気抵抗から得られる散乱時間 τ_t と似通った温度依存性をもつことが明らかになっている（枅富他 PRL 2011）。本年度は、千葉が自作したベクトルマグネットを用いることにより、2次元面に平行な磁場によってスピン偏極したシリコン電子系に研究を拡張した。今回は、簡便のため、外部ボロメータを用いずに2次元電子系の抵抗変化から吸収パワーを見積もる方法を採用した。 $B_{||} = 0$ において外部ボロメータを用いた枅富らの結果と矛盾しないことは確認している。100 GHz のマイクロ波を照射した時の共鳴吸収線幅 ΔB は、面内磁場の印加とともに広がっていった。 τ_{CR} の温度依存性は、散乱時間 τ_t と似通った面内磁場依存性を示した。実験結果は、低周波極限から 100 GHz にわたる非常に広い周波数範囲において、散乱時間がスピン偏極とともに減少することを示唆する。現時点では、金属的温度依存性と同様に、散乱時間のスピン偏極率に対する依存性の原因となる機構についてのコンセンサスは得られていないが、我々の実験結果が理論モデルに強い制限を与えるものと期待している。

高周波電気伝導測定

低周波極限とサイクロトロン共鳴測定が行われた 100 GHz との中間の周波数領域における散乱時間を系統的に調べるために、0.1 ~ 10 GHz 領域での電気

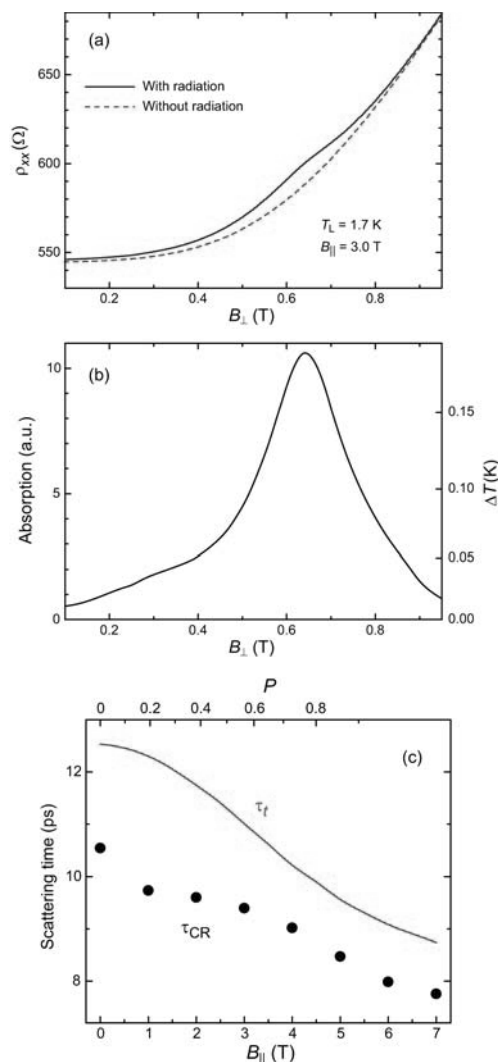


図 4.5.3: (a) 電子密度 $N_s = 1.13 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ の Si/SiGe ヘテロ接合中の2次元電子系における対角抵抗の垂直磁場依存性。実線が 100 GHz のマイクロ波を照射時の、点線が非照射時のデータ。面内磁場と温度は $B_{||} = 3.0 \text{ T}$ 、 $T = 1.7 \text{ K}$ に固定している。(b) マイクロ波照射による抵抗変化から求まる温度上昇から見積もったサイクロトロン共鳴吸収。(c) 吸収線幅から見積もった散乱時間 τ_{CR} と電気抵抗から見積もった散乱時間 τ_t の面内磁場 $B_{||}$ 依存性。上軸はスピン偏極率。

伝導測定系が花塚により行われた。試料は、Si/SiGe ヘテロ接合を持つウェハの表面にコプレーナ導波路をパターンニングしたものである。表面直下 (0.1 μm) の2次元電子の運動が、伝送損失を引き起こすことから、2次元系の対角伝導率 σ_{xx} を導出することができる。高い電子密度においては、すべての周波数

において金属的温度依存性が観測された。今後は、金属絶縁体転移点近傍の電子密度領域に研究を拡張して、絶縁体化と Wigner 結晶の形成との関連を調べる。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] K. Sawano, K. Toyama, R. Masutomi, T. Okamoto, K. Arimoto, K. Nakagawa, N. Usami, Y. Shiraki: Effects of increased compressive strain on hole effective mass and scattering mechanisms in strained Ge channels, *Microelectronic Engineering* **88**, 465 (2011).
- [2] R. Masutomi, K. Sasaki, I. Yasuda, A. Sekine, K. Sawano, Y. Shiraki, T. Okamoto: Metallic Behavior of Cyclotron Relaxation Time in Two-Dimensional Systems, *Physical Review Letters* **106**, 196404 (2011).
- [3] T. Okamoto, T. Mochizuki, M. Minowa, K. Komatsuzaki, and R. Masutomi: Magnetotransport in adsorbate-induced two-dimensional electron systems on cleaved InAs surfaces, *Journal of Applied Physics* **109**, 102416 (2011).

(会議抄録)

- [4] R. Masutomi, K. Sasaki, I. Yasuda, A. Sekine, K. Sawano, Y. Shiraki, T. Okamoto: Cyclotron Resonance of Two Dimensional Electrons near the Metal-Insulator Transition, *AIP Conference Proceedings* **1399**, 277 (2011).
- [5] R. Masutomi, K. Sasaki, I. Yasuda, A. Sekine, K. Sawano, Y. Shiraki, T. Okamoto: Cyclotron resonance in the two-dimensional metallic phase of Si quantum wells, *Journal of Physics: Conference Series* **334**, 012057 (2011).

(学位論文)

- [6] 千葉奨: 「スピン偏極したシリコン 2 次元電子系におけるサイクロトロン共鳴」(修士論文)
- [7] 鳥山順丘: 「走査トンネル顕微鏡を用いた半導体劈開表面二次元系の研究」(修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [8] T. Sekihara, R. Masutomi, and T. Okamoto: Two-dimensional superconductivity of ultrathin Bi films on cleaved GaAs surfaces, 26th International Conference on Low Temperature Physics (Beijing, China), August 10-17, 2011.

(国内会議)

一般講演

- [9] 関原貴之、栢富龍一、岡本徹: GaAs 劈開表面上に形成した金属超薄膜の超伝導、第 3 回 低温センター研究交流会・利用者懇談会 (東京大学小柴ホール) 2012 年 3 月 5 日.
- [10] 千葉奨、栢富龍一、澤野憲太郎、白木靖寛、岡本徹: スピン偏極したシリコン 2 次元電子系におけるサイクロトロン共鳴、日本物理学会 年次大会 (関西学院大学) 2012 年 3 月 24 日-27 日.
- [11] 関原貴之、栢富龍一、岡本徹: GaAs 劈開表面上に形成した金属超薄膜の超伝導、日本物理学会 年次大会 (関西学院大学) 2012 年 3 月 24 日-27 日.

招待講演

- [12] 栢富龍一: 半導体表面に形成される 2 次元電子系、第 5 6 回物性若手夏の学校 (富士吉田市) 2011 年 8 月 1 日-5 日.
- [13] 岡本徹: 半導体表面における量子ホール伝導と 2 次元スピングラス、日本物理学会 秋季大会 (富山大学) 2011 年 9 月 21 日-24 日.

4.6 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、量子凝縮相の探索に取り組んでいる。特に、基底状態の特徴を反映して低エネルギー、テラヘルツ周波数帯に発現する素励起の共鳴（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や多電子系の相転移ダイナミクスを調べることを主なテーマとしている。もう一つ的主軸テーマとして、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。

4.6.1 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、電子正孔対の密度と温度によって、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。低密度領域で近似的にボース粒子とみなせる励起子は、低温下で励起子ボースアインシュタイン凝縮 (BEC) を起こすことが期待されている。一方、励起子が十分高密度になると、多体効果によって励起子が不安定化し、構成粒子である電子と正孔に乖離し、電子正孔プラズマへと移行する (励起子モット転移)。これは電子正孔系の絶縁体金属転移である。励起子が乖離するような高密度領域で電子正孔系を低温にすると、励起子絶縁体、或いは電子正孔 BCS 状態と呼ばれる量子凝縮相が発現することも平均場理論の範囲では示されているが、実際に半導体電子正孔系で電子正孔 BCS 状態が安定に存在するかどうかは未解明の問題である。このような多彩な相をとりうる電子正孔系の相転移、あるいはクロスオーバー、低温での量子凝縮相の振る舞い、さらにはそこで電子相関効果がどのような役割を果たしているのか、について、我々はレーザー分光の手法を用いて研究している。特に励起子の束縛エネルギー (BCS 状態であればギャップエネルギー) に対応する低エネルギー、テラヘルツ周波数帯の誘電応答、光学伝導度スペクトルに注目して研究を進めている。

低温強磁場高圧下光ポンプ・テラヘルツプローブ分光法の開発

準熱平衡状態下で高密度に光励起された電子正孔系を調べるために、電子正孔対が長い寿命 ($>1\mu\text{s}$) を持つ間接遷移型半導体を取り上げた。間接遷移型半導体では伝導帯及び価電子帯の縮重が大きく、縮重がない場合に比べ与えられた電子密度に対してフェ

ルミ縮退した電子系全体の運動エネルギーが低下し、相対的に電子正孔液滴の形成を安定化させる多体の交換相関クーロンエネルギーが優勢となる。このため間接遷移型半導体の高密度電子正孔系では、低温になると電子正孔液滴が自発的に形成されるが、これは量子凝縮相発現にとっての阻害要因となる。この電子正孔液滴形成を抑制するために、結晶に1軸性圧力を印加し、バンド縮重を解消することを試みた。特に、1軸性圧力 ($>300\text{ MPa}$) により電子正孔液滴を不安定化した条件下で、テラヘルツ分光により励起子 $1s-2p$ 遷移やテラヘルツ帯に現れると期待される電子正孔 BCS ギャップの観測を行うために、テラヘルツ分光用1軸性圧力アンビルセルの開発を進めた。圧力下の Si において、伝導帯及び価電子帯の縮重が解けて電子正孔液滴の形成が抑制されていることを、テラヘルツ帯に現れる電子正孔液滴の表面プラズモン共鳴の観測から確認することに成功した。現在、アンビルセルの低温強磁場環境下への組み込みを完了し、低温強磁場高圧下での系統的なテラヘルツ分光を進めている。

励起子モット転移

間接遷移型半導体 Si における励起子モット転移をテラヘルツ分光法により調べた。光励起された電子と正孔が空間的に様に分布する条件下で励起子モット転移を調べるために、密度の不均一化をもたらす電子正孔液滴の形成を避け、電子正孔液滴の臨界温度 (23 K) 以上で電子正孔対密度を連続的に変化させながらテラヘルツ周波数帯の複素誘電関数を計測した。複素誘電関数スペクトルに対してドルーゼローレンツモデルによる解析を行い、励起子の密度、自由キャリアの密度、励起子のイオン化率、励起子 $1s-2p$ 遷移エネルギーとその緩和定数、自由キャリアの散乱レートを定量的に決定することに成功した。その結果から、励起子のイオン化率が急激に増大する密度、即ち励起子モット転移密度を明確に決定することができた。さらに、励起子の束縛エネルギーが励起子モット転移密度の前後でも大きく変化しないこと、励起子モット転移密度以上の金属相でも励起子相関が遮蔽されずに強く残っていることを明らかにした。これは平均場理論による励起子モット転移の従来の解釈とは全く異なる結果であった。加えて、自由キャリアの散乱レートがモット転移密度近傍で著しく増大する一方で、励起子の振動子強度と緩和定数は大きくは変化しないこと、この密度領域では、キャリア散乱レートが励起子相関に起因して運動エネルギーより一桁程度大きく異なると異常金属相が出現していることを明らかにした。自由キャリアの散乱レートはより高密度になると一端減少することから、モット転移密度近傍における散乱レートの増大はキャリアーキャリア散乱によるものではなく、キャリアー励起子散乱によるものであると解釈した。さらに、励起子モット転移密度近傍で励起子とプラズモンが結合した新しい素励起が現れていることを、光学スペクトルから求めた損失関数の考察から明らかにした。

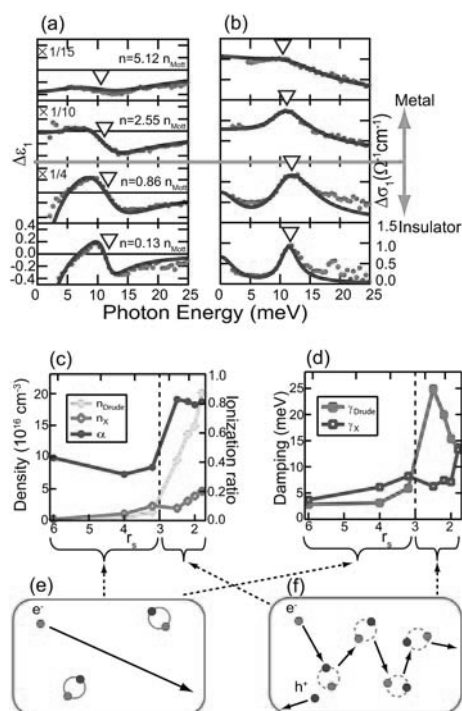


図 4.6.1: 格子温度 30 K、光励起後 4 ns における (a) 誘電率実部と (b) 光学伝導度の電子正孔対密度依存性。赤点：実験データ、青実線：フィッティング曲線。フィッティングにより得られた、(c) 自由キャリア及び励起子の密度とイオン化率、(d) 自由キャリア及び励起子の散乱レート。励起子ボーア半径で規格化した平均粒子間距離 r_s の関数としてプロットしている。黒点線：平均場理論から予想される温度 30 K での励起子モット転移密度 ($r_s = 3$)。推定される (e) 低密度領域、(f) 高密度領域における電子正孔系の模式図。

4.6.2 有機導体

有機導体では、温度、圧力、あるいは磁場に応じて、電荷密度波、スピン密度波、電荷秩序やモット絶縁体、超伝導などの多彩な電子相が発現する。興味深いのは、分子配置の自由度が外場、あるいは化学圧力によって僅かに変化することによって多彩な基底状態が劇的に変化することである。これら基底状態の特徴は、電気伝導や磁性に加えて光学応答にも顕著に表れる。特に、低エネルギーのテラヘルツ周波数帯には、準粒子励起や集団モード、分子間振動といった系の性質を特徴づける励起が存在している。このため、テラヘルツ周波数帯の光学応答から、準粒子励起スペクトルや集団モード、分子間振動を観測することにより、秩序形成のダイナミクス、金属状態の性質、電子格子相互作用を詳細に調べることができる。さらに、光パルスや高強度テラヘルツパルスによって準粒子、集団モード、あるいは分子間振動

を強く励起することにより、基底状態では発現しえない非平衡な光励起状態を実現できる可能性がある。この観点のもとに、我々は有機導体のテラヘルツ分光を進めている。今年度は特に、擬二次元系のテラヘルツ分光と光・テラヘルツ誘起相転移の研究を進めた。電荷秩序系 θ -(ET)₂CsZn(SCN)₄ (ET=BEDT-TTF) では、温度低下とともに格子周期の 2 倍及び 3 倍の変調周期の電荷整列 (電荷秩序) 相が短距離秩序を持ちながら発達することが知られている。この 2 倍周期電荷秩序相の発達に伴い、テラヘルツ帯の光学伝導度が大きく減少することを見出した。さらに、低温電荷秩序相において、光パルス (1.5 eV) 及びテラヘルツパルス (4 meV) 励起を行うと、2 倍周期電荷秩序が融解することを、光ポンプ・テラヘルツプローブ分光、テラヘルツポンプ・テラヘルツプローブ分光により見出した。どちらの場合も、ポンプ光により長寿命の熱的な変化に加えて高速に緩和する非熱的な変化が生じていることがわかった。現在、この非熱的な変化の起源について、光パルス励起とテラヘルツパルス励起の詳細な比較から調べている。11.5 K で超伝導を発現する κ -ET₂Cu[N(CN)₂]Br、及び二次元面内で ET 分子が二量体化しモット絶縁相となる κ -ET₂Cu[N(CN)₂]Cl では、ともに低温相でテラヘルツ帯に強い吸収が現れることを見出した。現在その起源解明に向けて、超伝導との相関、反強磁性秩序との相関を詳しく調べている。

4.6.3 超伝導体の超高速光・テラヘルツ波制御

近年 LiNbO₃ 結晶を用いた高強度テラヘルツ発生技術が著しく進展し、大きな注目を集めている。我々のグループでは 1 mJ 以下のフェムト秒パルスから 0.7 MV/cm を超える電場尖頭値を持つ極めて強いテラヘルツパルスを発生させることに成功し、これを用いた新しい非線形光学応答の研究について報告してきた。今年度はこの強いテラヘルツ光源を用いて BCS 超伝導状態の光制御に向けた実験を行った。典型的な BCS 超伝導体である NbN は、5.2 meV = 1.3 THz の大きさの BCS ギャップを持つため、高強度テラヘルツパルスでギャップを共鳴的に励起することで準粒子を高密度に直接生成し、格子系の温度上昇を伴わずに瞬時に非平衡 BCS 状態を実現することができると考えられる。高強度テラヘルツポンプ・テラヘルツプローブ分光によって非平衡 BCS 状態の超高速ダイナミクスを詳細に調べた。超伝導相に対して高強度テラヘルツパルスでポンプすることで、2 ps 以内に準安定な非平衡 BCS 状態が生じることが分かった。これはテラヘルツパルスにより高密度の準粒子を直接励起したことで、テラヘルツパルスのモノサイクル時間内に過剰な準粒子数によって新しい相へと変化したことを意味している。この準安定状態における光学伝導度スペクトルは、ギャップ以下のエネルギーで伝導度実部が大きく上昇し、有効温度の上昇では説明できない振る舞いを示すことが分かった。これは非平衡超伝導相が持つ空間不安定性によって高密度の準粒子が凝縮したことを示してお

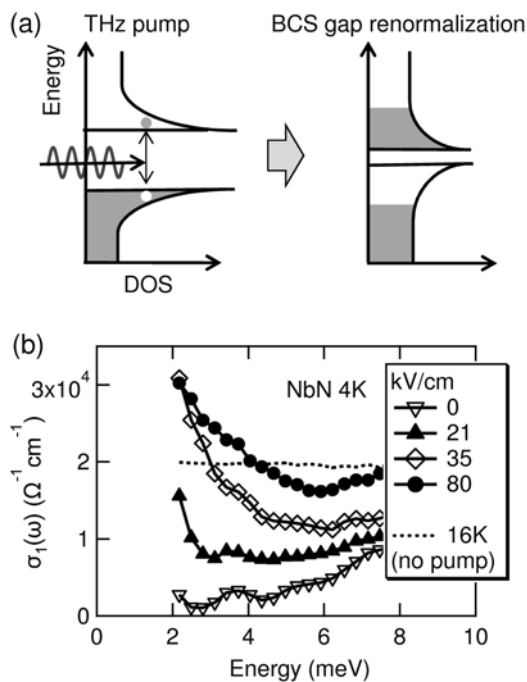


図 4.6.2: (a) テラヘルツポンプにより励起された高密度の準粒子による BCS 超伝導ギャップ縮小の模式図。(b) 温度 4K・テラヘルツポンプから 20ps 後における光学伝導度スペクトルの励起強度依存性。点線はポンプ無しの場合の常伝導相のスペクトル。

り、不均一性を考慮した有効媒質理論を用いてこのスペクトルがよく再現されることを明らかにした。

<受賞>

- [1] 松永隆佑：井上研究奨励賞 (2012 年 2 月)
- [2] 渡邊紳一 (元助教 (～2011 年 3 月)、現慶応大学)：日本物理学会若手奨励賞 (領域 5) (2012 年 3 月)

<報文>

(原著論文)

- [3] R. Shimano, Y. Ikebe, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, N. Nagaosa, and Y. Tokura: Terahertz Faraday rotation induced by an anomalous Hall effect in the itinerant ferromagnet SrRuO₃, EPL **95**, 17002 (2011). Selected for the EPL Best of 2011 collection.
- [4] D. Okuyama, S. Ishiwata, Y. Takahashi, K. Yamauchi, S. Picozzi, K. Sugimoto, H. Sakai, M. Takata, R. Shimano, Y. Taguchi, T. Arima, and Y. Tokura: Phys. Rev. B **84**, 054440 (2011).
- [5] Y. Takahashi, R. Shimano, Y. Kaneko, H. Murakawa, and Y. Tokura: Magnetoelectric resonance

with electromagnons in a perovskite helimagnet, Nature Physics **8**, 121 (2012).

- [6] Ryo Shimano, Shinichi Watanabe, and Ryusuke Matsunaga: Intense terahertz pulse-induced non-linear responses in carbon nanotubes, The Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, to be published(invited paper).

(会議抄録)

- [7] J. Y. Yoo, T. Suzuki, and R. Shimano: Broad-band THz spectroscopy of exciton fine structures in Si under the strong magnetic field, Proceedings of 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2011). DOI: 10.1109/irmmw-THz.2011.6104862
- [8] R. Shimano: Terahertz magneto-optics of quantum Hall effect and anomalous Hall effect, Proceedings of 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2011), DOI:10.1109/irmmw-THz.2011.6104956
- [9] Ryo Shimano and Y. Ikebe: Terahertz magneto-optics in the quantum Hall system, Proc. SPIE **8260**, 82601N (2012);

(国内雑誌)

- [10] 森本高裕, 池辺洋平, 島野亮, 青木秀夫：光で見る量子ホール効果, 日本物理学会誌 2011 年 5 月号「最近の研究から」第 66 巻 第 5 号 365 頁-370 頁
- [11] 渡邊紳一, 島野亮：高強度テラヘルツパルスによるカーボンナノチューブの超高速非線形光学現象, 月刊オプトロニクス 2011 年 8 月号 第 30 巻 第 356 号 107 頁-141 頁
- [12] 島野亮：光学量子ホール効果, パリティ 2012 年 1 月号 特集「物理科学, この 1 年」第 27 巻 第 1 号 35 頁-36 頁

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [13] J. Y. Yoo, T. Suzuki, and R. Shimano: Broad-band THz spectroscopy of exciton fine structures in Si under the strong magnetic field, 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2011) Houston, Texas, USA, Oct. 3, 2011.
- [14] Takeshi Suzuki, and Ryo Shimano: Terahertz study of coulomb correlation in photoexcited electron and hole system in Si, Gordon Research Conference "Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems", Galveston, Texas, USA, Feb. 20, 2012.

招待講演

- [15] Ryo Shimano: Terahertz frequency magnetoelectric phenomena in condensed matters, CLEO:2011, Laser Science to Photonic Applications, Baltimore, Maryland, USA, May 4, 2011.

- [16] Ryo Shimano: Terahertz magneto-optics of quantum Hall effect and anomalous Hall effect, 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2011), Houston, Texas, USA, Oct. 6, 2011.
- [17] Ryo Shimano and Y. Ikebe: Terahertz magneto-optics in the quantum Hall system, SPIE Photonics West, OPTO/Ultrafast Phenomena and Nanophotonics XVII, San Francisco, California, USA, Jan. 25, 2012.
- [18] Ryo Shimano: Dynamical magnetoelectric effect with electromagnon in perovskite helimagnets, Gordon Research Conference "Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems", Galveston, Texas, USA, Feb. 20, 2012.

(国内会議)

一般講演

- 2010 年日本物理学会秋季大会 (2010 年 9 月 21-24 日、富山大学)
- [19] 高橋陽太郎, 金子良夫, 村川寛, 島野亮, 十倉好紀: ヘリカル磁性体におけるエレクトロマグノンの巨大電気磁気効果
- [20] 柳済允, 鈴木剛, 島野亮: テラヘルツ分光法による Si の励起子微細構造の磁場依存性の観測
- [21] 鈴木剛, 柴垣和広, 島野亮: 一軸性圧力下における Si 高密度電子正孔系のテラヘルツ分光
- [22] 柴垣和広, 鈴木剛, 島野亮: 一軸性圧力下における Si の励起子及び電子正孔液滴の発光観測
- 2011 年日本物理学会「第 67 回年次大会」(2011 年 3 月 24-27 日 関西学院大学)
- [23] 高橋陽太郎, 金子良夫, 島野亮, 十倉好紀: 交換歪に起因するエレクトロマグノンの動的電気磁気効果
- [24] 松永隆佑, 島野亮: 超伝導 NbN における高強度テラヘルツ波誘起非平衡 BCS 状態
- [25] 柳済允, 鈴木剛, 島野亮: 光励起-テラヘルツプローブ法による Si の励起子寿命測定
- [26] 関口文哉, 柳済允, 鈴木剛, 島野亮: Ge における高密度電子正孔系のテラヘルツ分光
- [27] 鈴木剛, 島野亮: Si の励起子モットクロスオーバーにおける励起子 プラズモン相互作用

●その他

- [28] 島野亮: 実験サイドから; テラヘルツ分光の現状, 科学研究費補助金「幾何学的位相による物質相: 量子液体及びグラフェンでの応用と展開」第 1 回会議, 東京大学, 2011 年 5 月 23 日
- [29] 島野亮: テラヘルツ時間領域分光法による励起子モット転移の研究, 新学術領域研究新学術領域研究「動的相関光科学」第 5 回シンポジウム, 京都大学, 2011 年 6 月 14 日

- [30] 島野亮: 高強度テラヘルツ波パルスによる電子相制御, 新学術領域研究「分子自由度が拓く新物質科学」A04 班会議, 東京大学, 2011 年 10 月 12 日
- [31] 柳済允, 鈴木剛, 島野亮: Si の励起子の磁場下テラヘルツ分光, 第 4 回文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」シンポジウム, 名古屋キャッスルプラザホテル, 2011 年 11 月 14 日
- [32] 鈴木剛, 島野亮: テラヘルツ時間領域分光法による励起子モット転移の研究, 新学術領域研究新学術領域研究「動的相関光科学」第 6 回シンポジウム, 京都大学, 2012 年 1 月 5 日
- [33] 松永隆佑, 島野亮: 超伝導 NbN における高強度テラヘルツ波誘起非平衡 BCS 状態, 新学術領域研究「分子自由度が拓く新物質科学」第 6 回領域会議, 宮城県仙台市, ホテル岩沼屋, 2012 年 1 月 6 日
- [34] 島野亮: 高強度テラヘルツ波光源の開発と分子性導体への応用, 新学術領域研究「分子自由度が拓く新物質科学」第 6 回領域会議, 宮城県仙台市, ホテル岩沼屋, 2012 年 1 月 6 日
- [35] R. Shimano: Terahertz magneto optics; a new route to study the AC Hall effect, Workshop on *Quantum liquids and graphene physics*, 筑波大学, 2012 年 2 月 16 日
- [36] 鈴木剛: 高密度励起半導体における電子・正孔系の相転移ダイナミクス, 第 3 回低温センター研究交流会・利用者懇談会, 東京大学, 2012 年 3 月 5 日

招待講演

- [37] 島野亮: Generation and application of intense coherent terahertz pulses, 理研シンポジウム「第 2 回 拓がる原子分子物理研究: 先端光技術で切り開く新しい原子分子物理」, 理化学研究所, 2011 年 12 月 2 日
- [38] 島野亮: 高強度テラヘルツ波が拓く新しい非線形光学, 「相変性材料における電子・フォノン励起過程と構造変化」ワークショップ, 慶應大学, 2012 年 3 月 12 日
- [39] 島野亮: テラヘルツ波領域における非線形光学応答と電子相制御, テラヘルツテクノロジーフォーラム・平成 23 年度第 3 回技術検討会, 東京大学, 2012 年 3 月 21 日

(セミナー)

- [40] 島野亮: テラヘルツ波領域の物性物理—光と物質の研究の新展開—, 光 FORUM 第 3 回セミナー, 東京大学, 2011 年 7 月 27 日

4.7 高木研究室

固体中の電子多体系が示す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。遷移金属酸化物中の伝導や磁性を支配するのは遷移金属元素の d 軌道を占めていた電子である。d 軌道の空間広がりが小さいが故、電子はクーロン相互作用により強く相関する。相関電子は、その相互作用を通じて電子液体・電子液晶と呼ばれる相を形成する。相関電子では電荷、スピン、軌道 (縮退する軌道のどれを選ぶか) の自由度がしばしば独立に振る舞うがゆえに、電荷液晶状態、スピン液体状態と言った多彩な状態が出現する。高温超伝導現象も相関電子が示す多彩な顔の一つであり、電子相の融解や相競合が、超伝導発現の本質であるとされている。

4.7.1 超伝導機構の解明と開拓

新奇な超伝導体の開拓と高温超伝導機構解明の研究を推進している。これまで銅酸化物超伝導において、高温超伝導が発現する直前に現れる擬ギャップ相の概念の確立、擬ギャップ相の背景に隠れた電子結晶状態の発見などに、当研究室は貢献してきた。ここから超伝導機構に切り込むべく、新しいアプローチを模索している。これらの研究と並行して新奇な超伝導体の設計と探索に尽力している。

遷移金属ニクタイド系における超伝導

近年、鉄ヒ素系 (FeAs 系) 超伝導体の発見に触発され、多くの研究グループにより周辺物質における超伝導体探索の研究が盛んに行われてきている。これに関連して我々のグループでは、ルテニウムニクタイド系 (RuPn 系) において新規超伝導体探索を行ってきた [12, 14]。

Ru の 4d 軌道は Fe の 3d 軌道と同じ数の電子を持ち、一般に磁性を持たないことが多い。その為、RuPn 系における超伝導相の探索は FeAs 系との比較の観点からも興味深いと考えられる。本研究においては、MnP 型の斜方晶構造を持つ二元系 RuPn ($Pn = P, As, Sb$) を研究対象として取り上げた。いずれの RuPn ($Pn = P, As, Sb$) も室温においては抵抗率が $\sim 1\text{m}\Omega$ 程度と金属的であり、このうち RuSb に関しては 1.2 K で超伝導転移することが観測された。一方、RuPn ($Pn = P, As$) では、温度を下げた際にそれぞれ 270 K と 200 K において金属-絶縁体転移が観測された。この金属-絶縁体転移に際しては、磁化の不連続な減少による非磁性相の出現が観測されており、擬ギャップの形成が示唆された。この擬ギャップ相に対し、Ru サイトを Rh により置換していったところ、 $\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x\text{P}$ 、 $\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x\text{As}$ のいずれにおいても、擬ギャップ相の出現が抑制され、量子臨界点近傍において超伝導相が出現することを発見した。多くの量子臨界点近傍で現れる超伝導相は、反強磁性相や強磁性相といった磁気秩序相を抑制することより現れることが知られているのに対し、本研

究では非磁性相を抑制することで得られる量子臨界点近傍で超伝導の出現が観測されたという点に特徴がある。

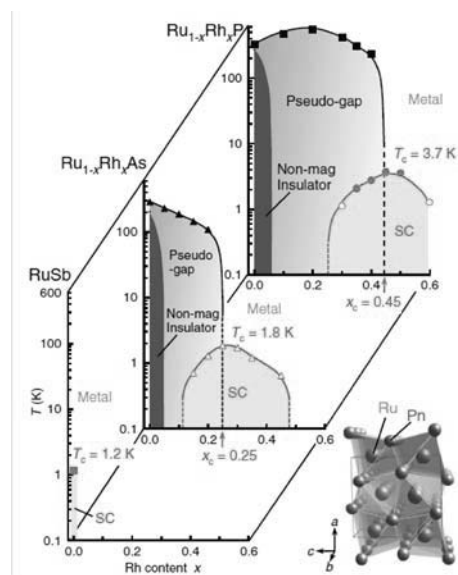


図 4.7.1: $\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x\text{Pn}$ ($Pn = P, As, Sb$) の電子相図

4.7.2 スピン軌道相互作用誘起の新奇電子相の開拓

遷移金属酸化物における電子相探索の舞台は、これまで最も電子相関の強い 3d 遷移元素からなる複合酸化物であった。重い 5d 遷移金属元素を含む酸化物は軌道の空間的な広がりが大きいために、相関効果が弱くモット絶縁体 (電子固体) 状態は生じないとされてきた。ところが最近、5d Ir 遷移金属酸化物でもモット絶縁体状態になる例が次々と見つかり、大きな謎が投げかけられて来ている。我々は Ir 複合酸化物に代表される重い 5d 遷移金属酸化物を舞台とし、極めて強いスピン軌道相互作用のもとでの電子相関物理を、スピン軌道半金属-モット絶縁体転移の微視的機構の理解を通じて明らかにすることに取り組んでいる。

共鳴非弾性 X 線散乱による Sr_2IrO_4 の研究

Sr_2IrO_4 において、Ir の L3 端を利用して非弾性 X 線散乱実験を行い、 IrO_2 面のブリルアンゾーン全体に渡る低エネルギー電子励起を観測した [1]。0.5, 3.2, 6.0 eV のエネルギーにピークが観測され、それぞれモットギャップによる遷移、O の 2p バンドから Ir の 5d バンドへの電荷移動励起としてアサインされた。モットギャップによる遷移は弱く観測さ

れており、波数分散も小さかった。これは、 Sr_2IrO_4 を特殊なモット絶縁体としている、スピン軌道相互作用により支配された狭い 5d 軌道バンドによるものと考えられる。

4.7.3 幾何学的フラストレーション格子上の電荷液体

LiV_2O_4 スピネル酸化物では、V の原子価が 3.5 + と半整数で、1:1 の V^{3+} と V^{4+} が、強いフラストレーション効果で知られるパイロクロア格子上に存在する。クーロンエネルギーの観点から、 V^{3+} と V^{4+} は隣り合おうとするので、スピン系と同様に、電荷配列のフラストレーションが生じる。量子スピン液体の電荷版である LiV_2O_4 の基底状態は、電子の有効質量が 100 を超える重い電子状態になっていることが実験的に示されている。我々は、輸送・光学特性を中心とした測定を行い、その起源の解明に取り組んでいる。

光学測定による圧力誘起金属－絶縁体転移の観測

LiV_2O_4 における低温高圧化での金属－絶縁体転移を、赤外分光測定により研究した [6]。7 GPa 以上の圧力下では、40 K において金属相が徐々に絶縁体的になる様子が観測された。これは AlV_2O_4 と類似の電荷秩序が形成されていると推測される。この圧力誘起の金属－絶縁体転移の振る舞いは、低温のみでなく室温においても観測された。具体的には、300 K において遠赤外領域のドルーデ応答が圧力印加に伴い緩やかに抑制される様子が観測されている。また 8 GPa 以上の圧力下では、光学フォノンが低エネルギー側にシフトした。このマクロな構造相転移の前駆現象としてのフォノンのソフト化は、絶縁体相と（金属相と絶縁体相の）中間領域の境界付近のみに現れることが確認された。

4.7.4 巨大電子エントロピーの設計と熱電変換技術への応用

多自由度系の特徴を反映して、相関電子はしばしば極めて高いエントロピーを有する。このエントロピーを電流として運ぶことにより高効率の熱電変換が原理的に可能となる。このような原理に基づいて、新規熱電変換材料の探索を進めている。

擬ギャップ系 Ru_2Sn_3 の熱電特性

近年、高効率熱電変換材料探索の指針として擬ギャップを有する物質に注目が集まっている。擬ギャップを有する物質では、フェルミエネルギー準位近傍に急峻な状態密度を持つことが多い為、キャリアドーピ

ングによりフェルミ準位の位置を調整することで、高いゼーベック係数が得られる。本研究では、擬ギャップを持つ Ru_2Sn_3 を研究対象として取り上げた。その結果、この系は半金属でありながら、電子と正孔が非対称なバンド分散を持つことを反映して大きなゼーベック係数を示し、 $\text{ZT} = 0.15$ という比較的高い性能指数が実現されることが分かった。さらに Sn 欠損を導入し熱伝導率を抑制したところ、 $\text{ZT} = 0.30$ まで性能指数を上昇させることに成功した [15]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] K. Ishii, I. Jarrige, M. Yoshida, K. Ikeuchi, J. Mizuki, K. Ohashi, T. Takayama, J. Matsuno, H. Takagi, "Momentum-resolved electronic excitations in the Mott insulator Sr_2IrO_4 studied by resonant inelastic x-ray scattering", *Physical Review B* **83**, 115121 (2011).
- [2] K. Okazaki, S. Sugai, S. Niitaka, and H. Takagi, "Phonon, two-magnon, and electronic Raman scattering of $\text{Fe}_{1+y}\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x$ ", *Physical Review B* **83**, 025103 (2011).
- [3] K. Ohgushi, A. Yamamoto, Y. Kiuchi, C. Ganguli, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko and H. Takagi, "Superconducting Phase at 7.7 K in the Hg_xReO_3 Compound with a Hexagonal Bronze Structure", *Physical Review Letters* **106**, 017001 (2011).
- [4] S. Lee, Y. Oshima, H. Sawada, F. Hosokawa, E. Okunishi, T. Kaneyama, Y. Kondo, S. Niitaka, H. Takagi, Y. Tanishiro, K. Takayanagi, "Counting lithium ions in the diffusion channel of an LiV_2O_4 crystal", *Journal of Applied Physics* **109**, 113530 (2011).
- [5] A. Dienst, M. C. Hoffmann, D. Fausti, J. C. Petersen, S. Pyon, T. Takayama, H. Takagi, A. Cavalleri, "Bi-directional ultrafast electric-field gating of interlayer charge transport in a cuprate superconductor", *Nature Photonics* **5**, 485 (2011).
- [6] A. Irizawa, S. Suga, G. Isoyama, K. Shimai, K. Sato, K. Iizuka, T. Nanba, A. Higashiya, S. Niitaka, and H. Takagi, "Direct observation of a pressure-induced metal-insulator transition in LiV_2O_4 by optical studies", *Physical Review B* **84**, 235116 (2011).
- [7] N. Dragoe, A. M. Flank, P. Lagarde, S. Ito, H. Shimotani, H. Takagi, "Molecular thermal contraction of the $\text{Ar}@\text{C}_{60}$ endohedral fullerene", *Physical Review B* **84**, 155448 (2011).
- [8] F. Laliberte, J. Chang, N. Doiron-Leyraud, E. Hassinger, R. Daou, M. Rondeau, B. J. Ramshaw, R. Liang, D. A. Bonn, W. N. Hardy, S. Pyon, T. Takayama, H. Takagi, I. Sheikin, L. Malone, C. Proust, K. Behnia, L. Taillefer, "Fermi-surface reconstruction by stripe order in cuprate superconductors", *Nature Communications* **2**, 432 (2011).

- [9] R. Kadono, A. Koda, W. Higemoto, K. Ohishi, H. Ueda, C. Urano, S. Kondo, M. Nohara, H. Takagi, "Quasi-One-Dimensional Spin Dynamics in LiV_2O_4 : One-to-Three-Dimensional Crossover as a Possible Origin of Heavy Fermion State", *Journal of the Physical Society of Japan* **81**, 014709 (2012).
- [10] M. Sutherland, R. P. Smith, N. Marcano, Y. Zou, S. E. Rowley, F. M. Grosche, N. Kimura, S. M. Hayden, S. Takashima, M. Nohara, H. Takagi, "Transport and thermodynamic evidence for a marginal Fermi-liquid state in ZrZn_2 ", *Physical Review B* **85**, 035118 (2012).
- [11] S. Lee, Y. Oshima, S. Niitaka, H. Takagi, Y. Tanishiro, K. Takayanagi, "In-situ Annular Bright-Field Imaging of Structural Transformation of Spinel LiV_2O_4 Crystals into Defective $\text{Li}_x\text{V}_2\text{O}_4$ ", *Japanese Journal of Applied Physics* **51**, 020202 (2012).
- [12] D. Hirai, T. Takayama, D. Hashizume, H. Takagi, "Metal-insulator transition and superconductivity induced by Rh doping in the binary pnictides RuPn ($\text{Pn}=\text{P}, \text{As}, \text{Sb}$)", *Physical Review B* **85**, 140509(R) (2012).
- [13] Y. Y. Chu, H. H. Wu, S. C. Liu, Hsiu-Hau Lin, J. Matsuno, H. Takagi, J. H. Huang, J. van den Brink, C. T. Chen, D. J. Huang, "Enhancement of the Jahn-Teller distortion by magnetization in manganites", *Applied Physics Letters* **100**, 112406 (2012).
- (学位論文)
- 博士論文
- [14] 平井大悟郎: New Transition Metal Pnictide Superconductors (2011 年 3 月、東京大学大学院新領域創成科学研究科)
- 修士論文
- [15] 河底秀幸: 擬ギャップ系 Ru_2Sn_3 の熱電特性 (2011 年 3 月、東京大学大学院新領域創成科学研究科)
- [16] 中居大輔: 固体電解質スーパーキャパシタ (2011 年 3 月、東京大学大学院新領域創成科学研究科)
- [17] 松浦啓紀: リチウムイオン電池正極材料の特性と電子構造相関 (2011 年 3 月、東京大学大学院新領域創成科学研究科)
- [18] 魯楊帆: Ta_2PdS_5 の超伝導とパウリ極限を超える上部臨界磁場 (2011 年 3 月、東京大学大学院新領域創成科学研究科)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [19] T. Takayama, K. Ohashi, and H. Takagi: Semimetallic State Formed by Strong Spin-Orbit Coupling in SrIrO_3 , SCES 2011 (Cambridge, United Kingdom, September, 2011).
- [20] T. Takayama: Superconductivity in 4d, 5d pnictides, UK-Japan Meeting 2012, (Tokyo, Japan, January, 2012).
- [21] T. Takayama, K. Kuwano, D. Hirai, Y. Katsura, A. Yamamoto, and H. Takagi: Strong Coupling Superconductivity in New Antiperovskite SrPt_3P , The 12th Korea-Japan-Taiwan Symposium on Correlated Electron Systems, (Kaohsiung, Taiwan, March, 2012).
- [22] Y. Nakamura, K. Takenaka, A. Kishimoto, H. Takagi, 19th Annual International Conference of Composite and Nano-Engineering: Defect Induced Hardening And Toughening in $\text{Mn}_3\text{Cu}_x\text{Ge}_{1-x}\text{N}$ Metallic Perovskite, 19th Annual International Conference of Composite and Nano-Engineering, (Shanghai, China, July, 2012).
- [23] Y. Nakamura, K. Takenaka, A. Kishimoto, H. Takagi, 19th Annual International Conference of Composite and Nano-Engineering: Defect Induced Hardening And Toughening in $\text{Mn}_3\text{Cu}_x\text{Ge}_{1-x}\text{N}$ Metallic Perovskite, The 12th Korea-Japan-Taiwan Symposium on Correlated Electron Systems, (Kaohsiung, Taiwan, March, 2012).
- [24] Y. Gu, K. Taniguchi, R. Tajima, S. Nishimura, A. Yamada, H. Takagi: Cathode Performance of a New Spinel Oxide LiRh_2O_4 , The 62nd Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry (Niigata, Japan, September, 2011).
- [25] Y. Gu, K. Taniguchi, R. Tajima, S. Nishimura, A. Yamada, H. Takagi: Electrochemical Insertion of Lithium into a New Spinel Oxide LiRh_2O_4 , UK-Japan Meeting 2012 (Tokyo, Japan, January, 2012).
- [26] K. Taniguchi, Y. Gu, R. Tajima, S. Nishimura, D. Hashizume, A. Yamada, H. Takagi: A cathode material as a model system with suppressed lattice strain for rechargeable lithium-ion batteries, The 12th Korea-Japan-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (Kaohsiung, Taiwan, March, 2012).
- [27] Y. Lu, T. Takayama, Alimamy F. bangura, H. Takagi: Superconductivity beyond the Pauli Limit in $\text{Ta}_2\text{Pd}_x\text{S}_5$, UK-Japan Meeting 2012 (Tokyo, Japan, January, 2012).
- [28] Y. F. Lu, T. Takayama, A. F. Bangura, H. Takagi: Superconductivity and upper critical field beyond Pauli limit in $\text{Ta}_2\text{Pd}_x\text{S}_5$, The 12th Korea-Japan-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (Kaohsiung, Taiwan, March, 2012).
- [29] A. Matsumoto, T. Takayama, H. Takagi: 2D Heisenberg antiferromagnetism in spin-orbit Mott insulator Sr_2IrO_4 , UK-Japan Meeting 2012 (Tokyo, Japan, January, 2012).
- [30] A. Matsumoto, T. Takayama, H. Takagi: 2D Heisenberg antiferromagnetism in spin-orbit Mott insulator Sr_2IrO_4 , The 12th Korea-Japan-Taiwan

- Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (Kaohsiung, Taiwan, March, 2012).
- [31] H. Kawasoko, T. Takayama, H. Takagi: Thermo-electric performance of pseudogap system Ru_2Sn_3 , The 12th Korea-Japan-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (Kaohsiung, Taiwan, March, 2012).
- [32] Y. Tashiro¹, T. Takayama, H. Takagi: Thermo-electric properties of $\text{In}_{3.7}\text{Mo}_{15}\text{S}_{19}$ with low thermal conductivity, The 12th Korea-Japan-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (Kaohsiung, Taiwan, March, 2012).
- [33] A. Kato, T. Takayama, H. Takagi: Magnetic Properties of Iridates with honeycomb network, UK-Japan Meeting 2012 (Tokyo, Japan, January, 2012).
- 招待講演
- [34] H. Takagi: Phase Sensitive Imaging of Complex Electrons, Wilhelm and Else Heraeus Seminar, (Bad-Honnef, Germany, April, 2011).
- [35] H. Takagi: Phase sensitive imaging of complex electrons in Fe-based superconductors, Ringberg Symposium on High Temperature Superconductivity, (Ringberg, Germany, May, 2011).
- [36] H. Takagi: Quantum magnetism in Ir^{4+} based oxide magnets, MEXT/CIFAR Program on Frustrated Magnetic And Other Systems, (Vancouver, Canada, May, 2011).
- [37] H. Takagi: Spin orbit coupling, electron correlations and exotic magnetic couplings in 5d Ir oxides, Tokyo-Cologne Workshop on Strongly Correlated Transition-Metal Compounds, (Cologne, Germany, September, 2011).
- [38] H. Takagi: Engineering spin-orbital Mott insulator $\text{SrIrO}_3/\text{SrTiO}_3$ multilayers, TRR 80 Workshop on Functionality from Heterostructures, (Oberurg, Austria, October, 2011).
- [39] H. Takagi: Emergent phases of correlated electrons in transition metal oxides, Stanford University, Physics, Applied Physics and SLAC joint Colloquium, (Stanford, USA, November, 2011).
- [40] H. Takagi: Spin orbit coupling, electron correlations and exotic magnetism in 5d complex Ir oxides, APS March Meeting 2012, (Boston, USA, February, 2012).
- [41] H. Takagi: Spin orbit coupling, electron correlations and exotic magnetism in 5d complex Ir oxides, The 12th KJT Symposium on Strongly Correlated Electron System, (Kaohsiung, Taiwan, March, 2012).
- [42] T. Takayama: Magnetism of honeycomb Iriridate A_2IrO_3 ($\text{A} = \text{Li}, \text{Na}$), Novel Phenomena in Frustrated Systems (Santa Fe, USA, May, 2011).
- [43] T. Takayama: Superconductivity in non-iron pnictides, Gordon Research Conference on Superconductivity (Waterville Valley Resort, USA, June, 2011).
- [44] T. Takayama: Magnetism of Ir^{4+} Magnets with Strong Spin-Orbit Coupling, seminar at department of Physics, Seoul National University (Seoul, Korea, October, 2011).
- [45] T. Takayama: Novel Electronic Phases Produced by Strong Spin-orbit Coupling in Iridate, Korean Physical Society Meeting (Busan, Korea, October, 2011).
- (国内会議)
- 一般講演
- [46] 花栗哲郎, 北川健太郎, 松林和幸, 目崎雄二, 上床美也, 瀧川仁, 高木英典: LiFeAs の渦糸芯状態と超伝導ギャップ, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 2011 年 9 月
- [47] 山崎展樹, Nic Shannon, 高木英典, S/N/S 三層膜における近接効果, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 2011 年 9 月
- [48] 藤原宏平, 福岡康裕, 松野丈夫, 井土宏, 大谷義近, 高木英典: 導電性イリジウム酸化物におけるスピンホール効果の検出, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 2011 年 9 月
- [49] 山本文子, 大串研也, 高木英典, 石垣徹, 神山崇: 六方晶ブロンズ Hg_xReO_3 の高圧合成と超伝導特性, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 2011 年 9 月
- [50] 門野良典, 幸田章宏, 髭本亘, 大石一城, 植田浩明, 野原実, 浦野千春, 近藤真一郎, 高木英典: LiV_2O_4 における擬一次元的スピンゆらぎと重い電子状態, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 2011 年 9 月
- [51] 岡崎浩三, 伊藤孔明, 大田由一, 小谷佳範, 下志万貴博, 木須孝幸, 渡部俊太郎, C. T. Chen, 新高誠司, 花栗哲郎, 高木英典, 辛埴: $\text{Fe}(\text{Te}, \text{Se})$ のレーザー角度分解光電子分光, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 2011 年 9 月
- [52] 花栗哲郎, 五十嵐九四郎, 川村稔, 高木英典, 笹川崇男: トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 の磁場中分光イメージング, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 2011 年 9 月
- [53] 脇坂祐輝, 須田山貴亮, 田久保耕, 溝川貴司, Naurang L. Saini, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 片山尚幸, 野原実, 高木英典: 温度変化 ARPES からみた Ta_2NiSe_5 の相転移, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 2011 年 9 月
- [54] 佐藤聖峰, 脇坂祐輝, 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: RuP の光電子分光, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 2011 年 9 月
- [55] 桂ゆかり, 高木英典: MgSrSi 型構造化合物における新規熱電変換材料探索, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 2011 年 9 月

- [56] 幸坂祐生, 加納学, 高木英典, 笹川崇男: 層状 Rashba 物質 BiTeI の分光イメージング測定, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 2011 年 9 月
- [57] 幸坂祐生, 加納学, 高木英典, 笹川崇男: 層状 Rashba 物質 BiTeI の分光イメージング測定 (II), 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月
- [58] 新高誠司, 高木英典: LuRu₂ の超伝導特性, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月
- [59] 魯楊帆, 高山知弘, Alimamy F. Bangura, 高木英典: Ta₂Pd_xS₅ における超伝導, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月
- [60] 山本文子, 竹下直, 熊井玲児, 高木英典: Tl₂Ru₂O₇ の高圧低温下における 2 種の絶縁相, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月
- [61] 神野貴昭, 清水康弘, 新高誠司, 高木英典, 伊藤正行: 二次元三角格子 LiVO₂ における軌道秩序と三量体形成, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月
- [62] 松野丈夫, 井原康太, 高木英典: [(SrIrO₃)_m, SrTiO₃] 超格子薄膜における物性制御, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月
- [63] 松本章代, 高山知弘, George Jackeli, 高木英典: Sr₂IrO₄ の量子磁性, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月

招待講演

- [64] 高木英典: 熱伝導変換、スピントロニクス、超伝導材料創成における元素戦略, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月

5 一般物理理論

5.1 宇宙理論研究室 (須藤)

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太陽系外惑星の2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。

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500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の発見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以下に見出すか。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重力

進化と銀河のクラスターリング統計、ミッシングバリオンの起源と観測的検証、ロス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などを研究しつつある。さらに既存の枠にとらわれない独創的なテーマの開拓をも目指しており、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

バリオン音響振動の2次元モデルとハロークラスターリング

銀河分布のパワースペクトルに現れるバリオン音響振動は、その特徴的な振動周期を「宇宙標準のさし」として用いることで、銀河分布の赤方偏移・距離関係を決定できる。さらに、分光観測から得られる赤方偏移ゆがみの影響を利用すると密度ゆらぎの成長率を決定することができ、宇宙論的スケールでの重力理論の検証ができる。しかしながら、赤方偏移ゆがみによって生じる非等方性のせいで銀河のクラスターリングを2次元面上で特徴づける必要がある。これまで我々は重力進化の摂動論にもとづき、バリオン音響振動の精密な2次元モデルを構築、音響振動の非等方性を精密に特徴づける理論テンプレートの開発を行ってきた。本年度は、N体シミュレーションのハローカタログを用いて理論テンプレートの有効性を検討した。ハローカタログから測定したバリオン音響振動には、銀河バイアスと赤方偏移ゆがみの非線形な絡み合いによると考えられる異常な振幅増大が見られたが我々の開発した理論テンプレートはそのふるまいを定量的に説明することに成功し、実用にも十分耐えうるテンプレートであることが示された。[4, 44, 65]

ラグランジェ再和法にもとづく弱非線形パワースペクトルの高次補正

重力進化による宇宙大規模構造のクラスターリングを定量的かつ精密に特徴づけるため、近年、摂動論をもとづいた解析計算手法の改良が進んでいる。従来の摂動展開に何らかの非摂動的效果を取り込むことで展開の収束性を向上させる、というのが基本的アイデアであるが、本研究では、ラグランジェ描像のもとづき摂動展開を部分再和するという「ラグランジェ再和法」に着目、摂動の高次補正を系統的に取り入れるための定式化の拡張を行った。拡張された定式化にもとづき、2-ループの高次補正まで入れた計算を行い、N体シミュレーションとの比較から、従来の摂動論に比べて展開の収束性が向上することを見いだした。[5]

弱非線形領域における質量パワースペクトルの高速理論計算

摂動論にもとづく宇宙大規模構造の非線形重力進化の計算は、近年改良が進んだせいで、バリオン音響振動などの将来観測に対して高精度の理論テンプレートを提供しうる重要な手法となった。とはいえ、適用範囲を広げ、精度を上げるためには、摂動の高次補正を計算する必要があり、多次元の数値積分の評価に時間がかかることから、パラメーター推定などの用途に使うには未だ問題があった。本研究では、 Γ -展開と呼ばれる新たな摂動展開の定式化にもとづき、劇的な時間短縮を可能とする高速計算手法を開発した。この方法では、予め用意された摂動計算のデータセットと差分を取ることで、必要な計算をただか1次元の数値積分に簡約化させる。N 体シミュレーションなどとの比較・検証を通して、この摂動計算が従来より広い適用範囲をもつことを確認し、方法論の有効性を確認した。さらに現在、一般公開を目指して、CMB ボルツマンコードに組み込むことで汎用性の高い計算ツールを開発中であり、パラメーター推定にも使える実用的なコードが完成する。[30, 45, 46, 47, 67, 68]

スペース重力波干渉計を用いた宇宙論：ダークエネルギーと原始重力波

現在、地上では次世代型のレーザー干渉計の建設が進み、重力波の直接検出の期待が一層高まっているが、その一方、宇宙にレーザー干渉計を打ち上げて低周波の重力波観測を目指すプロジェクトの模索が進んでいる。こうしたプロジェクトの大きなゴールが、宇宙初期に起こったインフレーションの直接的証拠と考えられる原始重力波の検出である。そのためには、無数の連星中性子星が放射する重力波を取り除く必要があるが、本研究では、これら連星中性子星の重力波を”標準音源”として使うことで、宇宙膨張の精密診断に使える可能性を探った。合体前の連星中性子星から放射される重力波の振幅には宇宙論的距離の情報が含まれ、位相には宇宙膨張による変調が現れる。これらを組み合わせることで、原理的には重力波観測だけから、宇宙膨張の変化が測定可能である。フィッシャー解析にもとづく見積もりから、原始重力波の検出に必要なレーザー干渉計の感度があれば、連星中性子星を用いた宇宙膨張の精密診断が十分可能であることを突き止め、電磁波観測のフォローアップなしにダークエネルギーを探索する新たなプローブとなりうることを明らかにした。[3]

銀河の測光サーベイから探る原始非ガウス性：増光効果の影響

宇宙初期の揺らぎの生成機構を説明するインフレーション理論のうち、最も単純なモデルでは宇宙初期の

揺らぎが従う確率分布はほぼガウス分布に従う。このため、大きな原始非ガウス性の検出によって単純なモデルは棄却される。また、原始非ガウス性を詳細に調べることで、初期宇宙での揺らぎの生成メカニズムに関する新たな知見を得ることができる。宇宙初期に生成された揺らぎの統計的性質は、銀河数密度と物質揺らぎを結び付ける関係、すなわち銀河バイアスに反映されるため、銀河サーベイを行うことで原始非ガウス性の探求を行うことができる。

一方、実際の銀河サーベイから得られた銀河の等級限界サンプルには、大規模構造による弱重力レンズ効果で増光（あるいは減光）された銀河が含まれる。この増光効果によって銀河数密度が変化し、銀河数密度の相関パワースペクトルに新たな寄与が生じる。増光効果の影響は相関パワースペクトルの大角度スケールにおいて顕著に現れるため、原始非ガウス性の検証に影響を及ぼす可能性がある。

本研究では、銀河サーベイにおける観測量として銀河数密度および歪みを考慮し、これらの相関量における増光効果の影響について詳細に調べた。まず、増光効果が角度パワースペクトルに与える影響を調べ、増光効果のない場合には物理的に相関の小さい量は、増光効果によってその振幅が大幅に増幅され、HSC などの銀河サーベイで検出可能になることが分かった。また、LSST などの次世代サーベイを利用した場合、銀河サーベイを用いた原始非ガウス性の推定において増光効果は無視できない系統誤差となることを明らかにした [6]。

CMB の弱い重力レンズ再構築法の導出および宇宙論への応用

観測される CMB の揺らぎには大規模構造による弱重力レンズ効果の情報が含まれており、光子の軌跡の曲がり角を情報として取り出すことで、密度揺らぎなどの重力場を生じるソースに関して情報を得ることができる。CMB の弱重力レンズ効果は、Okamoto & Hu (2003) (OH03) などで示されたアルゴリズムをもとに、CMB の観測データのみから曲がり角の情報を取り出せる。将来的には、PolarBear や ACTPol といった角度分解能が高い地上の CMB 観測において高精度で曲がり角を再構築できると考えられている [33, 49]。

OH03 では、曲がり角がポテンシャルの空間微分（勾配成分）のみで与えられると仮定している。しかし、重力波や宇宙紐などによるレンズ効果では、曲がり角に空間微分以外の項（カール成分）が含まれる。このため、重力レンズ効果を用いて重力波や宇宙紐の検証を行う場合には OH03 の方法を拡張する必要がある。また、観測領域が有限であったり前景輻射のマスクが存在するより現実的なマップを用いた場合にもカール成分は生じるため、系統誤差の確認としてカール成分の再構築を行う必要がある。

本研究では、OH03 の手法を拡張し、曲がり角を勾配・カール成分に分離・再構築することで、重力波や宇宙紐の検証にも適用可能な曲がり角の再構築の手法を示した。また、Planck、ACTPol および検

出器ノイズなしを想定し、カール成分の再構築を行うことで原始重力波、および宇宙紐検証の可能性を見積もり、宇宙紐の検証方法として新たな手法を提案した [7, 31, 32, 50, 51, 69, 70, 71]。

OH03 等の再構築法では理想的な条件（全天の観測領域、マスクなし）を仮定しているが、実際の再構築では観測領域が有限であったり前景輻射のマスクが存在するより現実的なマップから再構築を行う必要があり、このような現実的な条件下での再構築法の開発が不可欠である。そこで本研究は、シミュレーションで作成したレンズマップをもとに、観測領域が有限でありマスクが存在する、より現実的なマップから再構築を行う手法を示した [48, 70, 71]。

SDSS 銀河カタログを用いた SFD 減光マップの検証

あらゆる系外天文観測は、我々の銀河系空間越しになされる。したがって、正確な銀河系ダスト減光マップは本質的である。現在最も広く用いられている減光マップは Schlegel, Finkbeiner, Davis (1988:SFD) によるもので、これは COBE と IRAS の全天赤外天文観測から推定されるダストの赤外「放射量」を用いて構築されている。しかしこれを可視域での「吸収量」に変換するには様々な仮定が必要なため、その信頼性を独立な方法で検証することは重要である。

Yahata et al. (2007) は、SDSS DR4 (Sloan Digital Sky Survey 4th Data Release) 銀河カタログを用いて SFD マップを検証し、減光量が 0.1 等以下の領域において系統誤差が存在することを示した。この系統誤差は、SFD で推定した銀河系内ダストの赤外放射に、系外銀河による赤外放射の寄与が混入したために生じたと結論されている。我々はこの結果を発展させて、SDSS 銀河カタログを用いて SFD マップを補正する可能性を検討している。今年度は、系外銀河の赤外放射による影響を数値的・解析的にモデル化し、これを SDSS DR7 の観測結果と比較することで、SFD マップの系統誤差が Yahata et al. (2007) の仮説によって説明されることを定量的に示した。[28] [56] [57]

5.1.2 系外惑星

トランジット惑星系を用いた惑星の軌道傾斜角の測定

本研究は、トランジット惑星系の観測によって惑星系の持つ基本的な性質を調べ、惑星形成・進化モデルに観測的な制限を与える事である。2011 年度は主に以下の 2 つに特化して惑星の軌道傾斜角の測定を行った。(1) 過去数年間の研究に引き続きロシター効果の観測を行った。ロシター効果はすでに 40 個以上の惑星系に対して測定されているが、惑星形成・移動理論を絡めた統計的な議論を行うにはまだサンプル数として不十分である。我々は主にすばるなどの大口径望遠鏡の特色を生かした観測を継続しており、2011 年度は XO-3, XO-2, HAT-P-16 という 3 つの天体の観測を行い解析を行った。また、ロシター

効果についてはさらに精密な理論モデル化を行い、星の作動回転の影響なども取り入れて議論した。[8, 9, 10, 11, 34, 35, 36, 52] (2) 一方でロシター効果以外の方法論を用いて星の自転軸と惑星の公転軸の関係を調べる研究も試みた。特に我々はケプラー望遠鏡による観測に着目し、アーカイブ・データの解析を行った。ケプラーで取得された星のライトカーブのうち、黒点による明るさの変動を持つものだけを取り出して解析し、その変動周期から星の自転周期を求めた。一方、一般に星を分光観測することにより、吸収線幅から星の射影自転速度（星の赤道面での自転速度のうち、我々の視線方向成分）を求める事が出来る。そこで私は新たにケプラーで検出されたトランジット惑星候補天体のうち黒点による周期変動を示す約 15 天体に対して分光観測を行い、射影自転速度を求めて星の自転周期と比較した。これにより星の自転軸が我々の視線方向に対してどの程度傾いているか（星の自転傾斜角）を推定した。トランジット惑星を持つ系では惑星の軌道公転軸は我々の視線方向に対してほぼ垂直であるため、星の自転傾斜角の測定は惑星の公転軸と中心星の自転軸の関係を表す指標となる。解析の結果、我々はいくつかの系で星の自転軸と惑星の公転軸がずれている証拠を発見した。[53]

地球の多バンド測光観測からの組成同定と経度方向のマッピング

反射光の波長依存性は、系外地球型惑星の表面を知る上で重要な鍵となる。EPOXI mission によって数千地球半径程度の上空から観測された可視～近赤外域の地球の反射光の時系列データを、等方的な散乱・数種類の表面組成という仮定のもとで解析することにより、雲・海・大陸・植生・雪などのスペクトルを用いれば各成分の存在比やその経度方向の分布は正しく再現できることが分かった。また、系外惑星観測で見込まれる大きな観測ノイズが組成推定に与える影響を定量的に調べ、EPOXI と同等の観測から雲や海のような割合の大きな成分を同定するには各バンドで 5 % 程度以下の精度、また植生などそれ以外の成分の寄与を検出するには 1 % 以下の精度が求められることを示した。[12]

惑星の自転・公転を利用した 2 次元マッピング (雲有り)

22 年度は、自転と公転という 2 種類の運動による主星-惑星-観測者の位置関係の変化を注意深く考慮すれば、系外惑星の反射光の年周変動から、表面の 2 次元アルベドマップが再構築できることを、雲のない場合で示した (Spin-Orbit Tomography; SOT)。23 年度はこれを雲のある場合に拡張した。その結果、雲の日変化や季節変化を取り入れたシミュレーションでも同じ手法が適用できることが分かった。この場合、単一バンドのマッピングからは雲と雪の成分の非一様性が抽出でき、雲の平均的なパターン (高緯

度で雲量が多いなど) が再現されることが分かった。また、雲や雪の反射率は波長にあまりよらないことから、2 バンドの差をとることで、雲や雪以外の成分(表面)の非一様性が再構築できることが分かった。特に、レッドエッジ(植生に特有の、波長 750nm 付近で反射率が急激に増大する現象)を挟む 2 バンドの差をとると、局所的な植生地帯が同定できることが分かった。[13]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Sally V. Langford, J. Stuart B. Wyithe, Edwin L. Turner, Edward B. Jenkins, Norio Narita, Xin Liu, Yasushi Suto & Toru Yamada “A comparison of spectroscopic methods for detecting starlight scattered by transiting hot Jupiters, with application to Subaru data for HD 209458b and HD 189733b”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **415**(2011)673
- [2] den Herder et al. “ORIGIN: Metal Creation and Evolution from the Cosmic Dawn”, *Experimental Astronomy*, online only (2011) (arXiv:1104.2048)
- [3] Atsushi Nishizawa, Kent Yagi, Atsushi Taruya & Takahiro Tanaka: “Cosmology with space-based gravitational-wave detectors: Dark energy and primordial gravitational waves”, *Physical Review D*, **85** (2012) 044047
- [4] Takahiro Nishimichi & Atsushi Taruya: “Baryon acoustic oscillations in 2D. II. Redshift-space halo clustering in N-body simulations”, *Physical Review D*, **84** (2011) 043526
- [5] Tomohiro Okamura, Atsushi Taruya & Takahiko Matsubara: “Next-to-leading resummation of cosmological perturbations via the Lagrangian picture: 2-loop correction in real and redshift spaces”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **08** (2011) 012
- [6] Toshiya Namikawa, Tomohiro Okamura and Atsushi Taruya “Magnification effect on the detection of primordial non-Gaussianity from photometric surveys” *Physical Review D*, **83** (2011) 123514
- [7] Toshiya Namikawa, Daisuke Yamauchi and Atsushi Taruya “Full-sky lensing reconstruction of gradient and curl modes from CMB maps” *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **01** (2012) 007
- [8] Teruyuki Hirano, Yasushi Suto, Joshua N. Winn, Atsushi Taruya, Norio Narita, Simon Albrecht, & Bun’ei Sato: “Improved Modeling of the Rossiter-McLaughlin Effect for Transiting Exoplanets”, *The Astrophysical Journal*, **742** (2011) 69
- [9] Teruyuki Hirano, Norio Narita, Bun’ei Sato, Joshua N. Winn, Wako Aoki, Motohide Tamura, Atsushi Taruya, & Yasushi Suto: “Further Observations of the Tilted Planet XO-3: A New Determination of Spin-Orbit Misalignment, and Limits

on Differential Rotation”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **63** (2011) L57

- [10] Norio Narita, Teruyuki Hirano, Bun’ei Sato, Hiroki Harakawa, Akihiko Fukui, Wako Aoki, & Motohide Tamura: “XO-2b: a Prograde Planet with Negligible Eccentricity and an Additional Radial Velocity Variation”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **63** (2011) L67
- [11] Simon Albrecht, Joshua N. Winn, R. Paul Butler, Jeffrey D. Crane, Stephen A. Shectman, Ian B. Thompson, Teruyuki Hirano, & Robert A. Wittenmyer: “A High Stellar Obliquity in the WASP-7 Exoplanetary System”, *The Astrophysical Journal*, **744** (2012) 189
- [12] Yuka Fujii, Hajime Kawahara, Yasushi Suto, Satoru Fukuda, Teruyuki Nakajima, Timothy A. Livengood, & Edwin L. Turner: “Colors of a Second Earth. II. Effects of Clouds on Photometric Characterization of Earth-like Exoplanets”, *The Astrophysical Journal*, **738** (2011) article id. 184
- [13] Hajime Kawahara, & Yuka Fujii: “Mapping Clouds and Terrain of Earth-like Planets from Photometric Variability: Demonstration with Planets in Face-on Orbits”, *The Astrophysical Journal Letters*, **739** (2011) article id. L62

(その他)

- [14] Yasushi Suto “International Research Network for Dark Energy (DENET)”, *Bulletin of Association of Asia Pacific Physical Societies* **20-21**(2012)22

(国内雑誌)

- [15] 須藤 靖 “主役はダーク” 毎日新聞社 本の時間 2011 年 4 月号～2012 年 3 月号
- [16] 須藤 靖 “空想書店” 読売新聞 2011 年 4 月 10 日 朝刊
- [17] 須藤 靖 “注文の多い雑文 その十五: 指折り数えて”、東京大学出版会 UP **464**(2011)19
- [18] 須藤 靖・河原 創 訳 “銀河はどこへ行った?” (共訳)、日経サイエンス (2011) 8 月号, p60
- [19] 須藤 靖 “たかがナカグロ、されどナカグロー 科学技術か、科学・技術か”、東京大学出版会 UP **466**(2011)18
- [20] 須藤 靖 “注文の多い雑文 その十六: サイコロを振れ、受験生”、東京大学出版会 UP **468**(2011)25
- [21] 須藤 靖 “世界でいろいろ 指で数える方法”、朝日小学生新聞 2011 年 11 月 3 日
- [22] 池内了 (編) “道の手帖 寺田寅彦”、河出書房新社 (2011 年 11 月刊行、pp.38-44 執筆)
- [23] 須藤 靖 “注文の多い雑文 その十七: 宇高連絡船の UDON”、東京大学出版会 UP **470**(2011)42
- [24] 須藤 靖 “注文の多い雑文 その十八: $P \times I=1$ の法則の発見”、東京大学出版会 UP **473**(2012)13

- [25] 須藤 靖 朝日新聞 asahi.com webronza 科学・環境
論説 2011 年 5 月 2 日、6 月 1 日、6 月 18 日、6 月
30 日、7 月 14 日、7 月 23 日、7 月 27 日、9 月 1 日、
9 月 15 日、9 月 30 日、10 月 6 日、11 月 8 日、11 月
29 日、12 月 10 日、12 月 16 日、12 月 29 日、2012
年 1 月 10 日、1 月 11 日、1 月 25 日、3 月 6 日、3
月 28 日
- [26] 樽家 篤史: “編集後記”, 日本物理学会誌 第 8 号 (2012)
- [27] 平野 照幸: “トランジット惑星を用いた惑星の軌道傾
斜角の測定と惑星移動理論”, 日本天文学会誌 「天文
月報」, **105** (2012) 131
- (学位論文)
- [28] Toshiya Kashiwagi “The Implication of the
anomaly in the SFD Galactic extinction map on
Far-infrared emission of galaxies” (修士論文)
- (著書)
- [29] 須藤 靖 “三日月とクロワッサン”, 毎日新聞社 (2012
年 2 月刊行)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [30] Atsushi Taruya: “RegPTfast: a fast computation
of non-linear power spectrum from perturbation
theory”; RESCEU/DENET summer school (Aso,
7/26-29, 2011)
- [31] Toshiya Namikawa, Daisuke Yamauchi and At-
sushi Taruya ”An algorithm for reconstructing
gradient- and curl-type deflection angle from CMB
maps” Berkeley CMB Lensing WS, U.C.Berkeley,
April 21-23, 2011
- [32] Toshiya Namikawa, Daisuke Yamauchi and
Atsushi Taruya ”Lensing reconstruction from
the cosmic microwave background” 11-th
RESCEU/DENET Summer School: Dark Energy
in the Universe, Kumamoto, July 25-29, 2011
- [33] Toshiya Namikawa, Shun Saito and Atsushi
Taruya ”Probing dark energy and neutrino mass
from upcoming lensing experiments of CMB and
galaxies” DENET/IAP Conference, IAP, October
24-26, 2011
- [34] Teruyuki Hirano: “Measurements of Stellar
Obliquities for Transiting Exoplanets with Sub-
aru/HDS”; Subaru Users Meeting FY2011 (Tokyo,
2/29, 2012)
- [35] Teruyuki Hirano: “The Rossiter-McLaughlin Ef-
fect: Improved Model and New Data”; Extreme
Solar Systems II (Wyoming, USA, 9/11-17, 2011)
- [36] Teruyuki Hirano, Joshua N. Winn, Simon Al-
brecht, Yasushi Suto, Norio Narita, & Ben ’ei
Sato: “New Analyzing Tools for the Rossiter-
McLaughlin Effect”; The 220th Meeting of the
American Astronomical Society (Boston, USA,
5/23, 2011)
- [37] Yuka Fujii, Hajime Kawahara: “Global Mapping of
Earth-like Exoplanets from Scattered Light Curves
as a Probe of the Habitat”; Extreme Solar Systems
II (Jackson, WY, USA, 9/11-9/17, 2011)
- [38] Yuka Fujii, Hajime Kawahara: “Simulation and
Inversion of Annual Light Curves of a Second
Earth”; Exoclines 2012 (Aspen, CO, USA, 1/16-
1/20, 2012)
- 招待講演
- [39] Yasushi Suto: “Known unknowns and unknown
unknowns: astronomy vs. physics”; invited talk at
ISMD2011 (Miyajima, September 26, 2011)
- [40] Yasushi Suto: “DENET, Sumire and TodaiFo-
rum”; opening address at DENET conference ”The
accelerating universe” (Paris, October 24-26, 2011)
- [41] Yasushi Suto: “Anomaly in the SFD Galaxy ex-
tinction map and FIR emission from SDSS galax-
ies”; invited talk at DENET conference ”The ac-
celerating universe” (Paris, October 24-26, 2011)
- [42] Yasushi Suto: “Unknown knowns and unknown
unknowns in the universe”; invited talk at Work-
shop on Chemical Evolution of the Universe
(Tokyo, October 31, 2011)
- [43] Yasushi Suto: “Hierarchy in the cosmic struc-
tures”; invited talk at Kyoto University GCOE
symposium “Link among hierarchies” (Kyoto,
February 13, 2012)
- [44] Atsushi Taruya: “Precision cosmology from
redshift-space galaxy clustering”; WKYC2011 @
KIAS (Soul, 6/27-7/1, 2011)
- [45] Atsushi Taruya: “RegPTfast: a fast computation
of non-linear power spectrum from perturbation
theory”; PTchat @ IPHT (Saclay, 9/20-22, 2011)
- (国内会議)
- 一般講演
- [46] 樽家篤史: “RegPTfast: 弱非線形領域における質量
パワースペクトルの精密理論計算”; 天文学会 (龍谷
大学, 3/21/2012)
- [47] 樽家篤史: “RegPTfast: 摂動論にもとづく非線形パ
ワースペクトルの高速計算”; 物理学会 (関西学院大
学, 3/26/2012)
- [48] 並河 俊弥、高橋 龍一、樽家 篤史「不完全マップか
らの CMB の弱い重力レンズ効果の再構築」日本天
文学会 2012 年春季年会、龍谷大学、2012 年 3
月 19 日～22 日
- [49] 並河 俊弥「CMB の弱い重力レンズを用いたニュート
リノ質量への制限: 現状と将来の展望」東京大学 RA
キャンプ、伊豆、2012 年 2 月 26 日～28 日
- [50] 並河 俊弥、樽家 篤史「CMB の弱い重力レンズ効果
の再構築法: カール成分を含めた定式化」日本天文
学会 2011 年秋季年会、鹿児島大学、2011 年 9
月 19 日～22 日

- [51] 並河 俊弥, 山内 大介, 樽家 篤史「CMB の弱い重力レンズマップ再構築: 勾配・カール成分の分離法」CMB ワークショップ, JAXA、2011年 7月11日
- [52] 平野 照幸, 樽家 篤史, 須藤 靖, 竹田 洋一, 成田 憲保, Joshua N. Winn, Roberto Sanchis-Ojeda, & Simon Albrecht: “ケプラー測光を用いた星の自転軸傾斜角の測定”; 天文学会 (龍谷大学, 3/22, 2012)
- [53] 平野 照幸, 成田 憲保, 佐藤 文衛, 須藤 靖, Joshua N. Winn, Simon Albrecht, 青木和光, & 田村元秀: “トランジット惑星系のロシター効果の観測: 最新データと精密モデル化”; 天文学会 (鹿児島大学, 9/22, 2011)
- [54] 藤井 友香, 河原 創: “地球型惑星のキャラクターゼーション”; 国際高等研究所「宇宙の生命」研究会 (東京大学, 6/16-6/18, 2011)
- [55] 藤井 友香, Edwin L. Turner, 須藤 靖: “地球型惑星の水吸収線と表層環境”; 天文学会 2012 年春季年会 (龍谷大学, 3/19-3/22, 2012)
- [56] 柏木俊哉, 須藤靖, 樽家篤史, 矢幡和浩, 加用一者: “SDSS カタログを用いた銀河系ダスト減光マップの検証とその系統誤差起源の追究”; 日本天文学会 2011 年秋季年会 (鹿児島大学, 9/19-9/22, 2011)
- [57] 柏木俊哉, 須藤靖, 樽家篤史, 矢幡和浩, 加用一者, 西道啓博: “遠方銀河の遠赤外放射に起因する SFD ダストマップの系統誤差”; 日本天文学会 2012 年春季年会 (龍谷大学, 3/19-3/22, 2012)
- 招待講演
- [58] 須藤 靖: “バイオマーカーと第二の地球の色”; 第 11 回 自然科学研究機構シンポジウム『宇宙と生命 — 宇宙に仲間はあるのか II —』(名古屋ナディアパーク, 2011 年 6 月 12 日)
- [59] 須藤 靖: “観測的宇宙論の展望”; 理論天文学懇談会シンポジウム (国立天文台, 2011 年 11 月 6 日)
- [60] 須藤 靖: “加速膨張する宇宙論”; 日本物理学会 宇宙物理領域シンポジウム (関西学院大学, 2012 年 3 月 24 日)
- [61] 藤井 友香: “地球型惑星のバイオマーカー”; 自然科学研究機構シンポジウム (東京国際フォーラム, 3/20-3/20, 2012)
- (セミナー)
- [62] Yasushi Suto: “Colors of a second Earth: towards exoplanetary remote-sensing” seminar at Centre de Recherche Astrophysique de Lyon (Lyon, October 20, 2011)
- [63] Yasushi Suto: “Cosmological implications of inhomogeneities in intra-cluster gas ” seminar at ASIAA (Taipei, February 2, 2012)
- [64] Yasushi Suto: “Colors of a second Earth” Colloquium at ASIAA (Taipei, February 3, 2012)
- [65] 樽家篤史: “バリオン音響振動と宇宙大規模構造の非線形進化”; CG 研おんたけセミナー (木曽福島, 9/2, 2011)
- [66] 樽家篤史: “観測的宇宙論 観測から探る宇宙の様相”; 地球維新塾 (12/2, 2011)
- [67] 樽家篤史: “宇宙の彼方の非線形性”; ランチトーク@物理学教室 (12/9, 2011)
- [68] 樽家篤史: “宇宙大規模構造の(超)精密理論計算”; 宇宙物理(重力)・素粒子論グループコロキウム (大阪市立大学, 2/3, 2012)
- [69] Toshiya Namikawa “Lensing Reconstruction from Cosmic Microwave Background” 東京大学 IPMU, July 21, 2011
- [70] 並河 俊弥「CMB の弱い重力レンズを用いた観測的宇宙論」名古屋大学、2012年2月16日
- [71] 並河 俊弥「CMB の弱い重力レンズを用いた観測的宇宙論」弘前大学、2011年 12月7日
- [72] Teruyuki Hirano: “Measurements of Stellar Obliquities and its Implication to Planetary Migration”; TA group seminar (Nagoya University, Dec. 2, 2011)
- [73] 藤井 友香: “第二の地球の覗き方: 反射光による系外惑星の表層環境の再構築”; (早稲田大学, 6/10 2011)
- (講演)
- [74] 須藤 靖: “太陽系外惑星から宇宙生物学へ”; 第 12 回 林忠四郎記念講演会 (筑波大学, 2012 年 1 月 17 日)
- [75] 須藤 靖: “Invaluable で priceless な科学の価値と値段”; 九段中等教育学校キャリア講演会 (九段中等教育学校, 2012 年 2 月 24 日)
- [76] 須藤 靖: “いまこそ夜空を眺めよう” 相馬高校東京大学研修講演会 (東京大学経済学部, 2011 年 4 月 15 日)
- [77] 須藤 靖: “夜空を通して世界を知る”; 駿台予備学校講演会 (駿台予備学校, 2011 年 6 月 18 日)
- [78] 須藤 靖: “福島は夜空ノムコウ”; 第 3 回全国同時七夕講演会 (福島県立安達高校、福島高校、相馬高校、2011 年 7 月 7、8 日)
- [79] 須藤 靖: “宇宙を知り 世界を知る”; 東京大学第 62 回駒場祭公開講座「東大の知に触れる秋」(東大駒場キャンパス, 2011 年 11 月 26 日)
- [80] 須藤 靖: “加速する宇宙論”; 宇宙科学講演会 (東大駒場キャンパス, 2011 年 12 月 7 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からなる2進数の「ビット」を基本単位とするような古典力学的な状態で表される従来の情報（古典的情報）に対して、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を指し、量子2準位系の状態で記述される「量子ビット (qubit)」を基本単位とする。量子情報を用いると古典情報とはクラスの違い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。

量子情報を活用したシステムとしては、多量子ビットの重ね合わせ状態を利用した量子計算（因数分解アルゴリズム・データベースサーチアルゴリズム）、未知量子ビット状態の測定における不確定性を利用した量子暗号、2量子ビットの重ね合わせ状態に現われる非局所的量子相関である「エンタングルメント (entanglement)」を利用した量子テレポーションなどの量子通信が提案されている。そして、量子情報を用いることで古典情報処理を超えて何が可能になるのか、そしてそのような量子情報処理をどのように実現するのか、という問いに対して、数学・計算機科学から物理・化学、また電子工学や情報工学等多岐にわたる学際的なアプローチで研究が進められている。

今年度は、村尾美緒准教授、Peter Turner 助教、博士課程大学院生の中田芳史氏、杉山太香典氏、仲山将順氏、修士課程大学院生である、若桑江友里氏、秋笛清石氏、および日本学術振興会外国人研究員の Michal Hajduk 博士のメンバーで、エンタングルメント理論、分散型量子情報処理、量子計算アルゴリズム、量子測定、量子力学基礎論、強い非局所相関を記述する確率モデル（一般確率論）に関する研究を行い、多角的な視点から量子情報処理の性質を解析した。

5.2.1 エンタングルメント理論

位相ランダム状態アンサンブルが持つエンタングルメントの性質およびその近似的生成

一様ランダム状態アンサンブルとは、ヒルベルト空間に一様ランダムに分布した純粋状態の集合のことであり、量子情報処理への応用や、統計力学において、熱浴と接した系でカノニカル分布が実現することを等重率の原理なしで証明するために用いられている。しかし、一様ランダム状態アンサンブルを物理的に実現することは難しく、例えば、閉じた系の時間発展による生成のためには、極めて非局所な相互作用が必要となることが知られている。

本研究では、閉じた系の時間発展の中で実現する量子状態の中でランダムに分布した純粋状態を考察することを目的とし、量子状態を与えられた基底で

展開した時の展開係数の位相のみがランダムに分布する「位相ランダム状態アンサンブル」を提唱した。このように、物理的制約を反映したランダム状態アンサンブルという考え方は、従来と異なる新しいアプローチである。我々は、位相ランダム状態アンサンブルが持つ平均エンタングルメント量の解析公式を導くことで、位相ランダム状態アンサンブルが平均として巨大なエンタングルメント量をもつ場合があることを示し、部分系でカノニカル状態が実現するために全系の初期状態が満たすべき必要十分条件を求めた。また、量子計算機を用いて位相ランダム状態アンサンブルの近似的に生成する方法も示した。[担当:中田、Turner、村尾]

近接多体相互作用を持つ一次元イジング模型におけるエンタングルメント生成力の解析

閉じた系の時間発展によるランダム状態アンサンブルの実現可能性を考察するために、摂動的な多体相互作用を含む1次元イジング系において、時間発展によって生成されるエンタングルメント量を詳細に解析した。ランダム状態アンサンブルは平均として極めて大きなエンタングルメントを持つため、時間発展によるエンタングルメント生成力が低い場合はランダム状態アンサンブルは実現しない。その結果、エンタングルメント生成力と多体相互作用の非局所性の関係を定量的に評価することに成功し、ランダム状態アンサンブルと同程度のエンタングルメントを得るためには極めて非局所な多体相互作用が必須であることを示した。この結果は、1次元イジング系においては時間発展によるランダム状態アンサンブルの実現は非現実的であることを意味している。[担当:中田、村尾]

空間的非均一性を持つ一次元スピン模型における相転移およびエンタングルメントの解析

量子スピン系において、基底状態のエンタングルメントの性質は、量子相転移やエンタングルメント面積則、共形場理論の中心電荷などと関連して精力的に研究されている。本研究では、有機化合物などで見られる空間的非均一なスピンの相転移およびエンタングルメントの性質を解析した。具体的には、相互作用および磁場が周期的にゆらぐ一次元スピン系を厳密に解き、基底エネルギー、基底状態の磁化および基底状態の二体・多体エンタングルメントを解析的に計算し、空間的不均一性がそれらに与える影響を考察した。そして、揺らぎによって引き起こされる量子相転移の存在や、相互作用の揺らぎは多体エンタングルメントを増大させる一方で、二体エンタングルメントを減少させることなどを明らかにした。この結果は、空間的不均一性が引き起こす興味深い物理現象の存在を示唆している。本結果はイタリア理論物理研究所の J. Hide 博士との共同研究である。[担当:Hide、中田、村尾]

グラフ状態の多体エンタングルメント

グラフ状態は、量子情報科学において測定ベースの量子計算の資源として用いられ、また、量子誤り訂正の符号化に対しても重要な役割を果たすなど、実用性の高いエンタングル状態である。グラフ状態を更に一般化した *weighted* グラフ状態は、強結合スピンハミルトニアンやスピニングスなどの乱雑なスピンシステムの基底状態を近似するためにも用いられる。エンタングルメントの定量化は量子情報科学において基礎的な課題の一つであるが、一方で、非常に計算量的に困難な問題であることが知られている。我々は、グラフ理論を用いることによってグラフ状態の特徴付けを行ない、この特徴付けを用いることで、与えられたグラフ状態に最も「近い」セパラブル状態を探索しグラフ状態のエンタングルメントの定量化を行った。そして、従来知られていなかった、異なるエンタングルメント測度間の関係を見出した。この結果により、ある種の雑音がグラフ状態のエンタングルメントに与える影響に関する知見を得ることができる。この定式化は、最近接セパラブル状態を異なる記述法で表すことで、*weighted* グラフ状態へも応用可能である。[担当: Hajdusek、村尾]

異方的ハイゼンベルグ相互作用によるエンタングルメント生成の抑制方法

量子ビットを実現する物理系としてスピン系を用いる場合には、スピン間に自然に働く *Heisenberg* 相互作用によって2つのスピンが不可避にエンタングルしてしまうため、量子ビットがデコヒーレンスの影響を受けやすい。このような望まないスピン間のエンタングルメントが引き起こすデコヒーレンスは、量子情報処理を実現するために克服すべき課題の一つであるが、相互作用の *on/off* を完全に制御することは簡単ではないため、対策が難しかった。今回我々は、初期状態を適切に選び、各スピンに適当な磁場をかけることによって、相互作用による2スピン間のエンタングルメント生成を実効的にキャンセルする方法を発見した。各スピンにかかる磁場は相互作用と同強度の定磁場でよいと、相互作用の制御に比べると制御が著しく容易であり、この手法は実験の観点から実用的である。本研究は、国立情報学研究所根本教授との共同研究である。[担当: 中田、Turner、村尾]

5.2.2 分散型量子情報処理

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、近年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。

量子バタフライ通信路における2量子ビットユニタリ演算の実装可能性

複雑な通信ネットワーク上で多者間の通信を行なう場合、ほとんど使われない通信路が存在する一方で、一部の通信路に通信の負荷が集中し、この通信路の通信容量がボトルネックとなって、全体のネットワーク通信効率が大幅に下がる可能性がある。そこで、より効率的な多者間ネットワーク通信を行うための手法として、ネットワーク符号化という新しい手法が2000年前後に考案され、過去10年間で目覚ましい研究進展を遂げている。

我々は、このネットワーク符号化の手法を、量子通信のみならず量子計算も含んだ形での分散型量子情報処理へと発展させるために、ボトルネックをもつ通信ネットワークのプロトタイプとして量子バタフライ通信路を介した2量子ビットユニタリ演算の実装可能性の研究を進めている。今年度は特に、量子バタフライ通信路の各通信路に対する制限を量子通信にのみ課し、古典通信は自由に許す場合について研究を進め、このような場合には、古典通信に制限がある場合とは異なり、制御ユニタリ演算より非局所性が大きいクラスの2量子ビット演算の実装が可能であることを証明した。[担当: 秋笛、村尾]

量子バタフライ通信路におけるマルチキャスト量子ネットワーク符号化

量子バタフライ通信路に関するこれまでの研究は、未知量子状態を1つの入力ポートから1つの出力ポートへ送信する、ユニキャストと呼ばれる量子通信に対応するものであった。一方、古典通信におけるバタフライ通信路では、ネットワーク符号化を用いることによって、1つの入力情報を複数の出力ポートに複製して出力することが可能となる。量子力学にはクローン禁止原理があるため、完全な複製を作成することは不可能であるが、最適クローン状態という複製に近い状態を普遍的に作成することが可能であることは知られていた。しかし、最適クローン演算を行なうためには量子計算を実行することが必要であるため、量子バタフライ通信路におけるマルチキャストの多者間量子通信については、まったく研究が行われていなかった。そこで我々はこの問題に取り組み、2つの独立な量子ビット入力からそれぞれの最適クローン状態に近い状態を作成して量子バタフライ通信路を介して配信する、マルチキャスト量子ネットワーク符号化のプロトコルを提案した。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り、提案したプロトコルは現在特許出願中である。[担当: 村尾]

5.2.3 量子計算アルゴリズム

オラクルの普遍的な制御化アルゴリズム

制御ビットと呼ばれるビットの状態に応じて計算ビットに演算を実行したりしなかったりする制御化ゲートは、古典計算アルゴリズムにおいて基本的な役割を果たしている。量子計算においても、対応する制御化ユニタリゲートが存在し、周期発見アルゴリズム、探索アルゴリズム、度量衡アルゴリズムなどに使われて量子計算のスピードアップや古典系に対する優位性の発現に重要な役割を果たしている。これらのアルゴリズムにおいては、オラクル（未知のユニタリゲート）を制御化したゲートが必要になるが、与えられたオラクルを決定論的に正確に制御化する普遍的なアルゴリズムは存在しない。

そこで我々は、オラクルの制御化を高い確率で近似的に実装する方法を探索し、オラクルの N 乗根を呼び出せるのであれば、量子系のデコヒーレンス制御で用いられる dynamical decoupling の性質を用いて、任意の精度のオラクルの制御化を実装することが可能であることを示した。また、 N 乗根および $-2N$ 乗根のオラクルが呼び出せる場合には、量子ゼノン効果を用いることによって、任意の成功確率で正確な制御化ユニタリゲートを実装することが可能であることを示した。さらに、オラクルの負の数の累乗を呼び出すことができない場合には、オラクルの正確な制御化は不可能であるが、近似的な制御化は可能であることを示した。本研究はシンガポール国立大学の添田彬仁氏との共同研究である。[担当: 仲山、村尾]

熱平衡状態を作り出すアルゴリズム

熱平衡状態（カノニカル状態）は統計力学の基盤的な概念であると共に、ハミルトニアンをコスト関数として選ぶと、そのハミルトニアン熱平衡状態は最適化問題の解を一定の確率で与えることができるため、計算機科学的な資源であると考えられる。与えられたハミルトニアン系の熱平衡状態を効率的に準備するための量子計算アルゴリズムとして、量子メトロポリスアルゴリズムが知られている。このアルゴリズムでは位相推定の量子アルゴリズムを用いて系のエネルギーの測定を行なうプロセスが含まれる。しかし、位相推定のアルゴリズムには、ハミルトニアンダイナミクスの制御化が必要であり、制御化のプロセスではハミルトニアンが局所的な要素に分解できることを用いなければならなかった。我々は、ハミルトニアン局所性の制限を回避して熱平衡状態を作り出す量子計算アルゴリズムの研究を行い、量子計算と乱択計算を組み合わせることで系の熱平衡化を実行する全く新しいアルゴリズムを発見した。このアルゴリズムはハミルトンダイナミクスとその逆時間発展を利用するものである。[担当: 仲山、村尾]

Discriminant 行列法の拡張

Discriminant 行列法は量子探索アルゴリズムの解析のために発展した方法である。この方法により、 1 と -1 という二つの固有値しか持たない行列を二つを掛け合わせて出来た行列の固有値と固有状態を求めることができる。我々は、二つしか固有値を持たない行列を二つ掛け合わせて出来る行列に対して、この方法を適用できるように拡張を行った。この研究によって、従来の離散時間での量子探索アルゴリズムを連続時間の量子探索アルゴリズムにすると、もはや量子的な高速化が起こらないことを示した。この研究は国立情報学研究所の根本香絵教授との共同研究である。[担当: 仲山、村尾]

5.2.4 量子測定

トモグラフィ推定精度の評価

未知の量子状態や量子操作を測定し、その測定データから量子状態や量子操作を推定する手法を量子トモグラフィと呼ぶ。既存の量子トモグラフィ理論には、実験的に達成困難な 2 条件（測定器系が情報完全である、測定回数が非常に多い）が仮定されているという問題がある。我々は、上記の 2 条件を仮定できない不完全な実験設定の下でも精度良く量子トモグラフィを行うために、どのような測定や推定を行えば良いのかを明らかにすることを目的に、次のような研究を行なった。

まず、完全な実験設定の下で、推定精度の代表的な基準である期待損失と誤差確率に関して、測定精度の高い測定器系や推定方法がどう異なるかを解析した。その結果、推定方法に関しては、任意の有限次元量子系の量子トモグラフィでは、どちらの基準で推定精度を評価しても最尤推定法が最も高精度となることを証明した。また、測定器系の設定に関しては、期待損失の観点からは推定精度の等しい測定器系が、誤差確率の観点からは異なる推定精度を持ちうるということが分かった。従って、推定精度の良さを評価する際には、期待損失と誤差確率の両方の観点から評価をすることでより良い測定器系を選ぶことができることが判明した。

次に、測定器系が情報完全で測定データ数が少ない場合について、2 準位量子系の量子状態トモグラフィに関する数値計算を行なった。その結果、期待損失を基準として推定精度を評価した場合、最尤推定法よりもベイズ推定法の方が推定精度が良いということが判明した。

一方、測定器系が情報不完全で測定データ数が多い場合には、測定器系を固定して使用すると、どのような推定方法を用いても推定値が真の値に収束しないことが容易に示される。この問題の解決案として、測定と並行して測定器系に修正を加えるという、測定器系を逐次的に更新する方法を検討し、古典統計学で用いられる A-最適基準と呼ばれる更新基準を適用すると、推定値が真の値に収束しないことを理論的に示した。従って量子トモグラフィでは測定更新

基準をよく検討する必要があることが判明した。[担当: 杉山、Turner、村尾]

連続変数系 t -design

t -design とは、ユニタリ不変 Haar 測度で分布する一様ランダムな純粋量子状態のアンサンブルを統計の t 次モーメントまで模倣する状態集合のことある。2-design は、量子状態を推定する際になどに最適な量子測定の探索に重要な役割を果たすことが知られている。離散変数系において 2-design の Clifford 群を用いた構築方法は良く知られているが、連続変数系の t -design については未解明な点が多い。そこで我々は、連続変数系の t -design を構築方法の考察を行い、コヒーレント状態の一様ランダムなアンサンブルは 1-design を形成するものの、2-design を与えないことを示した。離散変数系の Clifford 群と連続変数系の Weyl-Heisenberg 群の代数的なアナロジーからは、ガウシアン状態の一様ランダムなアンサンブルが連続変数における 2-design を形成するようにも思えるが、我々はこのアンサンブルが 2-design ではないことを示唆する根拠を見つけた。さらに、一様分布ではなく、非一様な重みを持った分布を考えても、2-design にはならないことが示された。この研究は、米国 Los Alamos 国立研究所の Robin Blume-Kohout 博士との共同研究である。[担当: Turner]

5.2.5 量子力学基礎論

量子系のエネルギー交換に関する揺らぎの定理

熱力学的な物理量はおおよそアボガドロ数個の粒子が集まった際の平均量であり、そのうちのいくつかの粒子が熱力学の法則を破るようなふるまいをする可能性はいつでも残されている。揺らぎの定理とはそのようなミクロな留意のふるまいに制限を与える物理法則である。そのような定理のうちの一つであるエネルギー交換に関する揺らぎの定理は、温度の高い物体から低い物体にある量のエネルギーを運ぶ粒子の数とその逆のふるまいをする粒子の数の比は運ばれるエネルギーの量の指数増加関数で表わされるというものである。この定理は物理系の時間発展の可逆性と、二つの物体が独立に用意されている（相関がない）という二つの過程から自然に導かれる。我々は、量子系においてこの仮定のうち二つの系の独立性を取り払った場合は、揺らぎの定理のエネルギーの指数関数の引数に二つの量子系のエネルギーの確率分布の相互情報量に関係する修正項を加えればよいということを見つけた。この修正から、二つの量子系の間に相関がある場合は、平均の熱流に関しても初期状態の二つの量子系の相関に関する相互情報量の分だけ熱の逆流がありうることを示された。この研究は東京大学の広野雄士氏と、ロンドンインペリアル大学の Terry G. Rudolph 教授および David Jennings 博士との共同研究である。[担当: 仲山、村尾]

5.2.6 強い非局所相関を記述する確率モデル (一般確率論)

量子力学では、物理系に対して測定を行った際に、各々の測定結果がどのくらいの確率で得られるかを考える。その確率を記述する数学的枠組みは、量子力学ではヒルベルト空間の代数であるが、それとは異なるものを仮想的に考えることも可能である。一般的な数学的枠組みでは、量子力学を超える強い非局所相関を記述する確率モデルを考えることができ、量子情報の分野では一般確率論と呼ばれている。この一般確率論は、量子力学の操作論的基礎付けに向けた試みの中で盛んに研究が行われている。

我々は特に、物理系を情報処理の資源として捉える立場から一般確率論の解析を進めている。量子系を資源として用いることで、計算や通信、暗号などの情報処理タスクが古典系のみを用いるときよりも効率よく実装できることがあることはすでに知られているが、我々はさらに、一般確率論で記述される物理系を資源として用いた場合に、どのような情報処理が新たに可能になるのか、あるいは不可能になるのかを解明することを目指している。これは、様々な情報処理タスクの可能性／不可能性の条件が物理法則にどのような制限を課しているかを明らかにすることに関連する。また、この研究を通して、量子力学をそれを含むより一般的な枠組みの中で捉え直すことにより、古典情報処理に対する量子情報処理の優位性が、量子力学のどのような性質に本質的に起因しているのかを明らかにすることも目指している。

一般化相互情報量を用いた情報因果律の解析

情報因果律とは、「2 者の間で許されている通信が一方から他方への m ビットの古典通信のみならば、それによって送られる古典情報量は、2 者が非局所的相関を補助として用いたとしても、 m ビットを超えない」という原理であり、量子力学を基礎付ける情報論の原理の一つとして期待されている。我々は、古典系と量子系の間の量子相互情報量を一般化することで、一般確率論にも適用できる相互情報量を定義し、それを用いて情報因果律の解析を行った。この一般化は、一般確率論で記述される物理系が持つ古典情報容量に関する考察に基づいている。我々の一般化相互情報量は、上の状況で送信者から受信者へ送られる情報量の自然な評価方法を与える。その結果、CHSH 不等式の破れの量子限界である Tsirelson 限界の情報論的導出においては、情報因果律よりも、一般化相互情報量の連鎖律が本質的であることを示した。また、連鎖律を課すことで、2 体の非局所相関だけでなく、1 gbit の状態空間を制限することも可能であることを示した。[担当: 若桑、村尾]

一般確率論における計算速度向上の解析

量子非局所相関の存在は、間接的に量子計算のスピードアップに関連する。従って、「一般確率論で許

される量子限界以上の非局所相関が存在した場合、量子計算以上のスピードアップが可能になるか?」というのは自然な設問である。ところが、相関の強さと理論の中で許される状態変換はトレードオフの関係になっていることが近年示され、相関が強すぎる場合は古典計算と同じ計算速度しか達成できないことが判明した。この現状を踏まえ、「相関を制限することで計算速度を向上させる」ことを目的とした研究を行った。量子計算では「位相」が重要な役割を果たしているため、まず、一般確率論における自然な「位相変換」の定義を与え、一般確率論では非可換な位相が自然に存在することや、干渉が起こり得ることなどを示した。今後、「位相変換」の概念を用いることで、計算速度向上のために必要な相関の制限を求める予定である。本研究は、オクスフォード大学の Vedral 教授との共同研究である。[担当：中田、村尾]

<報文>

(原著論文)

- [1] A. Soeda, P. S. Turner and M. Murao, *Entanglement cost of implementing controlled-unitary operations*, Phys. Rev. Lett. **107**, 180501 (2011)
- [2] A. Soeda, Y. Kinjo, P.S. Turner and M. Murao, *Quantum Computation over the Butterfly Network*, Phys. Rev. A **84**, 012333 (2011)
- [3] Y. Nakata and M. Murao, *Simulating typical entanglement with many-body Hamiltonian dynamics*, Phys. Rev. A **84**, 052321 (2011)
- [4] J. Hide, Y. Nakata and M. Murao, *Entanglement and the Interplay between Staggered Fields and Couplings*, Phys. Rev. A **85**, 042303 (2012).
- [5] T. Sugiyama, P. S. Turner, and M. Murao, *A-optimal adaptive experimental design for 1-qubit state estimation with finite data*, accepted for publication in Phys. Rev. A, arXiv:arXiv:1203.3391(quant-ph)
- [6] Y. Nakata, P. S. Turner and M. Murao, *Phase-random states*, arXiv:1111.2747 (2011)
- [7] R. Blume-Kohout and P. S. Turner, *The curious non-existence of Gaussian 2-designs*, arXiv:1110.1042 (2011)
- [8] D. Jennings, T. Rudolph, Y. Hirono, S. Nakayama and M. Murao, *Exchange Fluctuation Theorem for correlated quantum systems*, arXiv1204.3571 (2012)

(学位論文)

- [9] 若桑江友里, *Analysis of Nonlocal Correlation in terms of Information Causality*, 修士論文

(特許)

- [10] 国内特許、出願番号 (特願 2012-069415)、発明の名称 (バタフライネットワーク上でのマルチキャスト量子ネットワーク符号化方法)、出願日 (2012 年 3 月 26 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

- [11] Eyuri Wakakuwa, Peter S. Turner and Mio Murao, *Distillability and isotropy of nonlocal correlations*, Conceptual Foundations and Foils for Quantum Information Processing, Waterloo (Canada), May 2011
- [12] Shojun Nakayama and Mio Murao, *Engineering the environment: Quantum circuit and universal thermalization*, Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics (FQMT2011), Prague (Czech Republic), July 2011.
- [13] Yuji Hirono, Shojun Nakayama, David Jennings, Terry Rudolph, Peter S. Turner, and Mio Murao, *An extension of the exchange fluctuation theorem for initially correlated systems*, Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics (FQMT2011), Prague (Czech Republic), July 2011.
- [14] Yoshifumi Nakata and Mio Murao, *Simulating typical entanglement with many-body Hamiltonian dynamics in polynomial time*, Asian Conference on Quantum Information Science 2011 (AQIS 2011), Busan (Korea), August 2011
- [15] Eyuri Wakakuwa and Mio Murao, *Extended Nonlocality-Assisted Random Access Coding and Information Causality*, The 15th Quantum Information Processing (QIP2012), Montreal (Canada), December 2011
- [16] Yuji Hirono, Shojun Nakayama, David Jennings, Terry Rudolph, Peter S. Turner, and Mio Murao, *An extension of the exchange fluctuation theorem for initially correlated systems*, The 15th Quantum Information Processing (QIP2012), Montreal (Canada), December 2011.
- [17] Yoshifumi Nakata, Peter S. Turner and Mio Murao, *Entanglement of phase-random states*, The 15th Quantum Information Processing (QIP2012), Montreal (Canada), December 2011
- [18] Peter. S. Turner, *The curious nonexistence of Gaussian 2-designs*, The Conference on Quantum Information and Quantum Control, Fields Institute, Toronto, Canada, 08 August 2011

招待講演

- [19] Mio Murao, *"Globalness" of unitary operations on quantum information*, The sixth Conference on the Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography (TQC2011), Madrid (Spain), May 2011
- [20] Mio Murao, *Structural characterization of graph states for processing quantum information*, The 11th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS 2011), Busan (Korea), August 2011

- [21] Mio Murao, *Simulating typical entanglement with many-body Hamiltonian dynamics*, International Workshop on Simulation and Manipulation of Quantum Systems for Information Processing (SMQS-IP2011), Jülich (Germany), October 2011
- [22] Peter S. Turner, *Gaussian 2-designs*, The Workshop on Quantum Tomography, Centre for Quantum Technologies, Singapore (Singapore), November 2011

(国内会議)

一般講演

- [23] 杉山太香典, Peter S. Turner, 村尾美緒, 射影測定を用いた適応的量子推定, FIRST-QIPP/DYCE 夏期研修会 2011, Kyoto (Japan), August 2011
- [24] 杉山太香典, Peter S. Turner, 村尾美緒, 適応的量子推定問題における一致推定量の存在条件, 2011 年度統計関連学会連合大会, Fukuoka (Japan), September 2011
- [25] 杉山太香典, Peter S. Turner, 村尾美緒, 適応的量子推定問題における推定値の収束条件, 日本物理学会 2011 年秋季大会, Toyama (Japan), September 2011
- [26] 杉山太香典, Peter S. Turner, 村尾美緒, 量子トモグラフィにおける現在の課題と適応的な実験計画による解決の試み, 統計的推測の理論と方法論, 及び, 最近の動向, Ibaraki (Japan), November 2011
- [27] 杉山太香典, Peter S. Turner, 村尾美緒, A -最適基準を用いた適応的量子状態推定, 第 25 回量子情報技術研究会, Osaka (Japan), November 2011
- [28] 杉山太香典, Peter S. Turner, 村尾美緒, A -最適基準に基づく適応的量子推定手法の解析, 日本物理学会第 67 回年次大会, Hyogo (Japan), March 2012
- [29] Shojun Nakayama, Peter S. Turner and Mio Murao, 一般の対称性からの揺らぎの定理の導出, 非平衡系の物理-ミクロとマクロの架け橋, Kyoto (Japan), August 2011
- [30] 若桑江友里, P. S. Turner, 村尾美緒, *The Effect of Uniformly Random Noise on the Distillability of Nonlocal Boxes*, FIRST-QIPP/DYCE 夏期研修会 2011, Kyoto (Japan), August 2011
- [31] 秋笛清石, 村尾美緒, *Two-qubit global unitary operations over the butterfly network*, 第 4 回基礎物理セミナー, Shizuoka (Japan), December 2011

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個の単位で精密に制御・観測することが可能になってきた。当研究室ではこのような制御性を利用して、量子多体問題、ナノ系の熱力学、統計力学の基本原理解明などを目指して研究を行っている。

5.3.1 冷却原子気体

冷却 ^6Li 気体中のEfimov状態の束縛エネルギー測定

これまでの冷却原子系におけるEfimov状態の存在は原子数ロスの測定による間接測定で確認されてきたが、本研究では、RF会合の手法を用いることで ^6Li 原子3成分混合系におけるEfimov状態の束縛エネルギーを直接測定した。我々は先行研究においてあまり考慮されていなかった有限温度の効果がRF会合の実験結果に無視できない影響を与えることを見出し、十分低温で実験を行うことで、この有限温度の効果を排除したより正確な束縛エネルギーを測定することに成功した。この温度シフトを取り除いた束縛エネルギーは、従来の理論予測とは有意にズレており、3体パラメータを定数とする従来の理論予測、およびパラメータが単調に変化するとした我々の有効モデルの結果とはずれていることが分かった。この研究はPhysical Review Letters誌106巻に掲載された[3]。

散逸系の強磁性BECにおけるスピンドायナミクス

強磁性相互作用するボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)に対して平均場近似を用いると、古典スピンの運動方程式であるLandau-Lifshitz方程式と等価となることが知られている。我々はBECの運動を記述するGross-Pitaevskii方程式に現象論的にエネルギー散逸を加えると、Gilbert減衰と呼ばれる古典スピン系における散逸項が現れることを見出した。この散逸項を含んだ運動方程式はLandau-Lifshitz-Gilbert(LLG)方程式と呼ばれ、強磁性体のスピンドायナミクスを記述する方程式として広く用いられている。ただし、強磁性BECに対するLLG方程式は古典系と異なり、スピングージ対称性のために時間微分が超流動の速度場を含んだ物質微分として記述される。すなわち、超流動の流れに沿ってスピンが運ばれるという効果が含まれている。我々は双極子相互作用によるパターン形成のダイナミクスを数値的に調べ、超流動の流れがスピンのダイナミクスを加速させることを明らかにした。この研究はPhysical Review A誌に掲載された[11]。

^{87}Rb の相図における熱および量子揺らぎの効果

スピン1の強磁性BECは、2次ゼーマン効果により外部磁場を変えることで磁化ゼロの相から部分的に磁化した相(Broken-axisymmetry phase, BA相)へと相転移を起こす。我々はスピン1の ^{87}Rb 原子BECに対して、熱的および量子的な揺らぎまで取り入れた相図を調べた。 ^{87}Rb 原子では、原子間相互作用のうちスピン依存しないものとスピン依存するものの比が非常に大きいため、スピン偏極した系と異なり、非凝縮体の割合が小さくても凝縮体の磁性に与える影響は多大となる。我々は有限温度の相図を調べた結果、基底状態がBA相にある場合、凝縮が起こる転移温度と自発磁化が現れる転移温度が異なること、および、磁化をもった凝縮体との散乱によって非凝縮成分間にもスピニコヒーレンスが生じることを見出した。更に、この非凝縮成分のスピニコヒーレンスは絶対零度でも量子揺らぎとして存在し、そのために希薄気体でありながら基底状態が平均場の結果から大きく変わるという非自明な結果を得た。この研究はPhysical Review A誌に掲載された[12]。

対称性によるスピノールBECの分類

近年、 ^{52}Cr , ^{164}Dy , ^{168}Er といった大きい角運動量を持った原子のBECが実現している。内部自由度が大きい系では、相互作用パラメータに依存して様々な磁性を示す相が出現し、理論的に基底状態を求めるのも容易ではない。そこで我々は、系の対称性から基底状態を求める方法をスピノールBECに対して構築した。一般にゼロ磁場中のスピノール気体のハミルトニアンはスピンのSO(3)回転、およびU(1)のゲージ変換に対して不変である。低温ではこの対称性が自発的に破れて凝縮相が出現するが、内部自由度が大きい場合には必ずしも元の対称性が完全に破れるわけではない。むしろ、部分的に対称性を残しているものがほとんどで、様々な磁性相はその残している対称性によって識別される。逆に考えると、ある対称性を仮定すれば、それに対応する状態を求めることができ、それが基底状態の候補となる。我々はこの方法を、具体的にスピン3のBECに適用し、先行研究では見落とされていた相を発見した。この研究はPhysical Review A誌に掲載された[14]。

Abeホモトピー群による量子渦共存下におけるトポロジカル励起の分類

トポロジカルな影響とは、 $\mathbb{Z}$ (整数)で分類される点欠陥を考えたとき、+1の不変量を持つ点欠陥が量子渦の回りを一回転すると不変量が-1の点欠陥に変化する現象である。これは+1(-1)がトポロジカルな不変量ではないことを意味する。我々はAbeホモトピー群を用いることでこの問題を解決できることを発見した。第 n Abeホモトピー群は第1ホモトピー群と第 n ホモトピー群に分割することができ、さらにその群構造は2つの群の半直積で記述される。

この半直積は第 1 ホモトピー群と第 n ホモトピー群が非可換であることを意味し、我々はそれが量子渦によるトポロジカルな影響を表していることを初めて指摘した。Abe ホモトピー群の解析の結果、我々は点欠陥の不変量はトポロジカルな影響により $\mathbb{Z}$ から $\mathbb{Z}_2$ (2 元群) へ変更されることを見出した。即ち、点欠陥は無数種類存在することは出来ず、存在するかしないかの 2 通りしかない。この研究は Nuclear Physics B に掲載された [15]。

5.3.2 量子論および統計力学と情報理論の融合

孤立量子系の thermalization 機構の提案

我々は 1 次元及び 2 次元のハードコア Bose-Hubbard 模型を数値的に厳密対角化することで、各固有状態における運動量分布の期待値を計算した。その結果、これはエネルギー固有値の昇順に見ると極めて不規則な振動を示すことを発見し、このような振る舞いを eigenstate randomization hypothesis (ERH) と名付けた。さらに、ERH が成り立つとして、初期状態をエネルギー固有関数で展開した時の重みがエネルギー固有値に対して滑らかに振る舞うことを仮定すれば孤立量子系においてミクロカノニカル分布を適用することが正当化出来ることを示した。これらの結果は Physical Review E 誌に掲載された [8]。

5.3.3 量子測定 of 誤差における不確定性関係の情報論的解析

1927 年、ハイゼンベルグはガンマ線顕微鏡の思考実験を考察することで、互いに非可換な物理量の測定誤差を同時にゼロにすることはできない、という不確定性関係を示した。しかしながら、この不確定性関係の厳密な下限は今日まで知られていなかった。我々は、統計学で用いられる Fisher 情報量によって誤差が定式化できることを示し、二つの物理量の測定誤差の間に成り立つ等号達成可能な不確定性関係を導出した。今回導出された不確定性関係の下限は、これまでに予想されていた交換関係によって定められる下限よりも厳しく、これまでの下限が一般には達成できない事が示された。これらの結果は Physical Review A に掲載された [10]。

<受賞>

- [1] 川口由紀: 第 4 回井上リサーチアワード (井上科学振興財団、2012 年 2 月)
- [2] 渡辺 優: 平成 23 年度理学系研究科研究奨励賞 (博士課程) (東京大学、2012 年 3 月)

<報文>

(原著論文)

- [3] S. Nakajima, M. Horikoshi, T. Mukaiyama, P. Naidon and M. Ueda: Measurement of an Efimov trimer binding energy in a three-component mixture of ^6Li , Phys. Rev. Lett. **106**, 143201(1)-143201(4) (2011).
- [4] P. Naidon and M. Ueda: The Efimov effect in lithium 6, Comptes Rendus Physique de l'Acad?mie des Sciences **12**, 13-26 (2011).
- [5] Y. Eto, A. Noguchi, P. Zhang, M. Ueda, and M. Kozuma: Projective measurement of a single nuclear spin qubit by using two-mode cavity QED, Phys. Rev. Lett. **106**, 160501(1)-160501(4) (2011).
- [6] K. Aikawa, D. Akamatsu, M. Hayashi, J. Kobayashi, M. Ueda, and S. Inouye: Predicting and verifying transition strengths from weakly bound molecules, Phys. Rev. A **83**, 042706(1)-042706(7) (2011).
- [7] K. Aikawa, J. Kobayashi, K. Oasa, T. Kishimoto, M. Ueda, and S. Inouye: Narrow-linewidth light source for a coherent Raman transfer of ultracold molecules, Opt. Express **19**, 14479-14486 (2011).
- [8] T. N. Ikeda, Y. Watanabe, and M. Ueda: Eigenstate randomization hypothesis, Why does the long-time average equal the microcanonical average?, Phys. Rev. E **84**, 021130(1)-021130(4) (2011).
- [9] A. Noguchi, Y. Eto, M. Ueda, and M. Kozuma: Quantum-state tomography of a single nuclear spin qubit of an optically manipulated ytterbium atom, Phys. Rev. A **84**, 030301(1)-030301(4) (2011).
- [10] Y. Watanabe, T. Sagawa, and M. Ueda: Uncertainty relation revisited from quantum estimation theory, Phys. Rev. A **84**, 042121(1)-042121(7) (2011).
- [11] K. Kudo and Y. Kawaguchi: Dissipative hydrodynamic equation of a ferromagnetic Bose-Einstein condensate: analogy to magnetization dynamics in ferromagnets, Phys. Rev. A **84**, 043607(1)-043607(14) (2011).
- [12] N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, and M. Ueda: Effects of thermal and quantum fluctuations on the phase diagram of a spin-1 ^{87}Rb Bose-Einstein condensate, Phys. Rev. A **84**, 043645(1)-043645(17) (2011).
- [13] T. Sagawa, M. Ueda: Nonequilibrium thermodynamics of feedback control, Phys. Rev. E **85**, 021104(1)-021104(16) (2011).
- [14] Y. Kawaguchi and M. Ueda: Symmetry classification of spinor Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. A **84**, 053616(1)-053616(19) (2011).
- [15] S. Kobayashi, M. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda: Abe homotopy classification of topological excitations under the topological influence of vortices, Nuclear Physics B **856**, 577-606 (2012).

(学位論文)

- [16] Emi Yukawa: Hydrodynamic Description of Spin-1 Bose-Einstein Condensates (博士論文)
- [17] Yu Watanabe: Formulation of Uncertainty Relations between Error and Disturbance in Quantum Measurement by using Quantum Estimation Theory (博士論文)
- [18] Tatsuhiko Ikeda: Equilibration and Thermalization under Unitary Evolution in Closed Quantum Systems (修士論文)
- [19] Yui Kuramochi: Theory of Quantum Continuous Measurement in Diffusive and Jump Processes (修士論文)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [20] P. Naidon and M. Ueda: Efimov trimers in lithium 6, The 42nd Division of Atomic, Molecular and Optical Physics (DAMOP 2011), Atlanta, GA, USA, 2011.06.13-06.17.
- [21] S. Endo, P. Naidon and M. Ueda: Efimov and non-Efimov physics of 2+1 particles, The 42nd Division of Atomic, Molecular and Optical Physics (DAMOP 2011), Atlanta, GA, USA, 2011.06.13-06.17.
- [22] S. Kobayashi, M. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda: Abe homotopy classification of topological excitation under the influence of vortices, 20th International Laser Physics Workshop, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2011.07.11-07.15.
- [23] P. Naidon and M. Ueda: Efimov trimers in ultracold lithium 6, 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Beijing, China, 2011.08.10-08.17.
- [24] S. Endo, P. Naidon and M. Ueda: Efimov and Non-Efimov Three-Body Bound States for 2+1 Particles, The 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Beijing, China, 2011.08.10-08.17.
- [25] P. Naidon, E. Hiyama and M. Ueda: Universal few-body physics of helium-4 atoms, The 5th Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics, Seoul, Republic of Korea, 2011, 08.22-08.26.
- [26] T. N. Ikeda, Y. Watanabe, M. Ueda: Eigenstate Randomization Hypothesis: Why Does the Long-Time Average Equal the Microcanonical Average?, Workshop on: Many-Body Quantum Dynamics in Closed Systems, Barcelona, Spain, 2011.09.07-09.09.
- [27] Y. Kawaguchi and M. Ueda: Spin Dynamics of a fragmented spinor BEC, 2011 Conference on Bose-Einstein Condensation, Frontiers in Quantum Gases (BEC2011), Sant Feliu, Spain, 2011.09.10-09.16.
- [28] N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, M. Ueda: Effects of thermal and quantum fluctuations on the phase diagram of a ^{87}Rb Bose-Einstein condensate, Finite-temperature Non-equilibrium Superfluid Systems, Heidelberg, Germany, 2011.09.18-09.21.
- [29] Y. Kawaguchi: Topological Excitations in Quantum Gases, The 8th Japanese-German Frontiers of Science Symposium, Tokyo, Japan, 2011.10.28-10.30.
- [30] S. Endo, P. Naidon, M. Ueda: Trimer bound states and p-wave atom-dimer resonance for mass imbalanced ultracold fermions, International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries, Shiga, Japan, 2011.11.01-11.05.
- [31] N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, M. Ueda: Effects of thermal and quantum fluctuations on the phase diagram of a ^{87}Rb Bose-Einstein condensate, International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries, Shiga, Japan, 2011.11.01-11.05.
- [32] S. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, M. Ueda: Topological stability of vortex cores in spinor BECs, International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries, Shiga, Japan, 2011.11.01-11.05.
- [33] S. Furukawa, Yong Baek Kim: Entanglement entropy between two coupled Tomonaga-Luttinger liquids, International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries, Shiga, Japan, 2011.11.01-11.05.
- [34] Y. Watanabe: Formulation of Uncertainty Relations between Error and Disturbance in Quantum Measurement by using Quantum Estimation Theory, International Workshop on Anomalous Statistics, Generalized Entropies, and Information Geometry, Nara, Japan, 2012.03.06-03.10.
- 招待講演
- [35] M. Ueda: Introduction to spinor quantum gases, Conference on Cold Atoms, Semiconductor Polaritons and Nanoscience, Crete, Greece, 2011.05.02-05.06.
- [36] M. Ueda: Topological aspects in ultracold quantum gases, Conference on Cold Atoms, Semiconductor Polaritons and Nanoscience, Crete, Greece, 2011.05.02-05.06.
- [37] M. Ueda: Topological aspects of spinor Bose gases, Quantum Magnetism in Ultracold Atoms, Haifa, Israel, 2011.05.15-05.19.
- [38] M. Ueda, P. Naidon, S. Endo: Efimov states in Fermionic Lithium 6, Workshop on Frontiers in Ultracold Fermi Gases, Trieste, Italy, 2011.06.06-06.10.

- [39] M. Ueda and T. Sagawa: Information Thermodynamics, Maxwells Demon and Quantum Szilard Engine, QIT Workshops -Quantum Information and Foundations of Thermodynamics, Zurich, Swiss, 2011.08.09-08.12.
- [40] M. Ueda: Topological aspects in ultracold atoms, 2011 Annual Meeting of UK Cold-atom /Condensed Matter Network, Nottingham, UK, 2011.09.05-09.07.
- [41] M. Ueda: Efimov states in Fermionic Lithium, 2011 Conference on Bose-Einstein Condensation, Frontiers in Quantum Gases (BEC 2011), Sant Feliu, Spain, 2011.09.10-09.16.
- [42] M. Ueda: Fermionic Efimov States, Critical Stability 2011, Erice, Italy, 2011.10.09-10.15.
- [43] M. Ueda: Topological Aspects in Ultracold Atoms, The 34th International Workshop on Condensed Matter Theories (CMT34), Pohang, Korea, 2011.11.07-11.11.
- [44] M. Ueda: Topological aspects in ultracold atomic gases, The 26th Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop , Novel Quantum States in Condensed Matter 2011 (NQS2011), Kyoto, Japan, 2011.12.05-12.09.
- [45] P. Naidon and M. Ueda: L'effet d'Efimov dans le lithium 6, Journée Francophone de la Recherche, Maison Franco-Japonaise, Tokyo, Japan, 2011.12.17.
- [46] M. Ueda: Topological Aspects in Ultracold Atoms, Aspen Center for Physics 2012 Winter Conferences, Condensed Matter Physics, Aspen, USA, 2012.01.08-01.14.
- [47] M. Ueda: Maxwell's demon, the second law, and the minimum energy cost for measurement and erasure of information, UC Berkeley Atomic Physics Seminar, Berkeley, USA, 2012.02.22.
- (国内会議)
- 一般講演
- [48] Shimpei Endo: Universal Trimers and Efimov Trimers, RIKEN/TOKYO meeting on cold atoms and nucleons, RIKEN, 2011.05.30.
- [49] 作道直幸: 量子クラスター展開法による BCS-BEC クロスオーバーの解析、基研研究会 2011 非平衡系の物理 -ミクロとマクロの架け橋-、京都大学基礎物理学研究所、2011.08.18-08.20.
- [50] 池田達彦、渡辺優、上田正仁: 孤立量子系の熱緩和の一般論、基研研究会 2011 非平衡系の物理 -ミクロとマクロの架け橋-、京都大学基礎物理学研究所、2011.08.18-08.20.
- [51] 渡辺 優: 量子推定理論による不確定性関係の定式化、統計関連学会連合大会、九州大学、2011.09.04-09.07.
- [52] 渡辺 優: Uncertainty Relation Revisited from Quantum Estimation Theory、量子論の深化と発展、東京工業大学、2011.09.12-09.13.
- [53] 川口由紀、上田正仁: 微小スピノール BEC における対称性回復のダイナミクス、2011 年日本物理学会秋季大会、富山大学、2011.09.21-09.24.
- [54] 古川俊輔、Tyler Dodds、Yong Baek Kim: 強磁性相互作用を含む拡張シャストリー・サザーランド模型の基底状態: (CuCl) LaNb₂O₇ への応用、2011 年日本物理学会秋季大会、富山大学、2011.09.21-09.24.
- [55] 古川俊輔、Yong Baek Kim: 結合した二本の朝永・ラッティンジャー流体間のエンタングルメント・エントロピー、2011 年日本物理学会秋季大会、富山大学、2011.09.21-09.24.
- [56] 小林伸吾、川口由紀、小林未知数、新田宗土、上田正仁: スピノール BEC における渦芯構造の解析: 群論によるアプローチ、2011 年日本物理学会秋季大会、富山大学、2011.09.21-09.24.
- [57] 渡辺 優: 量子推定理論を用いた量子測定 of 誤差と擾乱の不確定性関係、量子情報技術研究会 (QIT25)、大阪大学、2011.11.21-11.22.
- [58] 川口由紀: Symmetry property and topological excitations in a spin-3 Bose-Einstein condensate、新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」第 2 回領域研究会、岡山大学、2011.12.17-12.19.
- [59] 古川俊輔、Yong Baek Kim: Entanglement entropy between two coupled Tomonaga-Luttinger liquids、新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」第 2 回領域研究会、岡山大学、2011.12.17-12.19.
- [60] 渡辺 優: 推定理論を用いた量子測定 of 誤差と擾乱の不確定性関係、基研研究会「物理と情報の階層構造-情報を接点とした諸階層の制御と創発-」、京都大学、2012.01.04-01.06.
- [61] S. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, M. Ueda : Vortex core excitations in spinor BECs, ISSP 短期研究会-量子凝縮系における defect と topology-、東大物性研究所、2012.01.05-01.07.
- [62] 池田達彦、渡辺優、上田正仁: 孤立量子系でミクロカノニカル分布が適用出来るための十分条件とその数値的検証、基研研究会 2011 非平衡系の物理 -ミクロとマクロの架け橋-、京都大学基礎物理学研究所、2012.01.05-01.07.
- [63] 遠藤晋平、Pascal Naidon、上田正仁: Universal trimers and Efimov trimers, Ultracold Gases: Superfluidity and Strong Correlation (USS-2012)、東京理科大学 森戸記念館、2012.01.11-01.13.
- [64] 池田達彦、渡辺 優、上田正仁: 孤立量子系でミクロカノニカル分布が適用出来るための十分条件の検証、2012 年日本物理学会年次大会、関西学院大学、2012.03.24-03.27.
- [65] 遠藤晋平、Pascal Naidon、上田正仁: 2 成分 Fermi 系における Efimov trimer と Universal trimer、2012 年日本物理学会年次大会、関西学院大学、2012.03.24-03.27.
- [66] 作道直幸、川上則雄、上田正仁: Lee-Yang の量子クラスター展開法による非対角、距離秩序の判定条

- 件、2012 年日本物理学会年次大会、関西学院大学、2012.03.24-03.27.
- [67] 小林伸吾、川口由紀、新田宗土、上田正仁: スピノール BEC における量子渦コア状態の分類、2012 年日本物理学会年次大会、関西学院大学、2012.03.24-03.27.
- [68] 湯川英美、上田正仁: スピン 1 Bose-Einstein 凝縮体の流体力学方程式の導出、2012 年日本物理学会年次大会、関西学院大学、2012.03.24-03.27.
- [69] 渡辺 優、上田正仁: 測定誤差と擾乱における不確定性関係の量子推定理論を用いた定式化、2012 年日本物理学会年次大会、関西学院大学、2012.03.24-03.27.
- [70] 倉持 結、渡辺 優、上田正仁: 直交位相振幅と光子数の同時測定過程による系のダイナミクスと測定結果の解析、2012 年日本物理学会年次大会、関西学院大学、2012.03.24-03.27.
- 招待講演
- [71] 上田正仁: 冷却原子気体とトポロジ、2011 年日本物理学会秋季大会 シンポジウム講演、富山大学、2011.09.21-09.24.
- [72] 川口由紀: スピン 3BEC における自発的対称性の破れと量子渦、ISSP 短期研究会 量子凝縮系における defect と topology、東京大学物性研究所、2012.01.05-01.07.
- [73] 川口由紀: スピン 3 スピノール BEC における自発的対称性の破れとトポロジカル励起, Ultracold Gases: Superfluidity and Strong Correlation (USS-2012), 東京理科大学 森戸記念館, 2012.01.11-01.13.
- [74] 渡辺 優: 量子推定理論から見た誤差と擾乱の不確定性関係、量子論の諸問題と今後の発展 (QMKEK4)、高エネルギー加速器研究所、2012.03.16-03.17.
- (セミナー等)
- [75] 池田達彦、渡辺 優、上田正仁: 多体量子系のエネルギー固有状態で見えるオブザーバブル、第 56 回物性若手夏の学校、山梨県ホテルエバグリーン富士、2011.08.01-08.05.
- [76] 遠藤晋平、BCS 理論は質量差が大きな 引力 Fermi 系を正しく記述するか?、第 56 回物性若手夏の学校、山梨県ホテルエバグリーン富士、2011.08.01-08.05.
- [77] 布能 謙: スクイズド状態とホーキング輻射、第 56 回物性若手夏の学校、山梨県ホテルエバグリーン富士、2011.08.01-08.05.
- [78] 作道直幸、川上則雄、上田正仁: 量子クラスター展開法による量子多体系の非対角長距離秩序の解析、量子情報処理プロジェクト関西・関東学生チャプター合同研究会、京都大学、2011.08.12-08.15.
- [79] 渡辺 優: Uncertainty Relation Revisited from Quantum Estimation Theory、FIRST 量子情報サマースクール、京都大学、2011.08.12-08.17.
- [80] S. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, M. Ueda: Abe homotopy classification of topological excitation under influence of vortices、茨城大学セミナー、2011.10.24.
- [81] 池田達彦、渡辺 優、上田正仁: 孤立量子系でマイクロノニカル分布が適用出来るための十分条件とその数値的検証、第 4 回 基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2011.12.03-12.05.
- [82] 遠藤晋平、Pascal Naidon、上田正仁: 2 component Fermi 系に対する 3 体束縛状態、第 4 回 基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2011.12.03-12.05.
- [83] 小林伸吾、川口由紀、新田宗土、上田正仁: スピノール BEC における量子渦コア状態の分類、第 4 回基礎物理セミナー合宿、神奈川県箱根町、2011.12.03-12.05.
- [84] 布能 謙: 光格子中の原子気体のエンタングルメントを用いた冷却方法、第 4 回 基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2011.12.03-12.05.
- [85] 渡辺 優: 量子推定理論を用いた量子測定の誤差と擾乱の不確定性関係、第 4 回 基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2011.12.03-12.05.
- [86] S. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, M. Ueda: Abe homotopy classification of topological excitation under influence of vortices、数理論理研究室セミナー、理化学研究所、埼玉県和光市、2011.12.09.
- [87] Y. Watanabe: Eigenstate Randomization Hypothesis: a thermalization mechanism on isolated quantum systems、Quantum Information Group Seminar, University of Bristol, UK, 2012.2.15.
- [88] 渡辺 優: 量子推定理論を用いた誤差と擾乱の不確定性関係、お茶大宇宙物理学研究室コロキウム、お茶の水大学、2012.02.23.
- [89] 渡辺 優: Formulation of Uncertainty Relations between Error and Disturbance in Quantum Measurement by using Quantum Estimation Theory、早稲田大学高等研究所セミナー、早稲田大学、2012.02.28.
- [90] 渡辺 優: 量子推定理論を用いた不確定性関係の定式化、新しい科学哲学をつくる会 春合宿セミナー、東京工業大学、2012.03.09-03.12.
- [91] S. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, M. Ueda: Abe ホモトピー群による量子渦共存下のトポロジカル励起の分類、近畿大学笠松研究室セミナー、東大阪市、2012.03.28.

6 一般物理実験

6.1 牧島研究室＋中澤研究室

6.1.1 科学衛星の運用と稼働状況 [123]

○ 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 6 年目に入った。搭載された X 線 CCD カメラ (XIS; X-ray Imaging Spectrometer) と硬 X 線検出器 (HXD; Hard X-ray Detector) は、順調に稼働を続けているが、放射線障害により太陽電池の出力が、徐々に劣化しつつある。我々は本年度も、衛星および硬 X 線検出器 (HXD) の運用を支援するとともに、搭載装置の較正を続行し [8, 26]、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

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、2009 年夏より観測を続けており、理研、JAXA、東工大、青学大、日大、京大、宮崎大などにより運用されている。牧島は引き続き、理研・基幹研究所に所属する MAXI チームのチームリーダーを、非常勤で兼務している。2011 年の秋で、MAXI は当初の約束である 2 年間の定常運用を完遂したが、ブラックホール [11]、中性子星 [25]、恒星のフレア、ガンマ線バーストなどで多くの科学的成果が得られていること、装置が引き続き稼働できることから、3 年間 (2012–2014 年度) の運用延長が JAXA により、正式に認められた。

東大物理学教室では、MAXI に直接に参加してはいないが、狭い視野を深く見る「すざく」と、全天を浅く見わたす MAXI の相補性を活かすべく、両者の連携を支援している。今年は日本天文学会欧文誌より、「すざく＋MAXI」の合併特集号が出版された。「すざく」の特集号としては 4 冊目に当たる。

6.1.2 質量降着するブラックホール [49]

ブラックホール (BH) に物質が吸い込まれる際は、静止質量エネルギーの $\sim 10\%$ が外界に放射される。降着物質は、 ~ 0.01 keV から ~ 100 MeV まで、広範囲なエネルギーをもつことができ、その放射は光子エネルギーにして 5 桁以上にもわたる。

○ 恒星質量ブラックホール [3, 24, 11, 29, 52, 73, 80]

「はくちょう座 X-1」(Cyg X-1) は、1970 年代半

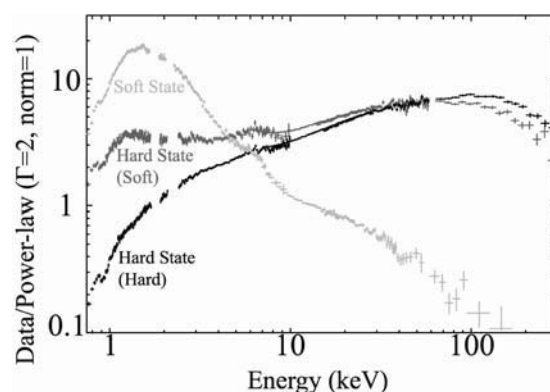


図 6.1.1: Broad-band spectra of the black-hole binary Cyg X-1 obtained on three occasions, with the *Suzaku* XIS (below 10 keV) and the HXD (above 10 keV). Light gray, dark gray, and black indicate the soft state, a brighter had state, and a fainter hard state, respectively.

ばに小田稔らの観測にもとづき、ブラックホールとして認定された最初の天体で、質量降着する恒星質量 BH の代表格である。鳥井、山田らは今年度も、「すざく」で 25 回にわたり観測された Cyg X-1 の広帯域スペクトルや短時間変動 ($10^{-3} - 10$ Hz) を解析した。この種の天体は図 6.1.1 に示すように、質量降着率の変動に伴い、特徴的な 2 状態 (ハード状態とソフト状態) の間を遷移する。今年度は、広帯域を誇る「すざく」のデータを用い、この両状態の詳しい比較を進めた。

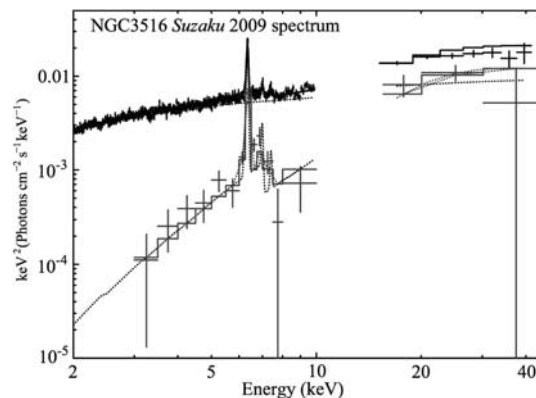


図 6.1.2: $\nu F\nu$ spectra of the Seyfert galaxy NGC 3516, obtained with *Suzaku*. The higher points indicate the time averaged data, while the lower points show the invariant component derived with a new C3PO method. The superposed dotted line indicates a fit by a standard cold reflection model with ~ 1 solar abundances.

○ 巨大ブラックホールと活動銀河核 [2, 12, 20, 58, 64, 68, 82, 99, 128, 132, 133]

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。AGN は恒星質量 BH と類似するものの、BH 質量が大きいと、星間吸収の強

い真空紫外領域に円盤放射が来るため、複雑なスペクトル成分を切り分けることが難しく、さまざまな学説が林立し、手詰まり状態にあった。この事態を打開すべく野田らは、「すざく」で得た広帯域のスペクトルを、変動を手掛かりに成分分解する方法を開発してきた。その結果、セイファート銀河 MCG-6-30-15 ではスペクトルの 20–40 keV 付近に、また吸収の少ないセイファート銀河 Mkn 509 では ~ 2 keV 以下に、パワーロー型の連続成分とは独立した、別の変動成分があることを突き止めた。この成果により野田はポスター銀賞を獲得した [2]。

野田らはこの手法を一般化し、あるエネルギーバンドのカウント数と、別のバンドのカウント数との相関を調べ、ゼロ点からのオフセットを測るという手法を開発し、C3PO (Count Count Correlation with Positive Offset) と名付けた。その結果、2–3 keV のカウント数を基準にとると図 6.1.2 の事例のように、変動しない成分のスペクトルが得られた。これはパワーロー型の 1 次放射が、AGN から > 0.1 pc の距離にある冷たい物質で反射された信号としてみごとに説明でき、強い鉄の蛍光輝線も見える。時間平均したスペクトルは、熱的コンプトン過程を表わすパワーロー成分と、この反射成分の和で、きれいに説明できた。この技法の登場は、AGN の研究に大きなブレークスルーをもたらすと考えられ、ASTRO-H 衛星 (§6.1.5) での大きな飛躍が期待される。

6.1.3 中性子星とその磁場 [50, 42]

○ 磁場の弱い中性子星 [7, 5, 37, 59, 65, 79]

中性子星 (NS) のあるものは磁場が $< 10^9$ と弱く、それらが小質量の恒星と連星系をなしたものを、LMXB (Low-Mass X-ray Binary) と呼ぶ。降着流の振舞いは BH の場合に似るが、NS の「硬い表面」が存在することが、BH との大きな違いである。

桜井らは昨年に続き、ランジェント LMXB である Aquila X-1 の「すざく」データを解析した結果、中性子星表面からの黒体放射の半径が、光度 ($\sim$ 質量降着率) とともに図 6.1.3 のように変化することを、世界で初めて明らかにした。光度が高いとき (ソフト状態) では、光学的に厚く幾何学的に薄い「標準降着円盤」が接する NS の赤道面付近から、黒体放射が放射される。光度が下がると (ハード状態)、円盤は光学的に薄く幾何学的に厚い高温コロナ流へと遷移し、NS 表面にほぼ球対称に降着するが、さらに光度が下がると放射領域は小さくなる。これは弱い磁気圏が頭をもたげ、降着流が南北の磁極に絞られる結果と解釈され、X 線の速いパルス検出が期待される。成功すれば中性子星の半径と質量が制限でき、原子核の状態方程式に貴重な情報となるため、「すざく」から ASTRO-H (§6.1.5) への絶好テーマである。

○ SFXT 天体と超長周期パルサー [38, 60, 63]

近年、SFXT (Supergiant Fast X-ray Transient) と呼ばれる硬 X 線天体が注目を集めている。これらは超巨星を主星にもつ強磁場 NS 連星で、通常その X 線光度は低い、数十分から数時間で強度が 2–3 桁も増加するなど激しい変動を示す。変動の生成

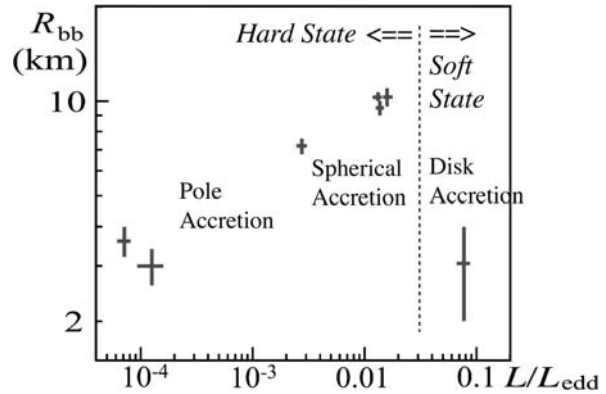


図 6.1.3: *Suzaku* measurements of the blackbody radius (assuming a spherical region) on the neutron star in Aquila X-1. Inferred accretion geometry is also indicated.

機構として、主星からの星風の濃い部分に NS が突入した際にフレアが生じるとする「非一様星風」説と、降着物質が強い磁場のアルヴェーン面に蓄えられ、間欠的に NS へと落下する「磁氣的ししおどし」説がある。笹野らは昨年度、「すざく」で観測された SFXT である IGR 16195–4945 の公開データを解析し、後者を強化する結果を導いた。

SFXT のあるものは、数百秒から数千秒と、ひじょうに長いパルス周期を示し、NS が超強磁場をもつことを示唆する。そこで笹野らは、SFXT の類似天体として、 $\sim 1 \times 10^4$ sec という長い自転周期をもつ X 線パルサー 4U 0114+65 を「すざく」で観測し、図 6.1.4 に示す高品質データを得た。遅い自転に伴い、鉄輝線、吸収などがどう変化するか調べることで、降着物質が NS から $\sim 10^{10}$ cm の Alfvén 面に蓄えられていることを示し、結果として、NS の磁場が $\sim 10^{13}$ G を超すことを証明したい。これも ASTRO-H (§6.1.5) の重要テーマとなる。

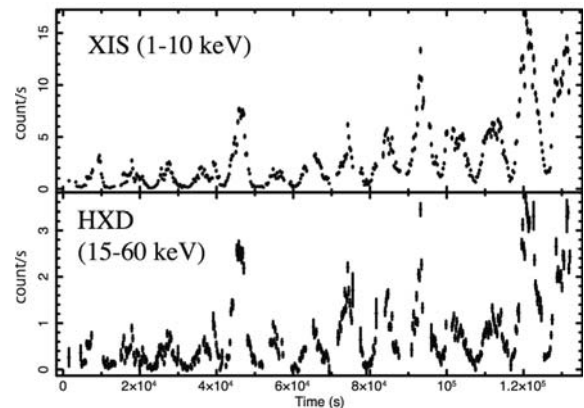


図 6.1.4: Light curves of the ultra-long-period pulsar 4U 0114+65, obtained with the *Suzaku* XIS (top) and the HXD (bottom). The 10^4 sec pulsations are visible.

○ マグネター天体 [13, 15, 23, 27, 28, 54, 78, 111, 112]

銀河系やマゼラン雲にある 20 個ほどの X 線源は、回転駆動でも降着駆動でもなく、 10^{14-15} G の超強磁

場をエネルギー源としてX線を放射する特殊なNS、「マグネター」と考えられている。我々はこれまで「すざく」により、図 6.1.5 のように、マグネターの広帯域スペクトルを明らかにしてきた。どれも硬軟2成分から成る特徴的なスペクトルを示し、老齢な天体ほど硬成分の強度が下がるが、その傾きは硬くなることなど、特異な性質が見られる。

中野らは ビッグバンセンターの平賀と協力し、マグネターに付随する超新星残骸 (SNR) CTB109 の「すざく」データを解析した結果、その年齢 (1~2 万年以下) は、中心にあるマグネター 1E2259+586 の特性年齢 (23 万年) より大幅に若いこと、よってマグネターの年齢はこれまで、系統的に過大評価されていた可能性に到達した。そこでマグネターの磁場が減衰する効果を含めて特性年齢を定式化し直したところ、この見かけ上の年齢齟齬が説明できることが判明した。これは、マグネターが磁気エネルギーを放射して輝く、真の「磁気駆動 NS」であることを意味するとともに、マグネターの活動期間は実はかなり短いこと、よって発見数から逆算したマグネターの誕生率はきわめて高く、重力崩壊型の超新星爆発では、 $\sim 10^{12}$ G の磁場をもつ NS よりマグネターの方が多く誕生する可能性までも示唆し、中性子星の研究に大きなインパクトが予想される。

この斬新な可能性を検証するには、磁気活動を終えつつあるマグネターの末裔が、銀河面に数多く存在することを示せばよい。そのため我々は、「あすか」銀河面サーベイで検出された暗い未同定X線源のうち、温度 0.3~0.5 keV の黒体放射に似たスペクトルを示すもの 4 例を選び、「すざく」で観測を始めた。黒体放射的なスペクトルをより精度よく定量化し、10 秒程度のパルスを探査することが目的である。さらに *ASTRO-H* (§6.1.5) の硬X線感度を活かし、微弱な硬X線成分を検出できれば、我々の仮説が実証できる。これは「あすか」、「すざく」、*ASTRO-H* という三世代のX線衛星を用いた、大事業といえる。

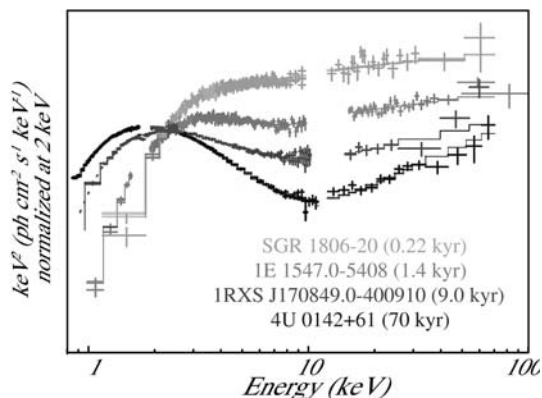


図 6.1.5: Wide-band νF_ν spectra of representative magnetars, observed with *Suzaku* and normalized at 2 keV. The spectral properties are seen to depend strongly on the characteristic age which is indicated in the parentheses.

6.1.4 銀河系および銀河団の研究

○ 銀河面と銀河中心のX線放射の研究 [10, 21, 34, 56, 69, 81, 110, 30, 31, 35]

我々の銀河面には、広がった「銀河面X線放射」(GRXE) が分布し、そのスペクトルには強い Fe、S、Si などの電離輝線が見られる。熱的プラズマ放射として解釈できるが、その発生源は 1980 年代から大きな謎で、電波の弱い SNR の集まり、暗い点源の集合、真にディフューズな高温プラズマの分布などの解釈が提案され、論争が続いていた。昨年度、湯浅らは「すざく」で観測した GRXE のスペクトルが、質量降着する白色矮星連星と、より柔らかい熱的放射 (おそらく星のコロナやフレア) の和で再現できることを示した。これはロシアグループがX線画像や点源の数から導いた結果と整合し、GRXE がおもに暗い点源の集合であることが、確定的しつつある。

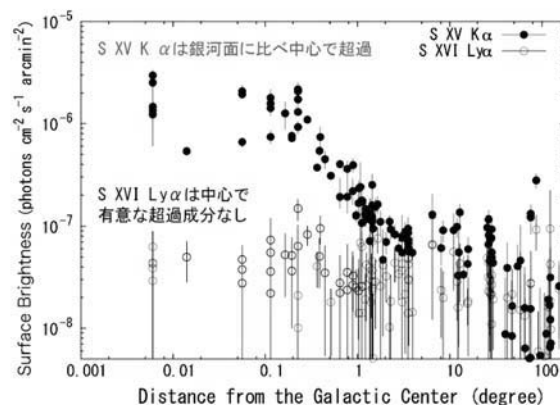


図 6.1.6: Galactic longitude distribution of He-like and H-like Sulphur K-line intensities in the Galactic diffuse emission. The excess brightness associated with the Galactic center is clearly visible in the He-like line, but is absent in the H-like line.

こうして GRXE の正体はほぼ明らかになりつつあるが、銀河中心から $\sim 1^\circ$ 以内には、GRXE と酷似した性質をもち、かつ表面輝度が 1 桁以上も高い、広がった熱的放射が存在する。この現象は「すざく」を用い、京大などを中心に活発に研究されており、GRXE とは異なる起源 (とくに真にディフューズな高温プラズマ) をもつ可能性が高い。内山らは「すざく」による大規模観測データを用い、銀河中心から銀河面に至る広い領域で、いろいろな重元素輝線の強度分布を調べたところ、図 6.1.6 に示す新しい成果を得た。すなわち He-like な S-K α 輝線は、銀河中心で強い表面輝度の増加を示し、これは電離鉄輝線 (H-like および He-line) で知られていた結果と一致するが、H-like な S-K α 輝線では、そうした表面輝度の増大が見られない。この謎は *ASTRO-H* (§6.1.5) で解かれると期待している。

○ 銀河団プラズマの2温度構造 [4, 40, 55, 67, 86]

我々は長年のX線観測にもとづき、銀河団の磁気流体的な描像を追求している。このテーマでは昨年度より、上海交通大学の顧力意 (Gu Liyi) と協力して来たが、今年度は彼が学振外国人特別研究員としてして来日した結果、大幅に研究を進めることができた。Abell 1795 銀河団の中心 100 kpc 以内では、高温 (~ 5.3 keV) と低温 (~ 2.1 keV) のプラズマが共存していることが立証でき、さらに低温成分の多い領域で、重元素アバンドアンスが有意に高くなっていること、すなわち中心銀河からの元素供給が働いていることも検証できた。これらは我々が過去に得た、ケンタウルス座銀河団などの結果とよく一致し、中心銀河の磁気圏に低温プラズマが閉じ込められているという、牧島の提唱する「中心銀河コロナ」の描像を支持する。

○ 銀河団の宇宙論的進化の新しい徴候 [70, 85, 96, 97, 124, 131, 134, 135, 136]

我々の磁気流体的描像によれば、銀河団のメンバー銀河が高温プラズマ中を運動するさい、プラズマは加熱され、銀河は抵抗を受け中心に落下するであろう。その証拠を探るため引き続き、顧力意 (Gu Liyi) を中心に、奈良高専の稲田直久らと協力し、近傍 ($z \sim 0.1$) から遠方 ($z \sim 0.9$) までの 34 個の銀河団に対して、可視光でのメンバー銀河の空間分布を、X線で求めた高温プラズマの空間分布と比較する作業を続けた。その結果、図 6.1.7 に示すように、遠方の (若い) 銀河団ではプラズマの周辺部まで銀河が分布するのに対し、近い (老齢の) 系では、プラズマの中心部に銀河が集中することを、世界で初めて明らかにすることに成功した。この成果は今後、多大なインパクトをもつと自負する。

この解析では、分光情報を伴わない可視光の多色測光画像から、各銀河団のメンバー銀河を選んでいく。我々は複数の異なる手法を比較することにより、メンバー選定における系統的誤差を取り除くよう注意した。さらに様々な観測上のバイアスも慎重に考慮した結果、この進化は有意であると確信するに至った。

この結果は、宇宙年齢かけて銀河が中心に落下してきたことを強く示唆するが、その原因としては、我々の提唱する磁気流体的な効果が唯一の解釈ではなく、重力相互作用のみに基づく dynamical friction などがある。また同様な効果を生むものとして、進化に伴う銀河団外縁部へのプラズマ集積などがある。現在、これら競合過程の見積りを進めている。

○ 銀河団の質量分布 [84, 109]

全重力質量の空間分布は、銀河団の形成過程、ひいては暗黒物質の性質を反映する、重要なパラメータであり、一般に Navarro-Frenk-White 型の、カスプをもつ半径分布で表現できるとされている。しかし多くの銀河団でこの描像は必ずしも観測事実とは一致せず、全重力質量が中心銀河と全銀河団という、階層構造をもつ徴候が強い。昨年、Gu らが Abell 1795 銀河団でこのことを検証した [4] のに続き、今年度は西田らが、「すざく」で観測した Ophiuchus 銀河団のデータを解析したところ、図 6.1.8 に示すように、やはり全重力質量は、銀河団と銀河という明らかな階層構造をもつことが判明した。小さい方の構

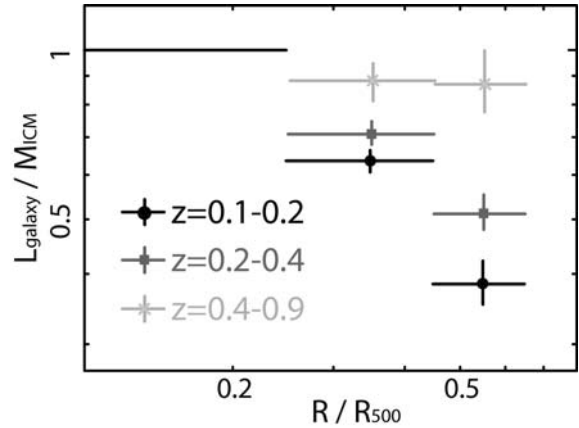


図 6.1.7: Circularly integrated galaxy light profiles of clusters of galaxies, normalized to circularly integrated mass of their X-ray emitting plasmas. Results on 34 clusters have been averaged into three subgroups with different redshifts. In nearer (hence older) clusters, the member galaxies are more strongly concentrated to the central region of their plasma spheres.

造は中心銀河に付随しており、星などのバリオンの寄与が大きいと思われる。

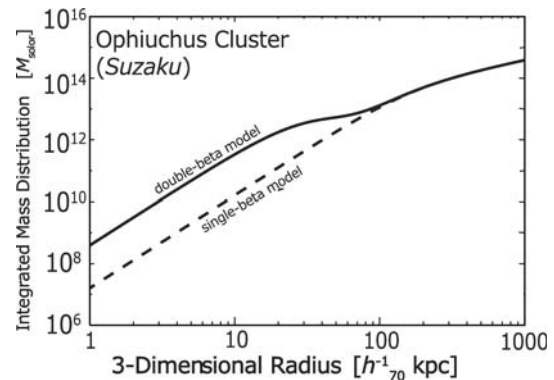


図 6.1.8: A spherically integrated profile of the total gravitating mass in the Ophiuchus cluster of galaxies. A solution based on a hierarchical potential model is indicated by a solid curve, of which the contribution of the larger component is shown by the dashed line.

○ 銀河団の周辺部

銀河団の中心とともに、それらの周辺部も、宇宙論の実験室として重要である。中澤らは今年度、宇宙研の川原田、首都大の赤松、東京理科大の佐藤や松下らと協力し、「すざく」を用いた銀河団周辺部の研究を進めた [6, 109, 66]。その結果、銀河団の周辺部にかけてプラズマ温度が低下するという現象が、広く見られることを確認しつつある。

Sengul らは中心銀河をもたない Aell 2147 銀河団の XMM-Newton のデータを解析した結果、ここでも同様に外縁部での温度の低下を確認することができた [48, 83]。したがって外縁部でのプラズマの振

舞いは、中心 cD 銀河の有無とは独立に見られる、銀河団の広範な特徴となりつつある。

6.1.5 ASTRO-H 衛星計画

○ ASTRO-H 衛星とその搭載装置

ASTRO-H 衛星は、米国 NASA および欧州 ESA などとの国際協力を含め、オールジャパンの体制で開発が進められている、次世代の宇宙 X 線衛星で、「すざく」の後継機となる。機上には、1–10 keV 域で X 線エネルギーを数 eV の精度で測定する X 線マイクロカロリメータ、5–80 keV で集光できる 2 台のスーパーミラー硬 X 線望遠鏡 (HXT)、その焦点面に置かれる硬 X 線イメージャー (HXI)、1 台の軟 X 線望遠鏡とその焦点面に置かれる広視野の X 線 CCD、60–600 keV で働く軟ガンマ線検出器 (SGD) が搭載される。これらの協力により、ASTRO-H は広帯域、高感度、高精度での分光観測を得意とし、高エネルギー宇宙物理学に大きな貢献を行なう。

ASTRO-H は長さ 14 m、重さ 2.7 t と日本最大の科学衛星で、HIIA ロケットにより打ち上げられる。当初は 2014 年初め (2013 年度末) の打ち上げを予定していたが、東日本大震災により、JAXA つくば宇宙センターの試験設備に甚大な被害が及んだため、打ち上げは 2014 年の夏に再設定された。

我々は、JAXA ほか国内の大学研究機関、スタンフォード大、フランス CNES などと共同し、中澤および内山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。2011 年度は、試作品の製作と評価を進めつつ、詳細設計審査会 (CDR) をクリアし、衛星搭載品の最終設計を固めた。

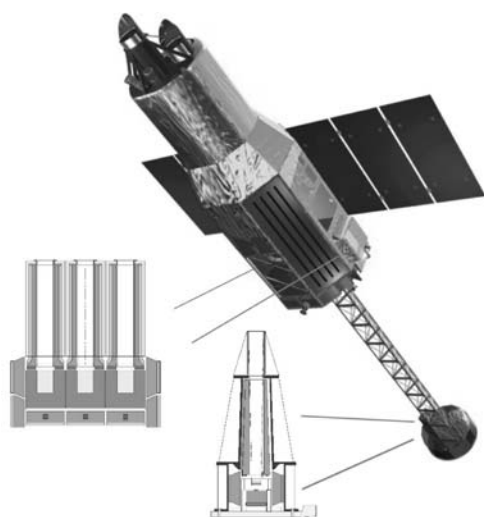


図 6.1.9: Drawing of the ASTRO-H satellite, to be launched in 2014. The overall length is 14 m, and the weight is 2.7 t. Also plotted are cross sectional views of the HXI (right: 40 cm tall) and SGD (left: 50 cm tall). Two identical units of each instrument are mounted.

○ HXI と SGD [74, 77, 87, 89, 102, 115, 118]

HXI は、5–70 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 6.1.9 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と 1 段の両面 CdTe ストリップ検出器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 6.1.9 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 の帯域で動作し、数度の角度分解能を持つ。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。

○ HXI および SGD の機構開発 [90, 121]

我々は、HXI および SGD 検出器部の、機構開発で中心的な役割を担っている。中澤は昨年続き、炭素繊維強化プラスチックを用いた、HXI および SGD のハウジング構造の設計を進め、HXI ハウジングの試作品がスーパーレジン工業 (株) により製造された。内山、笹野、中野らを中心に、HXI/SGD 双方の感度向上の鍵を握る BGO シールドの構造開発を進め、図 6.1.10(上) のように、数回の振動試験を行ない、設計の健全性を確認した。こうして確立した BGO シールド部の設計と製造方法は、搭載品の製造メーカーである三菱重工に技術移転した。

○ HXI および SGD の熱設計 [41, 76, 116, 119, 125]

HXI と SGD は、主検出部に Si や CdTe、アクティブシールド部には APD など、多くの半導体素子を用いるため、検出器の全体を -20°C 程度まで放射冷却する必要がある。ところが両装置ともかなりの内部発熱をもち、加えてどちらも衛星構体の外に搭載せざるをえず、そのため直射日光や地球赤外線を浴び、日陰では冷たい宇宙空間を見ることになる。対流のない宇宙空間で、所期の低温を達成しつつ、軌道周回や姿勢お変更に伴う温度変動を小さく抑えるには、両装置ともに慎重な熱設計が求められる。

我々は野田らを中心としてこの困難な課題に取り組み、素材を機械的と熱的観点から最適に選ぶこと、グラファイトシートや銅の柱を熱伝導素子として用いること、放射遮蔽材 (MLI) を高性能化することなど、数々の改良を行なった。数値計算と実験室測定を併用することで、ほぼ満足のゆく熱設計に到達しつつある。しかし数値計算には、接触伝熱などの不定要素がつきまとう。そこで実機に近い熱的ダミーを製作し、三菱重工とともに図 6.1.10(下) のように真空チェンバーを用いた実証試験を繰り返し、搭載品の最終設計を固めつつある。

○ アクティブシールド部の開発

HXI や SGD の感度を究極に左右するものが、ア



図 6.1.10: Tests at ISAS/JAXA. (top) A vibration test for a BGO block used in the SGD, performed on 2011 September 9. (bottom) A thermal dummy of the HXI detector, about to be tested inside a vacuum chamber.

クティブシールドの性能である。これは主検出部を複数の BGO シンチレータで隙間なく囲み、その発光をアバランシェフォトダイオード (APD) で個々に読み出し、禁止信号を生成することで達成される。高品位 BGO 結晶は、ESA の協力により、ロシア無機化学研究所から供給されつつある。

BGO は屈折率が 2.15 と極めて高く、蛍光光子が内部に閉じ込められやすく、しかも用いる APD が 1 cm 角と小さいため、シンチレーション光を効率よく読み出すことが重要である。昨年の西岡に続き、笹野らは、実験室用に試作した結晶や、HXI や SGD の EM (Engineering Model) 品の結晶を実測し、さらに GEANT4 によるモンテカルロシミュレーションを組み合わせて、この問題に取り組んで来た [46, 72, 122]。その結果、図 6.1.11 のように、結晶から読み出す光量 L (1 cm 立方の結晶の値で規格化) の逆数は、結晶の体積 V と、APD を取り付ける結晶面の面積 A_r との一次関数になるという、美しいスケーリング則を発見し、その物理的な解釈にも成功した。これにより BGO アクティブシールド搭載品の性能を、良い精度で推定できるようになった。笹野、内山、西田らはまた、ロシアから到着した多数の結晶の受け入れ試験として、外観、寸法、重量の測定や、ガンマ線源を照射した時の発光量の測定を続けている。

鳥井、笹野らは、広島大、早大などと協力し、アクティブシールドの信号処理部 (APMU) の開発と試験を行ってきた [93, 106, 120, 113, 114]。そのた

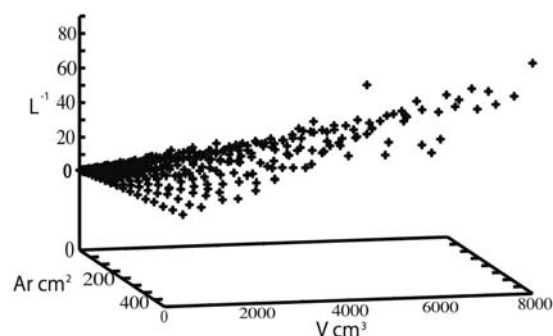


図 6.1.11: Behavior of light output L from large BGO crystals as read out using a $1 \times 1 \text{ cm}^2$ APD, derived with numerical simulations (crosses) and experiment (not shown). V is the scintillator volume, while A_r is the BGO surface area where the APD is attached.

め図 6.1.12 に示すように、APD 読み出しの BGO シンチレータ、プリアンプ、波形整形器、ADC、デジタル信号処理システムなどを組み合わせ、アクティブシールド全体のブレッドボードモデルを作成した。これを用い、陽子や鉄イオンなど荷電高粒子による巨大信号や、仕様素材の放射化に伴うハイレート信号に耐えるよう、アナログ回路設計やデジタル信号処理の最適化を行っている。今後は、このアクティブシールドと主検出部 (イメージャ) を組み合わせた試験を行って、バックグラウンドの除去性能を検証し、最終的に搭載品の仕様決定を行う予定である。

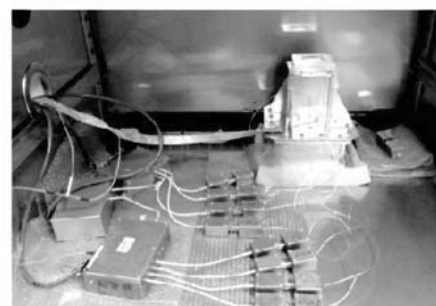


図 6.1.12: Tests of the HXI/SGD active shield system. (top) The read-out electronics. (bottom) A breadboard model detector with 9 APD readouts, together with charge sensitive amplifiers, all placed inside a thermostatic chamber.

○ HXI 主検出部（イメージャー）の開発

中野らは JAXA と協力し、HXI 主検出部（イメージャー）に用いる、両面 Si ストリップ検出器 (DSSD) の開発を行なってきた [47, 75, 104, 105]。DSSD は N 側にも P 側にも、250 μm 間隔で設けられた幅 150 μm のストリップ列 128 本をもつ。隣接ストリップ間で X 線が検出されたときの挙動を調べるため、試作品に SPring-8 にて 30 keV の細いビームを照射しスキャンしたところ、図 6.1.13 の結果が得られた。すなわち、ストリップ間の約 40 μm の領域では、電荷が両側に分割する現象が見られたが、両方のパルス高トを加算することで、問題なくイベントが再生できることがわかった。この電荷分割領域の幅は、1 次電子の飛程を反映して、X 線エネルギーと正相関することも明らかになった。

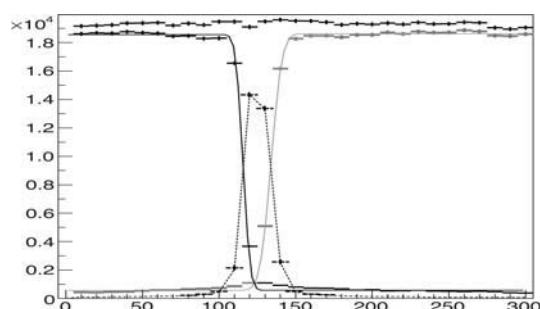


図 6.1.13: A narrow beam scan across a DSSD chip, performed at SPring-8 using an energy of 30 keV. Count rates of a particular strip (solid), and those with the adjacent one (gray), are plotted as a function of cross-strip position (in microns). The dotted data points are split events over the two strips. Summing the pulse heights of the two channels gives the count rates shown at the figure top.

イメージャー部の 1 つの DSSD から出る多チャンネル出力は、イメージャー部に組み込まれた ASIC で読み出され、A/D 変換される。この「HXI フロントエンド部」のデータは、HXI-DPU と呼ばれるファームウェア回路で高速に収集処理され、その出力は、機上の CPU 処理部 (HXI-DE) に転送される。SGD もほぼ同様である。櫻井らは JAXA とともに HXI-DPU の開発に参加し、その性能試験において必要となるシミュレータを開発した [45, 117]。これはフロントエンド部のデジタル出力を模擬する機能をもち、SpaceWire プロトコルに準拠する。櫻井はこの業績により、研究科の研究奨励賞を獲得した [1]。

<受賞>

- [1] 櫻井壮希、理学系研究科研究奨励賞（修士）、東京大学、2012 年 3 月
- [2] Hirofumi Noda: “Studying the Origin of Soft X-ray Excess in AGN with ASTRO-H” ASTRO-H Summer School 2011, poster award

<報文>

(原著論文)

- [3] Manami, T., Kubota, A., Yamada, S., Done, C., Kolehmainen, M., Ueda, Y. & Torii, S.: “The truncated disk from Suzaku data of GX 339-4 in the extremely comptonized very high state”, *Astrophys. J.*, in press (2012)
- [4] Gu, L. Xu, H., Gu, J. Kawaharada, M., Nakazawa, K., Qin, Z., Wang, J., Wang, Y., Zhang, Z., Makishima, K.: “Two-phase ICM in the Central Region of the Rich Cluster of Galaxies A1795: A Joint *Chandra*, *XMM-Newton*, and *Suzaku* View”, *Astrophys. J.* **749**, id 186 (2012)
- [5] Takahashi, H., Sakurai, S. & Makishima, Kazuo “Rossi X-ray Timing Explorer Observations of the Low-mass X-ray Binary 4U 1608-522 in the Upper-banana State”, *Astrophys. J.* **738**, id 62 (2011)
- [6] Sato, T., Sasaki, T., Matsushita, K., Sakuma, E., Sato, K., Fujita, Y., Okabe, N., Fukazawa, Y., Ichikawa, K., Kawaharada, M., Nakazawa, K. et al.: “Suzaku observations of the Hydra A cluster out to the virial radius”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **64**, in press (2012)
- [7] Sakurai, S., Yamada, S., Torii, S., Noda, H., Nakazawa, K., Makishima, K., Takahashi, H.: “Accretion Geometry of the Low-Mass X-ray Binary Aquila X-1 in the Soft and Hard States”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **64**, in press (2012)
- [8] Yamada, S., Uchiyama, H., Dotani, T., Tsujimoto, M., Katsuda, S., Makishima, K., Takahashi, H., Noda, H., Torii, S., Sakurai, S., Enoto, T. et al.: “Data-oriented Diagnostics of Pileup Effects on the Suzaku XIS”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **64**, in press (2012)
- [9] Akamatsu, H., Takizawa, M., Nakazawa, K., Fukazawa, Y., Ishisaki, Y. & Ohashi, T.: “X-Ray View of the Shock Front in the Merging Cluster Abell 3376 with Suzaku”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **64**, in press (2012)
- [10] Chernyshov, D.O., Dogiel, V.A., Nobukawa, M., Tsuru, T. G., Koyama, K., Uchiyama, H., & Matsumoto, H.: “Spatial and Temporal Variations of the Diffuse Iron 6.4 keV Line in the Galactic Center Region”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **64**, Article No.14 (2012)
- [11] Nakahira, S., Koyama, S., Ueda, Y., Yamaoka, K., Sugizaki, M., Mihara, T., Matsuoka, M., Yoshida, A., Makishima, K. et al.: “A Spectral Study of the Black Hole Candidate XTE J1752-223 in the High/Soft State with MAXI, Suzaku, and Swift”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **64**, Article No.13 (2012)
- [12] Noda, H., Makishima, K., Uehara, Y., Yamada, S., Nakazawa, K.: “Suzaku Discovery of a Hard Component Varying Independently of the Power-Law Emission in MCG-6-30-15”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **63**, 449–458 (2011)
- [13] Enoto, T., Makishima, K., Nakazawa, K., Kokubun, M., Kawaharada, M., Kotoku, J. &

- Shibazaki, N.: “Soft and Hard X-Ray Emissions from the Anomalous X-ray Pulsar 4U 0142+61 Observed with Suzaku”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, 387–396 (2011)
- [14] Watanabe, E., Takizawa, M., Nakazawa, K., Okabe, N., Kawaharada, M., Babul, A., Finoguenov, A., Smith, G., P. & Taylor, J., E.: “Suzaku X-ray Follow-up Observation of Weak-lensing-detected Halos in the Field around ZwCl0823.2+0425”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, 357–366 (2011)
- [15] Esposito, P., Israel, G. L., Turolla, R., Mattana, F., Tiengo, A., Possenti, A., Zane, S., Rea, N., Burgay, M., Götz, D., Mereghetti, S., Stella, L., Wieringa, M. H., Sarkissian, J. M., Enoto, T., Romano, P., Sakamoto, T., Nakagawa, Y. E., Makishima, K., Nakazawa, K., Nishioka, H., & Francois-Martin, C.: “Long-term spectral and timing properties of the soft gamma-ray repeater SGR 1833-0832 and detection of extended X-ray emission around the radio pulsar PSR B1830-08”, *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* **416**, 205–215 (2011)
- [16] Tsuchiya, H., Hibino, K., Kawata, K., Hotta, N., Tateyama, N., Ohnishi, M., Takita, M., Chen, D., Huang, J., Miyasaka, M., Kondo, I., Takahashi, E., Shimoda, S., Yamada, Y., Lu, H., Zhang, J. L., Yu, X. X., Tan, Y. H., Nie, S. M., Munakata, K., Enoto, T. & Makishima, K. “Observation of thundercloud-related gamma rays and neutrons in Tibet”, *Phys. Rev. D*, in press (2012)
- [17] Tsuchiya, H.; Enoto, T.; Yamada, S.; Yuasa, T.; Nakazawa, K.; Kitaguchi, T.; Kawaharada, M.; Kokubun, M.; Kato, H.; Okano, M.; Makishima, K.: “Long-duration γ ray emissions from 2007 and 2008 winter thunderstorms”, *J. Geophys. Res.* **116**, ID D09113 (2011)
- Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, すざく + MAXI 合併特集号 (2011)
- [18] Sato, T., Matsushita, K., Ota, N., Sato, K., Nakazawa, K. & Sarazin, C. L.: “Suzaku Observations of Iron K-Lines from the Intracluster Medium of the Coma Cluster”, S991–S1007 (2011)
- [19] Murakami, H., Komiyama, M., Matsushita, K., Nagino, R., Sato, T., Sato, K., Kawaharada, M., Nakazawa et al.: “Suzaku and XMM-Newton Observations of the Fornax Cluster: Temperature and Metallicity Distribution”, S925–S936
- [20] Noda H., Makishima K., Yamada S., Torii S., Sakurai S., & Nakazawa, K.: “Suzaku Studies of Wide-Band Spectral Variability of the Bright Type I Seyfert Galaxy Markarian 509”, S925–S936
- [21] Uchiyama, H., Nobukawa, M., Tsuru, T.G., Koyama, K., & Matsumoto, H.: “Global Distribution of Fe K α Lines in the Galactic Center Region Observed with the Suzaku Satellite”, S903–S911
- [22] Uchiyama, H., Koyama, K., Matsumoto, H., Tibolla, O., Kaufmann, S., & Wagner, S.: “No X-Ray Excess from the HESS J1741–302 Region except a New Intermediate Polar Candidate”, S865–S872
- [23] Nakagawa, Y., Makishima, K., & Enoto, T.: “The Suzaku Discovery of A Hard Power-Law Component in the Spectra of Short Bursts from SGR 0501+4516”, S13–S820
- [24] Torii, S., Yamada, S., Makishima, K., Sakurai, S., Nakazawa, K., Noda, H., Done, C., Takahashi, H. & Gandhi, P.: “Spectral and Timing Studies of Cyg X-1 in the Low/Hard State with Suzaku”, S771–S783
- [25] Yamamoto, T., Sugizaki, M., Mihara, T., Nakajima, M., Yamaoka, K., Matsuoka, M., Morii, M., & Makishima, K.: “Discovery of a Cyclotron Resonance Feature in the X-ray Spectrum of GX 304–1 with RXTE and Suzaku during Outbursts Detected by MAXI in 2010”, S753–S757
- [26] Yamada, S., Makishima, K., Nakazawa, K., Kokubun, M., Kawaharada, M., Kitaguchi, T., Watanabe, S., Takahashi, H., Noda, H., Nishioka, H., Hiragi, K., Hayashi, K., Nakajima, K., Tashiro, M., Sasano, M., Nishino, S., Torii, S., Sakurai, S., Takahashi, T., Mizuno, T., Enoto, T., Yuasa, T., Tanaka, T., Kouzu, T., Nakano, T., et al. “Improvements in Calibration of GSO Scintillators in the Suzaku Hard X-Ray Detector”, S645–S656
- (会議抄録)
- Suzaku 2011: Exploring the X-ray Universe*, AIP Conference Proceedings, Volume 1427
- [27] Enoto, T., Nakagawa, Y.E., Nakano, T., Nishioka, H., Yasuda, T., Terada, T. Sakamoto, T., Makishima, K. and *Suzaku* Magnetar Members: “Recent Suzaku studies of the X-ray emission from magnetars”, 68–75
- [28] Nakano, T., K. Makishima, K., Nakazawa, K., Uchiyama, H. & Enoto, T.: “Attempts toward understanding the formation of magnetars”, 126–128
- [29] Torii, S., Makishima, K., Yamada, S. & Nakazawa, K.: “The *Suzaku* view of Cyg X-1 over the two spectral states”, 129–131
- [30] Nobukawa, M., Ryu, S.G., Nakashima, S., Tsuru, T., G., Koyama, K. and Uchiyama, H. : “Suzaku study of X-ray emission from the molecular clouds in the Galactic center region”, 209–216
- [31] Sawada, M., Nakashima, S., Nobukawa, M., Uchiyama, H. & XIS Team : “An improved correction method for charge transfer efficiency of XIS onboard *Suzaku*”, 245–246
- [32] Kouzu, T., Terada, Y., Tashiro, M. S., Yamada, S., Bamba, A., Yuasa, M., Mori, T., Fukazawa, Y., Enoto, T., Tanaka, T., Shibata, S. & Makishima, K.: “Hard X-ray properties of a variable standard candle, Crab, with the *Suzaku*/HDX”, 265–266

- [33] Fujinaga, T., Mori, K., Kimura, S., Bamba, A., Dotani, T., Ozaki, M., Uchiyama, H., Matsumoto, H., Terada, Y. & Puhhofer, G.: “*Suzaku* observation of the VHE gamma-ray source HESS J1427-608”, 280–281
- [34] Uchiyama, H., Nobukawa, M., Tsuru, T. G., Koyama, K. & Matsumoto, M.: “Wide spatial profiles of Fe K α lines in the Galactic center diffuse X-rays”, 282–283
- [35] Ryu, S.G., Nobukawa, M., Nakashima, S., Tsuru, T., G., Koyama, K. & Uchiyama, H.: “New approach to the past activity of Sagittarius A* from a 3 dimensional view of X-ray reflection nebulae near Sagittarius C”, 284–285
- [36] Yamamoto, T., Mihara, T., Suguzaki, M., Nakajima, M., Yamamoka, K., Matsuoka, M. & Makishima, K.: “*Suzaku* observations of X-ray binary pulsar GX 304-1 triggered by MAXI/GSC in 2010 August”, 302–303
- [37] Sakurai, S., Yamada, S., Nakazawa, K. & Makishima, K.: “Broad-band *Suzaku* spectra of the LMXB Aql X-1 in Soft and Hard States”, 308–309
- [38] Sasano, M., Yuasa, T., Yamada, S., Nakazawa, K. & Makishima, K.: “*Suzaku* studies of SFXT flare mechanisms”, 312–313
- [39] Yoshida, Y., Isobe, N., Mineshige, S., Kubota, A., Mizuno, T. & Makishima, K.: “*Suzaku* observations of two ultraluminous X-ray sources in the nearby spiral galaxy IC 342”, 318–319
- [40] Gu, L., Xu, H. & Makishima, K.: “Two-phase ICM in the central region of the rich cluster of galaxies Abell 1795: A joint *Chandra*, *XMM-Newton*, and *Suzaku* view”, 334–335
- その他の収録
- [41] 野田 博文、内山 秀樹、中澤 知洋、牧島 一夫、川原 田 円、太田 方之、渡辺 伸、国分 紀秀、高橋 忠幸、岩田 直子、小川 博之、大野 雅功、深沢 泰司、田島 宏康: 「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 硬 X 線撮像検出器の熱設計」、第 12 回宇宙科学シンポジウム講演後刷集、P4-00C
- [42] Makishima, K.: “What are being discovered by the forefront cosmic X-ray observations”, *Proc. The 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies* (OMEG11), AIP, in press (refereed)
- (国内雑誌)
- [43] 牧島一夫: 「科学衛星による宇宙 X 線の観測技術」、光技術コンタクト誌 2012 年 2 月号 (日本オプトメカトロニクス協会)
- [44] 高橋忠幸、中澤知洋: 「X 線、 γ 線で探る宇宙の構造と進化」、応用物理学会誌 2012 年 3 月号 (日本応用物理学会)
- (学位論文)
- [45] 櫻井壮希「次期 X 線衛星 ASTRO-H 硬 X 線撮像検出器デジタルデータ処理系の開発と検証」、修士学位論文
- [46] 笹野 理「ASTRO-H 衛星に向けた BGO シンチレータの APD 読み出しとその集光効率」、修士学位論文
- [47] 中野俊男、「X 線衛星 ASTRO-H 搭載用 Si 両面ストリップ検出器の評価と検証」、修士学位論文
- [48] Sengul Ozden, “X-ray Properties of the Non-Cool-Core Cluster Abell 2147”, 修士学位論文
- < 学術講演 >
- (国際会議招待講演)
- [49] Makishima, K.: “Observational Studies of High Energy Astrophysical Objects”, Rashid Snyaeв 教授の京都賞受賞記念ワークショップ (京都国際会館、2011 年 11 月 11 日)
- [50] Makishima, K.: “What are being discovered by the forefront cosmic X-ray observations”, *The 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies* (OMEG11) (理化学研究所、2011 年 11 月 16 日)
- [51] Makishima, K.: “Kamae-sensei’s Gradual “Conversion” to Astrophysics”, Prof. Kamae’s retirement symposium (Stanford, 2011 年 12 月 3 日)
- (国際会議一般講演/ポスター)
- *Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond*, Stanford University, July 20–22 (2011)
- [52] Torii, S., Yamada, S., Nakazawa, K. & Makishima, K.: “The *Suzaku* View of Cyg X-1 over the Two Spectral States”, oral
- [53] Nobukawa, M., Ryu, S.G., Nakashima, S., Tsuru, T., G., Koyama, K. & Uchiyama, H.: “*Suzaku* study of X-ray emission from the molecular clouds in the Galactic center region”, oral
- [54] Nakano, T., Makishima, K., Nakazawa, K., Uchiyama, H. & Enoto, T.: “Attempts toward Understanding the Formation of Magnetars”, oral
- [55] Gu, L., Xu, H., Gu, J., Kawaharada, M., Nakazawa, K., Qin, Z., Wang, J., Wang, Y., Zhang, Z. & Makishima, K.: “A Joint *Chandra*, *XMM-Newton* and *Suzaku* View of Two-Phase ICM of Abell 1795”, poster
- [56] Uchiyama, H., Nobukawa, M., Tsuru, T. G., Koyama, K. & Matsumoto, M.: “Wide spatial profiles of Fe K α lines in the Galactic center diffuse X-rays”, poster
- [57] Sawada, M., Nakashima, S., Nobukawa, M., Uchiyama, H. & XIS Team: “An improved correction method for charge transfer efficiency of XIS onboard *Suzaku*”, poster
- [58] Noda, H., Makishima, K., Yamada, S. & Nakazawa, K.: “*Suzaku* Studies of the Origin of Soft X-ray Excess in Markarian 509”, poster

- [59] Sakurai, S., Yamada, Nakazawa, K. & Makishima, K.: “Broad-band *Suzaku* spectra of the LMXB Aql X-1 in the soft and hard states”, poster
- [60] Sasano, M., Nakajima, K., Yamada, S., Yuasa, T., Nakazawa, K. & Makishima, K.: “*Suzaku* studies of SFXTs”, poster
- [61] Fujinaga, T., Mori, K., Kimura, S., Bamba, A., Dotani, T., Ozaki, M., Uchiyama, H., Matsumoto, H., Terada, Y. & Puhlhofer, G.: “*Suzaku* observation of the VHE gamma-ray source HESS J1427-608”, poster
- [62] Ryu, S.G., Nobukawa, M., Nakashima, S., Tsuru, T.G., Koyama, K. & Uchiyama, H.: “New approach to the past activity of Sagittarius A* from a 3 dimensional view of X-ray reflection nebulae near Sagittarius C”, poster
- *The X-ray Universe 2011*, Berlin, Germany, June 27-30 (2011)
- [63] Sasano, M., Nakajima, K., Yamada, S., Yuasa, T., Nakazawa, K. & Makishima, K.: “*Suzaku* Studies of SFXTs”, oral
- [64] Noda, H., Makishima, K., Yamada, S. & Nakazawa, K.: “*Suzaku* Discovery of a New Variable Component in MCG-6-30-15”, poster
- [65] Sakurai, S., Yamada, Nakazawa, K. & Makishima, K.: “Spectral analysis of LMXB Aql X-1 in soft and hard states with *Suzaku*”, poster
- [66] Kawaharada, M., Okabe, N., Umetsu, K., Takizawa, M., Matsushita, K., Fukazawa, Y., Hamana, T., Miyazaki, S., Nakazawa, K. & Ohashi, T.: “ICM in Cluster Outskirts Affected by Large Scale Structure Discovered in A1689”
- その他の国際会議
- [67] Gu, L., Xu, H., Gu, J., Kawaharada, M., Nakazawa, K., Qin, Z., Wang, J., Wang, Y., Zhang, Z. & Makishima, K.: “Two-Phase ICM in the Central Region of the Rich Cluster of Galaxies Abell 1795: A Joint Chandra, XMM-Newton, and *Suzaku* View”, *Suzaku/Astro-H Cluster workshop* (東京理科大学、2011 年 6 月 11 日).
- [68] Hirofumi Noda: “Studying the Origin of Soft X-ray Excess in AGN with *ASTRO-H*” *ASTRO-H summer school 2011* (熱海、2011 年 8 月 24-26 日)
- [69] Uchiyama, H.: “Study of the Galactic Ridge X-ray Emission with *ASTRO-H* SXI”, *ibid.*
- [70] Gu, L., Inada, N., Nakazawa, K., Konami, S., Kawaharada, M. & Makishima, K.: “Search for Galaxy-ICM Interaction in Rich Clusters of Galaxies”, *Cluster Workshop* (箱根、2011 年 12 月 18-19 日).
- (国内会議/一般講演)
- 日本物理学会・秋季分科会 (2011 年 9 月 16~19 日、弘前大学)
- [71] 玉川徹、山田真也、岩橋孝典、阿佐美ふみ、吉川瑛文、武内陽子、早藤麻美、Jean SwankC、Keith JahodaC、Keith GendreauC、岩切渉、幸村孝由、金子健太、田原謙、高橋忠幸、牧島一夫ほか GEMS/XACT チーム: 「X 線偏光観測衛星 GEMS と偏光観測ロケット実験 XACT の現状 II」、17aSX-1
- [72] 笹野理、西岡博之、奥山翔、中澤知洋、牧島一夫、奥村暁、湯浅孝行、山田真也、片岡淳、深沢泰司ほか: 「Avalanche Photo Diode を用いた大型 BGO 結晶での集光効率の測定」、17pSK-04
- [73] 山田真也、牧島一夫、鳥井俊輔: 「『すざく』衛星によるブラックホール連星 Cygnus X-1 の最新成果」、18aSX-6
- [74] 渡辺伸、田島宏康、深沢泰司 B、内山秀樹、内山泰伸、榎戸輝揚、太田方之、大野雅功、小高裕和、片岡淳 E、川原田円、国分紀秀、佐藤悟朗、高橋弘充、高橋忠幸、田代信、田中孝明、寺田幸功、中澤知洋ほか ASTRO-H SGD チーム: 「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器 (SGD) の開発の現状」、18aSX-7
- [75] 道津匡平、深沢泰司、水野恒史、高橋弘充、西野翔、林克洋、朴寅春、田島宏康、田中孝明、榎戸輝揚、斉藤新也、渡辺伸、国分紀秀、高橋忠幸、太田方之、福山太郎、中澤知洋ほか HXI/SGD チーム: 「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載軟ガンマ線検出器用 Si 検出器の開発」、18aSX-7
- [76] 野田博文、牧島一夫、中澤知洋、田島宏康、田中孝明、榎戸輝揚、高橋忠幸、国分紀秀、渡辺伸、小川博之、岩田直子、深沢泰司ほか SGD チーム: 「X 線衛星 ASTRO-H 搭載 軟 γ 線検出器の熱設計」、18pSX-9
- [77] 国分紀秀、川原田円、佐藤悟朗、渡辺伸、大野雅功、田中康之、太田方之、高橋忠幸、中澤知洋、内山秀樹、牧島一夫ほか HXI/SGD チーム: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の開発」、18pSX-11
- 日本天文学会・秋季年会 (2011 年 9 月 22 日~24 日、鹿児島大学)
- [78] 中野俊男、牧島一夫、中澤知洋、内山秀樹、榎戸輝揚: 「マグネター特性年齢の過大評価と磁場の減衰」、J18a
- [79] 櫻井 壮希、鳥井 俊輔、中澤 知洋、牧島 一夫、山田 真也: 「『すざく』による Aql X-1 のソフト/ハード状態における降着流の幾何」、J48a
- [80] 鳥井 俊輔、牧島 一夫、山田 真也、櫻井 壮希、中澤 知洋、野田 博文: 「『すざく』を用いたハード/ソフト状態における Cyg X-1 の系統解析」、J60a、
- [81] 内山秀樹、牧島一夫: 「『すざく』による天の川銀河拡散 X 線放射の高統計スペクトルの研究」、Q14b、
- [82] 野田 博文、牧島 一夫、山田 真也、中澤 知洋: 「『すざく』で迫る I 型セイファート銀河 Markarian 509 の軟 X 線超過の起源」、S46a
- [83] Sengul, O., Gu, L. & Makishima, K.: “Thermal Conditions at the Central Regions of non-cD Clusters (3)”, T03a
- [84] 西田 瑛量、牧島 一夫、中澤 知洋、内山 秀樹、Gu liyi、古澤 彰浩: 「『すざく』を用いたへびつかい座銀河団の重力ポテンシャル形状の解析」、T10a

- [85] Gu, L., Inada, N., Nakazawa, K., Konami, S., Kawaharada, M., & Makishima, K.: “Investigation of Interactions Between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters”, T11a
- [86] Gu Liyi & Xu Haiguang: “A Chandra Study of Temperature Substructures in Intermediate-redshift Galaxy Clusters”, T12b
- [87] 中澤知洋、牧島一夫、内山秀樹、国分紀秀、渡辺 伸、高橋忠幸、太田方之、小高裕和、川原田 円、佐藤 悟朗、武田伸一郎、湯浅孝行、田島宏康、深沢 泰司ほか:「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の現状～FM 製造へ向けて～」、W62a
- [88] 萩野浩一、福山太郎、小高裕和、佐藤悟朗、渡辺伸、国分紀秀、高橋忠幸、田島宏康、田中孝明、榎戸輝揚、中澤知洋ほか:「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器の応答とイベント処理の研究」、W63a
- [89] 深沢泰司、田島宏康、渡辺伸、水野恒史、高橋弘充、大野雅功、内山泰伸、榎戸輝揚、田中孝明、太田方之、小高裕和、川原田円、国分紀秀、佐藤悟朗、高橋忠幸、湯浅孝行、武田伸一郎、森國城、内山秀樹、中澤知洋、牧島一夫ほか:「ASTRO-H 搭載軟ガンマ線検出器 (SGD) の開発現状」、W65a
- [90] 木村太輔、水野恒史、深沢泰司、吉田道利、植村誠、川端弘治、秋田谷洋、松本浩典、田島宏康、牧島一夫、中澤知洋、中島健太、鳥井俊輔、高橋忠幸ほか:「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器用ファインコリメータの試作品性能評価」、W66s
- [91] 朴寅春、道津匡平、深沢泰司、水野恒史、高橋弘充、西野翔、林克洋、田島宏康、田中孝明、榎戸輝揚、渡辺伸、国分紀秀、高橋忠幸、太田方之、福山太郎、斉藤新也、中澤知洋ほか:「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載軟ガンマ線検出器用 Si 検出器の開発 (2)」、W68a
- [92] 平木一至、水野恒史、深沢泰司、小高裕和、佐藤 有、渡辺 伸、国分紀秀、高橋忠幸、中澤 知洋、下浦 享、中平聡志ほか:「モンテカルロシミュレーションを用いた ASTRO-H 半導体コンプトンカメラの放射化バックグラウンドの評価 (2)」、W69a
- [93] 吉野将生、齋藤龍彦、中森健之、片岡淳、国分紀秀、渡辺伸、大野雅功、湯浅孝行、高橋忠幸、森國城、西岡博之、笹野理、中澤知洋、牧島一夫ほか:「ASTRO-H 搭載 BGO シールド用 APD センサ及びアナログシステムの開発」、W70a
- [94] 後藤国広、松岡正之、高橋弘充、大野雅功、深沢泰司、湯浅孝行、国分紀秀、高橋忠幸、中澤知洋ほか:「ASTRO-H 衛星搭載 BGO アクティブシールドの信号処理におけるデジタルフィルタの最適化」、W71a
- [95] 杉田聡司、山岡和貴、深沢泰司、大野雅功、高橋拓也、上原岳士、花畑義隆、田代信、寺田幸功、岩切渉、高原一紀、安田哲也、中川友進、高橋忠幸、国分紀秀、山内誠、大森法輔、秋山満、牧島一夫、中澤知洋ほか:「すざく衛星搭載硬 X 線検出器広帯域全天モニタ部 (HXD-WAM) の現状 IIX」、W73a
- 日本天文学会・春季年会 (2012 年 3 月 19 日～22 日、龍谷大学)
- [96] 牧島一夫、顧 力意、稲田直久、中澤知洋、小波さおり、川原田 円、北口貴雄:「Interactions Between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters I」, A05a
- [97] Gu, L., Makishima, K., Inada, N., Nakazawa, K., Konami, S., Kawaharada, M. & Kitaguchi, T.: “Interactions Between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters II”, A06a
- [98] 川原田 円、岡部信広、田村隆幸、藤田裕、滝沢元和、松下恭子、佐藤浩介、太田直美、中澤知洋、大橋隆哉:「ASTRO-H で診る銀河団の進化に伴う銀河団ガスの加熱と粒子加速」、B10a
- [99] 野田 博文、牧島 一夫、中澤 知洋、山田 真也:「X 線天文衛星 ASTRO-H で確立する AGN センtral エンジンの新描像」、B29a
- [100] 山田真也、牧島一夫、玉川 徹、寺島雄一、根来 均、鳥井俊介、野田博文、Poshak Gandhi:「ASTRO-H 衛星と X 線偏光衛星 GEMS で迫るブラックホールの激しい時間変動の起源」、B32a
- [101] 内山秀樹、牧島一夫:「『すざく』による天の川銀河拡散 X 線放射の空間依存性の研究」、R02a
- [102] 渡辺伸、田島宏康、深沢泰司、太田方之、小高裕和、川原田円、国分紀秀、佐藤悟朗、高橋忠幸、武田伸一郎、森國城、湯浅孝行、水野恒史、高橋弘充、大野雅功、内山泰伸、榎戸輝揚、田中孝明、Roger Blandford、Grzegorz Madejski、内山秀樹、中澤知洋、牧島一夫ほか:「ASTRO-H SGD チーム:「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器 (SGD) の開発現状」、W102a
- [103] 原山淳、川原田円、渡辺伸、太田方之、国分紀秀、高橋忠幸、田島宏康、深沢泰司、中澤知洋ほか:「ASTRO-H 衛星搭載 HXI/SGD の電源制御回路部 (CPMU) の開発」、W107a
- [104] 林 克洋、朴 寅春、西野 翔、安田 創、大杉 節、深沢泰司、水野恒史、高橋弘充、大野雅功、遠藤 暁、田島宏康、田中孝明、国分紀秀、渡辺 伸、太田 方之、高橋忠幸、中澤知洋ほか:「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載硬 X 線撮像用シリコンストリップ検出器の放射線耐性評価」、W116a
- [105] 萩野浩一、中野俊男、小高裕和、佐藤悟朗、渡辺伸、国分紀秀、高橋忠幸、中澤知洋、牧島一夫ほか:「ASTRO-H 衛星搭載 HXI 用両面ストリップ検出器の応答の研究」、W117a
- [106] 吉野将生、齋藤龍彦、溝間青樹、中森健之、片岡淳、後藤国広、松岡正之、高橋弘充、大野雅功、深沢泰司、渡辺伸、国分紀秀、高橋忠幸、森國城、笹野理、鳥居俊輔、中澤知洋、牧島一夫ほか:「ASTRO-H 衛星搭載 BGO シールド統合試験に向けたアナログ信号処理部の検証」、W118a
- 日本物理学会・春季大会 (2012 年 3 月 24～27 日、関西学院大学)
- [107] 岩田憲、土屋晴文、榎戸輝揚、山田真也、湯浅孝行、川原田円、北口貴雄、中澤知洋、国分紀秀、加藤博、岡野 治、牧島一夫:「2009 年および 2010 年における雷や雷雲からの放射線観測」、24pGF-13

- [108] 穀山渉、安東正樹、森脇成典、石徹白晃治、高橋走、新谷昌人、麻生洋一、高島健、中澤知洋、高橋忠幸、国分紀秀、吉光徹雄、小高裕和、湯浅孝行、石川毅彦、榎戸輝揚、苔山圭以子、坂井真一郎、佐藤修一、高森昭光、坪野公夫、戸田知朗、橋本樹明：「宇宙実験実証プラットフォーム (SWIM) を用いた超小型重力波検出器の開発 X (観測成果)」、24pGJ-12
- [109] 西田 瑛量、牧島 一夫、中澤 知洋、内山 秀樹、古澤 彰浩：「X 線衛星「すざく」によるへびつかい座銀河団の重力質量分布の推定」、25aGJ-8
- [110] 内山秀樹、牧島一夫：「『すざく』長時間観測アーカイブデータを用いた天の川銀河拡散 X 線放射の研究」、25aGJ-10
- [111] 牧島一夫、中野俊男、中澤知洋、内山秀樹、笹野理、榎戸輝揚：「磁気エネルギーの解放を考慮した超強磁場中性子星の年齢推定 (1)」、25aGJ-11
- [112] 中野俊男、牧島一夫、中澤知洋、内山秀樹、笹野理、榎戸輝揚：「磁気エネルギーの解放を考慮した超強磁場中性子星の年齢推定 (2)」、25aGJ-12
- [113] 後藤国広、松岡正之、高橋弘充、大野雅功、深沢泰司、湯浅孝行、国分紀秀、高橋忠幸、中澤知洋 B、吉野将生、齋藤龍彦、中森健之、片岡淳、田島宏康ほか HXI/SGD チーム：「ASTRO-H 衛星搭載の硬 X 線・軟ガンマ線検出器シールド部における信号処理用デジタルフィルタ開発」、25pFB-4
- [114] 齋藤龍彦、吉野将生、溝間青樹、中森健之、片岡淳、後藤国広、松岡正之、高橋弘充、大野雅功、深沢泰司、渡辺伸、国分紀秀、高橋忠幸、森國城、笹野理、鳥井俊輔、中澤知洋、牧島一夫、田島宏康ほか HXI/SGD チーム：「ASTRO-H 衛星搭載 BGO シールド統合試験に向けたアナログ信号処理部の検証」、26pGJ-1
- [115] 川原田円、国分紀秀、佐藤悟朗、渡辺伸、田中康之、太田方之、湯浅孝行、小高裕和、高橋忠幸、中澤知洋、内山秀樹、牧島一夫ほか HXI/SGD チーム 26pGJ-3
- [116] 野田 博文、内山 秀樹、中澤 知洋、牧島 一夫、川原 田 円、太田 方之、渡辺 伸、国分 紀秀、高橋 忠幸、岩田 直子、小川 博之、大野 雅功、深沢 泰司、田島 宏康：「次期 X 線衛星 ASTRO-H 搭載の硬 X 線撮像検出器の熱設計」、26pGJ-4
- [117] 櫻井壮希、中澤知洋、牧島一夫、小高裕和、湯浅孝行、佐藤 有、齋藤新也、渡辺 伸、国分紀秀、高橋忠幸、高橋弘充、田島宏康：「次期 X 線衛星 ASTRO-H 搭載硬 X 線撮像検出器におけるイベントデータ処理機能の検証」、26pGJ-5
- [118] 田島宏康、深沢泰司、渡辺伸、内山秀樹、内山泰伸、榎戸輝揚、太田方之、大野雅功、小高裕和、片岡淳 E、川原田円、国分紀秀、佐藤悟朗、高橋忠幸、高橋弘充、武田伸一郎、田代信、田中孝明、寺田幸功、中澤知洋、中森健之、Roger Blandford D、牧島一夫ほか SGD チーム：「Astro-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器の開発」、26pGJ-8
- [119] 大野雅功、上野一誠、深沢泰司、田島宏康、野田博文、中澤知洋、牧島一夫、太田方之、渡辺伸、国分紀秀、高橋忠幸、岩田直子、小川博之ほか SGD チーム：「X 線衛星 ASTRO-H 搭載軟ガンマ線検出器システムの熱設計と検証」、26pGJ-9
- [120] 鳥井 俊輔、笹野 理、西田 瑛量、中澤 知洋、牧島一夫ほか：「硬 X 線撮像検出器 HXI に向けたアクティブシールド機能の検証実験」、26pGJ-12
- [121] 木村太輔、水野恒史、深沢泰司、吉田道利、植村誠、川端弘治、秋田谷洋、北村唯子、松本浩典 A、田島宏康、石橋和紀 B、森英之、宮澤拓也、酒井理人、坂廻果林、牧島一夫、中澤知洋、高橋忠幸ほか HXI/SGD チーム：「衛星搭載軟ガンマ線検出器用高精度金属コリメータの性能評価」、26pGJ-12
- [122] 笹野理、西岡博之、奥山翔、中澤知洋、牧島一夫、奥村暁、湯浅孝行、山田真也、片岡淳、深沢泰司ほか：「APD による衛星搭載用大型 BGO 結晶の測定」、27aGC-4
- その他の国内研究集会
- [123] 牧島一夫：「すざく、MAXI、ASTRO-H」、ビッグバンセンター第 11 回サマースクール (久住高原、2011 年 7 月 25 日)
- [124] Gu, L., Inada, N., Kodama, T., Nakazawa, K., Konami, S., Kawaharada, M., & Makishima, K.: "Interactions Between Galaxies and Hot Plasmas", RESCEU 研究交流会 (本郷、2011 年 11 月 17 日)
- [125] 野田 博文、内山 秀樹、中澤 知洋、牧島 一夫、川原 田 円、太田 方之、渡辺 伸、国分 紀秀、高橋 忠幸、岩田 直子、小川 博之、大野 雅功、深沢 泰司、田島 宏康：「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 硬 X 線撮像検出器の熱設計」、第 12 回宇宙科学シンポジウム (宇宙科学研究所、2012 年 1 月 5-6 日)
- [126] 中澤知洋、高橋忠幸、釜江常好、国分紀秀、高島健、田島宏康、田代信、玉川徹、寺田幸功、能町正治、深沢泰司、牧島一夫、水野恒史、三谷烈史、吉光徹雄、渡辺伸 ほか：「高感度ガンマ線望遠鏡 CAST 計画」、第 12 回宇宙科学シンポジウム (宇宙科学研究所、2012 年 1 月 5-6 日)
- [127] 牧島一夫：「X 線観測分野からのコメント」第 2 回 CRC タウンミーティング (東工大岡山キャンパス、2012 年 1 月 11 日)
- [128] 野田 博文「X 線観測で明らかにする活動銀河核セントラルエンジンの新描像」京都大学 基研、天体核 GCOE 研究会: Multi-Messenger Astronomy で迫るコンパクト天体 (2012 年 2 月 23-24 日 京都大学)
- [129] 中澤知洋、高橋忠幸、釜江常好、国分紀秀、高島健、田島宏康、田代信、玉川徹、寺田幸功、能町正治、深沢泰司、牧島一夫、水野恒史、三谷烈史、吉光徹雄、渡辺伸 ほか：「高感度ガンマ線望遠鏡 CAST 計画」(招待講演)、高宇連シンポジウム (奈良女子大、2012 年 3 月 28-30 日)
- (セミナー、談話会)
- [130] 牧島一夫：「X 線で探るコンパクト天体～『すざく』から ASTRO-H へ～」、天文・天体物理若手 夏の学校 (愛知県蒲郡、2011 年 8 月 3 日)
- [131] Gu, L., Inada, N., Kodama, T., Nakazawa, K., Konami, S., Kawaharada, M., & Makishima, K.: "Evolution of galaxy light and ICM distributions in galaxy clusters", 東京大学天文学教育研究センター 談話会 (三鷹、2011 年 10 月 17 日)

- [132] 野田博文：「X 線観測で探る AGN セントラルエンジン」、東京大学天文学教室談話会（2011 年 11 月 15 日）
- [133] 野田博文：「X 線観測で迫る AGN セントラルエンジンの新描像」東京大学天文学研究教育センター談話会（三鷹、2011 年 12 月 8 日）
- [134] Gu, L., Inada, N., Kodama, T., Nakazawa, K., Konami, S., Kawaharada, M., & Makishima, K.: “Interactions Between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters”, 国立天文台談話会（三鷹、2012 年 1 月 31 日）
- [135] Gu, L., Inada, N., Kodama, T., Nakazawa, K., Konami, S., Kawaharada, M., & Makishima, K.: “Search for Galaxy-ICM Interaction in Rich Cluster of Galaxies”, JAXA 宇宙科学研究所（相模原、2012 年 3 月 1 日）
- [136] Gu, L., Inada, N., Kodama, T., Nakazawa, K., Konami, S., Kawaharada, M., & Makishima, K.: 東京大学天文学教室談話会（本郷、2012 年 3 月 13 日）
- （一般向け講演、テレビ番組）
- [137] 牧島一夫：「宇宙の大きさを考えよう」、日本舞踊協会＋理化学研究所「かぐや新作講演会コラボレーション」（国立劇場、2011 年 7 月 16 日）
- [138] 牧島一夫：「最新の宇宙像を学ぼう～ビッグバン・ブラックホール・暗黒物質と暗黒エネルギー～」、埼玉県立川越高校スーパーサイエンスハイスクール講演会（2011 年 7 月 30 日）
- [139] 牧島一夫：NHK(BS プレミアム) コズミックフロント「驚異！ブラックホール 頭脳がみつけた奇妙な天体」に出演（2011 年 11 月 15 日放映）
- [140] 牧島一夫：「ビッグバンとブラックホールとロケット」、文京区子ども科学カレッジ第 1 回（文京区教育センター、2012 年 4 月 14 日）
- [141] 牧島一夫：NHK(E テレ) サイエンス ZERO 「謎の天体ブラックホールを解き明かせ！」に出演（2012 年 4 月 29 日放映）

6.2 高瀬研究室

高瀬研究室では、主に柏キャンパスの TST-2 装置を用い、核融合発電の実現を目標に、「トカマク」と呼ばれるトーラス型プラズマの研究を行っている。特に磁場によるプラズマ閉じ込め効率の指標である β (= プラズマ圧力/磁場圧力) を高くとれる球状トカマク (ST) 方式による核融合炉の経済性向上を目指している。TST-2 のプラズマ大半径、小半径はおよそ 0.38 m, 0.25 m であり、最大プラズマ電流、最大磁場はおよそ 120 kA, 0.3 T である。トカマクプラズマを閉じ込め、維持するには、プラズマを加熱しつつ、プラズマ中にトーラス大周方向の電流 (プラズマ電流) を駆動する必要がある。電流駆動の有力な方法として高周波 (RF) 波動を使う方法があり、当研究室では 3 つの周波数帯の波動を使った加熱・電流駆動の原理実証実験を行っている。また、RF 加熱・電流駆動の実測に向けた平衡解析・レーザートムソン散乱計測の開発等を進めている。一方、トカマクプラズマは遠非平衡物理系の典型例であり、その輸送現象は微視的乱流揺動に支配されている。乱流の理解と制御法の確立はプラズマ閉じ込めの高性能化に不可欠であるため、乱流揺動の詳細計測および分析を通じて乱流揺動の物理解明とその制御を目指している。

6.2.1 TST-2 実験

RF 電流駆動実験

TST-2 において周波数 200 MHz の RF 波動を用いたプラズマ電流 (I_p) 立ち上げ実験を行っている。この周波数はトカマクで電流駆動の実績のある「低域混成波 (LHW)」と呼ばれる波の周波数帯に相当する。今年度は 200 MHz の「速波 (FW)」進行波を励起できるコムラインアンテナを用いて実験を行い、垂直磁場と RF パワーの緩やかな増加に合わせて $I_p = 15$ kA を達成した。RF 波動がどのような物理機構で電流駆動に寄与しているのかを明らかにするため、様々なエネルギー帯の X 線計測を行った結果、軟 X 線の計測からは I_p が大きくなるに従って 1 keV 以上のエネルギーを持つ高速電子が増えていくことがわかった。また、図 6.2.1 に示すように、 $I_p > 5$ kA 程度になり、RF 電流駆動効果が重要になってくると、 I_p を担う方向の高速電子からの硬 X 線の放射温度が反対方向の放射温度より大きくなることがわかった。この結果から、方向性を持った低域混成波が電子を一方方向に加速し、電流駆動に寄与していることが示された。このような RF で立ち上げたプラズマ中に静電プローブを挿入し、浮遊電位の測定を行った。浮遊電位とはプローブ電極に電流が流れなくなる電位であり、プラズマ中の高速電子のエネルギーの目安になると考えられる。測定の結果、浮遊電位が真空容器電位に比べマイナス 1 kV に達する場合もみられた。この値は中心ソレノイド (トーラス中心部に位置するコイル) による電磁誘導を用いて立ち上げたプラズマの場合の典型的な値 (マイ

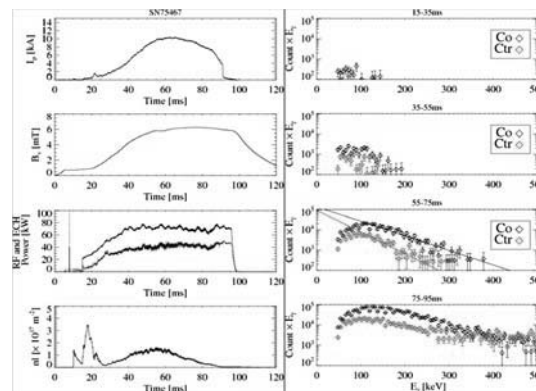


図 6.2.1: Time evolutions of HX spectra (right column) and discharge waveforms (left column) during I_p ramp-up. Black (red) symbols represent HX energy spectra in co- (counter-) directions.

ナス数十ボルト程度) より 1 桁以上大きく、高速電子の存在を示す。図 6.2.2 に示す静電プローブをシャフト回りに回転させて角度分布を測ったところ、大きな異方性が観測され、高速電子には特定方向の流れがあることが明らかとなった。これはアンテナにより励起された波が電子に一方方向の運動量を与えているためと考えられる。TST-2 プラズマ中でどのよ

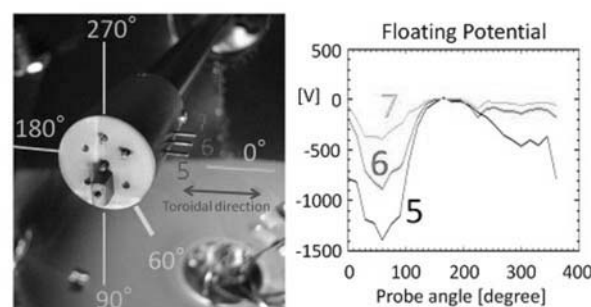


図 6.2.2: Langmuir probe (left), and angular dependence of the floating potential (right).

うな波が励起され、どのように伝搬するかを調べるため、偏波方向を識別できる磁気プローブを作成した。トロイダル方向偏波 (FW に対応) とポロイダル方向偏波 (LHW に対応) の周波数スペクトルの比較より、アンテナは主に FW を励起するが、非線形過程により LHW が励起されていることが示唆された。

LHW 直接励起アンテナの設計・製作

前述のように、FW 進行波を励起するコムラインアンテナを使い、 $I_p = 15$ kA までの電流立ち上げに

成功しているが、最終的な目標は $I_p > 50 \text{ kA}$ 程度までの電流増加を達成し、ST において LHW を用いてプラズマが自発的に I_p を流し自己維持できる状態に接続できることを示すことである。LHW の励起効率を高めるため、LHW 進行波を直接励起できる「グリルアンテナ」の設計、製作を行い、設置を完了した (図 6.2.3)。グリルアンテナは位相差をつけた導波管列で構成されるが、磁場の低い ST ではサイズが大きくなりすぎるという問題があった。そこで導波管内に誘電体を充填することにより波長を短くし、アンテナの寸法を小さくする工夫をした。これまでに、導波管間の位相差を調整することでプラズマへの波動励起効率が変わることがわかっており、反射率を 15% まで下げることができている。また、最大 50 kW の電力を入射し、 $I_p = 5 \text{ kA}$ までの電流立ち上げを達成している。

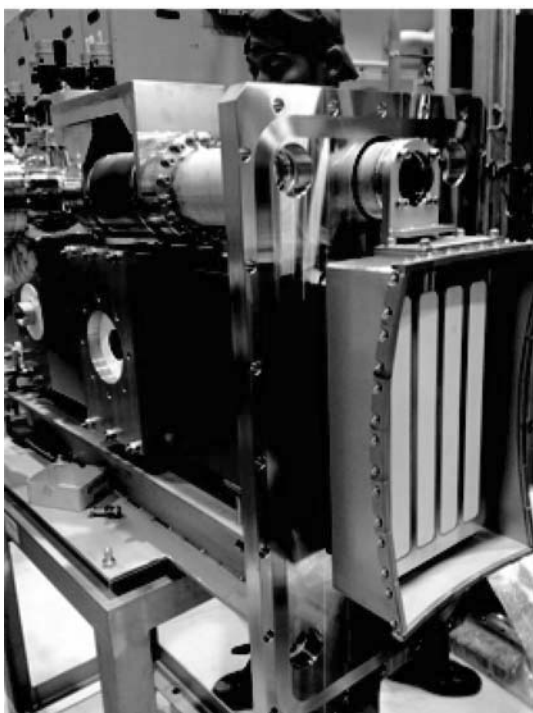


図 6.2.3: The new dielectric-loaded waveguide array antenna (“grill antenna”).

マイクロ波による ST プラズマ生成実験

LHW のプラズマ中心部への伝搬を確保するため、これまで使われていた磁場 ($\sim 0.1 \text{ T}$) よりも高い磁場 ($\sim 0.3 \text{ T}$) が必要である。これまでは 2.45 GHz のマイクロ波を使って初期プラズマを生成していたが、磁場の増加に伴い 8.2 GHz のマイクロ波を使う必要がある。8.2 GHz の電磁波は、本研究室から約 20 m 離れた研究室から伝送するので、損失を少なくするよう TST-2 までの導波管伝送路を設計し、敷設した。

真空容器内に入射するための真空窓には反射をなくすため反波長の厚みのアルミナを用いた。プラズマ中に入射するためのホーンアンテナは 8.2 GHz のサイクロトロン共鳴面に接するよう入射するため指向性を持たせた設計とした。8.2 GHz で生成されたプラズマでは従来の 2.45 GHz で生成されたプラズマに比べ約 1 桁高い密度 ($\sim 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$) を得ることができる。これは 8.2 GHz のカットオフ密度が約 1 桁高いためである。また、8.2 GHz では 2.45 GHz に比べ約 2 倍の出力が得られるため、より大きな I_p を得ることができた。図 6.2.4 に $I_p = 4.5 \text{ kA}$ の時の平衡配位を示す。マイクロ波で生成・維持された平衡の特徴はポロイダルベータ (プラズマ圧力のポロイダル磁場圧力に対する比) が 1 より大きいこと、電流密度がトーラスの弱磁場側にピークを持つことである。

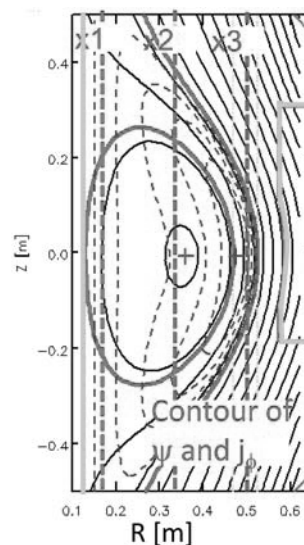


図 6.2.4: Reconstructed equilibrium of an ST plasma formed by 8.2 GHz microwave, showing flux surfaces (black/red) and contours of current density. Vertical dashed lines indicate fundamental (x1), second harmonic (x2) and third harmonic (x3) electron cyclotron resonance layers.

プラズマ乱流測定

プラズマ中に揺らぎが存在すると、プラズマ中の荷電粒子は電場揺らぎによる $E \times B$ ドリフト運動に半径方向の粒子速度揺らぎが生じ、半径方向に粒子輸送を引き起こす。これは異常輸送と呼ばれ、プラズマの閉じ込め性能を悪化させる原因となる。このためプラズマ中における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。TST-2 の高い実験機動性を活かし、ショット数を増やすことで統計精度を高めた乱流研究が可能である。揺らぎに

よる粒子輸送は密度揺らぎと電位揺らぎの相関と位相に依存するため、実験的に乱流輸送を同定するには、各種揺らぎの波数や周波数、あるいはそれらの揺らぎの間の相関を計測する必要がある。種々のプラズマ閉じ込め装置における周辺部揺動計測で、乱流揺動のパワースペクトルや揺動の輸送への寄与について、ポロイダル断面上における非一様性が報告されている。揺動のポロイダル非対称性は従来の理論では説明し難く、周辺乱流の発達、伝播の理解に重要である。乱流輸送の非対称性の測定を目的として、誘導生成プラズマを対象に静電プローブを用いて TST-2 周辺プラズマにおける浮遊電位およびイオン飽和電流揺動のポロイダル断面での 2 次元分布計測を行った。静電プローブは空間・時間分解能に優れ、比較的容易に空間電位、密度揺動に関する情報を得ることが出来る。その結果、最外殻磁気面内側に強い MHD 揺動が存在し、プラズマ上部で 70 kHz の静電揺動が増大していること、最外殻磁気面を境に浮遊電位揺動の伝播方向が逆転していることを検出した。さらに、トロイダル方向に離れ、同一磁力線上にあると考えられるプローブ間で強い相関を検出し、その相関が MHD 揺動と連動して増減していることを示した。近年の研究では乱流の飽和レベル・輸送量を決定する機構として異なるスケールのプラズマ乱流間の非線形過程の重要性が広く認識されている。異なる周波数間の非線形結合を示すために行ったバイスペクトル解析では、MHD 揺動および 70 kHz の静電揺動と広い範囲の周波数が結合していることを示した (図 6.2.5)。

計測法の開発

プラズマ中の電子温度 (T_e) および電子密度 (n_e) の分布を精度良く測定する手法として、1 パルスのレーザーを往復させ、往路と復路のトムソン散乱信号を得る「ダブルパストムソン散乱法」の開発が進められている。まずプラズマ中心部において、電子温度、電子密度、電子温度非等方性を 10% の精度で測定可能なシステムを構築した。電子温度非等方性はプラズマ周辺部で現れる可能性があるため、径方向分布計測システムの開発を行い、電子温度・電子密度・電子温度非等方性の 6 点同時分布計測に成功した (図 6.2.6)。高密度の誘導生成プラズマでは有意な電子温度非等方性は検出されていない。より低密度のプラズマの測定を目指し、誤差の軽減やマルチパス化を進めている。

プラズマ中の RF 波動伝播は電子密度分布に異なるため、プラズマ中の電子密度分布を知ることは重要である。マイクロ波干渉計を用いて線積分密度を測定し、プラズマ中の電子密度分布を推定するため、水平方向および鉛直方向の複数の計測経路を整備した。3 本の水平経路および 5 本の鉛直経路に沿って測定された線積分密度より、電子密度分布を再構成した結果、プラズマ中心部と周辺部で密度が高く、その間の領域で低い密度の領域が存在することを示唆する結果が得られた。

プラズマ中に流れる電流の分布を測るため、電流

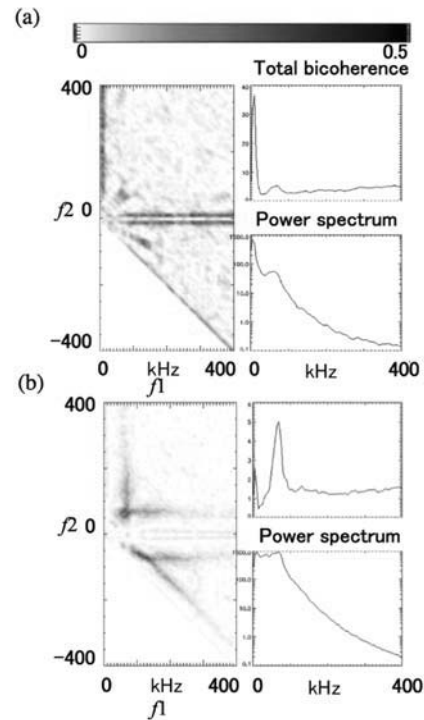


図 6.2.5: Bicoherence patterns of $\tilde{V}_f$ (a) well inside the plasma boundary ($R = 415$ mm, $Z = 234$ mm) and (b) just inside the boundary ($R = 512$ mm, $Z = 203$ mm).

計測用小型ロゴスキーコイルを径方向に 2 つ、ラングミュアプローブを径方向に 4 つ (最前面では上下に 1 つずつ)、さらにトロイダル磁場とポロイダル磁場が同時に計測できる 2 次元磁気プローブが搭載された複合プローブの開発を行なっている。プローブ全体が径方向に移動でき、軸回りに回転できるため、径方向分布及び角度分布計測が可能である。本年度は、ロゴスキーコイルの感度測定及びプローブ全体の設計を行なった。さらに、ロゴスキーコイルが非常にノイズに敏感なため、銅製シールドの作成も行なった。

6.2.2 共同研究

QUEST におけるトムソン散乱

九州大学の ST 装置 QUEST において、マイクロ波による I_p 立ち上げ、定常維持実験が行われている。電流駆動機構を解明するために必要な平衡解析には、信頼性の高い温度・密度分布データが必要である。マイクロ波で立ち上げたプラズマの密度は低い場合、トムソン散乱光は弱く、計測は困難であるが、

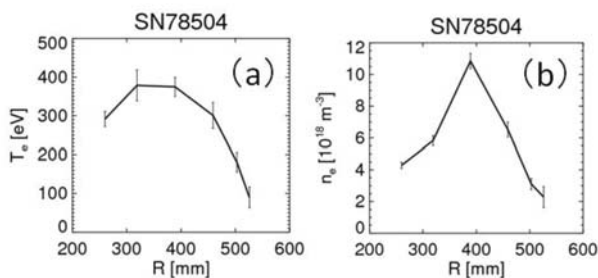


図 6.2.6: Profiles of (a) T_e and (b) n_e measured in an inductively formed plasma.

プラズマが定常的であることを利用し、散乱光を積算する事によって、十分な散乱光を検出することを試みた。前年度に設置したレーザーや集光ポートに加え、今年度は球面ミラー及び光ファイバーを設置し、集光光学系を完成させ、分光系（ポリクロメーター）を設置した。このシステムを用い、 10^{17} m^{-3} 程度の密度のプラズマを計測し、散乱信号の検出及び電子温度の導出に成功した。大半径方向 6 点の空間分布計測を行ったところ、プラズマ中心部における電子温度は $10 \pm 80 \text{ eV}$ 程度であった。

LHD 装置における反射計計測

マイクロ波反射計は、マイクロ波を入射し、プラズマ中で反射して返ってきたマイクロ波の位相を測定する計測法であり、微小な電子密度変動を測定することができる。この特徴を利用して、プラズマ中の RF 波動を検出することができるので近年注目されている。核融合科学研究所の LHD（大型ヘリカル装置）では既設のマイクロ波反射計を用いて、イオンサイクロトロン加熱のためにプラズマ中に励起した RF 波動の測定を行っている。図 6.2.7 は、入射マイクロ波の周波数が 34 GHz の時の反射計信号のスペクトルを示したもので、 10 dB 以上の S/N 比で入射 RF 波動 (38.47 MHz) に由来する信号が測れることを示している。RF 波動による位相変動は rms で 10^{-3} rad 程度であり、密度変動レベルに換算すると 0.2% 程度である。さらに波の分散関係等を用いて、ポロイダル方向の波動電場を評価すると、およそ 8 kV/m であった。この値は、簡単なモデル計算より予想される値より 1 桁程度高いが、この差は種々の現実的な効果がモデル計算では考慮されていないことに起因すると考えられる。

MAST における EBW 放射測定

英国の ST 装置 MAST では、H モード（閉じ込め改善モード）プラズマにおいて間欠的に発生し、第一壁に大きな損害を与える ELM（周辺局在モード）という不安定性の物理機構をプラズマ周縁部の詳細な電流分布測定によって明らかにすることを目指す

ている。このため、天文学で用いられている開口合成法という手法をプラズマ計測に応用する試みが進行中である。この手法ではプラズマに向けて複数並べたアンテナレイの信号間の相互相関を 2 次元フーリエ変換することで、プラズマからの放射を 2 次元イメージとして再構築する。ここでいう放射とはプラズマ中で生成された電子バーンスタイン波（EBW）がモード変換して生じた電磁波である。放射点が磁場に沿って並ぶため、イメージから磁場ピッチ角がわかり、これより電流分布が得られる。得られるイメージの質はアンテナの幾何学的な配置に依存するが、アンテナサイズや真空容器窓の空間的制約のため、その最適化には限界があり、図 6.2.7 の最左図のような放射を仮定した場合は中央図（principal solution という）のような復元にとどまり、偽のピークを伴うことがある。そこで最大エントロピー法（MEM）を用いて、偽のピークを除去するコードを作成し、最右図のように復元し成功し、有効性を確認した。2012 年度には、このコードを実験データに適用することを目指す。

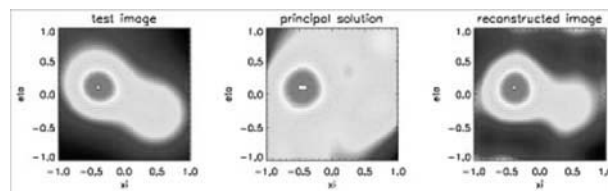


図 6.2.7: Left: test image, center: principal solution, right: image reconstructed by MEM ($\xi = \sin \theta$, $\eta = \cos \theta \sin \phi$, where θ and ϕ are horizontal and vertical angles, respectively).

UTST における RF 加熱実験

UTST はプラズマ合体によりベータ（プラズマ圧力の磁場圧力に対する比）の高い ST プラズマを生成することのできる装置であり、 21 MHz の RF システムを用いて加熱実験を行っている。プラズマ合体により高ベータプラズマが短時間で生成できるが、リコネクション（磁力線の再結合）が終わってしまうと加熱入力が無くなってしまふ。これに高次高調速波（HHFW）による電子加熱を加え、高ベータ状態を維持することが目的である。今年度は同軸管内のアークを防ぐため、最適長さでの配管を行い、アーク検出のための電圧プローブを設置し、計測システムも一新した。平成 24 年度から加熱実験を再開する予定である。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Takase, A. Ejiri, H. Kakuda, Y. Nagashima, T. Wakatsuki, O. Watanabe, P. Bonoli, O. Meneghini, S. Shiraiwa, J. Wright, C. Moeller, H. Kasahara, R.

- Kumazawa, T. Mutoh, K. Saito and TST-2 Group: Development of a plasma current ramp-up technique for spherical tokamaks by the lower hybrid wave, *Nucl. Fusion* **51** (2011) 063017.
- [2] J. Hiratuska, A. Ejiri, M. Hasegawa, Y. Nagashima, Y. Takase, H. Tojo, T. Yamaguchi, T. Ambo, H. Kakuda, T. Sakamoto, R. Shino, M. Sonehara, T. Wakatsuki and O. Watanabe: Development of a Double-pass Thomson Scattering System in the TST-2 Spherical Tokamak, *Plasma Fusion Res.* **6** (2011) 1202133.
- [3] H. Meyer, M.F.M. De Bock, N.J. Conway, S.J. Freethy, K. Gibson, J. Hiratsuka, A. Kirk, C.A. Michael, T. Morgan, R. Scannell, G. Naylor, S. Saarelma, A.N. Saveliev, V.F. Shevchenko, W. Suttrop, D. Temple, R.G.L. Vann and the MAST and NBI teams: LH transition and pedestal studies on MAST, *Nucl. Fusion* **51** (2011) 113011.
- [4] M. Ishiguro, K. Hanada, H. Liu, H. Zushi, N. Yoshida, T. Tokunaga, K. Nakamura, A. Fujisawa, H. Idei, M. Sakamoto, M. Hasegawa, S. Tashima, Y. Takase, T. Maekawa and Y. Kishimoto: Direct measurement of energetic electron flow in Q-shu University experiment with steady-state spherical tokamak, *Rev. Sci. Instrum.* **82** (2011) 113509.
- [5] S. Kamio, Q. Cao, K. Abe, M. Sakumura, N. Suzuki, T. Watanabe, K. Ishiguchi, R. Imazawa, T. Yamada, M. Inomoto, Y. Takase and Y. Ono: Multipoint Spectroscopy Measurement of Spherical Tokamak Heating by Magnetic Reconnection in UTST, *Plasma Fusion Res.* **6** (2011) 2402033.
- [6] Y. Nagashima, A. Ejiri, Y. Takase, M. Sonehara, H. Kakuda, T. Oosako, J. Hiratsuka, O. Watanabe, T. Yamaguchi, H. Kobayashi, T. Wakatsuki, T. Sakamoto, K. Hanashima, T. Ambo, R. Shino and S. Inagaki: Evaluation of edge electron temperature fluctuation by the use of fast voltage scanning method on TST-2, *Plasma Fusion Res.* **6** (2011) 2402036.
- [7] Y. Nagashima, S.-I. Itoh, S. Inagaki, H. Arakawa, N. Kasuya, A. Fujisawa, K. Kamataki, T. Yamada, S. Shinohara, S. Oldenburger, M. Yagi, Y. Takase, P. H. Diamond and K. Itoh: Non-Gaussian properties of global momentum and particle fluxes in a cylindrical laboratory plasma, *Phys. Plasmas* **18** (2011) 070701.
- [8] M. Uchida, T. Maekawa, H. Tanaka, S. Ide, Y. Takase, F. Watanabe and S. Nishi: Generation of initial closed flux surfaces by ECH at a conventional aspect ratio of $R/a = 3$: experiments on the LATE device and JT-60U tokamak, *Nucl. Fusion* **51** (2011) 063031.
- [9] D. Moreau, D. Mazon, M.L. Walker, J.R. Ferron, K.H. Burrell, S.M. Flanagan, P. Gohil, R.J. Groebner, A.W. Hyatt, R.J. La Haye, J. Lohr, F. Turco, E. Schuster, Y. Ou, C. Xu, Y. Takase, Y. Sakamoto, S. Ide, T. Suzuki and ITPA-IOS group members and experts: Plasma models for real-time control of advanced tokamak scenarios, *Rev. Sci. Instrum.* **51** (2011) 063009.
- [10] H. Tojo, A. Ejiri, J. Hiratsuka, T. Yamaguchi, Y. Takase, K. Itami and T. Hatae: First measurement of electron temperature from signal ratios in a double-pass Thomson scattering system, *Plasma Fusion Res.* **83** (2012) 023507.
- (学位論文)
- [11] 安保貴憲: Measurements of Radio Frequency Waves in Magnetized Plasmas by Microwave Reflectometry and Interferometry (修士論文)
- [12] 篠遼太: Plasma Start-up Experiments Using the Electron Cyclotron Wave on the TST-2 Spherical Tokamak (修士論文)
- [13] 曾根原正晃: Fluctuation measurements over a broad region of low-field side edge plasma in the TST-2 spherical tokamak (修士論文)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [14] T. Wakatsuki, A. Ejiri, H. Kakuda, O. Meneghini, S. Shiraiwa, Y. Takase, J. C. Wright, T. Ambo, K. Hanashima, J. Hiratsuka, Y. Nagashima, T. Sakamoto, R. Shino, M. Sonehara, T. Yamaguchi and O. Watanabe: Plans for Lower Hybrid Current Drive Experiment using a Dielectric Loaded Waveguide Array Antenna in TST-2, The 19th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas, Newport, RI, USA, June 1–3, 2011.
- [15] Y. Takase, T. Wakatsuki, A. Ejiri, H. Kakuda, C.P. Moeller, T. Ambo, K. Hanashima, J. Hiratsuka, H. Kasahara, R. Kumazawa, Y. Nagashima, K. Saito, T. Sakamoto, T. Seki, F. Shimpō, R. Shino, M. Sonehara, O. Watanabe, T. Yamaguchi: Plasma Current Start-up Experiment using Waves in the Lower Hybrid Frequency Range in TST-2, The 19th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas, Newport, RI, USA, June 1–3, 2011.
- [16] K. Hanada, et al.: QUEST experiments towards steady state operation of spherical tokamaks, The Joint Meeting of 5th IAEA Technical Meeting on Spherical Tori, 16th International Workshop on Spherical Torus (ISTW2011), 2011 US-Japan Workshop on ST Plasma, Toki, Japan, Sep. 27–30, 2011.
- [17] H. Idei, et al.: Development of Electron Cyclotron / Bernstein Wave Heating and Current Drive System and its Application to the QUEST Experiments, The Joint Meeting of 5th IAEA Technical Meeting on Spherical Tori, 16th International Workshop on Spherical Torus (ISTW2011), 2011 US-Japan Workshop on ST Plasma, Toki, Japan, Sept. 27–30, 2011.

- [18] T. Wakatsuki, A. Ejiri, H. Kakuda, Y. Takase, T. Ambo, H. Furui, T. Hashimoto, J. Hiratsuka, H. Kasahara, K. Kato, R. Kumazawa, Y. Nagashima, K. Saito, T. Sakamoto, T. Seki, F. Shimpō, R. Shino, T. Shinya, M. Sonehara, O. Watanabe, and T. Yamaguchi: X-ray Measurements during Plasma Current Start-up Experiments using Waves in the Lower Hybrid Frequency Range on the TST-2 Spherical Tokamak, The Joint Meeting of 5th IAEA Technical Meeting on Spherical Tori, 16th International Workshop on Spherical Torus (ISTW2011), 2011 US-Japan Workshop on ST Plasma, Toki, Japan, Sept. 27–30, 2011.
- [19] Y. Nagashima, M. Sonehara, H. Kakuda, Y. Takase, A. Ejiri, J. Hiratsuka, O. Watanabe, T. Yamaguchi, T. Sakamoto, T. Wakatsuki, T. Ambo, R. Shino, H. Furui, T. Hashimoto, K. Kato, and T. Shinya: Fluctuation measurement across the broad range of the low-field side edge plasmas in the TST-2 spherical tokamak, The Joint Meeting of 5th IAEA Technical Meeting on Spherical Tori, 16th International Workshop on Spherical Torus (ISTW2011), 2011 US-Japan Workshop on ST Plasma, Toki, Japan, Sept. 27–30, 2011.
- [20] T. Yamada, M. Gryaznevich, S. Kamio, Q.H. Cao, N. Suzuki, T.G. Watanabe, T. Itagaki, K. Take-mura, K. Yamasaki, K. Ishiguchi, Y. Hayashi, H. Tanabe, T. Li, M. Inomoto, Y. Takase, Y. Ono: Merging startup experiments in UTST and MAST, The Joint Meeting of 5th IAEA Technical Meeting on Spherical Tori, 16th International Workshop on Spherical Torus (ISTW2011), 2011 US-Japan Workshop on ST Plasma, Toki, Japan, Sept. 27–30, 2011.
- [21] A. Ejiri, T. Wakatsuki, H. Kakuda, Y. Takase, Y. Nagashima, T. Ambo, H. Furui, T. Hashimoto, J. Hiratsuka, H. Kasahara, K. Kato, R. Kumazawa, K. Saito, T. Sakamoto, T. Seki, F. Shimpō, R. Shino, T. Shinya, M. Sonehara, O. Watanabe, and T. Yamaguchi: Equilibrium analysis of the RF start-up plasma on the TST-2 spherical tokamak device, The Joint Meeting of 5th IAEA Technical Meeting on Spherical Tori, 16th International Workshop on Spherical Torus (ISTW2011), 2011 US-Japan Workshop on ST Plasma, Toki, Japan, Sept. 27–30, 2011.
- [22] H. Kakuda, A. Ejiri, H. Furui, Y. Nagashima, M. Sonehara, Y. Takase, T. Wakatsuki, T. Ambo, T. Hashimoto, J. Hiratsuka, H. Kasahara, K. Kato, R. Kumazawa, K. Saito, T. Sakamoto, T. Seki, F. Shimpō, R. Shino, T. Shinya, O. Watanabe, T. Yamaguchi: Floating Potential Measurements during Plasma Current Start-up Experiments using Waves in the Lower Hybrid Frequency Range on the TST-2 Spherical Tokamak, The Joint Meeting of 5th IAEA Technical Meeting on Spherical Tori, 16th International Workshop on Spherical Torus (ISTW2011), 2011 US-Japan Workshop on ST Plasma, Toki, Japan, Sept. 27–30, 2011.
- [23] Y. Takase, et al.: Plasma current ramp-up by waves in the lower hybrid frequency range on TST-2, 53rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Salt Lake City, UT, USA, Nov. 14–18, 2011.
- [24] Y. Nagashima, et al.: Non-Gaussian properties of global particle and momentum fluxes driven by turbulence in a linear plasma, 53rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Salt Lake City, UT, USA, Nov. 14–18, 2011.
- [25] J. Hiratsuka, A. Ejiri, M. Hasegawa, Y. Nagashima, Y. Takase, H. Tojo, T. Yamaguchi, T. Ambo, H. Kakuda, T. Sakamoto, R. Shino, M. Sonehara, T. Wakatsuki and O. Watanabe: Off-axis temperature anisotropy measurement by a double-pass Thomson scattering diagnostic system on TST-2, 21th International Toki Conference, Toki, Japan, Nov. 28–Dec. 1, 2011.
- [26] H. Tojo, et al.: Demonstration of an in-situ relative calibration method for a Thomson scattering diagnostics on TST-2, 21th International Toki Conference, Toki, Japan, Nov. 28–Dec. 1, 2011.
- (国内会議)
一般講演
- [27] 山口隆史、江尻晶、平塚淳一、永島芳彦、長谷川真、成原一途、高瀬雄一、関子秀樹: QUEST におけるトムソン散乱計測の開発、第 6 回 QUEST 研究会、九州大学、2011 年 8 月 2–3 日
- [28] 古井宏和、永島芳彦、高瀬雄一、江尻晶、角田英俊、曾根原正晃: TST-2 における 200MHz 高周波波動を用いた立ち上げプラズマの浮遊電位計測、第 6 回 QUEST 研究会、九州大学、2011 年 8 月 2–3 日
- [29] 加藤邦彦他: 球状トカマクにおける干渉計を用いた密度計測、プラズマ若手夏の学校、高野山大学、2011 年 8 月 8–11 日
- [30] 古井宏和他: 200MHz 立ち上げプラズマにおける浮遊電位計測、プラズマ若手夏の学校、高野山大学、2011 年 8 月 8–11 日
- [31] 新屋貴浩他: UTST における高次高調波実験計画、プラズマ若手夏の学校、高野山大学、2011 年 8 月 8–11 日
- [32] 橋本貴博他: TST-2 における 8.2GHz マイクロ波を使ったプラズマ立ち上げ実験計画、プラズマ若手夏の学校、高野山大学、2011 年 8 月 8–11 日
- [33] 曾根原正晃、永島芳彦、高瀬雄一、江尻晶、大迫琢也、山口隆史、角田英俊、坂本拓也、平塚淳一、若月琢馬、安保貴憲、篠遼太、渡邊理: TST-2 における周辺乱流の空間 2 次元計測、プラズマ科学のフロンティア 2011 研究会、核融合科学研究所、2011 年 9 月 7–8 日
- [34] 江尻晶、門野良典、日下部岳広、佐藤恵、箕浦高子、澤田美智子、原田慶恵、由良敬: 研究者のワークライフバランス (WLB) WG、大規模アンケート調査のフォローアップ WG 活動報告、第 9 回男女共同参画学協会連絡会シンポジウム、つくば、2011 年 10 月 31 日

- [35] Junichi Hiratsuka, Akira Ejiri, Makoto Hasegawa, Yoshihiko Nagashima, Yuichi Takase, Hiroshi Tojo, Takashi Yamaguchi, Takahiro Ambo, Hidetoshi Kakuda, Takuya Sakamoto, Ryota Shino, Masateru Sonehara, Takuma Wakatsuki and Osamu Watanabe: Double-pass Thomson scattering diagnosis on the TST-2 spherical tokamak device, プラズマ・核融合学会第 28 回年会/応用物理学会第 29 回プラズマプロセッシング研究会/日本物理学会 (領域 2)2011 年秋季大会 (Plasma Conference 2011)、金沢、2011 年 11 月 22–25 日
- [36] T. Wakatsuki, et al.: X-ray measurements during non-inductive plasma current start-up experiments using lower hybrid waves on the TST-2 spherical tokamak, プラズマ・核融合学会第 28 回年会/応用物理学会第 29 回プラズマプロセッシング研究会/日本物理学会 (領域 2)2011 年秋季大会 (Plasma Conference 2011)、金沢、2011 年 11 月 22–25 日
- [37] Y. Nagashima, et al.: Dynamics of global transport and turbulence noise force an experimental analysis on plasma turbulence, プラズマ・核融合学会第 28 回年会/応用物理学会第 29 回プラズマプロセッシング研究会/日本物理学会 (領域 2)2011 年秋季大会 (Plasma Conference 2011)、金沢、2011 年 11 月 22–25 日
- [38] M. Ishiguro, et al.: Measurement of Energetic Electron Flow with Langmuir Probe in QUEST, プラズマ・核融合学会第 28 回年会/応用物理学会第 29 回プラズマプロセッシング研究会/日本物理学会 (領域 2)2011 年秋季大会 (Plasma Conference 2011)、金沢、2011 年 11 月 22–25 日
- [39] K. Hanada, et al.: Radial propagation of blobs in ECR plasmas on QUEST, プラズマ・核融合学会第 28 回年会/応用物理学会第 29 回プラズマプロセッシング研究会/日本物理学会 (領域 2)2011 年秋季大会 (Plasma Conference 2011)、金沢、2011 年 11 月 22–25 日
- [40] H. Zushi, et al.: Evaluation of “Stochastic force” using higher order moments in the SOL fluctuations in QUEST, プラズマ・核融合学会第 28 回年会/応用物理学会第 29 回プラズマプロセッシング研究会/日本物理学会 (領域 2)2011 年秋季大会 (Plasma Conference 2011)、金沢、2011 年 11 月 22–25 日
- [41] 山口 隆史, 江尻晶, 平塚淳一, 長谷川真, 永島芳彦, 成原一途, 高瀬雄一, 関子秀樹, QUEST チーム: QUEST 球状トカマクにおけるトムソン散乱計測の開発、プラズマ・核融合学会第 28 回年会/応用物理学会第 29 回プラズマプロセッシング研究会/日本物理学会 (領域 2)2011 年秋季大会 (Plasma Conference 2011)、金沢、2011 年 11 月 22–25 日
- [42] 曾根原正晃, 永島芳彦, 角田英俊, 高瀬雄一, 江尻晶, 大迫琢也, 渡邊理, 平塚淳一, 山口隆史, 坂本拓也, 若月琢馬, 安保貴憲, 篠遼太, 古井宏和, 橋本貴博, 加藤邦彦, 新屋貴浩: TST-2 における周辺乱流の空間 2 次元計測、プラズマ・核融合学会第 28 回年会/応用物理学会第 29 回プラズマプロセッシング研究会/日本物理学会 (領域 2)2011 年秋季大会 (Plasma Conference 2011)、金沢、2011 年 11 月 22–25 日
- [43] 新屋貴浩: TST-2 における低域混成波を用いたビート波実験での磁気プローブによる計測、第 1 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、2012 年 2 月 10 日
- [44] 安保貴憲: マイクロ波反射計による RF 電場計測、第 1 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、2012 年 2 月 10 日
- [45] H. Kakuda, S. J. Freethy, V. F. Shevchenko, B. K. Huang, R. G. L. Vann: EBW imaging in MAST, 「ST 研究会」、核融合科学研究所、2012 年 2 月 23 日
- [46] R. Shino, et al.: Plasma start-up by EC wave in TST-2, 「ST 研究会」、核融合科学研究所、2012 年 2 月 23 日
- [47] M. Sonehara, et al.: Poloidal structure of turbulence of edge plasma in TST-2, 「ST 研究会」、核融合科学研究所、2012 年 2 月 23 日
- [48] 平塚淳一, 江尻晶, 長谷川真, 永島芳彦, 高瀬雄一, 東條寛, 山口隆史, 安保貴憲, 大迫琢也, 角田英俊, 加藤邦彦, 坂本拓也, 篠遼太, 新屋貴浩, 曾根原正晃, 橋本貴博, 古井宏和, 若月琢馬, 渡邊理: Current progress of the double-pass Thomson scattering diagnostics on TST-2 spherical tokamak, 第 15 回若手科学者によるプラズマ研究会、日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所、2012 年 3 月 14–16 日
- [49] 江尻晶, 安保貴憲, 大迫琢也, 角田英俊, 笠原寛史, 加藤邦彦, 熊澤隆平, 斎藤健二, 齋藤晴彦, 坂本拓也, 篠遼太, 新保富士夫, 新屋貴浩, 関哲夫, 曾根原正晃, 高瀬雄一, 永島芳彦, 野村吾郎, 橋本貴博, 平塚淳一, 古井宏和, 森川惇二, 山口隆史, 若月琢馬, 渡邊理: TST-2 における平衡解析、日本物理学会 2012 年春季大会、関西学院大学、2012 年 3 月 24–27 日
- [50] 江尻晶: 大規模アンケート調査にみるワーク・ライフ・バランス、日本物理学会 2012 年春季大会、関西学院大学、2012 年 3 月 24–27 日

招待講演

- [51] 高瀬雄一: 球状トカマクについて、プラズマ若手夏の学校、高野山大学、2011 年 8 月 8–11 日

6.3 坪野研究室

日本の重力波研究の長年の目標であった大型レーザー干渉計重力波検出器計画 KAGRA(旧 LCGT) プロジェクトが、ついに 2010 年 10 月よりスタートした。メインのターゲットは連星中性子星の合体にともなう重力波であり、KAGRA が完成すれば確実に年に数回の重力波イベントを検出できるはずである。現在は光学設計やインフラ整備が急ピッチで進んでいる。また全長 6km におよぶ巨大な真空パイプや低温冷却系の一部が完成している。

一方で、宇宙空間を利用した重力波検出計画も構想されており、われわれは日本独自のスペース重力波検出器 DECIGO を提唱している。これを実現するための基礎研究として、小型衛星を用いた予備実験などの準備を進めている。これらの基礎研究をもとにして、DECIGO によって巨大ブラックホールや宇宙初期のインフレーションに起源をもつ重力波をとらえようとする計画を推進中である。

また、地上で低周波の重力波を検出することが可能な新しいタイプの重力波検出器 TOBA(Torsion Bar Antenna)を開発し、実際に観測をおこなった。この TOBA の開発およびそれを用いた観測をまとめた博士論文によって、石徹白晃治氏（現東北大学）は第 6 回（2012 年）日本物理学会若手奨励賞を受賞した。[1, 7]

6.3.1 大型レーザー干渉計重力波検出器 KAGRA の建設

KAGRA(LCGT) は岐阜県神岡の地下サイトに一边 3km 全長 6km 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。2010 年 10 月よりプロジェクトがスタートしたが、本年度は 1 月 20 日に神岡でトンネル施設の着工式が開催され、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。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、2018 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。[5, 6, 14, 26, 30, 33, 50]

主干渉計設計

KAGRA の心臓部である主干渉計は、到来する重力波の情報をレーザーの位相変化へ転写し、最終的に計算機が処理可能な電圧信号へと変換するトランスデューサーの役割を果たす。主干渉計の各種パラメーターは様々な要素を考慮して最適化されなければならない。重力波に対する感度を最大化することはもちろんであるが、現実の光学部品等に不可避免的に含まれる誤差などの影響を受けにくく、さらに干渉計を制御するための信号が取得可能であるような設計を行う必要がある。本研究室では干渉計の動作をシミュレートする計算機モデルを構築し、この多

自由度最適化問題にアタックしている。現在までに、主干渉計の基本パラメータを全て決定した。さらにこのシミュレーションコードを用いて、入力レーザーの周波数雑音などのテクニカルノイズが干渉計出力にどのように現れるかを計算し、それらに対する要求値を設定した。また、ガウシアンビームを任意の光学系中で自動的にレイトレースするプログラムを開発し、これを用いて干渉計レイアウトの最適化と、鏡 AR 面反射などで発生する迷光の追跡及び対策を行っている。[3, 4, 12, 25, 47, 49, 51]

アライメント制御

レーザー干渉計を高感度な重力波検出器として用いるには、干渉計を構成する鏡の位置と姿勢を高精度に制御する必要がある。KAGRA では高出力レーザーを入射光として用いるため、干渉計の片腕の Fabry-Perot 共振器内を往復するレーザーパワーは 400 kW にも及ぶ。そのため、共振器を構成する鏡の傾きに対してレーザー輻射圧トルクがそれを拡大させる方向に働き、角度不安定性が自発的に生じてしまうという問題がある。

我々は干渉計シミュレーションを元に、各鏡の変位信号の分離がしやすく、また、角度不安定性が小さくなるよう KAGRA の干渉計パラメータを決定した。さらに、鏡の懸架系の 3 次元剛体シミュレーションの結果と合わせ、角度制御系の設計を行った。[11, 47]

パラメトリック不安定性

KAGRA では、その腕には数百 kW もの光学パワー蓄えられる設計になっている。このとき干渉計のパラメータによっては、鏡の弾性モードが干渉計の基本モードのフォトンに散乱して高次モードに励起し、本来蓄えられないはずの TEM 高次モードが干渉計の中に蓄えられることによって、干渉計のロックに支障を来しうる。この問題をパラメトリック不安定性と呼ぶ。bKAGRA における鏡の曲率半径の候補値それぞれについて、候補値周りでパラメトリック不安定性が起こるのか否かを検証した。

低温接合・低温物性の研究

KAGRA では鏡の熱雑音を低減するために最終的には干渉計の鏡を極低温まで冷却する。また、干渉計の鏡を吊るす際にシリケート接合と呼ばれる接合法が使用される予定である。しかしながらシリケート接合は常温でよく用いられる接合であり、低温での特性（機械強度など）はよくわかっていない。また、KAGRA で鏡を吊るすのに使用される金属ワイヤーの選定も行う必要がある。そこで、坪野研究室では高エネルギー加速器研究機構（KEK）と共同でシリケート接合の低温物性測定や金属ワイヤーの低温物性測定を行っている。

2011 年度は水酸化カリウム水溶液を用いてサファ

イアサンプルの接合およびサンプルの熱サイクル試験・種々の金属ワイヤーの RRR 測定を行った。RRR とは常温での抵抗値を極低温（今回は 4.2K）での抵抗値で割った値のことで、残留抵抗比と呼ばれるものである。金属ワイヤーの RRR の測定では、ベリリウム銅・リン青銅・モリブデンの三種類の金属ワイヤーの RRR の測定に成功した。[15, 16]

光検出器 (PD) 感度一様性の測定

KAGRA のレーザーには極めて高い強度安定度が必要とされ、その要求値は相対強度変動で 10^{-9} 以下である。そのため、極めて高性能のレーザー強度安定化制御を行うことが必要とされる。強度安定化制御に用いられる光検出器 (PD) は、レーザー強度の実変動のみを捉える必要がある。しかし、もし PD 受光面に光-電流変換効率の非一様性があると、ビームジッタが強度変動へと変換されてしまい、正しい測定ができない。そこで、我々はピエゾミラーとロッキングインアンプを組み合わせて、PD 受光面の感度マップを自動測定する装置を開発した。この装置で PD 受光面中の感度ができるだけ様な領域を選び、そこにビームを当てることで、ビームジッタの影響を最小に抑えることができる。今後はこの装置の改良、高速化を行っていく。

6.3.2 宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO

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 10Hz 以上で感度のある地上レーザー干渉計と、0.1Hz 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、現在そのデータ解析を行っている。また、DECIGO Path Finder (DPF) と呼ばれる DECIGO の技術実証衛星の開発にも参加しており、主に干渉計モジュールの構造設計を行っている。また、DPF において問題になると考えられている残留ガス雑音に関する研究も行っている。[18, 32, 38, 49]

DPF の開発

DECIGO 計画では、その前に 2 つの前哨衛星を打ち上げ、技術成熟度を段階的に向上させていくロードマップが立てられている。DECIGO パスファインダー (DPF) はその最初の前哨衛星であり、高度 500 km の地球周回軌道に投入される 350 kg 級の小型衛星として設計が進められている。DPF では、中間質量ブラッ

クホール合体からの重力波をターゲットとしており、我々の銀河内のイベントを観測できるだけの感度を持っている。また、地球重力場観測や、宇宙空間での精密計測のための先進科学技術の実現など幅広い成果が期待できる。DPF は JAXA が進めている小型科学衛星シリーズの候補の 1 つになっており、現在、衛星システム検討と基本サブシステムの試作と性能評価が進められている。[19, 28, 29, 39, 49]

SWIM_{μν}

SWIM (SpaceWire Interface demonstration Module) は、JAXA(宇宙航空研究開発機構)が開発した小型実証衛星 (SDS-1) に搭載され、2009 年 1 月 23 日に打ち上げ・軌道投入が成功裏に行われ、2010 年 9 月に運用を終了 (衛星が停波) した。

昨年度までで、観測運用を終了しデータを得ていた。しかし、そのデータには不具合が発生していたためにそのまま解析に供することはできない状態であった。そのため今年度は、まず不具合が発生していたデータの修復を行った。その後、プロジェクトの最終目的の一つである、重力波探査を実施した。

SWIM_{μν} は小型軽量な実証機であるため感度が良いわけではないが、この結果は円偏光モードについての背景重力波の上限値を定めた初めての例となった。このように、小型衛星上の小型検出器を用いて重力波探査という科学的成果にまで到達したことで、SWIM_{μν} プロジェクトの重要な目的である、将来につながる技術の軌道上実証を達成したといえる。これらの成果は、穀山が博士学位論文としてまとめている。さらに、投稿論文としても発表する準備を行っている。[20, 27, 31, 34, 53]

DPF における残留ガス雑音の実験

DPF では重力を検知するための試験マスとその周りにある静電センサの極板との距離が近いために残留ガス雑音が増加する Squeeze film damping という効果が重要となる。この Squeeze film damping の効果を研究するためねじれ振り子を用いた実験を行った。

Squeeze film damping の効果は壁を例えば楕円などにしてガス分子が逃げる経路を作ることにより低減することが可能である。今回、通常の壁の場合と 2 mm 間隔で細長い穴が空いた楕円の壁の場合で比較した。また、残留ガスの組成を知るために質量ガス分析器を用いて残留ガスの組成を調べ、おおむね H₂O がその成分であることがわかった。ダンピング測定を行った結果、試験マスと壁との距離が 1mm 程度の距離で通常の壁と比べ Squeeze film damping による残留ガス雑音が 3 分の 1 程度にまで低減していた。これは DPF において静電センサを楕円にすることで Squeeze film damping による残留ガス雑音をこの程度低減できることを示す結果である。[21, 40]

6.3.3 ねじれ振り子型重力波検出器, TOBA

ねじれ振り子型重力波検出器 (Torsion-bar Antenna, TOBA) は地上で低周波重力波を観測するための検出器である。現在、神岡で KAGRA という 3km の腕を持つ干渉計型重力波検出器が建設されているが、こういった地上の干渉計型重力波検出器は共振周波数と地面振動の影響で 10Hz 以下に感度を持つことができない。また、干渉計を宇宙に打ち上げて低周波重力波を探索するための DECIGO 計画の提案されているが、その実現にはまだしばらく時間がかかる見込みである。そこで地上で低周波重力波探索ができる検出器として TOBA が提案された。これは棒をワイヤーや超伝導ピン止め効果によって浮上させたもので、回転の共振周波数が数 mHz となりこれ以上の重力波に対して感度を持つ。現在、坪野研究室にワイヤー懸架タイプと超伝導磁気浮上タイプのプロトタイプ検出器が開発され、いずれも 0.1Hz 付近で重力波に対する感度が $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 程度となっている。今後は雑音を低減させ、より良い感度の実現を目指す。[1]

背景重力波のデータ解析

背景重力波とは、宇宙マイクロ波背景放射と同様、天体全域からほぼ一様に放射されている重力波で、天文学的起源の重力波と宇宙論的起源の重力波の重ね合わせであると考えられている。特に宇宙論的起源のものは、誕生直後の宇宙の姿を映し出すものとして注目されている。これを効率的に検出する為、東京大学と京都大学の 2ヶ所に設置されているプロトタイプ TOBA2 台を用い、同時観測を行った。これによって、TOBA における相関解析の手法を確立し、背景重力波に対する新たな上限値を与える事に成功した。この結果は TOBA1 台での解析結果を 4 倍ほど上回る結果であり、上限値を与えた周波数帯も 0.035~0.830Hz と、大幅に拡大する事ができた。[1, 8, 10, 37]

新型 actuator の開発

今後、TOBA の更なる感度向上を目指す為には、現在低周波数帯の感度を制限している磁場雑音の問題を解決する必要がある。この磁場雑音は、従来使用されているコイル-マグネットアクチュエータによって導入されている可能性が高い事が示唆されている。そこで、コイル-コイルアクチュエータと呼ばれる、磁場雑音に強く駆動力も大きい新型のアクチュエータを開発した。このアクチュエータは向かい合う 2 つのコイルに流れる交流電流の作る磁氣的相互作用を使用している。ここで、コイルには高周波の交流電流を流す事で、磁場雑音の影響を低減させている。現在までにこのアクチュエータについて 3 種類の使用方法を考案し、それぞれについて理論構築、検証、及びプロトタイプ TOBA の制御に成功している。今

後は、ノイズの評価や、超伝導コイル使用の可能性などを検討する予定である。[24]

6.3.4 低温光共振器を用いた超高安定レーザー光源の開発

高安定なレーザー光源の開発は、光原子時計のプローブレーザーや重力波検出器、高精度分光等、広い応用が期待される。一般に高精度のレーザー周波数安定化は、長さを安定化した光共振器にレーザーをロックすることによって実現される。従来は、温度膨張率が低い ULE ガラスを用いた光共振器が広く使われてきたが、その性能は熱雑音で制限されていることが分かっている。坪野研では、この熱雑音を下げするための冷却した光共振器を用いた超高安定レーザー光源の開発を行なっている。[13, 41]

開発の現状

光共振器の形状及び支持方法は地面振動による弾性変形の影響を最小化するように最適化する必要がある。我々は有限要素解析を用いて最適な形状を決定した。現在までに単結晶シリコン製光共振器の形状加工および研磨がほぼ終了し、今後、高反射率コーティングに進む予定である。また、この光共振器を収容し、冷却するためのクライオスタットの開発を行ない、納品された。このクライオスタットでは、液体ヘリウム再凝縮型と呼ばれる新しい冷凍機を採用し、光共振器への振動伝達を抑えるように設計されている。現在はこのクライオスタットの性能試験を行っている。[52]

プレ安定化レーザー

低温光共振器の波長は、Sr 光格子時計で使用されている 698 nm の 2 倍の波長の 1396 nm で設計した。波長 1396 nm のレーザーで、波長の制御などを考慮し、外部共振器型半導体レーザー (External Cavity Diode Laser, ECDL) を設計・製作を行い、100 mW の単一周波数出力を得た。さらにモードクリーナーと呼ばれる光共振器を用いて周波数のプレ安定化システムの構築を行った。これらは、ネオアーク株式会社との共同で行った。[47, 48]

光共振器の防振

目的の周波数安定度を獲得する為には、地面振動によって共振器長が変動するのを防がなければならない。この為に必要となるのが防振台である。我々の標的とする 1Hz で防振を行う為には、能動防振装置の開発が必要となる。ここではヘキサポッドと呼ばれる 6 本脚の台を使用する。6 本の脚にはそれぞれピエゾ素子が組み込まれており、小型の seismometer

(速度計) でモニターした振動をピエゾ素子にフィードバックして脚の長さを調節する事で、全自由度の振動を抑える。この能動防振装置によって、東京の地面振動レベルを約一桁防振した支持台を構築する事を目標とし、現在までにその設計、発注が完了している。[13]

低温における接合の研究

低温光共振器では共振器のミラーの取り付けにオプティカルコンタクト (オプコン) が用いられ、光共振器の支持系にシリケート接合が用いられる。しかし、これらの接合は低温での使用実績がないので、低温での強度や熱伝導率などの測定を行う必要がある。そこで、坪野研究室では単結晶シリコンのオプコンおよびシリケート接合の研究を行っている。2011年度はシリコンのオプコンおよびシリケート接合サンプルの作製・サンプルの熱サイクル試験・サンプルの熱伝導率測定を行った。熱伝導測定はシリケート接合のサンプルにのみ行い、接合面を含む部分の熱抵抗が接合面を含まないバルク部分での熱抵抗に比べて液体窒素温度付近で 10 倍程度大きくなることがわかった。[16]

6.3.5 非古典光を用いたレーザー干渉計の高感度化

スクイーズド光を用いたレーザー干渉計の高感度化

スクイーズド光とは、共役な物理量のうち一方の揺らぎが量子限界よりも大きい、他方の揺らぎは量子限界よりも小さくなっている状態である。我々の実験では、直交位相振幅の揺らぎを小さくした直交位相振幅スクイーズド光を生成する。このような光を発生させるには光子間に相関をもたせる必要がある、そのために非線形光学効果を用いる。具体的には、2 次の非線形光学効果である縮退パラメトリック増幅を共振器の中で行う OPO (Optical Parametric Oscillator) を作成し、スクイーズド光を生成する。また、この際必要になる第二次高調波を生成するために、SHG (Second-Harmonic Generator) も作成する。重力波検出への応用では、その検出帯域である 10 Hz ~ 10 kHz において、量子限界を基準として -10 dB 程度揺らぎを小さくしたスクイーズド光の生成が目指している。2011 年度は -6 dB のスクイージングレベルを達成した。また、生成したスクイーズド真空場をプロトタイプ重力波検出器に導入する事で検出器の散乱雑音を -2 dB 低減する事に成功した。[17, 42]

6.3.6 極小距離領域における重力法則の検証

ねじれ振動子による重力実験

量子重力理論のある種のモデルでは、時空が通常の 4 次元座標だけではなく、複数の余剰次元で記述される。そういったモデルが正しいとすれば、余剰次元の存在のためにサブミリメートル領域で重力の逆二乗則が成り立たないことになる。坪野研究室ではかつて重力波検出器として用いられていたねじれ振動子でその検証実験を試みている。この検出器は高い Q 値と低い共振周波数をもつため、高い S/N 比で重力信号を検出することができる。

2011 年度はアンテナに加える変調重力場の周波数安定化、および防振装置の改良に取り組み、その上で予備実験としてキャリブレーション用のデータの取得、雑音信号の評価を行った。

以上の成果を踏まえ、今後は本測定および解析を行い、重力の逆二乗則を先行研究よりも高い精度で検証する予定である。[22, 35, 36]

6.3.7 空間等方性の研究

三角光共振器を用いた異方性検出実験

量子重力理論の研究や宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測から、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。しかし、これまでの多くの実験は Michelson-Morley の実験と同じように往復光速の異方性探索となっており、片道光速の異方性への上限値は往復光速に比べて 4 桁大きいものとなっていた。そこで、我々は片道光速の異方性に着目し、研究を行なっている。片道光速の異方性とは、一方向に進む光の速さの、行き帰りの差である。

これまで異方性探索実験では、光共振器の鏡像反転対称性のため、往復光速の異方性しか測定することはできなかった。そこで、光リング共振器の光路の一部に媒質を入れて屈折率を変え、非対称性を持たせることで片道光速の異方性を測定可能にした。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することを考案した。ダブルパス構成では一度光共振器に共振した光を逆回りに再入射する。これにより測定が高精度な null 測定となる。現在までに片道光速の異方性に対し、これまでの世界最高精度での測定に比べて 2 倍以上厳しい上限値を与えた。これは本手法の特長があったためであり、論文投稿準備中である。[9, 23]

<受賞>

[1] 石徹白晃治：第 6 回 (2012 年) 日本物理学会若手奨励賞。

<報文>

(原著論文)

- [2] Koji Ishidoshiro, Masaki Ando, Akiteru Takamori, Hirotaka Takahashi, Kenshi Okada, Nobuyuki Matsumoto, Wataru Kokuyama, Nobuyuki Kanda, Yoichi Aso, and Kimio Tsubono: First Observational Upper Limit on Gravitational Wave Backgrounds at 0.2 Hz with a Torsion-Bar Antenna, *Phys. Rev. Lett.* **106** (2011) 161101.
- [3] Y. Aso, K. Somiya and O. Miyakawa, Length sensing and control strategies for the LCGT interferometer, *Classical and Quantum Gravity*, accepted for publication.
- [4] Y. Aso and the LCGT Collaboration, Optical Configuration and Control of Ultra-sensitive Gravitational Wave Detectors, *Journal of the Vacuum Society of Japan*, **54** (2011) 597.
- [5] J. Abadie, et al., Search for gravitational waves from binary black hole inspiral, merger, and ring-down, *Physical Review D*, **83** (2011) 122005.
- [6] J. Abadie, et al., Search for gravitational waves associated with the August 2006 timing glitch of the Vela pulsar, *Physical Review D*, **83** (2011) 042001.

(国内雑誌)

- [7] 坪野公夫:重力探査衛星 B 実験の 50 年 (翻訳)、*パリティ* **27-4** (2012) 38-41.

(学位論文)

- [8] 正田亜八香: ねじれ型重力波検出器 TOBA の開発及び背景重力波探査, 修士論文, 2012 年.
- [9] 道村唯太: 光リング共振器を用いた片道光速の異方性探査, 修士論文, 2012 年.

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [10] A. Shoda, M. Ando, K. Okada, K. Ishidoshiro, W. Kokuyama, Y. Aso and K. Tsubono : Search for a stochastic gravitational-wave background with Torsion-bar Antennas, (July 2011, Amaldi9/NRDA meeting, Cardiff University).
- [11] Y. Michimura, Y. Aso, K. Agatsuma, T. Sekiguchi, M. Evans, L. Barsotti, LCGT Collaboration: Alignment Sensing and Control for LCGT, 9th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (July 2011, Cardiff).

招待講演

- [12] Y. Aso, Interferometer Control of Advanced Detectors, 9th Amaldi Meeting on Gravitational Waves, Cardiff University, UK, July 2011.

(国内会議)

一般講演

- [13] 坪野公夫, 波多野智, 池上健, 鈴木敏一, 麻生洋一, 大前宣昭, 平松成範, 牛場崇文, 柴田和憲, 正田亜八香, 三橋秀人, 稲場肇, 渡部謙一, 洪鋒雷, 低温光共振器を用いた超高安定光源の開発 III, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [14] 黒田和明, 梶田隆章, 中谷一郎, 大橋正健, 川村静児, 三代木伸二, 内山隆, 宮川治, 高橋竜太郎, 山元一広, 石塚秀喜, 東谷千比呂, 廣瀬榮一, 上泉眞裕, 岩崎詩子, 斎藤陽紀, 榊原裕介, 関口貴令, 藤本眞克, 上田曉俊, 大石奈緒子, 阿久津智忠, 辰巳大輔, 固武慶, 端山和大, 我妻一博, 中村康二, 江口智士, 石崎秀晴, 鳥居泰男, 福嶋美津広, 田中伸幸, 山本明, 鈴木敏一, 木村誠宏, 春山富義, 井岡邦仁, 齊藤芳男, 小池重明, 横山順一, 樽家篤史, 坪野公夫, 麻生洋一, 平松成範, 穀山涉, 岡田健志, 瓦尊慶, 松本伸之, 道村唯太, 正田亜八香, 柴田和憲, 牛場崇文, 森脇成典, 森匠, 高山圭吾, 渡部恭平, 及川溪, 平谷真也, 三尾典克, 大前宣昭, 細谷暁夫, 河合誠之, 宗宮健太郎, 鹿野豊, 須佐友紀, 神田展行, 岡田雄太, 山本尚弘, 譲原浩貴, 中尾憲一, 中村卓史, 安東正樹, 瀬戸直樹, 榎山和己, 八木絢外, 植田憲一, 米田仁紀, 中川賢一, 武者満, 阪田紫帆里, 新谷昌人, 高森昭光, 和泉究, 陳タン, 佐藤修一, 田嶋茂樹, 本間彰, 樋口亜希子, 林翔平, 東浦孝典, 角谷昌憲, 高辻利之, 尾藤洋一, 寺田総一, 長野重夫, 田越秀行, 佐々木節, 柴田大, 田中貴浩, 佐合紀親, 関口雄一郎, 西澤篤志, 西田恵里奈, 榎藤里奈, 新富孝和, 大原謙一, 高橋弘毅, 姫本宣朗, 浅田秀樹, 二間瀬敏史, 伊藤洋介, 高橋史宜, 原田知広, 西條統之, 小島康史, 瓜生康史, 山田章一, 古在由秀, 橋詰克也, 大森隆夫, 川添史子, Yanbei Chenf, 河邊径太, 新井宏二, Haixing Miaof, M.E.Tobarg, D. Blair, Ju Lig, Chunhong Zhaog, Linqing Weng, Warren Johnsonh, 苔山圭以子, 中野寛之, Zong-Hong Zhuj, S. Dhurandhark, S. Mitrak, V. Milyukovl, Lucio Baggiom, Yang Zhangn, Chao-Guang Huang, Junwei Caop, Sheau-Shi Panq, Sheng-Jui Chenq, 沼田健司, Szabolcs Marks, Stuart Reidt, Riccardo DeSalvou, Wei-Tou Niv, Xiang-hua Zhaiv, Ping Xiv, Hsien-Hao Meiw, Tai Hyun Yoonx, Hyung Won Leey, Hyung Mok Leez, Jae Wan Kim, Yong-Ho Cha, Hyun kyu Kim, Chang-Hwan Lee, Gungwon Kang, John J. Oh, Sang Hoon Oh, Myeong-Gu Park, Sang Pyo Kim, Maurice H.P.M. van Putten, Archana Pai, 大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) プロジェクトの現状, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [15] 山元一広, 高橋竜太郎, 関口貴令, 榊原裕介, 東谷千比呂, 上泉眞裕, 岩崎詩子, 内山隆, 三代木伸二, 大橋正健, 阿久津智忠, 石崎秀晴, 高森昭光, 鈴木敏一, 木村誠宏, 小池重明, 坪野公夫, 麻生洋一, 牛場崇文, 柴田和憲, 大前宣昭, 宗宮健太郎, Riccardo DeSalvo, Ettore Majorana, Eric Hennes, Jo van den Brand, Alessandro Bertolini, J, Nick A. Lockerbie, LCGT collaboration, LCGT 用防振装置の開発 VII, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [16] 牛場崇文, 柴田和憲, 大塚茂巳, 坪野公夫, 鈴木敏一, 低温光共振器のための接合物の物性測定, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).

- 庫).
- [17] 松本伸之, 道村唯太, 岡田健志, 麻生洋一, 坪野公夫, 干渉計のオートアライメント制御, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [18] 安東正樹, 川村静児, 瀬戸直樹, 中村卓史, 坪野公夫, 佐藤修一, 田中貴浩, 船木一幸, 沼田健司, 神田展行, 井岡邦仁, 高島健, 横山順一, 青柳巧介, 我妻一博, 阿久津智忠, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 新谷昌人, 池上健, 石川毅彦, 石崎秀晴, 石徹白晃治, 石原秀樹, 和泉究, 市来淨興, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 上田曉俊, 植田憲一, 歌島昌由, 江口智士, 江尻悠美子, 榎基宏, 戎崎俊一, 江里口良治, 大石奈緒子, 大河正志, 大橋正健, 大原謙一, 大淵喜之, 岡田健志, 岡田則夫, 河島信樹, 川添史子, 河野功, 木内建太, 岸本直子, 國中均, 國森裕生, 黒田和明, 黒柳幸子, 小泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山渉, 苔山圭以子, 古在由秀, 小島康史, 固武慶, 小林史歩, 西條統之, 齊藤遼, 坂井真一郎, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親, 佐々木節, 佐藤孝, 柴田大, 正田亜八香, 真貝寿明, 杉山直, 鈴木理恵子, 諏訪雄大, 宗宮健太郎, 祖谷元, 高野忠, 高橋走, 高橋慶太郎, 高橋忠幸, 高橋弘毅, 高橋史宜, 高橋龍一, 高橋竜太郎, 高森昭光, 田越秀行, 田代寛之, 田中伸幸, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 陳たん, 辻川信二, 常定芳基, 豊嶋守生, 鳥居泰男, 中尾憲一, 中澤知洋, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中山宜典, 西澤篤志, 西田恵里奈, 西山和孝, 丹羽佳人, 能見大河, 橋本樹明, 端山和大, 原田知広, 疋田渉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志, 福嶋美津広, 藤田龍一, 藤本眞克, 二間瀬敏史, 細川端彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 松本伸之, 道村唯太, 宮川治, 宮本雲平, 三代木伸二, 向山信治, 武者満, 森澤理之, 森本睦子, 森脇成典, 八木絢外, 山川宏, 山崎利孝, 山元一広, 吉田至順, 吉野泰造, 柳哲文, 若林野花, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (36): DECIGO/DPF, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [19] 佐藤修一, 阿久津智忠, 上田曉俊, 新谷昌人, 麻生洋一, 鳥居泰男, 田中伸幸, 陳たん, 権藤里奈, 大淵喜之, 岡田則夫, 正田亜八香, 道村唯太, 坪野公夫, 穀山渉, 安東正樹, 川村静児, DECIGO pathfinder のための干渉計モジュールの開発 (4), 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [20] 穀山渉, 安東正樹, 森脇成典, 石徹白晃治, 高橋走, 新谷昌人, 麻生洋一, 高島健, 中澤知洋, 高橋忠幸, 国分紀秀, 吉光徹雄, 小高裕和, 湯浅孝行, 石川毅彦, 榎戸輝揚, 苔山圭以子, 坂井真一郎, 佐藤修一, 高森昭光, 坪野公夫, 戸田知朗, 橋本樹明, 宇宙実験実証プラットフォーム (SWIM) を用いた超小型重力波検出器の開発 X (観測成果), 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [21] 岡田健志, 麻生洋一, 坪野公夫, 石徹白晃治, 安東正樹, DPF のマスモジュールにおける残留ガス雑音の研究 IV, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [22] 柴田和憲, 牛場崇文, 大塚茂巳, 平松成範, 麻生洋一, 坪野公夫, 共振型振動子を用いたサブミリメートル領域における重力法則の検証 (5), 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [23] 道村唯太, 大前宣昭, 穀山渉, 麻生洋一, 安東正樹, 坪野公夫, 光リング共振器を用いた片道光速の異方性探索, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [24] 正田亜八香, 安東正樹, 岡田健志, 石徹白晃治, 穀山渉, 麻生洋一, 坪野公夫, 超伝導磁気浮上型ねじれアンテナのための新型アクチュエータの開発, 及び背景重力波探索, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [25] 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 道村唯太, 柴田和憲, 辰巳大輔, 阿久津智忠, 山元一広, 我妻一博, 西田恵里奈, 陳タン, 安東正樹, 新井宏二, 和泉究, 山本博章, LCGT Collaboration, LCGT の主干涉計設計 II, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [26] 宮川治, 大石奈緒子, 上泉眞裕, 斎藤陽紀, 三代木伸二, 和泉究, 麻生洋一, 道村唯太, 端山和大, LCGT Collaboration, 計算機を利用した LCGT の制御 (II), 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [27] 穀山渉, 安東正樹, 森脇成典, 石徹白晃治, 高橋走, 新谷昌人, 麻生洋一, 高島健, 中澤知洋, 高橋忠幸, 国分紀秀, 吉光徹雄, 小高裕和, 湯浅孝行, 石川毅彦, 榎戸輝揚, 苔山圭以子, 坂井真一郎, 佐藤修一, 高森昭光, 坪野公夫, 戸田知朗, 橋本樹明: SDS-1/SWIM による重力波観測成果と DPF 技術の宇宙実証, 第 2 回小型科学衛星シンポジウム (2012 年 3 月 6 日, JAXA/ISAS).
- [28] 正田亜八香, 新谷昌人, 道村唯太, 麻生洋一, 安東正樹, 穀山渉, 坪野公夫: DECIGO pathfinder における重力場観測の感度評価, 第 2 回小型科学衛星シンポジウム (2012 年 3 月, JAXA/ISAS).
- [29] 道村唯太, 麻生洋一, 石徹白晃治, 佐藤修一, 安東正樹, 阿久津智忠, 上田曉俊, 川村静児, 坪野公夫: DECIGO Pathfinder 向けプロトタイプ干渉計実験, 第 2 回小型科学衛星シンポジウム (2012 年 3 月, JAXA/ISAS).
- [30] 宗宮健太郎, 寺田聡一, 宮川治, 麻生洋一, 川添史子, Andreas Freise, LCGT 用 DC readout system の開発, 日本物理学会 2012 年年次大会 (2012 年 3 月、関西学院大学、兵庫).
- [31] 穀山渉, 安東正樹, 森脇成典, 石徹白晃治, 高橋走, 新谷昌人, 麻生洋一, 高島健, 中澤知洋, 高橋忠幸, 国分紀秀, 吉光徹雄, 小高裕和, 湯浅孝行, 石川毅彦, 榎戸輝揚, 苔山圭以子, 坂井真一郎, 佐藤修一, 高森昭光, 坪野公夫, 戸田知朗, 橋本樹明: SDS-1/SWIM 搭載超小型重力波検出器による観測成果, 第 12 回宇宙科学シンポジウム (2012 年 1 月, JAXA/ISAS).
- [32] 正田亜八香, 新谷昌人, 道村唯太, 麻生洋一, 安東正樹, 穀山渉, 坪野公夫: DECIGO pathfinder における重力場観測の感度評価, 第 12 回宇宙科学シンポジウム (2012 年 1 月, JAXA/ISAS).
- [33] 坪野公夫, スタートした LCGT 計画, ビッグバンセンター研究交流会 (2011 年 11 月、東京大学、本郷).
- [34] 穀山渉, 安東正樹, 森脇成典, 石徹白晃治, 高橋走, 新谷昌人, 麻生洋一, 高島健, 中澤知洋, 高橋忠幸, 国分紀秀, 吉光徹雄, 小高裕和, 湯浅孝行, 石川毅彦, 榎戸輝揚, 苔山圭以子, 坂井真一郎, 佐藤修一, 高森昭光,

- 坪野公夫, 戸田知朗, 橋本樹明: SWIM による重力波観測成果と DPF 技術の宇宙実証, 第 10 回 DECIGO ワークショップ (2011 年 11 月 19 日, 京都大学).
- [35] 牛場崇文, 柴田和憲, 大塚茂巳, 平松成範, 麻生洋一, 坪野公夫, 共振型振動子を用いたサブミリメートル領域における重力法則の検証 III, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 9 月, 弘前大学, 青森).
- [36] 柴田和憲, 牛場崇文, 大塚茂巳, 平松成範, 麻生洋一, 坪野公夫, 共振型振動子を用いたサブミリメートル領域における重力法則の検証 (4), 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 9 月, 弘前大学, 青森).
- [37] 正田亜八香, 岡田健志, 石徹白晃治, 安東正樹, 麻生洋一, 坪野公夫, 超伝導磁気浮上型ねじれアンテナによる東京・京都での重力波同時観測 III, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 9 月, 弘前大学, 青森).
- [38] 安東正樹, 川村静児, 瀬戸直樹, 中村卓史, 坪野公夫, 佐藤修一, 田中貴, 船木一幸, 沼田健司, 神田展行, 井岡邦仁, 高島健, 横山順一, 青柳巧介, 我妻一博, 阿久津智忠, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 新谷昌人, 池上健, 石川毅彦, 石崎秀晴, 石徹白晃治, 石原秀樹, 和泉究, 市来淨典, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 上田暁俊, 植田憲一, 歌島昌由, 江口智士, 江尻悠美子, 榎基宏, 戎崎俊一, 江里口良治, 大石奈緒子, 大河正志, 大橋正健, 大原謙一, 大淵喜之, 岡田健志, 岡田則夫, 河島信樹, 川添史子, 河野功, 木内建太, 岸本直子, 國中均, 國森裕生, 黒田和明, 黒柳幸子, 小泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山渉, 苔山圭以子, 古在由秀, 小嶋康史, 固武慶, 小林史歩, 西條統之, 齊藤遼, 坂井真一郎, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親, 佐々木節, 佐藤孝, 柴田大, 正田亜八香, 真貝寿明, 杉山直, 鈴木理恵子, 諏訪雄大, 宗宮健太郎, 祖谷元, 高野忠, 高橋走, 高橋慶太郎, 高橋忠幸, 高橋弘毅, 高橋史宜, 高橋龍一, 高橋竜太郎, 高森昭光, 田越秀行, 田代寛之, 田中伸幸, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 陳たん, 辻川信二, 常定芳基, 豊嶋守生, 鳥居泰男, 中尾憲一, 中澤知洋, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中山宜典, 西澤篤志, 西田恵里奈, 西山和孝, 丹羽佳人, 能見大河, 橋本樹明, 端山和大, 原田知広, 疋田渉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志, 福嶋美津広, 藤田龍一, 藤本眞克, 二間瀬敏史, 細川瑞彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 松本伸之, 道村唯太, 宮川治, 宮本雲平, 三代木伸二, 向山信治, 武者満, 森澤理之, 森本睦子, 森脇成典, 八木絢外, 山川宏, 山崎利孝, 山元一広, 吉田至順, 吉野泰造, 柳哲文, 若林野花, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (33):DECIGO/DPF, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 9 月, 弘前大学, 青森).
- [39] 佐藤修一, 阿久津智忠, 上田暁俊, 新谷昌人, 麻生洋一, 鳥居泰男, 田中伸幸, 陳たん, 権藤里奈, 大淵喜之, 岡田則夫, 正田亜八香, 道村唯太, 坪野公夫, 穀山渉, 安東正樹, 川村静児, DECIGO pathfinder のための干渉計モジュールの開発 (3), 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 9 月, 弘前大学, 青森).
- [40] 岡田健志, 麻生洋一, 坪野公夫, 石徹白晃治, 安東正樹, DPF のマスモジュールにおける残留ガス雑音の研究 III, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 9 月, 弘前大学, 青森).
- [41] 坪野公夫, 波多野智, 三橋秀人, 池上健, 稲場肇, 渡部謙一, 洪鋒雷, 鈴木敏一, 麻生洋一, 平松成範, 低温光共振器を用いた超高安定光源の開発 II, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 9 月, 弘前大学, 青森).
- [42] 松本伸之, 高橋走, 麻生洋一, 坪野公夫, 政田元太, 古澤明, 重力波検出器の感度向上に向けたスクイーズド光の生成実験 V, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 9 月, 弘前大学, 青森).
- [43] 大前宣昭, 麻生洋一, 坪野公夫, 平松成範, 正田亜八香, 波多野智, 三橋秀人, 香取秀俊, 低温光共振器を用いた時計用周波数安定化レーザーの開発, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 9 月, 弘前大学, 青森).
- [44] 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 山元一広, 道村唯太, 辰巳大輔, 阿久津智忠, 我妻一博, 西田恵里奈, 陳タン, 安東正樹, 新井宏二, 山本博章, LCGT Collaboration, LCGT の主干渉計設計, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 9 月, 弘前大学, 青森).
- [45] 道村唯太, 麻生洋一, 我妻一博, 関口貴令, Matt Evans, Lisa Barsotti, The LCGT Collaboration, LCGT のアラインメント制御, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 9 月, 弘前大学, 青森).
- [46] 我妻一博, 辰巳大輔, Chen Dan, 山本博章, 麻生洋一, LCGT Collaboration, LCGT 用 Power Recycling Cavity の設計に関する考察, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 9 月, 弘前大学, 青森).
- [47] 宮川治, 大石奈緒子, 三代木伸二, 和泉究, 麻生洋一, 斎藤陽紀, 道村唯太, 端山和大, LCGT Collaboration, 計算機を利用した LCGT の制御, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 9 月, 弘前大学, 青森).
- [48] 大前 宣昭, 麻生 洋一, 坪野 公夫, 平松 成範, 正田 亜八香, 波多野 智, 三橋 秀人, 香取 秀俊: 低温光共振器を用いた時計用周波数安定化レーザーの開発, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 9 月, 富山大学, 富山).
- [49] 坪野公夫, 重力波プロジェクト報告 LCGT, DECIGO, DPF, RESCUE 夏の学校 (2011 年 7 月, 熊本、三愛高原ホテル).
- [50] 坪野公夫, ついにスタート! LCGT, 物理教室ランチトーク (2011 年 5 月, 東京大学、本郷).
- 招待講演
- [51] 麻生洋一, 超高感度重力波検出器へ向けた光学設計技術, 2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会シンポジウム 「重力波観測用巨大干渉計の設計と建設」 (早稲田大学), 2012 年 3 月.
- [52] 坪野公夫, 低温光共振器を用いた超高安定光源の開発, 「最も正確なものさし 光コム」のためのレーザー開発ワークショップ (台場、日本科学未来館), 2011 年 12 月.
- (セミナー)
- [53] 穀山渉: ねじれ型重力波アンテナ (TOBA) と宇宙空間回転 TOBA による重力波観測, 京都大学天体核研究室 重力波・重力実験セミナー (2011 年 10 月 21 日, 京都大学).

6.4 佐野・原田研究室

佐野・原田研究室では、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の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、流体現象などにおいてその存在が知られていたが、力学系の分岐理論やアトラクターの概念、カオスなどの理解の進展により、流体系に限らず、より広範な物理現象を含む大きなクラスとしての非線形力学系が持つ一般的性質として学問体系が再編成されつつある。そのような観点からは、流体力学、液晶やコロイドなどのソフトマター、化学反応系、生命システムまで含めて、パターン形成や非線形振動、カオスや乱流といった自己組織現象の動力学は共通した特徴を持っており、系の詳細によらず統一的に記述し扱うことが可能である。以上に加えて最近では、微小な系におけるゆらぎの統計則や、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に、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を構築することも視野に入りつつある。また一方で、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、有効な自由度の数などにより多様な運動形態が生じ、普遍性だけではな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、我々は典型的と思われる非平衡系の実験系を選び、良く制御された実験を行い非平衡度を上げていった時に見られる新たな現象を詳細に観測するという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。

メンバーの異動は、次の通りである。2011年4月より、竹内一将が助教として新たにメンバーに加わった。また、博士研究員の松尾美希がJAMSTEC研究員に、江宏仁が国立台湾大学応用力学研究所の助教授に転出した。

6.4.1 巨視的非平衡系の物理

液晶乱流が示す界面成長の普遍揺らぎ

スケール不変な物理現象はどこまで普遍的な法則に従うのか？平衡系の臨界現象で見られる豊かな普遍構造は非平衡系では如何なる形で現れるのか？非平衡統計力学の可能性を探る上でも重要なこれらの問いへのアプローチとして、我々は揺らぎ界面成長の普遍挙動に注目している。スケール不変な界面成長の基本的普遍クラスは Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) クラスとして知られ、近年数理物理の発展により可解モデルの性質が次々と解かれて大きな注目を集めている。我々はこの問題に実験側から取り組み、液晶乱流ドメインの成長過程で見られる界面成長の詳細な解析を行った。

ある種のネマチック液晶に高電場をかけ、レーザーによって位相欠陥を導入すると、DSM2 と呼ばれる位相欠陥乱流の界面成長が観察できる。我々はレーザー形状を制御することで円形界面と平面界面の二種類を生成し（図 6.4.1 写真）、昨年度までに界面揺らぎの振幅が KPZ クラスのスケール指数を示すこと、分布関数が KPZ クラス可解モデルの厳密解と一致すること（図 6.4.1 右上）を示していた。本年度は実験データの解析を更に進め、時間・空間の相関関数（図 6.4.1 左下）や有限時間効果、極値統計分布など、様々な統計的性質について実験事実を提示した。結果、指数を除く全ての統計量において円形界面と平面界面で異なる結果が得られ、また揺らぎ分布や相関関数にランダム行列の数理が深く関わるなど、界面普遍揺らぎ

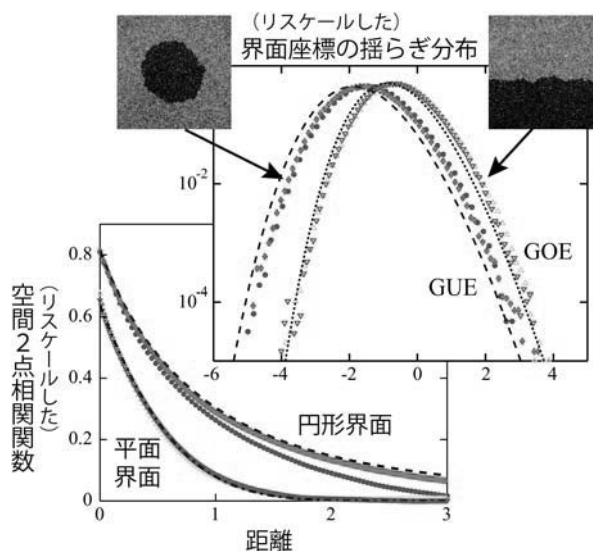


図 6.4.1: 右上: DSM2 乱流の成長界面の揺らぎ分布、左下: 空間相関関数。円形・平面界面の揺らぎ分布は GUE・GOE ランダム行列の最大固有値分布と一致し、円形界面の空間相関は GUE Dyson ブラウン運動の相関と一致する。

の豊かで非自明な普遍統計則の様相を明らかにした [1, 2, 3, 16, 19, 20, 28, 34, 51, 72, 80, 84, 85, 86, 89]。また、我々は界面成長だけでなく液晶の乱流間相転移にも着目し、その普遍的臨界現象と対称性の影響を調べている [1, 2, 41, 84, 85, 87]。

液晶のトポロジカル欠陥渦

近年乱流の雛形として盛んに研究されている、超流動ヘリウムや冷却原子気体といった量子流体における欠陥渦との対比を念頭に、振動細線および振動電場によって励起される液晶トポロジカル欠陥渦の生成と流体相互作用の観察を行った [74]。

実験では、室温で直接観察できる液晶系の利点を生かし、流れとの相互作用によって配向場が乱され、欠陥が生成、伸張り、衝突、組換をおこなう過程を捉えることに成功した。配向処理を施したガラス基板で液晶をはさみこみ、磁場と交流電流によってタングステン細線を振動させ、あるいは一次元状の透明電極に電圧を印加して液晶電気対流を発生させて、これら駆動力の増加とともに欠陥渦が拡がっていくことを示し、さらに横方向流れを与えた場合に欠陥が引き伸ばされて下流に飛んでゆくことを検証した (図 6.4.2)。特に、臨界流速では欠陥渦密度が冪的に減衰することを確認でき、理論的に予想された確率統計的性質を示唆する結果を得た。

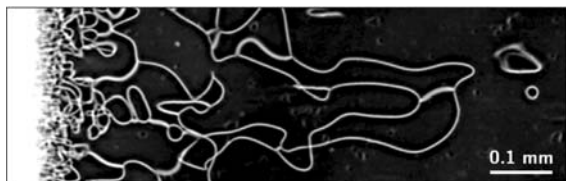


図 6.4.2: 横方向流れによる液晶欠陥渦のフライト

沸騰による伝熱面温度分布の変動と熱輸送効率

熱対流系についての研究は、理論、実験の各方面で数多く行われてきた。しかしながら、多くの先行研究で取り扱われてきた系では、作動流体は気体のみあるいは液体のみといった単一相であり、気体と液体が共存している系での研究は近年に至るまでなされてこなかった。2009 年に G. Ahlers らによって、臨界点近傍のエタンを用いた二相共存系熱対流における熱輸送特性が報告されているが、同グループは系を臨界点近傍に保つために系を圧力、物質浴と接続させているため、実験領域における物質の量は一定ではなく、また圧力の変動といった沸騰現象に由来するダイナミクスには焦点を当てていない。

本研究では工学的にはヒートパイプとして知られている系を用いて実験を行っている。Ahlers らの先行研究とは異なり、物質的に閉じた系であるため沸騰現象に由来する圧力および温度の変動を測定することができる。また、伝熱面温度を測定するための

サーミスタは円周上に 8 個実装されているため、局所的に発生する沸騰現象による温度の不均一性を検出することができる。今回得られた結果として、加熱面温度の非一様性についての時系列から沸騰現象の状態 (Bursting Ratio) を定義することで、熱の輸送効率と沸騰状態の関係を明らかにした (図 6.4.3)。

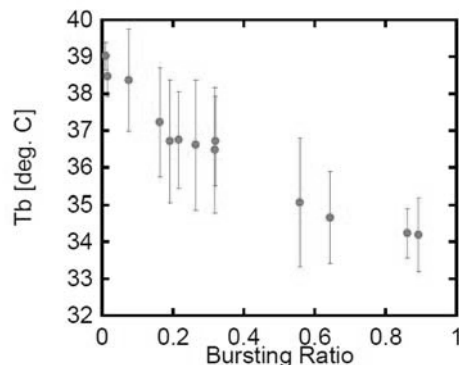


図 6.4.3: 加熱面温度 (T_b) と沸騰状態 (Bursting Ratio) の相関。Bursting Ratio が大きいほど盛んに沸騰が生じており、加熱面の熱が速やかに輸送されることで温度が減少する傾向にある。

非ブラウン粒子を含む低レイノルズ流体の可逆・非可逆転移

低レイノルズ流体は、ストークス方程式によって記述されるため、近似的に可逆な振る舞いを見せる。この系に非ブラウン粒子を加え、Couette Cell を用いて剪断を印加した場合、剪断の大きさによって可逆から非可逆に転移することが報告されている。また、この系のレオロジーを見ると、可逆な場合は、粘性的な性質しか示さないが、不可逆になることで、弾性的な性質を示し、しかもその大きさが不可逆な粒子の割合に比例することがわかっている。そこで、このレオロジーと転移の関係を明らかにするための実

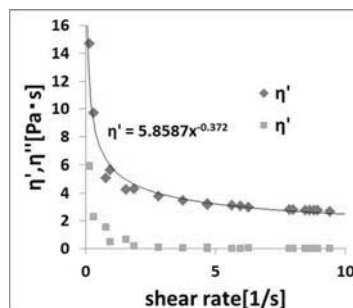


図 6.4.4: 上図: せん断速度とせん断応力の関係。粒子があることにによって、系がジャミング現象的な性質を見せていることがわかる。

験を行った。実験の結果、ジャミング現象に似た現象とともに系が弾性的な性質を見せることがわかった (図 6.4.4)。つまり、せん断速度ゼロ近傍で、複素粘性の虚数項が急激に立ち上がり、系が弾性的な性質を示すことがわかった [79]。

マイクロチューブルに見る自走粒子の集団運動

鳥の群れ運動やイワシ玉など自走するものが多数集まることで形成される秩序構造が存在する。近年基礎物理・応用研究ともにこのような集団運動について盛んに研究が行われている。特に Vicsek 等によって提唱された数値モデル (T. Vicsek, Phys. Rev. Lett. 1995.) などにより興味深い物理的諸性質が発見され、統計物理学的に注目されている分野の一つである。

このような自走粒子の集団運動に関し、我々は記憶を持った自走粒子の集団ダイナミクスについて研究を行った。実験系としてはガラス基板上に固定されたダイニン上を走るマイクロチューブルを用いた。ダイニンとマイクロチューブルは生体内のタンパク質で微生物の鞭毛などを形成する。観察の結果、ダイニン上を走るマイクロチューブルはランダムに動くものの、軌跡の曲率が一定時間持続することがわかった。一定時間維持される曲率が一種の記憶として働き、マイクロチューブルを多数ばらまいた時にマイクロチューブル集団の渦が格子状に形成されることがわかった (図 6.4.5 (a))。我々は記憶を持った自走粒子に対する数値モデルを考案し、記憶時間が十分長い時に実験で得られた渦の格子パターンが形成されることを明らかにした (図 6.4.5 (b)) [15, 29, 52]。

自己駆動する非対称粒子の運動、相互作用と集団挙動

本実験で用いた非対称なコロイド粒子は交流電場によって自己駆動することが知られている。この非対称な粒子 (Janus 粒子) はポリスチレン粒子に金属を半球コートした、数ミクロンの大きさのものであり、ポリスチレン側を頭として電場と垂直の方向に動く。今回、Janus 粒子に上下方向の交流電場を与えることにより、粒子の平面運動が見られた。

粒子の周りに生じる非対称な流れは交流電場の周波数によって異なり、結果として粒子の運動方向と粒子間相互作用の変化が確認できた。特に、中間周波数領域 (500Hz~30kHz) では、ポリスチレン側を頭として粒子が駆動し、粒子同士が反発するのに対し、高周波数領域 (30kHz~) では駆動方向と相互作用の逆転が観測できた (図 6.4.6(a))。上記の逆転現象は、金属とポリスチレン部分における流れ及び分極の周波数依存性によって理解できた [53, 68, 30, 35, 21]。

また、粒子が自己駆動する際に受ける力を測定するため、回転する Janus 粒子 (図 6.4.6(b) inset) を用いた実験も行った。直接力を測定できないため、Fluctuation theorem (FT) を用いることにより、回転情報のみで力を推定することができ、電場に依存することがわかった (図 6.4.6(b))。結果の妥当性を確認するため、回転速度とストークスの式 (壁に

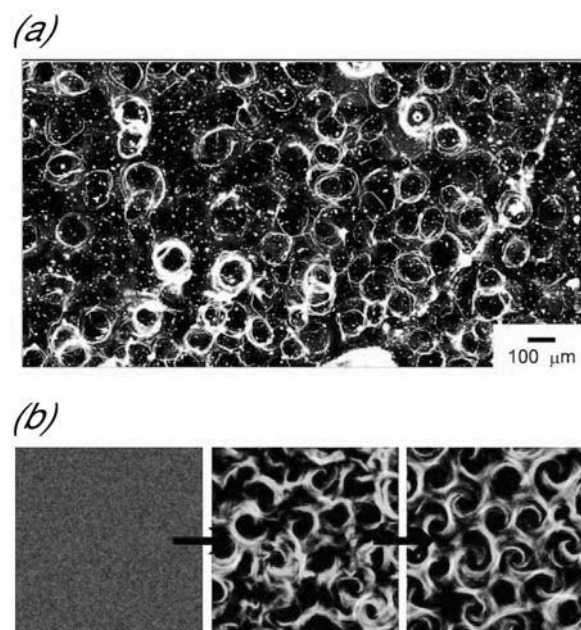


図 6.4.5: (a) ダイニンに駆動されるマイクロチューブルが形成する渦の格子。 (b) 数値モデルによって再現された渦の格子の生成過程。

近い場合の補正を入れた) を用いて力のオーダーを推定したところ、両結果が一致した (図 6.4.6(b)) [53, 68, 30, 35, 21]。

さらに、多くの Janus 粒子を駆動する実験も行った。ここでは、平衡系で見ることのできない特異な密度ゆらぎが確認できた (図 6.4.6(c))。実際、2つの粒子が接近すると、運動方向を揃える傾向が見られ (図 6.4.6(c) inset)、特異な密度ゆらぎの原因となっていることが考えられる [53, 68, 30, 35, 21]。

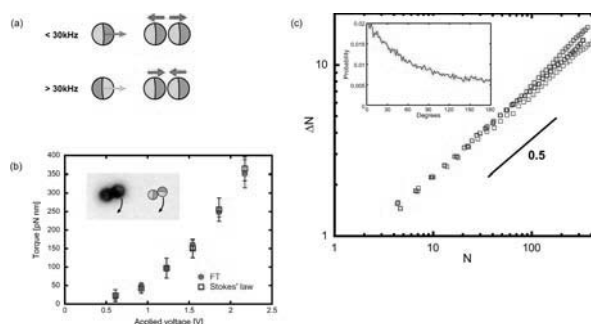


図 6.4.6: (a) 駆動方向及び相互作用。 (b) FT による力の推定。 Inset: 回転する Janus 粒子。 (c) 多粒子実験での特異な密度ゆらぎ。 Inset: 2 粒子が運動方向を揃える様子。

濃厚懸濁液の界面不安定性とパターンダイナミクス

細胞に代表されるように、分裂や変形をしながら自発的に運動をする粒子・孤立パターンダイナミクスの研究はいくつか行われている。しかし、変形をしながら自発運動する孤立パターンは流体系では発見されていなかった。我々は垂直加振下のポテトスターチ懸濁液界面において、分裂する穴を複雑流体の系で初めて発見した [4]。また、懸濁液中の粉体粒子の粒径を変え実験を行った結果、加振強度が大きくなると楕円変形した穴が分裂する穴に分岐することを発見した [32, 33]。さらに我々は、今まで注目されてこなかった、壁面でのレオロジーを考慮して流体の方程式から懸濁液界面の発展方程式を導き出した。このモデルにより、先行研究で発見されていた **heaping** という界面不安定性の実験結果を非常に良く説明できることを示した [37, 64, 88]。次に、私たちは水よりも重く粘性の高いシリコンオイル上に水滴を乗せ垂直加振することで、液滴が変形をしながら自発的に運動することを発見した (図 6.4.7)。これは水滴上に局在したファラデー波が起こる事で駆動されていることが分かった。ファラデー波により液滴の形状が変形するという報告はあるが、ファラデー波により自発運動をする液滴は初めての報告である [75]。

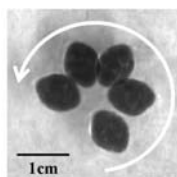


図 6.4.7: 垂直加振下でのシリコンオイル上の水滴の自発運動

6.4.2 小さな非平衡系の物理

フィードバック制御による冷却と情報量の関係

コロイド粒子系におけるフィードバック制御による冷却現象は、原子間力顕微鏡におけるノイズキャンセレーションや、レーザー冷却に代わる量子効果実現のためのデバイスとして研究が行われている。このフィードバックによる冷却は Brown 粒子の速度と逆向きのフィードバック力を加え続けることで達成され、特に近年になって Brown 粒子の瞬間的な速度の測定が可能になったことより、コロイド粒子の速度揺らぎがミリケルビン領域まで下げることが可能になっている。実験系では常にフィードバック装置の測定誤差などによってコロイド粒子の冷却限界が存在するが、この冷却限界に対する一般的な定量的議論は行われてこなかった。この問題に対し、我々は緩和時間あたりにフィードバックのために測定した際に、得られる情報量 (系の状態と測定結果の間の相互情報量) によって、冷却限界が決定されるという式を導出した [6, 18, 23]。

この式を用いて、冷却限界を見積もることが可能であり、測定間隔が一定で、各測定に対するフィードバックのプロトコルが同一の場合は、冷却限界が緩和時間と測定間隔の比で決定されることや、測定誤差 0 や測定間隔 0 の極限でない場合には絶対零度が達成されないことを示した。また、測定誤差が Gaussian のフィードバックによる冷却のモデルで、この式がフィードバックの冷却の性質を現していることを示した [23, 38, 55, 65, 70, 71]。

また、フィードバックによる冷却においては、フィードバック操作が有限時間でなされることから、我々は有限時間での情報-エントロピー生成の効率を議論した。この問題は、情報を仕事に変換する情報熱機関の最大仕事率の下での効率を議論することと等価であり、情報熱機関を実用化する上で重要な問題である。この問題に対して、我々は線形応答領域では 1 サイクルあたりの最小エントロピー生成率の下での効率が $1/2$ を超えないことと、フィードバックによる冷却では効率が 1 に限りなく近づくことを示した [23, 38, 70, 76]。

化学共役反応の効率限界と情報熱力学との関係

一見第二法則を破っているかに見える系が、実は外界の自由エネルギーを取り込んでその秩序を作り出している、ということで説明される現象は、生物系に限らず、自然界に広く見られる。特に細胞内のように、マクロな操作主のいない、自律的でミクロ環境下では、自由エネルギー伝達手段として、ほとんどすべての場面で化学共役反応が採用されている。

我々はまず、元の熱平衡状態を化学共役反応により新しい平衡状態に遷移させる過程の伝達効率を考え、第二法則による自明な効率限界よりも十分低い原理的な限界が存在している点を指摘した [13, 17, 66, 24]。次に、化学共役反応を二つの部分系を含むマルコフ過程とみなし (図 6.4.8)、自由エネルギー伝達の「手段」が情報熱力学的な描像で理解できるかどうかについて考察した。具体的には、現象が Maxwell's demon-like であるとはどういうことかを定義し、同じ 2 自由度マルコフ過程の枠組みにおいて、化学共役反応的な場合と情報熱力学的な場合について、自由エネルギー伝達の方法の違いを議論した [56, 77, 24]。

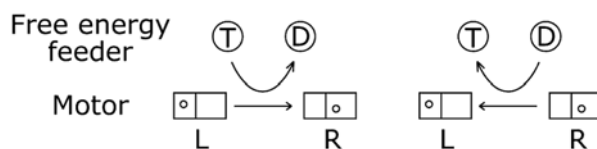


図 6.4.8: 化学共役系 (二準位間遷移同士の共役) の例

ミクロな情報熱機関の実証実験

「シラードエンジン」は情報熱機関（系の状態を観測しその結果に応じたフィードバック操作を施す熱機関）のミニマルモデルとされ、具体的には次のような系と操作からなる。熱浴に接した箱に1つの粒子が閉じ込められており、ある瞬間に粒子の位置を観測する。箱の中心に仕切りを入れ、粒子が右にあれば左に、左にあれば右に仕切りを動かす。粒子の存在する体積が2倍になるので $kT \log 2$ の仕事を取り出せる一方、理想的には仕切りを入れるのに仕事は必要ないためこのサイクルは観測で得られた情報 $kT \log 2$ を仕事に変換するものだと考えられている。

我々の目標はそのシラードエンジンを古典的な実験系で再現することである。水中に浮かぶマイクロビーズをレーザーピンセットによりトラップし、レーザーを高速走査することで実効的に箱型のポテンシャルを作ることができる。走査の幅を変えることで粒子を閉じ込めた箱の膨張・圧縮を再現し、シラードエンジンと同じプロトコルを実装する。動画解析により粒子が箱にした仕事を算出し、観測で得られる情報量と比較することで近年発表された一般化 Jarzynski 等式を検証するとともに膨張速度と仕事率の関係について議論する。

温度勾配中のコロイド粒子の運動

系の不均一性によって流れが生じる輸送現象は、非平衡特有の現象の代表例である。温度勾配によってエネルギーが輸送される熱伝導は古くから知られていたが、温度勾配によって物質が輸送される Soret 効果と呼ばれる現象は19世紀に発見され、その後いくつもの系でその性質が調べられてきた。

最近では、レーザーを用いた局所加熱の方法が開発されたことで、拡散が遅いために測定が難しかった μm スケールのコロイド粒子系でも Soret 効果の測定が行われている。しかし、これまでの実験ではコロイド粒子の発する蛍光の強度から間接的に粒子の分布を測っているために、測定可能な試料が限られている等の問題があった。これらの問題点を克服するために、個々の粒子の運動の直接観察によって分布を求めるため実験系を作った。

この測定方法をもちいて、今回は水溶液中の silica コロイド粒子の Soret 効果の測定を行った。そして、 nm サイズの silica 粒子で知られている高温部への集積が μm スケールの粒子でも起こることを確かめた (図 6.4.9 左)。また、水溶液に非極性の高分子である polyethylene glycol を添加することで起こる Soret 効果の反転 (図 6.4.9 右) の高分子濃度依存性を調べた結果、高分子が silica コロイド粒子の表面に吸着することで Soret 効果の反転が引き起こされることを見出した [57, 67, 69, 40, 25]。さらに、Soret 効果の変化を引き起こすメカニズムに迫るため、高分子のサイズ依存性の測定も行った [42, 78, 25]。

6.4.3 生命現象の物理

運動・分裂する細胞の力場

運動する物体を物理的に理解するためには、物体に働く力と運動との関係を定量的に記述する必要がある。この素朴な方針は無生物のみならず生物についても有効であると考えられるが、細胞に関してそのような力-運動の関係はいまだ明らかにされていない。当研究室は2次元細胞運動のモデル系である細胞性粘菌（キイロタマホコリカビ）を実験材料として、運動する細胞が基盤に及ぼす力場を測定した (図 6.4.10)。測定した力場の空間分布を多重極展開して解析し、展開の低次の成分と細胞の動きとが相関することを見出した。この結果は細胞の力場と運動の関係を明らかにした、最初の報告である [22, 36, 43]。

細胞分裂の理解のためには、その化学的側面に加え、力学的側面を明らかにする必要がある。分裂期の細胞が能動的に生成する力のうち、細胞と溶液との界面で働く力と細胞内部で働く力についてはすでに

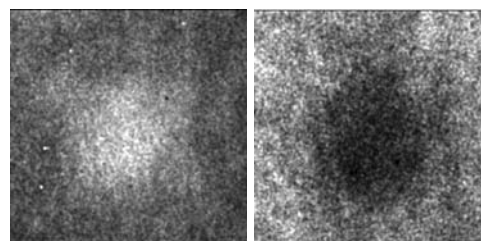


図 6.4.9: 蛍光強度を使わない方法で求めた粒子分布: 明るい部分が粒子が集まっている部分。画像中央がレーザーによって局所的に加熱されている。左: 高分子を含まない水溶液中の silica コロイド粒子。右: Polyethylene glycol を含む水溶液中の silica コロイド粒子

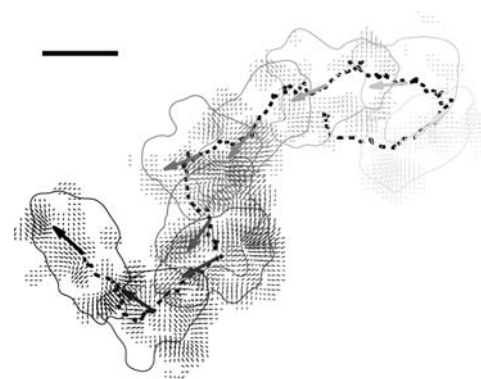


図 6.4.10: 細胞の力-運動の関係。細胞の輪郭、重心の軌跡、牽引力 (小さな矢印)、2次モーメント符号で決めた1次モーメント「ベクトル」の時間発展を図示した。バー: $10\mu\text{m}$ 。

いくつかの報告がある一方で、細胞と基盤との界面に働く力・牽引力はいまだ測定されていない。当研究室は、細胞性粘菌を実験材料として用い、分裂期の細胞が基盤に及ぼす力場を定量的に測定した。分裂期の細胞は運動時に比べて2倍程度の大きな力を基盤に加えており、この力の大部分は分裂溝の両端に働く張力であった。さらに力場の空間的な異方性と分裂軸とが分裂初期から相関していることがわかった。これらの結果は、分裂期の牽引力が、1. 分裂期終盤に起こる分裂溝の切断への寄与、2. 分裂期の回転対称性の破れに関する情報の保持、の2つの役割を果たしていることを示唆するものである [22, 58]。

細胞生物物理学のための微細構造の作成

一般的な蛍光顕微鏡を用いた縮小露光システムを構築し、ミクロン程度の微細構造を簡便に作製することに成功した。今後、細胞を個別に長期観察するためのマイクロ流路や、細胞運動における力の直接測定に応用していくことが期待される。

実験では、細胞性粘菌の運動をつかさどる PIP_2 - PIP_3 サイクルをはじめとする各種シグナル伝達物質を蛍光標識し、それらがなす反応拡散系の動態挙動において、伝播波の後縁に強いアクチンスポットが形成されることを発見した。特にマイクロピラー上では、アクチンスポットが突起部分をつかんで運動する様子が観察された (図 6.4.11)。アクチンを伝播波の縁に局在させるようなモデルは明らかでないが、凹凸部分で伝播波が誘起されることから、力学的な作用が細胞内アクチン重合系に伝わり、さらに上流の反応サイクルへとフィードバックする伝達経路の存在が示唆される [54, 63]。

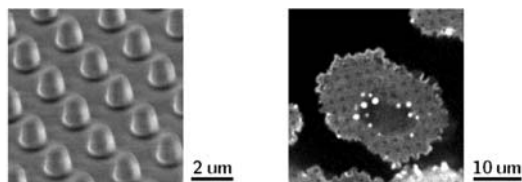


図 6.4.11: マイクロピラー構造とアクチン波の伝播

<受賞>

- [1] 竹内一将, 第 28 回 井上研究奨励賞, 井上科学振興財団, 2010 年 2 月 3 日.
- [2] 竹内一将, 第 6 回 日本物理学会 領域 11 若手奨励賞, 日本物理学会, 2010 年 3 月 25 日.

<報文>

(原著論文)

- [3] K. A. Takeuchi, M. Sano, T. Sasamoto, and H. Spohn: Growing interfaces uncover universal fluctuations behind scale invariance, *Sci. Rep. (Nature)*, **1**, 34 (2011).

- [4] H. Ebata and M. Sano, Self-Replicating Holes in a Vertically Vibrated Dense Suspension: *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 088301 (2011).
- [5] K. A. Takeuchi, H. Chaté, F. Ginelli, A. Politi, and A. Torcini: Extensive and Subextensive Chaos in Globally Coupled Dynamical Systems, *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 124101 (2011).
- [6] S. Ito and M. Sano: Effects of error on fluctuations under feedback control, *Phys. Rev. E* **84**, 021123 (2011).
- [7] M. Bienia and M. Sano, Non-destructive ultrasonic velocimetry for central region velocity fields in turbulent Rayleigh-Benard convection of mercury, *Journal: Flow Measurement and Instrumentation*, **22**, 291-294 (2011).
- [8] M. Y. Matsuo, Hierarchical mechanism of development of wealth and structure for a premodern local society, *Phys. Rev. E* **83**, 066110 (2011).
- [9] M. Y. Matsuo and M. Sano, Geometrical model of a self-propelled broken interface, *J. Phys. A: Math. Theor.* **44**, 285101 (2011).
- [10] H. Kitahata, N. Yoshinaga, K. H. Nagai, and Y. Sumino: Spontaneous motion of a droplet coupled with a chemical wave, *Phys. Rev. E*, **84**, 015101(R) (2011).
- [11] K. A. Takeuchi, H.-l. Yang, F. Ginelli, G. Radons, and H. Chaté: Hyperbolic decoupling of tangent space and effective dimension of dissipative systems, *Phys. Rev. E*, **84**, 046214 (2011).
- [12] F. Ginelli, K. A. Takeuchi, H. Chaté, A. Politi, and A. Torcini: Chaos in the Hamiltonian mean field model, *Phys. Rev. E*, **84**, 066211 (2011).
- [13] K. Kawaguchi and M. Sano: Free energy transduction in autonomous systems, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **80**, 083003 (2011).
- [14] M. Y. Matsuo and M. Sano, Reflection antisymmetric spatiotemporal chaos under field-translational invariance, *Phys. Rev. E* **85**, 036215 (2012).
- [15] Y. Sumino, K. H. Nagai, Y. Shitaka, D. Tanaka, K. Yoshikawa, H. Chaté, and K. Oiwa: Large-scale vortex lattice emerging from collectively moving microtubules, *Nature*, **483**, 448-452 (2012).

(会議抄録)

- [16] 竹内一将: 揺らぐ成長界面の普遍性 - スケーリングを超えて, *物性研究*, **96**, 22-25, 2011 年.
- [17] 川口喬吾, 佐野雅己: 自律系の自由エネルギー変換効率, *物性研究*, **96**, 139-140, 2011 年.
- [18] 伊藤創祐, 佐野雅己: フィードバック制御下の Harada-Sasa 等式とその制限, *物性研究*, **96**, 181-182, 2011 年.
- [19] K. A. Takeuchi: Brownian Motion to Growing Interfaces - universal laws of physics across biology, economics, and mathematics -, *Cahier Multiculturel de la Maison du Japon*, **5**, 8-15 (2011).

- [20] 竹内一将：界面成長とランダム行列の不思議な関係～液晶乱流が示す実験証拠～，九州大学 応用力学研究所 研究集会報告 23AO-S7, 22-25, 2011 年.

(国内雑誌)

(学位論文)

- [21] 鈴木量：自己駆動非対称粒子を用いた非平衡物理の実験的研究，博士論文，2012 年 3 月.
- [22] 谷本博一：力測定法を用いた細胞運動と分裂に関する生物物理学的研究，博士論文，2012 年 3 月.
- [23] 伊藤創祐：フィードバック制御下での緩和と情報による冷却限界，修士論文，2012 年 3 月.
- [24] K. Kawaguchi: Free energy transduction in small autonomous systems, Master thesis, Mar. 2012.
- [25] 中山洋平：温度勾配が駆動するコロイド粒子輸送の輸送係数の測定，修士論文，2012 年 3 月.

(著書)

- [26] M. Sano, M. Y. Matsuo, and T. Ohta, Dynamics of deformable self-propelled particles: relation with cell migration, "Series in Soft Condensed Matter - Vol. 4 NON-EQUILIBRIUM SOFT MATTER PHYSICS", edited by S. Komura and T. Ohta, Chapter 7 (pp.365- pp.415), World Scientific (2012).

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [27] K. A. Takeuchi, H. Chaté, F. Ginelli, A. Politi, and A. Torcini: Extensive and Sub-Extensive Chaos in Systems with Long-Range Interactions, Chaos, Complexity and Transport, May 23-27, 2011, Marseille, France.
- [28] K. A. Takeuchi and M. Sano: Geometry-dependent universal fluctuations of growing interfaces: evidence in turbulent liquid crystals, Engineering of Chemical Complexity, July 4-8, 2011, Berlin, Germany.
- [29] K. H. Nagai, H. Kitahata, Y. Sumino, and N. Yoshinaga: Dynamics of self-rotating droplets driven by Marangoni effect, Collective Dynamics and Pattern Formation in Active Matter Systems, Aug. 29 - Sep. 23, 2011, Max Planck Institute, Dresden, Germany.
- [30] R. Suzuki and M. Sano: Experiments on collective behaviour of self-propelling asymmetric colloidal particles using AC electric field, Collective Dynamics and Pattern Formation in Active Matter Systems, Aug. 29 - Sep. 23, 2011, Max Planck Institute, Dresden, Germany.
- [31] K. A. Takeuchi: Extensivity and sub-extensivity of chaos in globally-coupled systems, Dynamics Days Europe 2011, Sep. 12-16, 2011, Oldenburg, Germany.

- [32] H. Ebata and M. Sano: Bifurcation of holes in vertically vibrated dense suspensions, International Workshop on Nonlinear dynamics in Science, Sep. 26, 2011, Kyoto, Japan.
- [33] H. Ebata and M. Sano: Bifurcation from stable holes to replicating holes in vibrated dense Suspensions, Nara Workshop on Fracture and Related Topics, Oct. 12-14, 2011, Nara, Japan.
- [34] K. A. Takeuchi and M. Sano: Growing interfaces uncover universal fluctuations behind scale invariance, International Symposium on Complex Systems 2011, Dec. 1-2, 2011, the University of Tokyo, Japan.
- [35] R. Suzuki and M. Sano: Self-Propelling Asymmetric Colloids in AC Electric Field, International Symposium on Complex Systems 2011, Dec. 1-2, 2011, the University of Tokyo, Japan.
- [36] H. Tanimoto and M. Sano: Complementary pictures of traction stress field of migrating cell, Internal Symposium on Complex Systems 2011, Dec. 1-2, 2011, the University of Tokyo, Japan.
- [37] H. Ebata and M. Sano: Model of the heaping in vibrated suspensions under slip/non slip switching boundary condition, International Symposium on Complex Systems 2011, Dec. 1-2, 2011, the University of Tokyo, Japan.
- [38] S. Ito and M. Sano, Entropy pumping and finite time information thermodynamics, International Symposium on Complex Systems 2011, Dec. 1-2, 2011, the University of Tokyo, Japan.
- [39] K. Kawaguchi and M. Sano: Quantitative Observation of Cell Differentiation Dynamics, International Symposium on Complex Systems 2011, Dec. 1-2, 2011, the University of Tokyo, Japan.
- [40] Y. Nakayama and M. Sano: The effect of polymer adsorption on the non-equilibrium transport of colloidal particles, International Symposium on Complex Systems 2011, Dec. 1-2, 2011, the University of Tokyo, Japan.
- [41] K. A. Takeuchi: Liquid-crystal turbulence opens up experimental investigations on absorbing phase transitions, Phase Transition Dynamics in Soft Matter, Feb. 20-22, 2012, Kyoto University, Japan.
- [42] Y. Nakayama and M. Sano: Soret effect of silica particles under temperature gradient - the effect of polymer adsorption -, International Conference CODEF III "Colloidal Dispersions in External Fields", Mar. 20-23, 2012, Bonn, Germany.
- [43] H. Tanimoto and M. Sano: Multi-pole analysis of traction stresses reveals a simple force-motion relationship of migrating cell, CDB symposium on Quantitative Developmental Biology, Mar. 26-28, 2012, Kobe, Japan.

招待講演

- [44] Masaki Sano, Individual and collective dynamics of self-propelling micro-swimmers, International Workshop “Collective Dynamics and Pattern Formation in Active Matter Systems”, Sept. 12-16, 2011, Dresden, Germany.
- [45] Masaki Sano, Cell migration: Stress measurement and modeling, Seminar in Max-Planck Institute for Physics of Complex Systems, Sept. 21, 2011, Dresden, Germany.
- [46] Masaki Sano, Active Colloids: from external to self-control of colloidal transport Seminar at Institute for Physical Chemistry, Heidelberg University, Sept. 23, 2011, Heidelberg, Germany.
- [47] Masaki Sano, Active Colloids: from external to self-control of colloidal transport, 1st Scientific Symposium on Hot Nanoparticles and Nanostructures, Leipzig University, Oct. 10-11, 2011, Leipzig, Germany.
- [48] Masaki Sano, Information Energy Conversion in Autonomous and Non-autonomous Systems, Regional Bio-Soft Matter Workshop: Non-equilibrium Statistical Physics in Bio-Soft Systems, Oct. 27-29, 2011, National Taiwan University, Taipei.
- [49] Masaki Sano, Fluctuation and Information in Small Non-equilibrium Systems, GCOE Symposium, Links among Hierarchies, Kyoto University, Feb. 13-15, 2012, Kyoto.
- [50] Masaki Sano, Dynamics and Interaction of Colloids in Driven and Active States, Phase Transition Dynamics in Soft Matter: Bridging Microscale and Mesoscale, Feb. 20-22, 2012, Kyoto.
- [51] K. A. Takeuchi: Universal Fluctuations of Growing Interfaces - beyond scaling laws -, East Asia Joint Seminars on Statistical Physics 2012, Mar. 18-20, 2012, Suzhou, China.
- (国内会議)
一般講演
- [52] 永井健, 住野豊, H. Chaté, 大岩和弘: ダイニンとマイクロチューブが作る自走粒子のパターン形成, 第71回形の科学シンポジウム, 2011年6月17-19日, 千葉大学.
- [53] 鈴木量, 江宏仁, 佐野雅己: 自己駆動する非対称粒子の相互作用と集団挙動, 基研研究会 非平衡系の物理 - ミクロとマクロの架け橋 -, 2011年8月18-20日, 京都大学.
- [54] 黒田真史, 谷口大相: 微細構造上の細胞運動と応答, 基研研究会 非平衡系の物理 - ミクロとマクロの架け橋 -, 2011年8月18-20日, 京都大学.
- [55] 伊藤創祐, 佐野雅己: フィードバック制御された Langevin 系での有効温度の下限と情報量, 基研研究会 非平衡系の物理 - ミクロとマクロの架け橋 -, 2011年8月18-20日, 京都大学.
- [56] 川口喬吾, 佐野雅己: 相互情報量の物理モデル的理解, 基研研究会 非平衡系の物理 - ミクロとマクロの架け橋 -, 2011年8月18-20日, 京都大学.
- [57] 中山洋平, 佐野雅己: コロイド粒子溶液系における非平衡輸送, 基研研究会 非平衡系の物理 - ミクロとマクロの架け橋 -, 2011年8月18-20日, 京都大学.
- [58] 谷本博一, 佐野雅己: 分裂する細胞の力場, 日本生物物理学会 第49回年会, 2011年9月16-18日, 兵庫県立大学.
- [59] 竹内一将, H.-l. Yang, F. Ginelli, G. Radons, H. Chaté: Lyapunov ベクトルで捉える散逸力学系の有効次元 (II): 複素 Ginzburg-Landau 方程式の場合, 日本物理学会 2011年秋季大会, 2011年9月21-24日, 富山大学.
- [60] 竹内一将, H. Chaté: Lyapunov ベクトルで捉える散逸力学系の有効次元 (III): 周期軌道との関係, 日本物理学会 2011年秋季大会, 2011年9月21-24日, 富山大学.
- [61] 竹内一将, H. Chaté, F. Ginelli, A. Politi, A. Torcini: 大域結合系におけるカオスの示量性と“準”示量性, 日本物理学会 2011年秋季大会, 2011年9月21-24日, 富山大学.
- [62] 谷口大相, 黒田真史: ベイズ統計を用いた BZ 反応の構成方程式の推定, 日本物理学会 2011年秋季大会, 2011年9月21-24日, 富山大学.
- [63] 黒田真史, 谷口大相: 微細構造上の細胞運動と力学応答, 日本物理学会 2011年秋季大会, 2011年9月21-24日, 富山大学.
- [64] 江端宏之, 佐野雅己: 垂直加振下の懸濁液における heaping 形成のモデルについて, 日本物理学会 2011年秋季大会, 2011年9月21-24日, 富山大学.
- [65] 伊藤創祐, 佐野雅己: フィードバック制御された Langevin 系での有効温度の下限と情報量の関係式, 日本物理学会 2011年秋季大会, 2011年9月21-24日, 富山大学.
- [66] 川口喬吾, 佐野雅己: 自律的な自由エネルギー伝達の効率, 日本物理学会 2011年秋季大会, 2011年9月21-24日, 富山大学.
- [67] 中山洋平, 佐野雅己: 高分子溶液中でのコロイド粒子の Soret 効果, 日本物理学会 2011年秋季大会, 2011年9月21-24日, 富山大学.
- [68] 鈴木量, 佐野雅己: 自己駆動粒子の集団挙動の実験的理解, 第10回関東ソフトマター研究会, 2011年11月12日, 東京大学.
- [69] 中山洋平, 佐野雅己: 高分子の吸着によって引き起こされるコロイド粒子輸送係数の変化, 第10回関東ソフトマター研究会, 2011年11月12日, 東京大学.
- [70] 伊藤創祐, 佐野雅己: フィードバックによる冷却と有限時間の情報熱力学, 物理と情報の階層構造 — 情報を接点とした諸階層の制御と創発 —, 2012年1月5-7日, 京都大学.
- [71] 伊藤創祐, 佐野雅己: 緩和と情報による冷却限界, 情報統計力学の最前線 — 情報と揺らぎの制御の物理学を目指して —, 2012年3月21-23日, 京都大学.

- [72] 竹内一将：液晶乱流が示す KPZ 界面成長の特異な時間相関とユニバーサリティ，日本物理学会 2012 年年次大会，2012 年 3 月 24-27 日，関西学院大学。
- [73] 永井健：温度マランゴニ効果による液滴運動，日本物理学会 2012 年年次大会，2012 年 3 月 24-27 日，関西学院大学。
- [74] 黒田真史，佐野雅己：液晶におけるトポロジカル欠陥渦のフライトと減衰，日本物理学会 2012 年年次大会，2012 年 3 月 24-27 日，関西学院大学。
- [75] 江端宏之：ファラデーウェーブに誘起された液滴の自発運動，日本物理学会 2012 年年次大会，2012 年 3 月 24-27 日，関西学院大学。
- [76] 伊藤創祐，佐野雅己：有限時間の情報熱力学，日本物理学会 2012 年年次大会，2012 年 3 月 24-27 日，関西学院大学。
- [77] 川口喬吾，佐野雅己：化学共役反応と熱力学的限界，日本物理学会 2012 年年次大会，2012 年 3 月 24-27 日，関西学院大学。
- [78] 中山洋平，佐野雅己：高分子のコロイド表面への吸着と温度勾配が駆動する輸送現象の関係，日本物理学会 2012 年年次大会，2012 年 3 月 24-27 日，関西学院大学。
- [79] 乙村浩太郎，佐野雅己：非ブラウン粒子を含む低レイノルズ流体の非可逆性の研究，日本物理学会 2012 年年次大会，2012 年 3 月 24-27 日，関西学院大学。
- [87] K. A. Takeuchi: Directed Percolation Criticality and Hysteresis in Turbulent Liquid Crystals, ENS de Lyon, Laboratoire de Physique, July 12, 2011, France.
- [88] 江端宏之，佐野雅己：高濃度懸濁液における heaping 形成のモデルについて，京都大学 基礎物理学研究所 物性セミナー，2011 年 11 月 24 日。
- [89] 竹内一将：揺らぐ成長界面の普遍性 ～実験で見るランダム行列との不思議な関係～，東京大学 宮下・伊藤・藤堂・羽田野研 統計力学セミナー，2011 年 12 月 14 日。
- [90] 永井健：表面張力による液滴の自発運動，東京大学 豊田研究室 セミナー，2012 年 1 月 13 日。

(その他の講義)

- [91] 佐野雅己，マクロの自己組織化からミクロの自己組織化へ，理学系研究科共通科目，理学クラスター講義 I 「組織化」，2011 年 7 月 19 日，小柴ホール。
- [92] 佐野雅己，自己組織化とは何か：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，2011 年 11 月 5 日
- [93] 佐野雅己，集中講義，千葉大学理学部，非平衡系の統計物理学，2011 年 2 月 15～17 日，千葉大学。

招待講演

- [80] 竹内一将：界面成長とランダム行列の不思議な関係～液晶乱流が示す実験証拠～，非線形波動研究の進展－現象と数理の相互作用－，2011 年 10 月 27-29 日，九州大学 応用力学研究所。
- [81] 佐野雅己，マックスウェルの悪魔の物理，物理学専攻ガイダンス，6 月 6 日，東京大学小柴ホール。
- [82] 佐野雅己，アクティブソフトマターとしての自走コロイド，第一回ソフトマター研究会，2011 年 8 月 5 日，キャンパスプラザ京都。
- [83] 佐野雅己，ミクロとマクロの狭間から非平衡を見る：自律系の理解へ向けて，シンポジウム「創発と自己組織化?魅惑の非線形」，11 月 22 日，九州大学 西新プラザ。
- [84] 竹内一将：非平衡普遍法則の実験的検証，日本物理学会 2012 年年次大会，2012 年 3 月 24-27 日，関西学院大学。

(セミナー)

- [85] K. A. Takeuchi: Turbulent liquid crystals uncover universal behavior of macroscopic systems out of equilibrium, Università della Calabria, Dipartimento di Fisica, Apr. 18-19, 2011, Italy.
- [86] K. A. Takeuchi: Fluctuations universelles des interfaces croissantes: évidence dans les cristaux liquides turbulents, CEA-Saclay, séminaire SPEC, June 1, 2011, France.

6.5 山本研究室

6.5.1 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、観測的にも理論的にも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重要なテーマでもある。本研究室では、星・惑星系形成とそこでの物質進化を、電波観測（主にミリ波、サブミリ波、テラヘルツ波）により研究している。

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のである。本研究室では、このような独創的視点を軸に、星・惑星系形成過程の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）】我々は国内外の大型電波望遠鏡を駆使して、星・惑星系形成領域の観測を展開しているが、感度、分解能ともに十分ではない。それを解決するのが ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) である。ALMA 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 月から部分運用を開始し、2013 年から本格運用を予定している。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るであろう。

【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、 CH , H_2D^+ , HD_2^+ などの基本的分子のスペクトル線がある。それらの観測により、星・惑星系形成における物質進化の根幹を捉えることができる。世界的には 2009 年に打ち上げられた Herschel 衛星によりテラヘルツ帯観測が進められつつある。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展開していきたい。

6.5.2 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、 $HCOOCH_3$ などの大型飽和有機分子が原始星近傍の 100 AU 程度の領域に豊富に見られる天体で、ホットコリノ天体と呼ばれる（へびつかい座の IRAS16293-2422 など）。もう一つの典型は、炭素鎖分子が異常に豊富な天体（おうし座の L1527、おおかみ座の IRAS15398-3359）で、WCCC (Warm Carbon-Chain Chemistry) 天体と呼ばれる。WCCC 天体では、原始星近傍で CH_4 が星間塵から蒸発し、それが原料となって炭素鎖分子が爆発的に形成されている。ホットコリノ天体とは対照的に、WCCC 天体では大型飽和有機分子は検出されない。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。一方で、分子組成の違いの惑星系への伝播についても大きな興味もたれる。本研究室では、低質量星形成領域を中心に、電波観測による幅広い研究を進めている。

星間分子雲から惑星系への物質進化

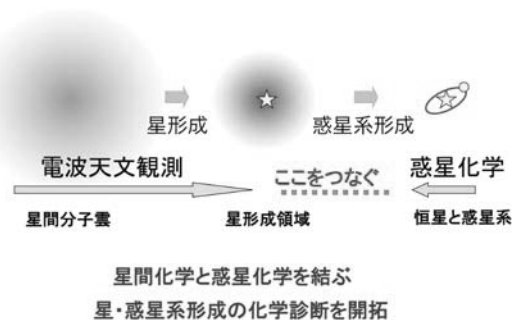


図 6.5.1: A schematic illustration of our goal

【L1527 のラインサーベイ】おうし座の L1527 ($d = 137$ pc) は WCCC を示す低質量原始星である。我々はその分子組成の全貌を明らかにするため、野辺山 45 m 望遠鏡を用いてラインサーベイ観測を行っている。今年度までの観測で、3 mm 帯 (80-115 GHz) のほぼすべての周波数帯域を観測した。rms 雑音温度が 5 mK (T_A^*) 以下という高感度観測の結果、40 種類以上の分子を検出できた。 $c-C_3H_2$ の高励起線、 $c-$

C₃H の微細構造線など他の天体では見られないものも多い。HCO、CCCO、HCCCCHO、CCO などの酸素を含む有機分子も多数検出されたが、HCOOCH₃ や (CH₃O)₂ などの大型飽和有機分子は検出されなかった。L1527 の分子組成を、同様に炭素鎖分子が豊富な星なしコア TMC-1 と比較したところ、窒素を含む分子が系統的に少ないなどの特徴がわかり、両者の化学過程の違いが浮き彫りになった。

【Serpens SMM4 のラインサーベイ】ホットコリノ天体ごとの分子組成の違いを調べる目的で、我々は ASTE 10 m 望遠鏡を用いた 345 GHz 帯のラインサーベイ観測を推進している。昨年度の R CrA IRS7B に引き続き、本年度は別のホットコリノ天体候補である Serpens SMM4 を観測した。332-364 GHz の周波数範囲を r.m.s 雑音温度 11-40 mK で高感度観測し、12 種の分子と 8 種の同位体分子を検出した。分子組成は、R CrA IRS7B と異なり、典型的なホットコリノ天体の IRAS 16293-2422 に近いことがわかった。この天体では NH₂D が検出され、DCO⁺ も比較的強く観測されたが、HDCO や DCN の重水素濃縮度は IRAS 16293-2422 よりも低かった。距離がより遠い Serpens SMM4 ではエンベロープの影響をより強く受けているためと見られる。

【NGC2264 CMM3 のラインサーベイ】NGC2264 CMM3 は、遠赤外線でも原始星が見えないほど若い大質量星形成領域である。我々はこの天体に対して、ASTE 10 m 望遠鏡及び野辺山 45 m 望遠鏡を用いてラインサーベイ観測を行った。ASTE では 330-366 GHz の範囲を観測し、16 種の分子と 14 種の同位体分子を検出した。野辺山 45 m 望遠鏡では、84.8-94.6GHz 及び 96.8GHz-106.6GHz の範囲を観測し、ASTE で検出された基本分子に加え、C₄H、HC₃N、HC₅N などの炭素鎖分子を検出した。本サーベイでは上位準位エネルギー (E_{rot}) が 300 K を越える CH₃OH の超高励起輝線も検出した。これらは大質量原始星に付随していると考えられ、原始星近傍の運動や化学過程を知る手がかりとなると期待される。

【L1157 B1 衝撃波領域のラインサーベイ】衝撃波は、星形成領域、銀河中心、超新星など、星間空間で普遍的に見られる。我々は、衝撃波に伴う化学過程を解明するために、低質量原始星 IRAS 20386+6751 周辺の衝撃波領域、L1157 B1 に対して、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて 78.1-115.8 GHz の周波数帯でのラインサーベイ観測を行った。この衝撃波領域は原始星からの双極分子流が周辺ガスと衝突して生じており、原始星から 0.1 pc ほど離れているため、純粋な衝撃波現象が観測できる。観測の結果、29 種類の分子の 130 本のスペクトル線を検出し、衝撃波領域の分子組成の全貌を明らかにすることができた。このサーベイにより、大型飽和有機分子である CH₃CHO、HCOOH、NH₂CHO、リンを含む分子である PN、炭素鎖分子の CCS などが検出された。本観測のスペクトルデータは、論文として投稿し受理されている。今後、他の関連領域の分子組成や衝撃波化学モデルとの比較を進める予定である。

【低質量原始星 L1448 のラインサーベイ】衝撃波領域の分子組成をさらに詳しく調べるため、ペルセウス座にある低質量星原始星 L1448 mm 周辺の衝撃波領域 L1448 B1/R1 に対して、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて 79-155.8 GHz 帯のラインサーベイ観測を行った。L1448 B1/R1 は原始星からの離角がそれぞれ 10'' 程度なので、原始星方向を観測することで望遠鏡のビームサイズ (~20'') 内に含まれる。この領域の特徴は、ジェットの終端速度が 80 km s⁻¹ に達し、L1157 B1 の 4 倍もあることである。L1448 B1/R1 におけるラインサーベイでは、L1157 B1 で観測された HCOOH、HCOOCH₃、CH₃CHO 等の有機分子は検出されていない。これは、L1157 B1 と L1448 B1/R1 での星間塵組成の違いや、双極分子流の年齢の違いなどを反映していると考えられる。同時に観測した原始星方向からは、C₄H や CH₃CCH などの炭素鎖分子が検出されており、低質量星形成領域の分子組成としても興味を持たれる。

【NGC1333 における PN の検出】我々は、衝撃波領域 L1157 B1 においてリンを含む分子 PN を検出した。これは低質量星形成領域としては初検出であるとともに、リンの化学が衝撃波化学と関連していることを示す結果であった。この結果を発展させるため、低質量星形成領域 NGC 1333 IRAS 4 近傍の衝撃波領域において PN ($J = 2 - 1$) の観測を行った。その結果、PN 輝線を 6σ 程度の強度で検出した。検出された PN 輝線は、ピーク速度が分子雲の視線速度とほぼ一致しており、速度幅は 1.5 km s⁻¹ 程度であった。これは、衝撃波領域に存在している速度幅の広い SiO ($J = 2 - 1$) のスペクトルとは明らかに異なる。Charnley and Millar (1994) によれば、PN は星間塵上に存在する PH₃ が蒸発した後、気相反応で 10⁴ yr 程度の時間をかけて生成される。このように、生成に一定時間を要することから、NGC 1333 IRAS 4 で観測された PN の起源は、線幅の広い SiO スペクトルの原因である現在の衝撃波ではなく、線幅の細い SiO スペクトルを生じさせている過去の減速した衝撃波に由来する可能性が高い。

【70 GHz 帯での D 化物の観測】低質量原始星近傍の分子組成は、同じような原始星進化段階にあっても同じとは限らない。これまでの観測で、少なくともホットコリノ化学と WCCC の 2 種類の化学過程があり得ることがわかっている。我々は、星形成までの時間が長い場合にホットコリノとなり、短い場合に WCCC 天体となることを提案している。これを確かめるために、分子の重水素濃縮度に着目した。重水素濃縮度は、星形成までの時間が長いほど高くなるため、独立な検証ができる。その観測のために、基本的分子の重水素化物のスペクトル線が多数存在する 70 GHz 帯の高感度受信機を開発し、野辺山 45 m 電波望遠鏡に搭載した。この受信機を用いて、WCCC 天体である L1527、IRAS15398-3359、ホットコリノ天体である IRAS 16293-2422、および関連する星なしコア（星形成が起こる前の分子雲コア）に対して、DCO⁺、N₂D⁺、DCN、CCD などの観測を行った。現在、その詳細な解析が進行中である。

【**星形成に伴う重水素濃縮の変化**】原始星誕生に伴う分子の重水素濃縮の変化を確立する目的で、低質量星形成領域 L1551、IRAS16293-2422 に対して重水素濃縮度分布を野辺山 45 m 望遠鏡で調べた。L1551 では原始星方向で DCO^+ の重水素濃縮度が減少しているのに対して、中性分子 DNC の重水素濃縮度は周辺と差がないことがわかった。これは、中性分子は分子イオンよりも解消速度が遅いためと考えられる。一方、同じ分子イオンでも N_2D^+ では原始星方向での重水素濃縮度の減少が見られず、また、IRAS16293-2422 では DCO^+ についても減少を見ることができなかった。これは、原始星周囲の低温のエンベロップの影響を受けているためであり、この寄与を除くことが星形成に伴う重水素濃縮度の変化を調べる上で重要であることがわかった。

【**TMC-1 における $^{13}\text{CH}_3\text{OH}$** 】星間分子雲において、一般に $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比は 60 であると考えられてきたが、我々の研究により、星なしコアにおいては分子によってこの比が大きく異なることがわかってきた。CO 分子から生成される分子では 60 に近い値を示すが、 C^+ から生成される分子ではそれより高い値を示す傾向がある。このことを利用して、 CH_3OH の生成過程を調べた。IRAM 30 m 電波望遠鏡を用いて、星なしコア TMC-1(CP) において CH_3OH の ^{13}C 同位体種 $^{13}\text{CH}_3\text{OH}$ の観測を行ったところ、 CH_3OH の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比はほぼ 60 であることがわかり、CO 分子由来である可能性が高いことが示された。冷たい星なしコアでの CH_3OH の生成過程については、(1) 気相中で C^+ から生成する機構と、(2) 星間塵の表層で CO 分子の水素化によって生成し、何らかの理由で気相中に放出される機構が考えられている。本研究の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比の結果は (2) を支持する。

【**星なしコアの CH_3OH の起源**】 CH_3OH は星形成領域で観測される代表的な分子で、星間塵表面上で生成されたものが星形成活動に伴い気相に放出されると考えられている。一方、 CH_3OH は TMC-1 のような 10 K 程度の冷たい星なしコアでも検出され、上で述べた ^{13}C 同位体の観測から星間塵起源と考えられる。そこで、10 K の環境でどのようにして CH_3OH (蒸発温度 ~ 100 K) が蒸発してくるかが問題となっていた。我々は、GBT 100 m 望遠鏡、IRAM 30 m 望遠鏡による高周波数分解能観測で、TMC-1 における CH_3OH スペクトル線プロファイルが他の分子と大きく異なることを見出した。 CH_3OH は小さな空間スケールで強度が変化しており、また、速度的にはエンベロップとの中間に存在するように見える。コア内部での乱流やエンベロップガスのコアへの降着などで生じる衝撃波で、 CH_3OH が星間塵表面から蒸発している可能性がある。

【**気相での CO_2 生成**】 CO_2 は惑星大気や彗星などの主要な構成分子の一つであり、星間化学と惑星科学をつなぐ重要な分子である。赤外線観測で固体 CO_2 が広く観測されてきたため、この分子は星間塵の表面で生成されると考えられてきた。一方で、気相の CO_2 については、 CO_2 が電波領域に回転遷移スペク

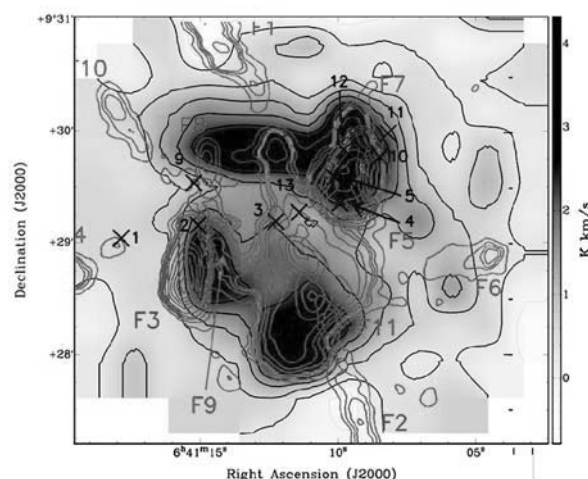


図 6.5.2: Integrated intensity map of SiO in NGC2264 CMM3 superposed on the distribution of outflows.

トル線を出さないため、観測は非常に限られてきた。我々は気相中の CO_2 を定量するのに HCO_2^+ が有効であることに着目し、IRAM 30 m 望遠鏡で観測を行った。 HCO_2^+ は星なしコア (TMC-1, L1544) でも検出され、気相で CO_2 生成が起きていることが示唆された。気相生成には HCO と酸素原子の反応が重要な役割を果たすと考えられている。事実、これまでの観測で、3 つの低質量 Class 0 天体と 2 つの星なしコアで HCO と HCO_2^+ がともに検出され、それらの関係性が示されつつある。

【**NGC 2264 における SiO の分布**】我々は、衝撃波トレーサーとして知られる SiO 分子輝線で、大質量星形成領域 NGC 2264 のマッピング観測を野辺山 45 m 望遠鏡を用いて行った。その結果、SiO が大質量原始星 CMM 3 を中心としてシェル状の構造をしていることがわかった (図 6.5.2)。SiO の分布はこの領域の分子流の分布と大局的に似ているが、分子流が比較的弱いにもかかわらず SiO が卓越して多い領域も存在している。これは、現在は見えていない「過去の分子流」によって気相中に放出された SiO が生き残っているためと考えられる。NGC 2264 の SiO のスペクトルは、線幅 20 km/s 程度のブロードな成分と 5 km/s 程度のシャープな成分が存在しており、後者は領域全体に広く分布している。このシャープな成分も、やはり過去にダストから放出された SiO が減速されたものと考えられる。そのような古い衝撃波の痕跡が領域全体に存在することは、NGC 2264 において 10^5 年以上にわたって、分子流により乱流が継続的にクランプに供給されてきたことを示唆する。

6.5.3 系外銀河の化学組成

巨大分子雲 (GMC) は銀河スケールと個々の星形成を繋ぐ中間階層であり、その形成と進化が近年注目を集めている。個々の GMC の環境・履歴とそこで起こる星形成の規模・形態との関連を確立することは、銀河における星形成史を理解する第一歩である。その手段の1つとして、銀河系内の星形成領域で使われてきた化学進化の手法がある。GMC の化学組成は GMC の存在する環境や進化段階に応じて変化すると考えられるため、化学組成から GMC の過去の履歴を推定できる。今後本格的に稼働する ALMA では、近傍銀河において CO 以外の様々な分子を容易に検出することが期待され、個々の GMC の分子組成を調べる事ができる。化学進化の手法とこれまでの運動学的な視点と組み合わせることで、GMC の形成・進化に迫りたい。

【M51 のラインサーベイ】これまで活動銀河核や爆発的星形成領域といった極限的な環境下の分子ガスを除き、GMC スケールの化学組成を研究した例はほとんどない。そこで、我々は典型的な円盤銀河である M51 の渦状腕に対して IRAM 30m 望遠鏡及び野辺山 45 m 望遠鏡を用いてラインサーベイを実施した。85-116 GHz 及び 130-148 GHz 帯を観測した結果、CCH、HNCO、CH₃OH、N₂H⁺、H₂CO など、これまで系外銀河の渦状腕では検出例のなかった分子を数多く検出した (図 6.5.3)。本研究により、渦状腕上の GMC の化学組成をくまなく明らかにし、GMC 進化に化学進化を適用する際に着目すべき分子を同定できた意義は大きい。今後は ALMA を使った高空間分解能観測により、化学組成と GMC 進化の関連を明らかにしていく。

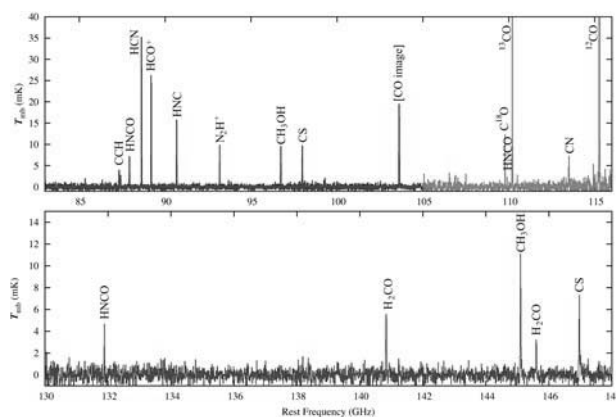


図 6.5.3: Spectral line survey toward M51

6.5.4 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 (ヘテロダイナミ

クサ) の開発が不可欠である。サブミリ波帯においては、SIS ミクサ素子が広く用いられてきた。ジョセフソン接合の非線形性を利用したもので、Nb (ニオブ) を超伝導物質に用いたものは、750 GHz 以下では量子雑音に迫る性能を発揮している。しかし、750 GHz 以上の周波数では、超伝導ギャップ間の吸収による損失が増大するため、急激に性能が低下する。そこで、本研究室では、超伝導ホットエレクトロン・ボロメータ (HEB) ミクサ素子の開発を行っている。HEB ミクサ素子は電磁波吸収による超伝導状態の破壊を利用し、受信信号と局部発振信号の「うなり」(中間周波信号) に伴う電力変化をバイアス電流の変化として検知するものである。そのためには、超伝導体をサブミクロンサイズにすること、そして、素子内に生じた熱電子を「うなり」の周期よりも早く冷却し、超伝導状態を回復させる必要がある。この冷却メカニズムには、(1) 熱電子の拡散によって電極に逃がす方法 (拡散冷却) と、(2) フォノンとの相互作用を介して基板に逃がす方法 (格子冷却) の2つがある。我々は、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。

【世界一低雑音の HEB ミクサ】ASTE 望遠鏡での THz 帯観測のために、NbTiN を超伝導物質に用いた 0.9 THz 帯、1.5 THz 帯の導波管型 HEB ミクサ素子の開発を進めた。我々は、昨年度すでに、0.9 THz 帯で 450 K、1.5 THz 帯で 590 K という低雑音温度を示す HEB ミクサの製作に成功していた。今年度は、雑音温度をそれぞれ 380 K、490 K まで低下させた。これは量子雑音の約 10 倍、7 倍に相当し、1.5 THz 帯ミクサは世界で最も高感度な HEB ミクサ素子である。このような低雑音を実現できた最も大きな要因は、超伝導マイクロブリッジの短縮である。NbTiN では、超伝導の破壊で生じた熱電子を冷却する機構は格子冷却である。しかし、我々は格子冷却と同時に、伝導で電極の金属に電子を逃がす拡散冷却もある程度有効に働いていることに注目し、拡散をより有効に働かせるためにブリッジの長さを 0.1 μ m まで短くした。その結果、電子の冷却がよりスムーズになり、雑音の低下につながったと考えられる。

【加熱成膜を取入れた HEB ミクサの製作】HEB ミクサの中間周波数帯域を拡大することは、同時観測帯域を広げる点で重要である。そのためには、3 nm 程度の厚さで良好な超伝導特性を示す超伝導薄膜が必要であり、これを実現するために、スパッタ成膜中に基板を 400 °C 程度まで加熱する基板加熱法を導入した。まずガラス基板を用いて NbTiN 薄膜でその効果を調べたところ、厚さ 8 nm の膜で 4 K 以上の超伝導転移温度 (T_c) の上昇がみられた。そこで、これまでの製作プロセスを一部見直し、基板加熱と AlN 緩衝層を組み込んだ新たなプロセスを考案し、3 nm の膜厚の超伝導層を持つ HEB ミクサを製作した。その雑音温度は、1.1 GHz 帯で 490 K と、これまでの 10.8 nm の素子と遜色ない性能が得られた。中間周波数帯域の測定を行ったところ、10.8 nm の素子では 1.1 GHz だった帯域幅が、3 nm の素子では 2.1 GHz まで拡大した。このように、基板加熱が HEB ミクサの製作で有効であることが確認された。

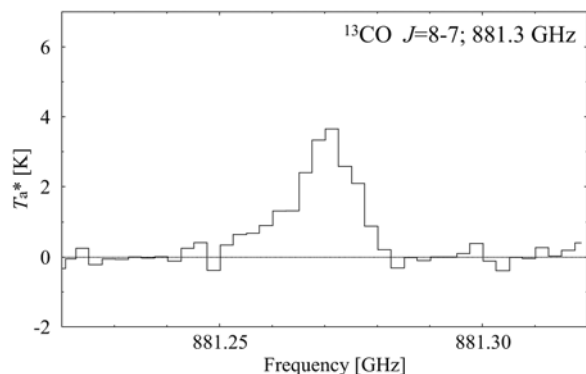


図 6.5.4: The ^{13}CO line observed toward the Orion A cloud with ASTE

【ASTE 用 THz 受信機の製作】我々の開発した HEB ミクサを ASTE 望遠鏡に搭載するため、ASTE 望遠鏡に適合するカートリッジ型受信機を組み上げた。周波数帯は 0.9/1.3-1.5 THz 帯のデュアルバンドで、各周波数同時受信が可能である。0.9 THz 帯では既存の電波天文学に用いられてきた SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) ミクサを使った観測が可能であるが、我々の製作した HEB ミクサの動作実証のため、両バンドとも HEB ミクサを用いた。この受信機カートリッジを ASTE 望遠鏡仕様のデュワーで試験し、研究段階と同等の性能で正常に動作していることを確認した。

【ASTE 用 IF システムの製作】本研究室で開発した THz 帯超伝導 HEB 受信機からの中間周波数信号は 0.9-1.4 GHz 帯に出力される。しかし、ASTE 望遠鏡に備わっている伝送系統は 6 GHz 帯用なので、出力信号を 1.1 GHz 帯から 6 GHz 帯に周波数変換する必要がある。そのためのモジュールを、市販のアップコンバータを用いて設計・作成した。入出力レベルの調整、周波数変換後のフラットな特性、および高地での運用にあたっての発熱対策の 3 点に留意して製作したものを、実験室で評価したうえで、ASTE 望遠鏡に取り付け試験運用に用いた。

【ASTE 望遠鏡での THz 帯試験観測】2011 年 9 月末から 10 月頭の 2 週間程度、チリの標高 5000 m のアタカマ砂漠にある ASTE 10 m 望遠鏡に搭載して試験観測を行った。今回は搭載期間が非常に限られている上、初めての搭載で試験観測が目的なので、0.9、1.3 THz のみ搭載した。我々の製作した HEB ミクサ受信機は望遠鏡サイトでも良好に動作し、0.9 THz 帯で月、木星の連続波観測およびオリオン A 分子雲中の ^{13}CO の回転スペクトル ($J = 8-7$; 881.3 GHz) の検出に成功した (図 6.5.4)。これにより、2012 年度以降本格的なテラヘルツ帯科学観測を行う目処がたった。

【準光学型 HEB ミクサの開発】ツインスロットアンテナを集積した準光学型の 1.9THz 帯 NbTiN HEB ミクサ素子の開発を行った。本年は、1.9THz 帯の通倍型固体発振器を 2 台利用し、これらを入力信号と局部発振信号として HEB ミクサ (細線厚 5nm、長さ 150 nm) に入力し、0.8-1.8 GHz 帯において中間周波信号 (IF) を得ることに成功した。さらに IF を 1 GHz 帯域 (中心 0.5GHz) のデジタルフーリエ分光計へと導き、ヘテロダイン分光システムを構築した。現在、HEB ミクサの雑音評価を進めている。この研究は大阪府立大学の前澤裕之氏との共同研究である。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Sakai, N. Sakai, K. Furuya, Y. Aikawa, T. Hirota, and S. Yamamoto, “DNC/HNC Ratio of Massive Clumps in Early Evolutionary Stages of High-Mass Star Formation”, *Astrophys. J.*, **747**, 140 (10 p) (2012).
- [2] Y. Watanabe, N. Sakai, J.E. Lindberg, J.K. Jorgensen, S.E. Bisschop, and S. Yamamoto, “An Unbiased Spectral Line Survey toward R CrA IRS7B in the 345 GHz Window with ASTE”, *Astrophys. J.* **745**, 126 (23 pp) (2012).
- [3] S. Shiba, Y. Irimajiri, T. Yamakura, H. Maezawa, N. Sekine, I. Hosako, and S. Yamamoto, “3.1 THz Heterodyne Receiver Using an NbTiN Hot-Electron Bolometer Mixer and a Quantum Cascade Laser”, *IEEE Tran. Terahertz Sci. Tech.* **2**, 22-28 (2012).
- [4] T. Yamaguchi, S. Takano, Y. Watanabe, N. Sakai, T. Sakai, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, N. Hirano, S. Takakuwa, Y. Aikawa, H. Nomura, and S. Yamamoto, “Detection of Phosphorous Nitride in the Lynds 1157 B1 Shocked Region”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **63**, L37-L41 (2011).
- [5] T. Hirota, T. Sakai, N. Sakai, and S. Yamamoto, “Detection of Two Carbon-Chain-Rich Cores: CB130-3 and L673-SMM4”, *Astrophys. J.* **736**, 4 (8 pp) (2011).
- [6] M. Sugimura, T. Yamaguchi, T. Sakai, T. Umamoto, N. Sakai, S. Takano, Y. Aikawa, N. Hirano, S.-Y. Liu, T.J. Millar, H. Nomura, Y.-N. Su, S. Takakuwa, and S. Yamamoto, “Early Results of the 3 mm Spectral Line Survey toward the Lynds 1157 Shocked Region”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **63**, 459-472 (2011).
- [7] O. Saruwatari, N. Sakai, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, T. Sakai, and S. Yamamoto, “Compact Molecular Outflow from NGC2264 CMM3: A Candidate for Very Young High-Mass Protostar”, *Astrophys. J.*, **729**, 147 (7 pp) (2011).

(会議抄録)

- [8] “Observations of Complex Molecules in Low-Mass Protostars”, N. Sakai and S. Yamamoto,

“The Molecular Universe”, J. Cernicharo and R. Bachiller eds., Proceedings IAU Symposium No. 280, 43-52 (2011).

- [9] “Peculiar Carbon-Chain Chemistry in Low-Mass Star Forming Regions”, N. Sakai, T. Sakai, T. Hirota, and S. Yamamoto, “Condition and Impact of Star Formation”, M. Rolling, R. Simon, V. Ossenkopf, and J. Stutzki eds., EAS Publication Series, **52**, 235-238 (2011).
- [10] “Line Survey of L1157 B1 Shocked Region”, T. Yamaguchi, M. Sugimura, T. Sakai, N. Sakai, S. Takano, Y. Aikawa, N. Hirano, S.-Y. Liu, H. Nomura, Y.-N. Su, S. Takakuwa, and S. Yamamoto, *ibid* **52**, 311-312 (2011).

(国内雑誌)

- [11] 鶴澤佳徳、山本智、「テラヘルツ天文学を切り拓く受信機技術」、日本物理学会誌、**66**, 375-379 (2011).
- [12] 坂井南美、「化学の目でみた星形成：星形成の多様性」、日本惑星学会誌、**20**, 52-60 (2011).

(学位論文)

- [13] 柴田大輝、「低質量形成に伴う重水素濃縮度変化の観測的研究」、修士論文、2012年3月
- [14] 古屋隆太、「テラヘルツ領域での天体観測を目指した超伝導 HEB ミキサの製作と基板加熱機構の導入」、修士論文、2012年3月

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [15] Y. Watanabe, N. Sakai, J. Lindberg, J. Jorgensen, S. Bisschop, and S. Yamamoto, “Spectral Line Survey toward R CrA IRS7B in the 345 GHz Window with ASTE”, Molecular Universe, IAU Symposium No 280, Toledo, Spain, May 2011.
- [16] T. Shiino, L. Jiang, R. Furuya, T. Yamaguchi, S. Shiba, T. Sakai, N. Sakai, Y. Watanabe, O. Ohguchi, H. Maezawa, T. Yamakura, Y. Irimajiri, S. Yamamoto, “Development of the 1.3-1.5 THz Band Superconducting HEB Mixer Receivers for ASTE 10 m Telescope”, The 22nd International Symposium on Space Terahertz Technology, 10-1, Tucson, U.S.A. April 2011.

招待講演

- [17] S. Yamamoto and N. Sakai, “ ^{13}C Isotope Fractionation in Cold Molecular Clouds”, Isotopes in Astrochemistry: An Interstellar Heritage for Solar System Materials?, Leiden, Netherland, December 2011.
- [18] “N. Sakai, Observations of Complex Molecules in Low-Mass Protostars”, IAU Symposium No. 280, Toledo, Spain, May 2011.

(国内会議)

一般講演

【日本天文学会 2011 年秋季年会、鹿児島大学、2011 年 9 月】

- [19] 坂井南美、酒井剛、廣田朋也、山本智、「低質量星形成領域 L1527 における炭素鎖分子の高分解能観測」、P40a
- [20] Y. Watanabe, N. Sakai, J. Lindberg, J. Jorgensen, S. Bisschop, S. Yamamoto, 「Spectral Line Survey of R CrA IRS7B with ASTE II」、P42c
- [21] 椎野竜哉、古屋隆太、相馬達也、酒井剛、坂井南美、渡邊祥正、大口脩、前澤裕之、山倉鉄矢、Jiang Ling、入交芳久、山本智、「ASTE 望遠鏡での 0.9, 1.3-1.5 THz 帯分光観測へ向けた受信機 開発 (1)」、V47c
- [22] 山口貴弘、高野秀路、酒井剛、坂井南美、渡邊祥正、山本智、他ラインサーベイメンバー、「Line Survey of L1157 B1 Shocked Region」、Q17a
- [23] 柴田大輝、坂井南美、廣田朋也、酒井剛、山本智、「原始星形成による重水素濃縮の解消」、P41a
- [24] 相馬達也、椎野竜哉、古屋隆太、酒井剛、坂井南美、渡邊祥正、大口脩、前澤裕之、山倉鉄矢、Jiang Ling、入交芳久、山本智、「ASTE 望遠鏡での 0.9, 1.3-1.5 THz 帯分光観測へ向けた受信機開発 (2)」、V48c
- [25] 古屋隆太、渡邊祥正、坂井南美、酒井剛、山本智、「大質量星形成領域 NGC2264 CMM3 のマッピング観測」、P43c
- [26] 徳留智矢、坂井南美、酒井剛、高野秀路、山本智、他ラインサーベイメンバー、「L1527 におけるスペクトル線サーベイ (2)」、P48b

【日本天文学会 2012 年春季年会、龍谷大学、2012 年 3 月】

- [27] 坂井南美、前澤裕之、酒井剛、Karl Menten、山本智、「Distribution of 9 cm CH Emission in Heiles Cloud 2」、P109a
- [28] 渡邊祥正、坂井南美、徂徠和夫、山本智、「Spectral Line Survey toward GMCs in M51 with NRO 45 m telescope」、R27a
- [29] 椎野竜哉、古屋隆太、相馬達也、酒井剛、渡邊祥正、坂井南美、大口脩、Jiang Ling、前澤裕之、山倉鉄矢、入交芳久、山本智、「ASTE 望遠鏡への 0.9, 1.3 THz 帯超伝導 HEB ミキサ受信機搭載」、V144a
- [30] 山口貴弘、高野秀路、酒井剛、坂井南美、渡邊祥正、山本智、他ラインサーベイメンバー、「Line Survey of L1157 B1 Shocked Region II」、P110a
- [31] 相馬達也、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「星なし分子雲コアにおける豊富な CH_3OH の起源」、P107a
- [32] 古屋隆太、渡邊祥正、坂井南美、酒井剛、山本智、「NGC2264 CMM 3 で見られるクランプへの継続的な乱流供給」、P103a
- [33] 古屋隆太、椎野竜哉、相馬達也、大口脩、前澤裕之、坂井南美、山本智、「広帯域化に向けた超伝導 HEB ミキサの改良と性能評価」、V115b
- [34] 徳留智矢、坂井南美、酒井剛、渡邊祥正、山本智、「Gas-phase Production of CO_2 in Dark Cloud Cores」、P108a

6.6 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。

6.6.1 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、本研究室の最近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、既に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ような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、本研究室ではさきに、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、 C_6H_5I 分子を用い、本手法の汎用性の実証も行った。一方、Even-Lavie valveを用いても、OCSや C_6H_5I 分子の配向度は、0.01のオーダーであり、劇的な配向度の増大を図ることは困難であることが明らかになった。この困難は、回転量子状態が Boltzmann 分布している thermal ensemble では、いわゆる right way に向く状態と wrong way に向く状態が混在していることに起因している。本研究室では、配向した分子試料を用いた「分子内電子の立体ダイナミクス (electronic stereodynamics in molecules)」に関する研究の推進を目指しており、配向度の高い分子試料の生成が不可欠である。そこで、初期回転量子状態を選別した試料に対し、静電場とレーザー電場を併用する手法や非共鳴2波長レーザー電場を用いる手法により高い配向度の実現を目指すこととした。そして、昨年度までに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」への展開を図る。

今年度は、まず開発した分子偏向器を用いた回転量子状態の選別の様子を、フェムト秒レーザーパルスを用いて試料の C_6H_5I 分子を多価イオン化し、クーロン爆裂によって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により調べた。分子偏向器の電極は上下に配置されており、上側の電極に高電圧を印加し、下側の電極を接地して使用する。Even-Lavie

valveによって生成される初期回転温度が十分に低い試料中の回転量子状態は殆ど全て high-field seekers であるので、分子偏向器に電圧を印加した場合には、予想通り分子の分布が全体として上側にシフトしている様子を確認することができた。背圧 16 気圧の Ne と背圧 60 気圧の He をバッファースガスとして使用した場合を比較すると Ne バッファースの場合の方が分子偏向器による偏向の度合いが大きかったが、これはその後の配列度や配向度の測定の結果、背圧 60 気圧の He バッファースを使用した場合の方が背圧 16 気圧の Ne バッファースを使用した場合よりも、初期回転温度がより低くなっているためであることが明らかになった。その後、より偏向した分子を試料とし、非共鳴ナノ秒レーザー電場を用いて配列度 ($\cos^2 \theta_{2D}$) (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) を測定したところ、特に背圧 60 気圧の He バッファースを使用した場合、レーザー強度 $1 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ のときに ($\cos^2 \theta_{2D}$) = 0.95 が得られた。また、静電場とレーザー電場を併用する配向制御法を用いた場合、レーザー電場の偏光方向と静電場の方向のなす角が 140° (40°) のとき、観測されるフラグメントイオンのうち、検出器面の上側に観測されるものの割合 $N_{\text{up}}/N_{\text{total}}$ は、静電場が 2.4 kV/cm でレーザー強度が $4 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ のときに 0.67 (0.33) に達した。今回得られた ($\cos^2 \theta_{2D}$) や $N_{\text{up}}/N_{\text{total}}$ の値は利用可能なレーザー強度や静電場で世界最高水準の値である。

今後、プラズマシャッター技術を用いてナノ秒レーザーパルスとそのピーク強度付近で遮断することによりレーザー電場のない条件下で高い配向度をもつ分子試料の生成技術の確立を目指す。静電場と直線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や試料分子の回転周期後にレーザー電場の存在しない条件下で 1 次元的な配向状態を生成できる。また、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 3 次元的な配向状態を生成できる。3 次元的配向制御の対象となる非対称コマ分子の場合、その複雑な回転準位構造に起因して、レーザー電場を遮断した後の回転状態の時間発展の仕方が分子の 3 つの分極率成分方向でそれぞれ異なるので、1 次元的な配向制御のように試料分子の回転周期後に 3 次元的な配向状態を生成するのは一般には困難である点に注意すべきである。レーザー電場のない条件下での配向制御に必要なプラズマシャッター技術については、先に原理実証実験に成功した時点 (A. Goban *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 013001 (2008)) に比べてさらに高性能化を進め、レーザー電場遮断後の残留成分を検出限界以下にすることに成功した。

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が可能である。直線偏光した 2 波長レーザー電場の偏光方向を平行にすれば 1 次元的な配向制御が可能であり、偏光方向を交差させることにより 3 次元的な配向制御が可能である。2 波長レーザー電場としては、ナノ秒 Nd:YAG レーザーの基本波 (波長 $\lambda = 1064 \text{ nm}$) とそ

の第 2 高調波 ($\lambda = 532 \text{ nm}$) を使用する予定である。2 波長レーザー電場に対するプラズマシャッター技術の実現可能性は、全光学的分子配向制御の原理実証実験 (K. Oda *et al.* Phys. Rev. Lett. **104**, 213901 (2010)) と並行して進めていたが、予め 2 波長を発生させてエチレングリコールジェットシートに入射すると第 2 高調波の高い光子エネルギーのためエチレングリコールの絶縁破壊が起こりやすく、より高いパルスエネルギーを利用できるようにすることが課題であった。今年度、基本波のみをプラズマシャッターで急峻に遮断するように整形した後で第 2 高調波を発生させることにより、基本波、及び第 2 高調波共により高いパルスエネルギーを利用する技術を開発した。

6.6.2 電子・イオン多重同時計測運動量画像分光装置の開発

超短パルス高強度レーザー電場と原子分子との相互作用において、原子分子中からトンネルイオン化した電子波束がレーザー電場中で駆動される際に高い運動エネルギーを獲得し、親イオンと再衝突する際に、非段階的 2 重イオン化、超閾イオン化、及び高次高調波発生などの興味深い現象が観測される。これらの現象はレーザー電場の 1 周期以内に起こり、原子や分子の瞬間的な構造や超高速ダイナミクスの研究対象として好適であることから、近年「再衝突 (電子の) 物理学 (recollision physics)」として大変注目されている。特に、分子が試料となる場合には、上記の現象の配向依存性を調べるのが重要であり、本研究室では「分子内電子の立体ダイナミクス」と呼ぶべき新しい研究分野の開拓を進めている。実験研究では、項目 1 で述べた気体分子の配向制御技術が基盤技術となる。本研究室ではこれまでに、クーロン爆裂で生成されたフラグメントイオンを 2 次元イオン画像化装置を用いて観測したり、高次高調波 (高エネルギーの光子) を真空紫外分光器を備えた装置を用いて観測することにより物理現象の探究を進めてきた。一方、原子分子中で超短パルス高強度レーザー電場に直接応答するのは電子なので、イオンや光に加えて電子の運動エネルギースペクトルや角度分布を観測することが重要である。さらに、非段階的 2 重イオン化や多原子分子の超高速構造変形などを探究する際は、イベントを特定するために、電子とイオンのコインシデンス測定ができることが望ましい。

そこで本年度は、「電子・イオン多重同時計測運動量画像分光装置」の開発を行った。開発した装置では、データの解釈が容易なように速度マップ型を採用した。超短パルス高強度レーザー電場による多光子イオン化で電子やイオンを検出する場合には、試料分子だけでなく残留ガスもイオン化されるため、高い真空度を達成することが重要である。このため、主要部分の材料に SUS316 を採用し、電解研磨仕上げとした。装置は主としてソースチェンバーと検出チェンバーから構成されており、それぞれターボ分子ポンプ 1 台、及びターボ分子ポンプ 2 台とゲッターポンプ 1

台を併用して排気することにより、 6.0×10^{-9} Torr、及び 1.5×10^{-10} Torr の良好な真空度が達成されている。分子線はオリフィス径 0.15 mm の Even-Lavie valve から供給され、スキマー (Beam Dynamics 社製、No. 50.8、直径 3 mm) でコリメートされて相互作用領域に導入される。フェムト秒レーザーパルスは、検出チャンバー内に設置された凹面鏡により集光され、検出チャンバーの中心で分子線と直交する方向から照射される。生成された電子とイオンは引き出し電場によって検出チャンバーの両端に設置された時間・位置敏感型のディレイライン検出器 (RoentDek 社製、HEX75) の方向に導かれて検出される。荷電粒子の軌道計算によると、静電レンズへの印加電圧を適切に調整することにより、運動エネルギー 40 eV 程度までの電子の検出が可能である。今後、気体分子の配向制御技術を駆使しつつ、「分子内電子の立体ダイナミクス」研究の推進に活用する予定である。

「電子・イオン多重同時計測運動量画像分光装置」の開発に当たり、同様の装置を用いた研究の第一人者であり、本研究室と共同研究を実施している柳下明教授 (高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・放射光科学研究施設・放射光科学第一研究系) の装置を参考にさせていただいた。また、装置の立ち上げに際し、客員共同研究員として本研究室での研究に参加した同研究機構特任助教の水野智也博士にご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

6.6.3 搬送波包絡位相を制御したフェムト秒パルスを用いた原子分子中からの高次高調波発生

近年の超短パルスレーザー技術の進歩により、レーザー電場の包絡線のピークに対する振動電場の位相 (搬送波包絡位相、Carrier-Envelope Phase: CEP) の固定された数サイクルパルスの発生が可能となり、高次高調波発生を始めとする光の 1 周期以内で起こる現象の CEP 依存性を直接的に調べることも可能になってきた。昨年度は、CEP の制御された数サイクルパルスを用いた実験に先立って、CEP の制御されたパルス幅 $\tau \sim 25$ fs のレーザー光を希ガス原子や配列した分子に集光照射して観測される高次高調波スペクトルを解析することにより高調波発生過程に関する新たな知見を得ることができた。具体的には、高調波スペクトルをフーリエ変換して解析した結果、チャープしてスペクトルが広がった隣合う奇数次高調波の同じ周波数成分が発生する時間差 ΔT が高調波次数とともに減少していることが初めて明らかになった。また、分子を試料とした場合に観測される干渉パターンの visibility は、alignment あるいは anti-alignment 状態にあるときの方がランダム状態にあるときよりも高くなることが明らかになった。このことは、アト秒パルス列の発生において、分子配列がその制御パラメータになることを示唆している。さらに、 N_2 分子を用いた場合の方が、 CO_2 分子を用いた場合よりも干渉パターンが明瞭であることも明らかになった。この性質は、 N_2 分子の最高

被占分子軌道 (Highest Occupied Molecular Orbital: HOMO) が σ_g の対称性をもつものに対し、 CO_2 分子のそれが π_g の対称性をもつことに起因していると考えられる。

今年度は、まず CEP の制御されたサブ 7 fs パルスを用いた実験を行うために、真空チャンバー中に設置した凹面鏡でフェムト秒パルスを集光できる高次高調波発生装置を立ち上げた。サブ 7 fs パルスは、フェムト秒 Ti:sapphire レーザー増幅システムから得られる 25 fs パルスを Ne を充填したホローコアファイバーに通すことにより、伝搬に伴う自己位相変調効果でスペクトルを広帯域化した後に、チャープミラー 8 枚 (即ち、8 bounces) で分散補償して圧縮することにより発生させる。さらに、数メートルに及ぶ空気中の伝搬や高調波発生装置の入射窓を通過する際の群速度分散によるパルスの広がりや高調波発生装置付近に設置した別のチャープミラー 8 枚 (即ち、8 bounces) で分散補償して使用した。高調波発生用のサブ 7 フェムト秒パルスのパルス幅と位相は、同じく高調波発生装置付近で SPIDER (spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction) 法により測定した。その結果、サブ 10 fs パルスは比較的容易に得られるものの、サブ 7 fs パルスを獲得するためには、フェムト秒 Ti:sapphire レーザー増幅システムのコンプレッサー内の回折格子、チャープミラーの入射角やウェッジ板の挿入量などの微妙な調整が必要であることが分かった。Ar 原子や配列した N_2 分子を試料として高次高調波を観測し、高調波スペクトル中に現れる強度変調が CEP の変化に伴って周期 π で移動することを確認できた。現在、配列した N_2 分子中から発生する高次高調波スペクトルに、HOMO とその一つ下の HOMO-1 からトンネルイオン化で生成された電子波束間の干渉効果が CEP の変化に伴いどのような形で発現するかなどを探索中である。

6.6.4 配列した分子中から発生する第 3 高調波の偏光特性

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・ブロイ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・ブロイ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は、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結合断面積 $\sigma(\omega)$ を評価することである。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で、必要な情報を得ることができると考えられる。しかし、高次高調波発生実験は真空中で行う必要があり、偏光特性などの評価は一般に困難である。一方、波長 800 nm パルスによる第3高調波(～267 nm)発生は空気中で行うことができ、ポラライザーなどの光学素子が利用できるため、偏光特性の評価も比較的容易である。

そこで昨年度は、配列した N_2 、 O_2 、 CO_2 分子から発生する第3高調波が、分子の配列とともにどのように変化するかを調べた。波長 800 nm、パルス幅 100 fs の Ti:sapphire レーザー光をマイケルソン干渉計に入れ、ポンプ光とプローブ光に分けた。マイケルソン干渉計のプローブ光の経路にはステップ幅 40 nm で動く光学台を設置し、2つの光の間には任意の時間差を付けられるようにした。さらに、プローブ光側には1/2波長板を入れておき、プローブ光の偏光方向を自由に変えることができたようにした。マイケルソン干渉計内で時間差を付けて再び同一光軸上に戻ったレーザー光をガスセルに入射した。まずポンプ光がガスセル中の分子を配列させ、その後にはプローブ光を配列した分子に入射して第3高調波を発生させた。このとき、分子が配列しているときは、

高調波発生の配列依存性に加え、配列した分子がもつ複屈折性のために、方向によっては位相整合条件を満たし、強い第3高調波を観測することができた。気体分子は一度配列したのちにほぼランダムな状態となり、第3高調波の強度は減少するが、分子の回転運動にしたがって1/4周期ごとに再び配列するため、この周期で第3高調波の強度も再び増大する。ポンプ光とプローブ光の間の遅延時間を分子の1回転周期程度まで変えながら、分光器と CCD カメラを用いて発生させた第3高調波のスペクトルを観測した。このとき、観測するスペクトルは、偏光ビームスプリッターで特定の偏光方向成分だけを取り出して観測できるようにした。

原子中からの第3高調波発生の実験は数多く行われているが、この場合は対称性からプローブ光の偏光成分と同じ偏光成分をもつ高調波が発生し、これと直交する偏光成分はほとんどない。昨年度は、特に CO_2 分子の場合には、ある条件下で高調波の偏光成分のうち、プローブ光の偏光成分と直交する方向の偏光成分の方がより強い強度になることを発見した。このため、今年度はプローブ光の楕円率を増加させたときに、第3高調波の偏光状態がどのように変化するかを詳細に調べた。イオン化ポテンシャルがほぼ等しい Ar と N_2 分子を比較すると、Ar から発生する第3高調波の偏光状態は、プローブ光の楕円率を 0.1 未満から 0.36 まで増加させても(プローブ光の楕円率の変化範囲は以下同じ)楕円率は比較的小さいままであり、orientation angle (楕円偏光の長軸の傾き角)はほぼ0のままであった。これに対し、aligned N_2 から発生する第3高調波の偏光状態は、プローブ光の楕円率が 0.2 付近のときに楕円率の大きな楕円偏光となり再び減少する特徴的な変化を示した。また、orientation angle は、プローブ光の楕円率が 0.2 の前後で0度から90度に急激に変化した。anti-aligned N_2 から発生する第3高調波の楕円率は、プローブ光の楕円率の増加とともに緩やかに増加し、プローブ光の楕円率が 0.3 付近でピークとなり再び減少し始めた。orientation angle は、プローブ光の楕円率の増加とともに単調に増加し続けた。一方、HOMO の対称性が同じ O_2 分子と CO_2 分子を比較すると、anti-aligned CO_2 からの第3高調波を除き、楕円率はプローブ光の楕円率が 0.12 付近で楕円率の大きな楕円偏光となり、orientation angle もプローブ光の楕円率が 0.12 付近で急激に増大し最終的に 90 度に近づいた。anti-aligned CO_2 からの第3高調波の偏光状態は、楕円率がピークとなり orientation angle が急激に変化するプローブ光の楕円率が 0.2 付近であったことを除き、定性的には他の場合と同様の変化を示した。 O_2 と CO_2 から発生する第3高調波の偏光特性が定性的に似ているのは、ともに HOMO の対称性が π_g であるため、プローブ光によって誘起され第3高調波の発生に寄与する非線形分極の性質が似ているためと定性的には解釈できるであろう。さらに、 O_2 と CO_2 に加え、aligned N_2 から発生する第3高調波の偏光特性も似ている(即ち、今回調べた中では anti-aligned N_2 から発生する第3高調波の偏光特性のみが異なる)と見ることがもできる。まだ断定するには至らないが、類似している分子の配列状態では HOMO がプローブ光の

楕円偏光の長軸に垂直な面を節としてもつものに対し、anti-aligned N_2 だけがプローブ光の楕円偏光の長軸に垂直な面に節をもたないことが関与している可能性もある。今回の実験はガスセル中で行ったものであり、第3高調波の発生には一般に位相整合効果が寄与していると考えられる。今後、異なるガス圧での観測や位相整合効果が比較的小さく単一分子の寄与をより観測しやすいパルス分子線を利用した観測を行うとともに、理論計算との比較を行うことにより新しい分子構造のイメージング手法としての可能性を探究する。

配列した分子中から発生する第3高調波の偏光特性について有益な議論をしていただいた米国 Northwestern 大学の Tamar Seideman 教授と Paul Sherratt 博士に謝意を表する。

6.6.5 その他

今年度は修士2名を輩出した。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堀田義仁君、横山晴道君(夏学期)、及び、堀之内裕理君、山本真吾君(冬学期)の活躍によるものである。

なお、今年度の研究活動は、科学研究費補助金の特別推進研究「配向制御技術で拓く分子の新しい量子相の物理学」(課題番号 21000003、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ものである。ここに記して謝意を表する。

<報文>

(原著論文)

- [1] Hiroki Mizutani, Shinichirou Minemoto, Yuichiro Oguchi, and Hirofumi Sakai, "Effect of nuclear motion observed in high-order harmonic generation from D_2/H_2 molecules with intense multi-cycle 1300 nm and 800 nm pulses," *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* **44**, 081002 (5 pages) (2011) (Fast Track Communication).
 - [2] Shinichirou Minemoto and Hirofumi Sakai, "Measuring polarizability anisotropies of rare gas diatomic molecules by laser-induced molecular alignment technique," *The Journal of Chemical Physics* **134**, 214305 (9 pages) (2011).
 - [3] Kosaku Kato, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Suppression of high-order-harmonic intensities observed in aligned CO_2 molecules with 1300-nm and 800-nm pulses," *Physical Review A* **84**, 021403(R) (4 pages) (2011). Selected for *Virtual Journal of Ultrafast Science* Vol. 10, Iss. 9 (2011).
 - [4] Yusuke Sakemi, Kosaku Kato, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Characteristics of high-order harmonics generated from atoms and aligned molecules with carrier-envelope-phase-stabilized 25-fs pulses," *Physical Review A* **85**, 051801(R) (4 pages) (2012).
- (著書)
- [5] Yuichi Fujimura and Hirofumi Sakai, "Electronic and Nuclear Dynamics in Molecular Systems," (分担執筆) Section 1.10 "Alignment and Orientation of Molecules," Chapter 2 "Experimental Setups and Methods," and Chapter 4 "Molecular Manipulation techniques with Laser Technologies and Their Applications," World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. (2011).
- (学位論文)
- [6] Je Hoi Mun, "Controlling the orientation of rotational-quantum-state-selected molecules," Master's thesis, March 2012.
 - [7] 酒見悠介, 「搬送波包絡位相を制御したパルスによる原子分子中からの高次高調波発生」, 修士論文, 2012年3月.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [8] Hirofumi Sakai, "All-optical molecular orientation and its future prospects," International Symposium on Attoscience and Ultrafast Quantum Control (SASQC11), London, UK, September 8th, 2011.
 - [9] Hirofumi Sakai, "All-optical molecular orientation and future challenges," 9th International Conference of Computational Methods in Science and Engineering (ICCMSE 2011), Halkidiki, Greece, October 4th, 2011.
 - [10] Hirofumi Sakai, "Title to be announced," 10th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, Taipei, Taiwan, Republic of China, October, 2012.
- 一般講演
- [11] Yusuke Sakemi, Shinichirou Minemoto, Kosaku Kato, and Hirofumi Sakai, "Carrier-envelope-phase effects on high-order harmonic generation from atoms and molecules," 3rd International Conference on Attosecond Physics, Sapporo, Hokkaido, Japan, July 8th, 2011.
 - [12] Ryo Yamashiro, Yusuke Sakemi, Shinichirou Minemoto, Tomoya Mizuno, Akira Yagishita, and Hirofumi Sakai, "Development of a multi-coincidence velocity-map imaging spectrometer for use in the studies on electronic stereodynamics in molecules," to be presented at 28th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Kasuga, Fukuoka, Japan, June, 2012.

(国内会議)

招待講演

- [13] 酒井広文、「気体分子の配向制御技術の現状と展望」、理研シンポジウム、第2回拡がる原子分子物理研究：先端光技術で切り開く新しい原子分子物理、理化学研究所大河内ホール、2011年12月2日。

一般講演

- [14] Je Hoi Mun, Midai Suzuki, Ryo Yamashiro, Tetsuro Hoshino, Tomoya Mizuno, Shinichirou Minemoto, Toshio Kasai, Akira Yagishita, and Hirofumi Sakai, “Development of a hexapole focuser for controlling molecular orientation,” 第27回化学反応討論会、東京工業大学大岡山キャンパス、2011年6月8日。
- [15] 加藤康作、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強度の配列度依存性」、第8回AMO討論会、東京大学本郷キャンパス、2011年6月17-18日。
- [16] 酒見悠介、加藤康作、峰本紳一郎、酒井広文、「原子分子中からの高次高調波発生と搬送波包絡位相依存性」、第8回AMO討論会、東京大学本郷キャンパス、2011年6月17-18日。
- [17] 文堤會、星野哲朗、峰本紳一郎、山城亮、水野智也、柳下明、酒井広文、「回転量子状態を選別した分子の配向制御」、2011年（平成23年）秋季第72回応用物理学会学術講演会、山形大学小白川キャンパス、2011年8月30日。
- [18] 酒見悠介、加藤康作、峰本紳一郎、酒井広文、「原子及び配列した分子中からの高次高調波発生における搬送波包絡位相の効果」、第4回文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」シンポジウム、名古屋キャッスルプラザホテル、2011年11月14日。
- [19] Je Hoi Mun, Shinichirou Minemoto, Tetsuro Hoshino, Ryo Yamashiro, Tomoya Mizuno, Akira Yagishita, and Hirofumi Sakai, “Enhancement of the degree of orientation with quantum-state-selected molecules,” 第4回文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」シンポジウム、名古屋キャッスルプラザホテル、2011年11月14日。
- [20] 文堤會、峰本紳一郎、星野哲朗、山城亮、水野智也、柳下明、酒井広文、「回転量子状態を選別した分子試料を用いた配向度の向上」、レーザー学会学術講演会第32回年次大会、TKP 仙台カンファレンスセンター、2012年1月31日。
- [21] 峰本紳一郎、酒見悠介、加藤康作、酒井広文、「数サイクルパルスを用いた配列した分子からの高次高調波発生」、レーザー学会学術講演会第32回年次大会、TKP 仙台カンファレンスセンター、2012年1月31日。
- [22] 文堤會、峰本紳一郎、酒井広文、「回転量子状態の選別による分子の配向度の向上」、2012年（平成24年）春季第59回応用物理学関係連合講演会、早稲田大学早稲田キャンパス、2012年3月17日。

- [23] 堀之内裕理、山本真吾、峰本紳一郎、酒井広文、「非断熱的に配列した分子中から発生する第三高調波の偏光特性」、2012年（平成24年）春季第59回応用物理学関係連合講演会、早稲田大学早稲田キャンパス、2012年3月18日。

6.7 五神研究室

本研究室では、光と物質のあらたな性質を探る研究を進めている。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、光によって制御された物質系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。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。また、微細加工技術を駆使して物質系の対称性を制御し、新たな光学機能を引き出す研究を進めている。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、ベクトル光波制御などに着目した研究を進めている。物理学教室における活動と工学系研究科附属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 線を用いた分光計測手法の開拓、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）の開発に取り組んでいる。本年度に進めた研究を以下に示す。

6.7.1 光励起された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 Bose-Einstein 凝縮 (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開拓してきた。

世界各地での長年の研究にもかかわらず、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。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

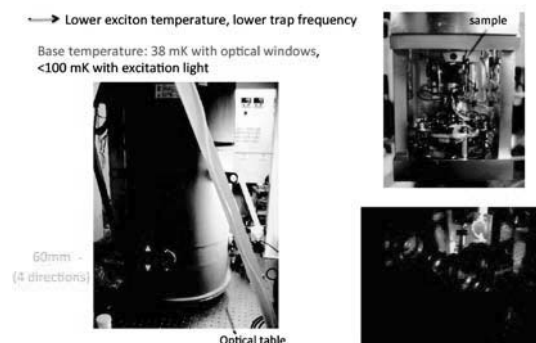


図 6.7.1: 希釈冷凍機内で半導体における励起子を捕獲し、その微弱な発光を顕微的に観測するためのセットアップ。ベース温度として 38 mK を記録している。

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が分かった。数値計算との比較の結果、上記のような非弾性散乱が強く起こる系においては、BEC 転移が生じたと仮定すると、基底状態を多数の粒子が占有して局所的に密度が上昇し、励起子を爆発的にトラップ中央からはじき出す (緩和爆発) ことが分かった [1, 5, 10, 12]。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% 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を可能とし、実際に励起子温度として 150 mK の低温な励起子を初めて観測した。さらに、急峻なトラップポテンシャルの設定においては、ヘリウム 3 冷凍機による実験と同様に、BEC 転移条件を満たす際に緩和爆発現象が生じることを再現した。凝縮体の割合を飛躍的に増すために、トラップポテンシャルを緩める実験、及び凝縮体そのものを直接観測する分光法の構築を進めている。

ダイヤモンド電子正孔系における低温多体现象の探索

間接遷移型半導体を低温で光励起すると、励起子ガスから電子正孔液体が空間的に相分離し、電子正孔液滴と呼ばれる状態が生じることが知られている。ダイヤモンドはシリコンと類似のバンド構造を持つ間接遷移型半導体であり、電子正孔液滴の密度は 10^{20}cm^{-3} と高い。このような高密度な電子正孔系は、極低温下の多体量子現象を研究する対象としてユニークなものである。しかし、高密度キャリア間の衝突によりキャリア寿命が短く、従来の発光スペクトル形状解析から、液滴の密度や温度を評価することは困難である。そこで、時間分解発光測定と同時に中赤外領域のポンププローブ分光測定を行い、液滴の誘電応答を観測した。有効媒質モデルを用いた解析から、液滴の密度や体積占有率の時間変化を評価した。液滴の誘電応答のダンピングの起源は、液滴内部の電子正孔間に働くクーロン相関に起因するものであることを明らかにした。また、液滴発光が観測される励起下で格子温度を下げていくと、励起子発光と液滴発光との間に、これまで観測されていない発光ピークが観測された。時間分解発光測定により、この状態は多励起子状態と解釈され、低温電子正孔系の新しい安定状態であることを示唆した。

極低温原子気体を用いた強相関多体系の研究

二体相互作用のみを許すようなフェルミ粒子系は最も単純な多体系であるが、幅広いフェルミ粒子系を理解する上で最も根本的で且つ重要な研究対象である。一般的にフェルミ粒子間、例えば中性子や電子間の相互作用を自由に制御することは容易ではない。だが、レーザー冷却された極低温フェルミ原子気体を用いることにより、幅広い相互作用領域を系統的に且つ高精度に測定できる。特にスピン間の相互作用を連続的に変化させることで実現される、BCS超流動から分子 BEC への相転移を伴わない連続的な変化は、量子多体系を記述する理論の枠組みを確立する上で重要な研究対象である。これまで我々はスピン間の散乱長が発散しているユニタリー極限において、熱力学・状態方程式 (EOS) を実験的に決定してきたが、BCS-BEC クロスオーバー全域に渡って EOS を決定する手法は確立されていない。そこで我々はこれまでの手法を拡張し、任意の相互作用領域でも EOS を決定できる手法を提案しその妥当性を示した。本提案方法で EOS を決定する為、リチウム 6 原子のレーザー冷却装置の立ち上げを行った。先の東日本大震災の影響もあり、従来の装置よりも電力消費が少なくなるよう工夫を凝らし、装置の設計を行った。従来はゼーマン減速法を用いて原子を冷却するが、この方法は大きな磁場を必要とするため消費電力が非常に大きい。本研究では永久磁石を用いた二次元磁気光学トラップ (2DMOT) の手法を採用し、消費電力の大幅な減少を実現した。この手法により、 10^8 個の冷却 ^6Li 原子を捕獲する事に成功し、従来の方法と同程度のパフォーマンスを得た。今後は冷却原子を光トラップへ移行し、外部磁場によりスピン間の相互作用を制御し、クロスオーバー

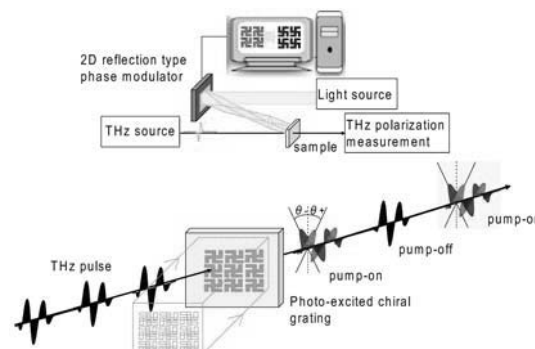


図 6.7.2: 光励起キャリアによる三次元キラルモルフォロジー誘起実験の模式図

全域に渡る EOS の測定を遂行する。

6.7.2 非自明な光学現象の探索とその応用

光励起キャリア擬 2 次元人工キラル格子の形成とテラヘルツ動的偏光制御

可視光領域とくらべて偏光制御素子が十分でない THz 領域において、人工構造による偏光制御は重要である。これまでのリソグラフィー等で作製された金属薄膜の人工構造は、一度構造を作製すると、その光学応答を動的に変化させることが困難であるという問題があった。我々は Si 基板上の金属キラル格子に対して光励起を行うことで、光励起キャリアの効果によって THz 領域において旋光性を発現させ、THz 偏光変調を実現することに成功している。この手法をさらに発展させ、励起光のビーム内の強度分布を二次元的に変調することによって、金属薄膜を用いることなしに Si 基板上にキラリティーを誘起することを試みた。Si 基板上に光励起キャリアのみで観測可能な旋光性を誘起するためには mJ 程度のパルスエネルギーを有する光を光源として用いることが必要であることがわかったため、高パルスエネルギー対応の反射型二次元空間位相変調器を導入した。これを用いて、高抵抗 Si 基板上に、周期 $180 \mu\text{m}$ 程度の円周期構造パターンになるように励起光を集光し、それを透過した THz 波の偏光変化を計測した (図 6.7.2)。この結果、確かに円周期のキラリティーに依存した、最大 1 度程度の偏光回転が観測され、円周期を変えることによって偏光回転スペクトルもシフトすることが確認された [42]。パターンがアキラルな場合にはこのような偏光回転は観測されなかった。これは、光励起キャリア分布の三次元キラリティーのみで THz の旋光性を誘起することが可能であることを示した初めての結果であり、励起光のパターンを変化させることによって、THz 波応答を自在に制御することが可能になる。

ねじれ偏光パルス励起による結晶内テラヘルツ振動のベクトル制御

我々は、時空間パルス波形整形技術を用いて実現したパルス内で偏光状態が時間軸上で変化する「ねじれ偏光パルス」を用いて、物質中の分極・磁化の振動を自在に制御する手法の開発を進めている。前年度に我々が行った、ねじれ偏光ダブルパルスを用いた磁化ベクトル制御の実験では、実質的に制御できるパラメータがダブルパルスの時間間隔のみであったのに対し、ねじれ偏光パルスの場合、周波数空間における左右円偏光の変調を自在に設計することが可能であるため、誘導ラマン過程の制御の自由度を飛躍的に向上させることが可能であることを我々は見出した。ここで重要になるのが、ねじれ偏光パルスの設計指針である。非線形光学過程である誘導ラマン過程を活用するためには、光パルスを構成する角周波数成分の偏光状態を独立に制御するのではなく、異なる周波数成分間の相関を考慮することが必須である。我々は、この相関を記述するシンプルなパラメータとして、包絡関数を表す「時間依存するストークスパラメータ」の捻れに着目し、素励起あたりの角運動量が $\pm 2\hbar$ となる回転モードを選択的に制御できることを理論的に示すことに成功した[29, 30, 38]。この設計指針に従って波形整形を施したねじれ偏光パルスによって、ユニークな回転モード制御が可能になった。例えば、近赤外パルスの高周波成分を左(右)円偏光、低周波成分を右(左)円偏光に整形したねじれ偏光パルスを用いて、3回対称結晶で差周波を発生させると、広帯域の右(左)円偏光 THz パルスが発生する。あるいは、ねじれ偏光パルスの位相にサイン型の位相変調を与えると、ねじれ偏光パルスのパルス列が発生するため、フリンジスペクトルを持つ円偏光 THz パルスや、中心周波数調整可能な狭帯域円偏光 THz パルスを発生させることが可能である。我々は、特徴的な共鳴を有しない ZnTe(111) 結晶に、設計されたねじれ偏光パルスを入射することによって上記のような THz 波発生偏光制御が可能であることを実験で示すことに成功した(図 6.7.3)[50]。これは、物質内部における THz 領域の様々な振動モードを自在に制御することが可能な技術であり、時空間パルス波形整形技術の強力なアプリケーションの一つであるとともに、制御素子が未だ不十分な THz 領域において、放射される THz 波の帯域や偏光を自在に制御可能な新手法である。

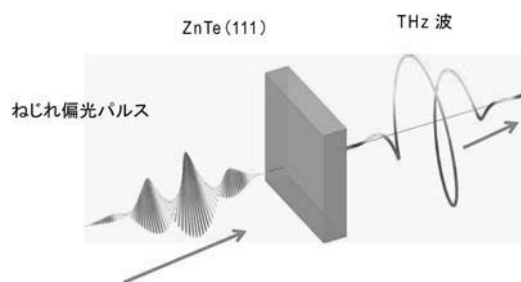


図 6.7.3: ねじれ偏光パルスを用いた THz 放射波形偏光制御実験の模式図

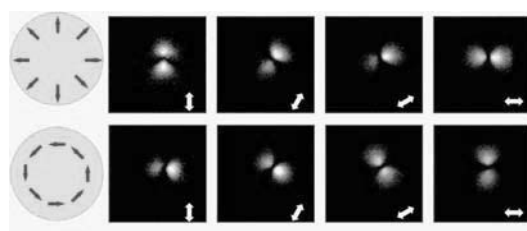


図 6.7.4: THz カメラで検出した THz ベクトルビームの電場強度分布。矢印は THz カメラの前に配置したワイヤグリッド偏光子の透過偏光方向を表す。上段がラディアルビーム、下段がアジマスビームの検出結果。

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た(図 6.7.4)[44]。近年開発されたテラヘルツカメラを用いてビーム内での偏光分布をリアルタイムに観測し、なおかつ二次元 EO サンプリング法を用いて面内及び面直方向の電場分布を直接検出することにより、ベクトルビームとそれに伴う縦電場発生が実現していることを確認した。今回開発した手法は、これまでに報告されている THz 領域におけるベクトルビーム発生法に比べて、偏光制御性、帯域、強度などの多くの点で優位性がある。

非線形光学結晶を用いたテラヘルツベクトルビームの発生

シリンダリカルベクトルモード (CV モード) とは中心軸対称な偏光分布を持つ光の空間モードであり、THz 波領域で実現されれば、タイトフォーカスによる THz イメージングの分解能向上や、縦方向 THz 電場パルスによる物性制御など THz テクノロジーに新たな展開をもたらすことが期待される。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、

6.7.3 新規コヒーレント光源開発と新しい分光手法開拓

モード同期ファイバーレーザー

超短パルス発生において共振器中の分散補償が重要であるが、Yb ファイバーレーザーにおいて 3 次分散補償過程について未知であり、光学素子により 3 次分散を補償する必要があるかどうかについては未解決であった。今回我々は、光学素子では 2 次分

散のみを補償する共振器構成を用いて、Yb ファイバーレーザーにおいて世界トップレベルの 30fs の超短パルス発生を確認した。これは共振器中に 3 次分散を補償する光学素子を導入する必要がないことを示す新しい結果である。さらに共振器中のパルスを 3 カ所から取り出し、FROG (Frequency Resolved Optical Gating) によってそれらの位相情報を得ることで共振器中の 2 次分散、3 次分散変化を明らかにした。それにより 3 次分散はゲイン媒質中とその後のファイバー部において自己補償されていることが分かった。またこの 3 次分散の自己補償は自己位相変調により生じていることを数値計算で示し、その補償過程においてパルスの非対称な時間波形が重要な役割を果たしていることを考察した。

受動共振器へのフェムト秒レーザーパルスの蓄積

近年、フェムト秒レーザーパルスを受動共振器内に蓄積し、共振器内で軟 X 線発生等微弱な非線形効果を増強する手法が開発されつつある。テラヘルツパルス電磁波への変換効率も非常に低く、通常はレーザーアンプを使用するなど大型のレーザー装置が必要であるが、この技術を利用することで効率の良いテラヘルツ発生と分光技術への応用を目指している。本研究では次世代のコンパクトなフェムト秒光源の一つであるエルビウム添加モード同期ファイバーレーザーを製作し、その出力を受動共振器に蓄積する技術開発を行った。共振器内においてレーザー出力の 100 倍程度ピークパワーが得られることを確認し、テラヘルツ電磁波への高い変換効率を実現できる準備が整った。

また、最近レーザー角度分解光電子分光の分解能が向上し、狭線幅で高繰り返しのコヒーレントな真空紫外光源の開発が求められている。そこで、パルス幅 10 ps、繰り返し周波数 73 MHz のチタンサファイアモード同期レーザーを基本波光源として、高効率四倍波発生による 6 eV 光源の開発を行った。受動共振器内に BiBO 結晶を挿入することで 70% 程度の高変換効率の第二高長波発生を実現した。これにより得られた強い二倍波をシングルパスで BBO 結晶に絞り込むことで 23 mW (中心波長 210 nm) の四倍波発生に成功した。

フォトンカウンティングストリークカメラによる高次光子相関計測

フォトンカウンティングストリークカメラを用いた、微小時間領域における光子統計測定法の開発を行っている。フォトンカウンティングストリークカメラの取得データから光子相関関数と光子計数分布を求めるプログラムを作製し、擬似カオス光とコヒーレント光を解析した。二次相関関数、三次相関関数とともに擬似カオス光に対して光子相関関数はパンチングを示し、スーパー・ポワソン分布の光子計数分布が得られた。コヒーレント光に対して光子相関関数は 1 となり、ポワソン分布の光子計数分布が得ら

れた。これらは理論的に期待される結果と一致しており、測定手法の有効性が示された。

この測定手法を用いて、面発光型レーザー (VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser) の二次の光子相関測定を行った。VCSEL への注入電流を変化させると、レーザー発振閾値近傍で二次の光子相関関数がサブナノ秒スケールで振動することを初めて観測した。この振動は、マクスウェルブロッホ方程式を用いた、光子とゲイン媒質中の反転分布キャリアのレート方程式により再現され、VCSEL における緩和振動であることを明らかにした。

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。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。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進められている。

<受賞>

- [1] 吉岡孝高: 平成 23 年度日本物理学会若手奨励賞 (領域 5)、2011 年 11 月。
- [2] 堀越宗一 (工学系研究科所属): 平成 23 年度日本物理学会若手奨励賞 (領域 1)、2011 年 11 月。
- [3] 樋口卓也 (工学系研究科所属): Young Investigator Award in Gordon Research Conference (Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems 2012). 2012 年 2 月。
- [4] 今井亮 (工学系研究科所属): 田中昭二賞 (物理工学優秀修士論文賞)、2012 年 3 月。

<報文>

(原著論文)

- [5] K. Yoshioka, E. Chae, and M. Kuwata-Gonokami: Transition to a Bose-Einstein condensate and relaxation explosion of excitons at sub-Kelvin temperatures, Nat. Commun., **2**, 328 (2011).
- [6] T. Unuma, Y. Ino, K. Peiponen, E. M. Vartiainen, M. Kuwata-Gonokami, and K. Hirakawa,

Causality-based method for determining the time origin in terahertz emission spectroscopy, *OPTICS EXPRESS*, **19** (19), 12759/1-7 (2011).

- [7] N. Kanda, T. Higuchi, H. Shimizu, K. Konishi, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, The vectorial control of magnetization by light, *Nat. Commun.*, **2**, 362 (2011).
- [8] J. Li, T. Higuchi, N. Kanda, K. Konishi, S. G. Tikhodeev, and M. Kuwata-Gonokami, *OPTICS EXPRESS*, **19** (23), 22550/1-7 (2011).

(国内雑誌)

- [9] 江馬一弘、小西邦昭: 「研究室探訪」、U7 学会会報、Vol.39、pp.54-60 (2011).
- [10] 吉岡孝高、五神真: 「バルク半導体における励起子 BEC 相の探索」、固体物理、Vol.46、No.11、pp.593-604 (2011).
- [11] 樋口卓也、五神真: 「光によるコヒーレントな磁化制御における結晶対称性の役割」、固体物理、Vol.46、No.11、pp.711-723 (2011).
- [12] 吉岡孝高、五神真: 「半導体励起子のボース・アインシュタイン凝縮」、日本物理学会誌、Vol.67、No.01、pp.44 (2012).
- [13] 堀越宗一、向山敬、上田正仁: 「ユニタリー極限におけるフェルミ原子気体の普遍的熱力学」、日本物理学会誌、Vol.67、No.04、pp.257 (2012).

(学位論文)

博士論文

- [14] 吉岡孝高: スピン禁制励起子のボース・アインシュタイン凝縮転移、(2012 年 1 月、東京大学大学院理学系研究科)
- [15] 樋口卓也: Optical Manipulation of Antiferromagnets (光による反強磁性体の制御)、(2012 年 2 月、東京大学大学院工学系研究科)
- [16] 神田夏輝: 時空間モルフォロジー制御によるテラヘルツ振動のベクトル的操作、(2012 年 2 月、東京大学大学院工学系研究科)

修士論文

- [17] 今井亮: テラヘルツカメラを用いた高強度テラヘルツベクトルビームの発生と検出、(2012 年 3 月、東京大学大学院工学系研究科)
- [18] 福岡 健太: 希釈冷凍機を用いた Cu_2O における励起子ボース・アインシュタイン凝縮の研究、(2012 年 3 月、東京大学大学院工学系研究科)

(著書)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [19] M. Kuwata-Gonokami: Experimental aspects of exciton-exciton interactions and of exciton BEC, School and Congerence "Cold Atoms, Semiconductor Polaritons and Nanotechnology", (Crete, Greece), May, 2011.
- [20] M. Kuwata-Gonokami: High Density excitation phenomena in semiconductors, School and Congerence "Cold Atoms, Semiconductor Polaritons and Nanotechnology", (Crete, Greece), May, 2011.
- [21] M. Horikoshi: Thermodynamics and Hydrodynamics of a unitary Fermi gas, INT symposium "Fermions from Cold Atoms to Neutron Stars : Benchmarking the Many-Body Problem", (Univ. of Washington), May, 2011.
- [22] M. Kuwata-Gonokami: Relaxation explosion of a Bose-Einstein condensate of excitons in Cu_2O , Fundamental Optical Properties of Semiconductor -2011, (North Carolina, USA), Aug., 2011.
- [23] M. Kuwata-Gonokami: Observation of spontaneous Bose-Einstein condensation and relaxation explosion of excitons at sub-Kelvin temperatures (poster), Bose-Einstein Condensation 2011 Frontiers in Quantum Gases, (Costa Brava, Spain), Sep, 2011.
- [24] M. Kuwata-Gonokami: Transition to a Bose-Einstein condensate of excitons in a potential trap at sub-Kelvin temperatures, Gordon Research Conference on Ultrafast phenomena in cooperative systems, (Texas, USA), Feb., 2012.
- [25] M. Kuwata-Gonokami: Polarization control with artificial chiral structures, 8th EOS Topical Meeting on Diffractive Optics 2012, (Delft, Netherlands), Mar., 2012.

一般講演 (口頭)

- [26] T. Higuchi, N. Kanda, H. Tamaru, and M. Kuwata-Gonokami: Optical Control of Magnetization by Linearly Polarized Laser Pulses in a Crystal with Three-Fold Symmetry, CLEO Europe - EQEC 2011, (Munich, Germany), May, 2011.
- [27] N. Kanda, T. Higuchi, H. Shimizu, K. Konishi, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami: All-optical coherent manipulation of magnetization vector in an antiferromagnetic NiO crystal, CLEO Europe - EQEC 2011, (Munich, Germany), May, 2011.
- [28] N. Kanda, T. Higuchi, H. Shimizu, K. Konishi, K. Yoshioka and M. Kuwata-Gonokami: Optical manipulation of magnetization vector in multi-dimensional space, Nonlinear Optics 2011, (Kauai, Hawaii), July, 2011.
- [29] T. Higuchi, N. Kanda, H. Tamaru, and M. Kuwata-Gonokami: Selection Rules for Light-Induced Magnetization through Stimulated Raman Process, Nonlinear Optics 2011, (Kauai, Hawaii), July, 2011.

- [30] T. Higuchi, H. Tamaru, and M. Kuwata-Gonokami: Ultrafast coherent manipulation of angular momentum via tuning the envelope of a light pulse, Gordon Research Conference on Ultrafast phenomena in cooperative systems, (Texas, USA), Feb., 2012.

一般講演 (ポスター)

- [31] J. Li, T. Higuchi, N. Kanda, K. Konishi and M. Kuwata-Gonokami: Enhancement of coherent magnetic dipole radiation by cavity effect in the terahertz regime, Nonlinear Optics 201 (Kauai, Hawaii), July, 2011.

(国内会議)

招待講演

- [32] 五神真: 人工キラル格子による光波操作—偏光制御の新展開—, FPD 設計技術研究会、秋葉原 UDX、2011 年 5 月
- [33] 吉岡孝高: 励起子ボース・アインシュタイン凝縮の実験的研究、第 56 回物性若手夏の学校、山梨県ホテルエバークリーン富士、2011 年 8 月
- [34] 五神真: 高密度電子正孔系の物質相—励起子ガスの基底状態を求めて、日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学、2011 年 9 月
- [35] 堀越宗一: BCS-BEC クロスオーバー全域に渡る E O S の実験的決定手法、Ultracold Gases : Superfluidity and Strong Correlations (USS-2012)、東京理科大学、2012 年 1 月
- [36] 吉岡孝高: 亜酸化銅におけるダーク励起子の精密分光とボース・アインシュタイン凝縮転移の観測、日本物理学会第 67 回年次大会 (若手奨励賞受賞講演)、関西学院大学、2012 年 3 月
- [37] 堀越宗一: 冷却フェルミ気体における普遍的熱力学関数の決定、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月

一般講演 (口頭)

- [38] 樋口卓也、田丸博晴、五神真: 誘導ラマン過程において光パルスが及ぼすトルク、日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学、2011 年 9 月
- [39] 福岡健太、森田悠介、吉岡孝高、五神真: 希釈冷凍機を用いた 100mK 以下の極低温における亜酸化銅励起子の発光解析、日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学、2011 年 9 月
- [40] 狭間優治、中嶋子、五神真、田中耕一郎: ダイヤモンドの励起子微細構造と準位間緩和、日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学、2011 年 9 月
- [41] 樋口卓也、五神真: MnF_2 結晶の反強磁性ドメインにおける磁気光学効果の選択則、日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学、2011 年 9 月
- [42] 神田夏輝、小西邦昭、五神真: 空間光変調によるテラヘルツ光学活性の動的制御、日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学、2011 年 9 月

- [43] 堀越宗一: ユニタリー極限の冷却原子系の実験、日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学、2011 年 9 月

- [44] 今井亮、神田夏輝、鄭渚、小西邦昭、五神真: 非線形光学結晶を用いたテラヘルツベクトルビームの発生、第 59 回 応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、2012 年 3 月

- [45] 大間知潤子、平野大輔、吉岡孝高、坂野昌人、下志万貴博、石坂香子、五神真: 高分解能光電子分光のための受動共振器を用いた高繰返し狭線幅 6eV 光源の開発、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月

- [46] 鶴沼毅也、井野雄介、Kai-Erik Peiponen、Erik M. Vartiainen、五神真、平川一彦: テラヘルツ放射分光における因果律に基づいた時間原点の決定、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月

- [47] 福岡健太、森田悠介、吉岡孝高、五神真: 希釈冷凍機を用いた亜酸化銅励起子の BEC 転移の系統的観測、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月

- [48] 堀越宗一: 冷却原子系を用いた希薄中性子物質の研究、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月

- [49] 富樫康平、乙津聡夫、Jonas Metz、堀越宗一、小芦雅斗、五神真: 冷却原子系の任意の散乱長での熱力学決定、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月

- [50] 佐藤正明、神田夏輝、樋口卓也、鈴木隆行、小西邦昭、吉岡孝高、三沢和彦、五神真: 三回対称結晶を用いたベクトル整形光パルスによる偏光制御 THz 波発生、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月

(セミナー等)

- [51] 樋口卓也、神田夏輝、田丸博晴、五神真: 非線形光学における角運動量保存則 ~ 光誘起磁化への応用 ~ (ポスター)、第 1 回 JS-NetS、大阪大学、2011 年 6 月

- [52] 今井亮、神田夏輝、小西邦昭、五神真: 高強度テラヘルツ波を用いた 2 次元計測手法の開拓 (ポスター)、第 1 回 JS-NetS、大阪大学、2011 年 6 月

- [53] 神田夏輝、小西邦昭、五神真: キラル格子における光誘起 THz 光学活性 (ポスター)、第 1 回 JS-NetS、大阪大学、2011 年 6 月

- [54] 五神真: 電子正孔・励起子量子凝縮相の光操作と制御、第 5 回 DYCE シンポジウム、京都大学化学研究所、2011 年 6 月

- [55] 大間知潤子: ダイヤモンドにおける低温電子正孔系の探索、第 5 回 DYCE シンポジウム、京都大学化学研究所、2011 年 6 月

- [56] 樋口卓也: 非線形光学における角運動量保存則 ~ 光誘起磁化への応用 ~ (ポスター)、第 5 回 DYCE シンポジウム、京都大学化学研究所、2011 年 6 月

- [57] 神田夏輝、小西邦昭、五神真: キラル格子における光誘起 THz 光学活性 (ポスター)、第 5 回 DYCE シンポジウム、京都大学化学研究所、2011 年 6 月

- [58] 小西邦昭: 人工ナノ構造を用いた光波制御、第2回先端フォトニクスシンポジウム、日本学術会議講堂、2011年10月
- [59] 大間知潤子、平野大輔、吉岡孝高、五神真: 高分解能光電子分光のためのエンハンスメント共振器を用いた紫外レーザー励起光源の開発 (ポスター)、第4回文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」シンポジウム、名古屋キャッスルプラザ、2011年11月
- [60] 大間知潤子、平野大輔、吉岡孝高、五神真: ダイヤモンド電子正孔液滴の中赤外誘電応答 (ポスター)、第4回文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」シンポジウム、名古屋キャッスルプラザ、2011年11月
- [61] 小西邦昭: 人工キラルナノ構造による円偏光発光制御 (ポスター)、第4回文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」シンポジウム、名古屋キャッスルプラザ、2011年11月
- [62] 吉岡孝高、大間知潤子、五神真: 半導体電子正孔系における量子凝縮相の光創生と制御 (ポスター)、CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」研究領域第4回公開シンポジウム、日本科学未来館、2011年12月
- [63] 吉岡孝高、大間知潤子、五神真: 高安定モード同期レーザーの作成と分光応用への展開 (ポスター)、CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」研究領域第4回公開シンポジウム、日本科学未来館、2011年12月
- [64] 樋口卓也、神田夏輝、李佳、小西邦昭、吉岡孝高、五神真: ねじれ偏光ダブルパルスを用いた結晶中の磁化のベクトル的制御の実現 (ポスター)、CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」研究領域第4回公開シンポジウム、日本科学未来館、2011年12月
- [65] 吉岡孝高: バルク半導体励起子のボース・アインシュタイン凝縮転移 (ポスター)、FIRST 量子情報プロジェクト全体会議 2011、京都国際ホテル、2011年12月
- [66] 大間知潤子: ストリークカメラによる時間領域光子相関測定: 半導体レーザーの高速緩和振動、FIRST 量子情報プロジェクト全体会議 2011、京都国際ホテル、2011年12月
- [67] Michel Fraser: Vortex lattice formation and melting in a polariton condensate、FIRST 量子情報プロジェクト全体会議 2011、京都国際ホテル、2011年12月

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。これまでに、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た手法を用いて、神経細胞の活動を可視化・操作する実験を行なっている。また、このような実験に理論的考察を加えることにより、神経回路の動作原理を探る研究も開始した。配線パターンの分かっているモデル神経回路において、個々の神経細胞の活動をリアルタイムに追跡することにより、神経回路の情報処理の仕組みを明らかにすることが私達の夢である。

7.1.1 運動パターン生成の基盤となる神経細胞及び遺伝子の同定と機能解析

神経ネットワークにおいて、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、出力系である運動神経細胞や感覚神経細胞に比して著しく少ない。昨年度我々は、ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動制御を担う介在神経細胞（PMSI と命名した）の同定に成功し、詳細な機能解析を進めた。その結果、この PMSI は、各体節に存在し、運動神経細胞を抑制的に支配することで、ぜん動運動中において筋収縮が伝播する速さを制御する重要な介在神経細胞であることを見出した。本年度我々は、回路内で生起する神経活動の集団現象を構成的に理解するために、運動パターン生成に関与する介在神経細胞群の遺伝学的同定をさらに進めた。また、遺伝学的手法を生かして、パターン生成を支える遺伝

子の探索を開始した。

ぜん動運動を制御する新規介在神経細胞の同定（板倉由季、高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直）

神経回路は、回路内の神経細胞群が時空間的に適切なパターンで活動することによって機能を果たす。しかし、この活動パターン生成の機構についてはほとんど明らかにされていない。そこで本研究では、ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動を生み出す神経回路をモデルとし、活動パターン生成機構の解明、ひいては神経回路の動作原理解明に取り組むこととした。この運動は体の尾端から頭端に向けて各体節の筋肉が順番に収縮することによって体を前進させるものであり、これと一致して、対応する運動神経細胞の活動が腹部神経節の尾側から頭側に向けて伝播することが確認されている。しかし、この運動神経細胞の活動パターンがいかにして生み出されるのかはわかっていない。そこでまずこの回路を構成する神経細胞群のうち、特に運動神経細胞の活動パターン生成に関わる新規介在神経細胞の同定を目指した。

前年度の研究により、運動神経細胞とシナプスを形成している可能性の高い介在神経細胞において遺伝子発現を誘導可能な Gal4 系統を探索したところ、L59-Gal4 系統が候補として見つかった。そのため今年度はこの系統を用いて研究を進めた。運動神経細胞の活動パターンと、その生成に関わる上流の介在神経細胞の活動パターンは、時間的相関を示すはずである。そのように考え、カルシウムイメージング法を用いて、運動神経細胞と介在神経細胞の活動を同時に、かつそれぞれを区別できるように可視化した。すると、L59-Gal4 で遺伝子発現が誘導される神経細胞群（以下 L59 神経細胞群）のうち、複数の神経分節に 1 対ずつ存在する介在神経細胞が、運動神経細胞の活動パターンと類似しつつ時間的相関をもった活動パターンを示すことが明らかになった。これは、この介在神経細胞がぜん動運動回路に含まれていることを示唆している。

次に、この介在神経細胞が運動神経細胞の活動パターン生成に関わっているならば、その神経活動を人為的に亢進・または抑制した際に運動に異常が生じると考え、実験を行った。亢進には青色光を受容すると開く陽イオンチャネル・チャネルロドプシン 2、抑制には一定の温度以上にあると神経伝達を阻害するタンパク質 Shibire を使い、L59 神経細胞群の活動を操作したときの幼虫の運動の様子を観察した。この結果、神経活動を亢進すると一部の筋肉が強く収縮しぜん動運動が阻害されること、一方、抑制すると 1 回のぜん動運動に要する時間が長くなることがわかった。つまり L59 神経細胞群の中に、その活動亢進によって運動神経細胞の興奮を引き起こす神経細胞、及び正常な速さのぜん動運動に必要なとされる神経細胞が含まれるということである。今後は神経活動操作に用いるタンパク質（チャネルロドプシン 2、Shibire）を L59 神経細胞群のうち一部の細胞に発現させることで、どの神経細胞がまさに運動神経細胞の興奮を引き起こし、正常なぜん動運動に必

要とされるのかを調べる予定である。この回路において、運動制御に関わる介在神経細胞はほとんど報告されていないが、L59 神経細胞群の中には、ぜん動運動の際に神経分節ごとに順番に活動する介在神経細胞、運動神経細胞の興奮を引き起こす介在神経細胞、および、正常な速さのぜん動運動を可能にする介在神経細胞が含まれている。これらの神経細胞が同一なのか、もしくは互いにどのような関係にあるのかを解析することで、運動パターンを生み出す回路機構が明らかにできると考えている。

運動制御に関わる振動活動性介在神経細胞の機能解析 (澤井貴史、高坂洋史、能瀬聡直)

運動回路の時空間活動パターンを生み出す介在神経細胞の同定を目指して、我々はこれまでにカルシウムイメージング法を用いた Gal4 系統スクリーニングを行なった。その結果、ぜん動運動と同期して振動性の活動を示すペプチド性介在神経細胞を見出した。本年度は、この細胞群の運動制御における機能の解析を進めた。温度感受性ダイナミン変異タンパク質 (Shibire) を用いて、この介在神経細胞の活動を抑制したところ、ぜん動運動の伝播する速さが低下した。また、光感受性陽イオンチャネルを用いてこの介在神経細胞の活動を亢進しても、ぜん動運動の伝播する速さが低下したことから、この介在神経細胞が適切なパターンで活動することが、ぜん動運動の伝播する速さの制御に重要であることが示唆された。この介在神経細胞の回路内での機能的位置を詳しく調べるために、このペプチドの受容体を発現するプロモータを用いて、下流の神経細胞の解析を行なった。ペプチド性介在神経細胞と、その下流と考えられる神経細胞の神経突起を詳細に解析したところ、互いに密に絡み合っているのが観察されたことから、これらの神経細胞は互いにシナプス接続していると考えられる。この下流の神経細胞の機能を調べるために、光感受性陽イオンチャネルを用いてその神経活動を亢進したところ、幼虫の全体節の筋収縮が引き起こされた。このことは、この下流の神経細胞が運動神経細胞を直接か間接に支配していることを示唆する。以上の結果より、このペプチド性介在神経細胞が運動制御を担っていること、及びその回路の一端が明らかになった。

運動回路におけるペプチド性神経細胞の機能の解析 (増山郁、能瀬聡直)

動物のふるまいや行動の神経基盤とそのメカニズムを探索するシステム神経科学における中心的な課題には、行動をつかさどる神経回路を同定し、その神経回路がどのように機能することで行動がうみだされるのか解明することが含まれる。特定の神経細胞や神経回路の活動に一過的な摂動を加え、その行動に与える影響を解析することは神経回路や行動のメカニズムの解明に向けた重要な知見を提供すると考えられる。

神経ペプチドは神経細胞から放出され、細胞膜上の受容体を介してシグナルを伝えることで睡眠、呼吸、記憶や学習などといった様々な活動の制御に関与している。さらに一部の神経ペプチドは神経系だけでなく他の臓器でもペプチドホルモンとして機能する。一例としてインスリンが挙げられる。インスリンは血糖値の恒常性維持に重要なペプチドホルモンとして様々な臓器で機能するが、脳にも発現しており神経ペプチドとしても機能する。近年ショウジョウバエにおいて神経ペプチドの発現を模擬する Gal4 系統の網羅的な解析が行われた。その解析から異種の神経ペプチドは異種の細胞に発現されており、また多くの場合限局された一部の神経細胞に発現していることが明らかになった。

これらの神経細胞の行動への寄与を解析する目的で、Gal4/UAS system を利用して光感受性の陽イオンチャネルであるチャネルロドプシン 2 や温度感受性の陽イオンチャネルである dTrpA1 を神経ペプチドが発現する神経細胞で発現した。それらの神経細胞を光や温度上昇によって活性化し、同時にショウジョウバエ幼虫の行動解析を行った。その結果一部の神経ペプチドが発現している神経細胞を活性化した場合、活性化前の平常時とは異なる運動を示すことが明らかになった。また異なる神経ペプチドを発現している細胞を活性化すると異なる運動を示すことが明らかになった。

これらの結果は神経ペプチドを発現している一部の神経細胞がショウジョウバエ幼虫の運動回路内で機能し運動の生成に重要な役割を果たすことを示していると考えられる。また神経ペプチドは動物の様々な活動に関与するため、それらの活動の一側面の解明の手掛かりを得た可能性がある。

幼虫運動の定量化による運動制御回路の正常機能を担う遺伝子の網羅的探索 (寺西功一、奥沢暁子、高坂洋史、能瀬聡直)

運動を制御する神経回路は、適切な神経細胞の分化、神経配線、シナプス形成、神経伝達機構の成熟などが全て揃って初めて正常に機能できる。これらの各ステップを担う遺伝子の探索はこれまでも進んでいるが、従来は全細胞で遺伝子発現が低下した遺伝子欠失体を用いた解析であったため、運動回路以外の発生に異常を引き起こす遺伝子については解析が不可能であった。これに対し、近年開発が進んだ RNA 干渉法による遺伝子機能欠失法を用いると、細胞特異的に遺伝子発現を低下させることができるため、より広範な遺伝子群について運動回路における役割を解析することが可能になった。そこで我々は、ぜん動運動回路の構成要素である運動神経細胞、感覚神経細胞、及び我々が同定した介在神経細胞のそれぞれにおいて、約 1000 種の遺伝子について RNA 干渉法を用いてその発現を低下させ、運動機能に影響を及ぼすかを解析することで、運動パターン生成を担う遺伝子の探索を進めた。各系統の幼虫の動きを CCD カメラで撮影し、その動画を我々が作成した幼虫の動きを自動抽出する ImageJ プログラムによ

て解析することで、運動機能の評価を行った。これまでに、ぜん動運動の速さに影響を与える RNA 干渉システムを複数見出している。今後、これらの遺伝子の運動回路における役割を詳細に解析する計画である。

感覚神経細胞における、ぜん動運動実現に関わる因子の解析（奥沢暁子、高坂洋史、能瀬聡直）

前項の RNA 干渉法を用いた遺伝子スクリーニングにより、感覚神経細胞でぜん動運動に影響すると考えられる遺伝子がいくつか見出された。そのなかで、ある転写因子に関して、感覚神経細胞での遺伝子発現を阻害すると、有意にぜん動運動速度が遅くなる現象が観察された。この転写因子欠失体において感覚神経細胞の形態を可視化したところ、軸索と軸索終末に異常形態が生じていた。この軸索形態の異常は、モータータンパク質に関わる遺伝子を欠失させた時の表現型と類似しており、この転写因子が一部の感覚神経において、モータータンパク質の転写制御に関わっている可能性を示唆している。

7.1.2 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ようすを同時にとらえることができるようになった。また、光生理学の発展により、神経細胞の活動を光照射によって局所的・一過的に制御できるようになった。我々はこれらの技術をショウジョウバエ幼虫の中枢神経系に適用することによって、神経回路の動的特性の解明を目指している。

抑制性神経支配による運動速度制御に関する電気生理学的解析（高坂洋史、能瀬聡直）

昨年度、運動神経細胞を直接支配する抑制性の介在神経細胞（PMSI と命名した）の同定に成功し、その活動を抑制するとぜん動運動において筋収縮の伝播する速さが低下することを見出している。この抑制性支配がどのようにして伝播の速さを制御しているのかを明らかにすることで、運動回路において適切な時空間活動パターンが生み出されるしくみに迫れると考えられる。そこで、この介在神経細胞の活動を光生理学的方法によって操作し、同時に神経活動を電気生理学的手法によって測定する実験系を確立した。ぜん動運動様の筋収縮の際、単一の運動神経から細胞外記録を行なうと、一過的なバーストが測定される。光感受性塩化物イオンポンプによってこの介在神経細胞の活動を抑制しながら、同様に単一の運動神経から活動測定したところ、バーストの継続時間が長くなることが見いだされた。このこと

は、抑制性神経細胞によって運動神経のバースト時間が制限されることで、神経活動が体節間を適切な速さで伝播するという時空間パターン制御機構を示唆する。

局所的神経細胞刺激と多細胞活動測定の光による同時実現系の確立（松永光幸、高坂洋史、能瀬聡直）

中枢神経系において、個々の神経細胞はその下流にある他の神経細胞（または筋肉細胞などの効果器）の活動を制御している。ある神経細胞群を刺激したときに、他の神経細胞群がどのような活動変化を示すのかを調べることで、神経回路内の情報の時空間的伝播過程が明らかにでき、回路の動作原理に迫れると考えられる。我々は、運動制御回路の動作原理を明らかにするために、ショウジョウバエ幼虫運動回路において、一部の神経細胞の人為的活動制御と神経細胞群の活動測定を可視光で同時に行なう実験系の確立を進めた。最終的な目標は、ある特定の神経細胞群を光感受性陽イオンチャネルであるチャネルロドプシン2によって亢進させ、その下流の神経細胞群の活動をカルシウム感受性蛍光タンパク質 GCaMP で可視化することにある。本年度は、まず光学系を確立するために、運動神経細胞にチャネルロドプシン2と GCaMP を共に発現させ、局所刺激と神経活動イメージングを同時に行なうことを試みた。刺激用の光源として共焦点顕微鏡のアルゴンガスレーザを用い、活動イメージング用には新たに導入したキセノンランプを用いた。運動神経細胞にチャネルロドプシン2と GCaMP を発現させた三齢幼虫の腹部神経節全体にレーザによって刺激光を当て続けた結果、GCaMP の蛍光強度が時間とともに増加していった。これはチャネルロドプシン2が機能し、その結果引き起こされた神経細胞の活動上昇が GCaMP によるイメージングで検出できたことを示している。今後、チャネルロドプシン2と GCaMP を異なる神経細胞群に発現させてその機能的関係を解析する予定である。またチャネルロドプシン2の代わりに光感受性塩化物イオンポンプ、ハロロドプシンを発現することにより、特定の神経細胞群の発火を抑制しながら他の神経細胞群の活動のカルシウムイメージングが可能である。これらの解析により、運動回路における神経活動の伝播様式を明らかにしたいと考えている。

幼虫運動回路におけるパッチクランプ測定系の確立（高木俊輔、高坂洋史、能瀬聡直）

神経活動の物理的実態は、細胞膜における一過的な電位変化である。これを直接測定できる強力な方法が電気生理学的手法である。その中の1つの手法で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、細胞膜の電位を微小ガラス電極を介して測定する手法である。我々は、幼虫の運動パターン生成の背後にある神経活動を詳細に解析するために、運動神経細胞の細胞膜か

らパッチクランプ法によって電位を測定する系を確立した。実際に電流を注入することで、活動電位が発生されることを確認した。この測定法と光による神経活動制御を組み合わせると、回路内での情報の流れの解析が可能になる。運動神経細胞をパッチクランプ法で測定しながら、光感受性陽イオンチャネルによって神経活動を亢進したところ、電流注入をした場合と同様に活動電位の発生を誘導できた。今後は、他の神経細胞を光制御しながら運動神経細胞の活動を測定することで、回路内のダイナミクスを詳細に解析していく予定である。

7.1.3 回路構造と神経機能の発生機構

複数の神経細胞がシナプスを介して順々につながっていくと、神経回路ネットワークができあがる。神経回路が正常に機能するためには、回路構造の適切な発達が必要であるが、その細胞・分子機構に関しては不明な点が多い。我々は、ショウジョウバエ胚・幼虫のぜん動運動成熟過程をモデルとして、神経回路構造の発達、及び回路機能の成熟過程の研究を進めている。

感覚神経細胞軸索終末の可塑的变化（奥沢暁子、高坂洋史、能瀬聡直）

ショウジョウバエ幼虫ぜん動運動にかかわる一部の感覚神経細胞は、中枢神経内に特徴的な神経終末構造を形成する。前年度までに、この構造が胚後期のわずかな時間に T 字型から U 字型へと変わること、またこの変化が神経終末の再構成によって形作られる可能性を明らかにした。本年度においては、さらに詳細な可視化法を用いることによって構造変化を追うと共に、この構造変化がどのような要因で起こるかについて研究をおこなった。

まず、胚後期の感覚神経細胞を、蛍光色素注入法を用いて単一細胞レベルの高い解像度で可視化した。その上で発達過程における形態変化の詳細な検討を行ったところ、感覚神経細胞は突起新生と刈り込み・整理によって構造を変化させていることが明らかになった。

つぎに、遺伝子欠失変異体を用いて構造変化の要因を検討した。胚期において、ぜん動運動様の運動がさかんに見られることから、胚期での運動による感覚神経細胞の神経発火が軸索終末の形態変化に関与していることが予想される。この可能性を検討するために、胚期の筋収縮を阻害するような遺伝子 (mhc) 欠失体と、感覚神経細胞の活動を阻害する遺伝子 (nompC) 欠失体それぞれで軸索終末の構造を可視化したところ、遺伝子欠失個体は軸索終末の総長が対照個体に比べ有意に長くなった。このことより、軸索終末の構造変化は、活動依存的な効果を反映していると考えられる。一方で、神経活動の低下により中枢神経系全体の構造にも異常が生じており、この中枢神経系の構造異常と軸索の広がりにも強く関係性があることが明らかとなった。以上から、感覚神経細胞軸

索の形態変化には、細胞自律・非自律的な要素双方が大きく関わっている可能性が示唆された。

運動回路の発達可塑性を支える回路基盤の解明（伏木彬、高坂洋史、能瀬聡直）

運動を制御する中枢神経回路、特に CPG (Central Pattern Generator) のような定型運動を司る回路網は、運動する過程において末梢あるいは中枢内でのフィードバック機構が動作していると考えられる。このような回路が成熟する過程において、環境からの刺激または自発的な発火活動に応じて神経細胞間の接続が、形態的かつ機能的に変化しながら回路全体として組織化されると考えられている。

前年度までの研究において、運動機能発達期（胚発生後期）に感覚神経細胞 chordotonal neurons (chos) の活動を一過的に操作することで幼虫のぜん動運動に可塑性が生じることを示した。ショウジョウバエの感覚神経細胞は三種類あり、全ての感覚神経細胞がぜん動運動の成熟に関わっているかは明らかではない。そこで本年度は、chos 以外の感覚神経細胞 multidendritic neurons (mds) の運動機能発達期における可塑性を調べた。mds は、運動機能成熟期（三齢幼虫期）において感覚性フィードバックを通じて運動の制御に重要な役割を担っていることが先行研究によって示されている。しかし、発達期に mds の活動を阻害したところ、chos のようなぜん動運動の可塑的な変化を見いだせなかった。これは、すべての感覚神経細胞が運動機能の成熟に関与しているわけではないことを示唆している。次に、chos による可塑的な変化がなぜ生じたのか詳細な回路基盤を探るため、可塑性の起きた個体の中枢神経内での chos 軸索投射の形態に着目した。運動に異常が生じた個体を解剖し、chos の神経細胞を染色したところ、対照個体と比較して神経突起に顕著な形態異常は見られなかった。今後は chos 全体の形態を観察するのではなく、光により活性化する GFP (PA-GFP) などを用いて chos の単一神経細胞のみを可視化し、行動に変化を及ぼした神経回路の構造上の変化を探索する。

感覚入力が運動回路の形成期に影響を及ぼすことは示されたが、運動を制御する中枢神経回路自体が可塑的な変化を起こすかどうかについては明らかではない。そこで運動を制御する介在神経細胞を同定し、胚発生後期に一過的に活動を操作することで、運動発達期における介在神経細胞の役割を探った。感覚入力から得られる情報を運動回路に働きかけるフィードバックを外部フィードバックとしたとき、運動回路による出力を感覚系を介さずに戻す局所的な制御機構を内部フィードバックと定義する。様々な系統のうち、感覚神経細胞 chos と中枢内に少数の GABA 作動性神経細胞の両方を発現する系統を用いて運動の発達期に活動を抑制すると、chos のみ阻害した場合とは相異なる可塑性が生じた。この GABA 作動性神経細胞は、カルシウム感受性蛍光タンパク質 GCaMP を用いたカルシウムイメージングによりぜん動運動の波に沿った活動パターンが観測されることが分かっており、局所的な筋収縮の情報を運動回

路へフィードバックしていると考えられる。また、感覚入力 chos と GABA 作動性神経細胞の活動を共に三齢幼虫期で一時的な神経伝達阻害した場合は運動が速くなり、一方で共に細胞死誘導した場合は chos だけで行ったときよりも著しく遅くなるという興味深い結果が得られている。これらのことから、着目している GABA 作動性神経細胞は、運動回路の構成要素であると同時に、運動回路の機能発達に関与していることが示唆される。今後、この GABA 作動性神経細胞の運動機能発達過程における働きをさらに詳しく調べる計画である。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Shakiryanova D., Morimoto T., Zhou C., Chouhan A.K., Sigrist S.J., Nose A., Macleod G.T., Deitcher D.L. and Levitan E.S.: Differential Control of Presynaptic CaMKII Activation and Translocation to Active Zones. *J Neurosci.* 31, 9093-100 (2011).
- [2] Inada K., Kohsaka H., Takasu E., Matsunaga T., and Nose A.: Optical dissection of neural circuits responsible for *Drosophila* larval locomotion with halorhodopsin. *PLoS One* 6, e29019 (2011).
- [3] Fukui, A., Inaki, M., Tonoe, G., Hamatani, H., Homma, M., Morimoto, T., Aburatani, H. and Nose, A.: Lola regulates glutamate receptor expression at the *Drosophila* neuromuscular junction. *Biol. Open*, in press (2012).

(総説)

- [4] Kohsaka, H., Okusawa, S., Itakura, Y., Fushiki, A. and Nose, A.: Development of larval motor circuits in *Drosophila*. *Dev. Growth Diff.*, in press (2012).
- [5] Nose, A.: Generation of neuromuscular specificity in *Drosophila*: novel mechanisms revealed by new technologies. *Front. Mol. Neurosci.*, in press (2012).

(学位論文)

- [6] 澤井貴史 : Optogenetic dissection of neural circuits underlying rhythmic locomotion (修士論文、新領域創成科学研究科)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [7] Kohsaka, H. and Nose, A. : Regulation of *Drosophila* larval locomotion by propagating activity of local interneurons. Cold Spring Harbor Meeting on “Neurobiology of *Drosophila*”. 2011.10.3-7, Cold Spring Harbor lab, USA
- [8] Masuyama, K., and Wang, J.W. : Visualizing Neural Circuits with Activity-Dependent Nuclear Import of a Transcription Factor. Cold Spring Harbor Asia Conference on Assembly, Plasticity, Dysfunction and Repair of Neural Circuits, 2011.10.17-21 Suzhou (China)

- [9] Fushiki, A. Kohsaka, H., and Nose, A.,: Role of sensory experience in functional development of *Drosophila* motor circuits. Cold Spring Harbor Asia Conferences on Assembly, Plasticity, Dysfunction and Repair of Neural Circuits, 2011.10.17-21, Suzhou (China)
- [10] Kohsaka, H. and Nose, A. : Optogenetic dissection of local circuits that regulate larval locomotion in *Drosophila*. 2012.3.28-31, Cold Spring Harbor Meeting on “Neuronal Circuits”, Cold Spring Harbor lab, USA

招待講演

- [11] Nose, A. : Optogenetic dissection of the neural circuits that regulate larval locomotion in *Drosophila*. 44th Annual Meeting of the Japanese Society of Developmental Biologists, Symposium, 2011.5.18-21, Okinawa

(国内会議)

一般講演

- [12] 増山郁 : 「転写因子の核内輸送を用いた神経回路の可視化: An Approach for Neural Tracing : Mapping Neural Circuits with Activity-Dependent Nuclear Import of a Transcription Factor.」、柏神経科学の会セミナー、2011.4.22、千葉
- [13] 増山郁 : 「活動依存的なレポーター遺伝子の発現を用いた神経回路の可視化 : Visualizing neural circuits activity dependent nuclear import of a transcription factor.」、生理学若手研究者フォーラム、2011.6.18、東京
- [14] 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」、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 23 年度第 1 回領域班会議、2011.8.21 - 24、神戸
- [15] 板倉由季、高坂洋史、能瀬聡直 : 「ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動を制御する介在ニューロンの探索」、2011 年度 包括脳ネットワーク夏のワークショップ、2011.8.21 - 24、神戸
- [16] Kohsaka, H. Takasu, E. and Nose, A.: Segmentally-arrayed interneurons regulate the peristaltic locomotion of *Drosophila* larvae. 第 34 回日本神経科学大会、2011.9.14-17、横浜
- [17] Masuyama K., and Wang J.W. : Visualizing Neural Circuits with Activity-Dependent Nuclear Import of a Transcription Factor. 第 3 4 回日本神経科学大会、2011.9.14-17、横浜
- [18] 奥沢暁子、高坂洋史、能瀬聡直 : 「ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動に関わる感覚フィードバック神経軸索終末の形成と可塑的变化」: 第 34 回日本神経科学大会、2011.9.14-17、横浜
- [19] 板倉由季、高坂洋史、能瀬聡直 : Search for interneurons that regulate larval locomotion in *Drosophila*. 第 34 回日本神経科学大会、2011.9.14-17、横浜

- [20] 伏木 彬、高坂洋史、能瀬聡直 : 「ショウジョウバエ幼虫の運動回路の機能発達における感覚受容の役割 : Role of sensory experience in functional development of *Drosophila* motor circuits.」、第 34 回日本神経科学大会、2011.9.14-17、横浜
- [21] 高坂洋史、能瀬聡直 : 「神経活動の可視化と光操作による運動制御回路の解析」、第 3 回光塾、2011.10.22-23、東京
- [22] 高坂洋史、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」、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 23 年度第 2 回領域班会議、2011.10.26-27、熱海
- [23] 奥沢暁子、高坂洋史、能瀬聡直 : 「ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動に関わる感覚フィードバック神経軸索終末の形成と可塑的变化」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 23 年度第 2 回領域班会議、2011.10.26-27、熱海
- [24] 伏木 彬、高坂洋史、能瀬聡直 : 「感覚入力に依存した運動回路の機能発達」、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 23 年度第 2 回領域班会議、2011.10.26-27、熱海
- [25] 板倉由季、高坂洋史、能瀬聡直 : 「ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動を制御する介在ニューロンの同定」、日本神経回路学会オータムスクール (ASCONE2011)、2011.11.3-5、諏訪
- [26] 伏木 彬、高坂洋史、能瀬聡直 : 「感覚入力に依存した運動回路の機能発達」、日本神経回路学会オータムスクール (ASCONE2011)、2011.11.3-5、諏訪
- [27] 澤井貴史、高坂洋史、能瀬聡直 : 「ショウジョウバエ幼虫の運動開始に関与する介在神経細胞の探索」、第 34 回日本分子生物学会年会、2011.12.13-16、横浜
- [28] 奥沢暁子、高坂洋史、能瀬聡直 : 「ショウジョウバエ幼虫の感覚フィードバック神経軸索終末の形成と機能」、東京大学 GCOE「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」第 7 回 RA キャンプ、2012.2.27-28、伊豆
- [29] 板倉由季、高坂洋史、能瀬聡直 : 「ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動を制御する介在ニューロンの同定・機能解析」、東京大学 GCOE「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」第 7 回 RA キャンプ、2012.2.26-28、伊豆
- [30] Fushiki, A. Kohsaka, H., and Nose, A. : Role of sensory experience in functional development of *Drosophila* motor circuits. GCOE「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」第 7 回 RA キャンプ、2012.2.26-28、伊豆

招待講演

- [31] Kohsaka, H., Takasu, E. and Nose, A.,: Functional and anatomical analysis of segmentally-arrayed interneurons that regulate locomotion in *Drosophila*. 第 84 回日本生化学会大会、2011.9.21-24、京都
- [32] 能瀬聡直 : 神経ネットワークの静と動、日本神経回路学会オータムスクール、2011.11.3-5、諏訪
- [33] Kohsaka, H. and Nose, A.: Optogenetic dissection of central circuits underlying larval locomotion in *Drosophila*. 第 34 回日本分子生物学会年会、2011.12.13-16、横浜

(講義等)

- [34] Nose, A.: Neuronal target recognition and synapse specificity. 沖縄科学技術大学院大学 Okinawa Institute of Science and Technology, Developmental Biology Course, 2011.7.17-27, 沖縄
- [35] 能瀬聡直、学習院大学理学部生命科学科集中講義、2011.9.14-15, 東京
- [36] 能瀬聡直、「光を使って運動回路の作動原理を探る」、東京大学大学院理学系研究科生物化学専攻 大学院講義

7.2 樋口研究室

当研究室では生体モータータンパク質を分子・細胞・個体の3つの階層からアプローチし、各階層の機能メカニズムを解明すると同時に全体を俯瞰した生体運動の物理モデルを構築する。主な研究テーマは、1) 精製モーター1分子の3次元的な運動をÅ精度で測定できる装置を開発して実験・解析し、Åレベルの運動メカニズムの解明を行う。2) 細胞内モーター分子の変位と力を3次元的に測定できる装置を開発し測定・解析して、力学状態の時空間的变化を解析する。3) マウス内モーター分子の運動を1分子レベルでイメージングできる装置を開発し測定・解析を行うことで、個体内細胞の運動を明らかにする。4) 細胞の運動機能に普遍的な物理モデルを構築する。

7.2.1 高輝度 QD 集合体の作製と精製

QDは高い量子効率を持ち、褪色を起こさないことから、生体内 *in vivo* イメージングへの応用が期待されている。しかし、QDはブリンキングを起こすことから、連続した長時間の観察には有効ではない。また、非侵襲での1分子観察を実現するためには、より蛍光強度の強いマーカーが必要である。そこで、我々は、種々の方法によりQD集合体を作製することにより、これらの弱点を克服することを試みた。1) QDは適した密度条件(40 nM以下)ならびに溶液条件下において、液体窒素によって急速に冷却することで、数10個~数100個程度のQDによる凝集体を形成することが明らかとなった。2)

また、97℃で数分間加熱することによっても大きな凝集体を形成した。しかし、加熱によって個々のQDの蛍光強度は著しく(〜1/100)減少することから、この方法は適していないものと考えられる。3)

COOH基を持つビーズにNH₂コーティングされたQDをクロスリンカー(EDC)によって架橋することによってもQD凝集体を作製することにも成功した。しかしこの場合、未反応のQDならびにビーズが多数混在しており、その後の精製が必要なだけでなく、非経済的である。以上の方法によって得られた凝集QDの輝度、及び位置精度を測定すると、どちらの因子においても、急速凍結により作製した凝集QDが、最も優れていることが示唆された。

7.2.2 筋フィラメント内ミオシン分子のステップ計測

骨格筋ミオシンII(以降ミオシンと呼ぶ)は筋収縮を担うアクチン系モータータンパク質の一種であり、アクチン上ですべり運動を行うことで力発生を行うことが知られている。2010年にKaya, Higuchi [science 2010] がミオシン分子をフィラメント化することによって、ミオシン分子の配向を揃え、またアクチンフィラメントに対するアフィニティを高め、ミ

オシンの力変位測定を行った。この実験系において低分子数(3?6分子)のフィラメントを用いた場合、ミオシンフィラメント内のミオシン分子はアクチンとランダムに相互作用し、10pN程度の低負荷の範囲内ではミオシン1分子で十分に力を出し得ることがわかった。また1分子の弾性計測からミオシンは非線形弾性を示し、力を出すときは弾性率が高くなり力を出し終わった後は弾性率が低くなることがわかった。しかしKayaの実験は低ATP濃度で行われたため、ミオシンとアクチンとの結合時間が長く、ミオシンの運動を他のミオシンが阻害している可能性があり、生体内で起こる現象と異なっているかもしれない。そこで本研究では生体環境に近い高ATP濃度(1mM)においてミオシンフィラメントの力変位測定を行い、ミオシン1分子反応に由来するstep sizeとdwell time(ステップ-ステップ間の時間間隔)の特性を調べた(図7.2.1)。この際、様々なATP濃度条件下で同様の計測を行った。実験ではビオチニルアクチンフィラメントに結合させたアビジンビーズを光ピンセットにより捕捉し、蛍光標識されたミオシンフィラメントとアクチンフィラメントが平行に配向するように相互作用させ、その際に発生したアビジンビーズの変位を測定した。また高ATP濃度での実験ではミオシン個々の現象が数msで完了することが予測されたため、既存の顕微鏡の改良を行うことで時間分解能を上げて測定をした。その結果、1mM、100 μM、10 μM ATPにおける変位トレースでステップ状の変位を確認できた。step sizeが負荷の増大とともに減少する傾向と、dwell timeが負荷の増大とともに増加する傾向は各ATP濃度で確認された。また、ミオシンの弾性部位の伸びから予想される力よりも高負荷の力が発生していたので、高負荷の力発生には複数分子のミオシンが寄与していると考えた。そこで各負荷の状態でもミオシン何分子がアクチンと結合しているのかをdwell timeから推定した。その結果、ミオシンフィラメント中のアクチンと相互作用可能なミオシン分子数は17分子であり、無負荷では2分子程度が、最大力付近では8分子程度が結合していると推定した。そして、弾性部位の伸び力関係と結合しているミオシンの弾性部位の分布からミオシンフィラメント全体で出す力を計算したところ、ミオシンが力を出した後も複数回に渡り力を出し続けることができれば、30pN程度の高負荷に抗して運動出来ることが予想された。これはA.F. ハックスレーが行った筋線維の力を急速に緩めると一旦は力が減少するがすぐに力が回復する実験で説明できる。したがって私はミオシン分子は複数回の力発生を行うことができると考えた。

7.2.3 Hetero 頭部ダイニンの歩行メカニズム

これまで、細胞質ダイニンは二つの重鎖が交互に構造変化して力発生を行うことで、微小管上を二足歩行していると予想されてきた。ところが、これまでの私の研究により、一方の重鎖を構造変化及び力発生をしない「活性を失った」重鎖に代えても、微小

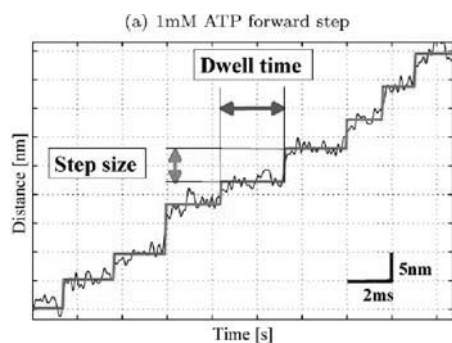


図 7.2.1: ミオシンフィラメント上のミオシン約 20 分子によって発せられた変位トレース。トレースのステップ状変位を数学的に見つけた

管上を一方向へと二足歩行することが明らかになった。昨年度までに、細胞質ダイニンの 2 つの重鎖に別々の蛍光色素または量子ドットを導入することで、2 つの重鎖の動きを高時間空間分解能で追跡するシステムが整った。本年度このシステムを利用することで、2 つの重鎖が交互にステップするだけでなく、一方の重鎖が連続してステップする場合があること、野生型の重鎖が「活性を失った」重鎖を物理的に微小管から引き剥がしていることが明らかとなった。それでは、細胞質ダイニンの動作に一方の重鎖の寄与は必要ないかというそうではない。光ピンセットを用いた計測から、ダイニンが負荷に抵抗して力を発生させるためには、両方の重鎖が構造変化することが重要だということもわかった。また、重鎖の構造変化自体は 6 pN 以上という強い力を出しうるが、少なくとも細胞性粘菌のダイニンでは、微小管との結合が大きな負荷に耐えられず、これが細胞質ダイニンの発生させる力を規定していることも示唆された。これらの特性が、「片足が死んでも二足歩行可能」という細胞質ダイニンのユニークな性質を生み出している。真核細胞の細胞質では、微小管のプラス端方向への物質輸送に関わるキネシンは多くの種類が存在するのにに対し、反対側への輸送を司る細胞質ダイニンは一種類だけである。そのため、細胞質ダイニンはさまざまな状況に応じて、その運動を調節できるものと考えられる。本研究は、これまでに得られた一つの重鎖の構造情報や反応キネティクスと、実際の二量体としての運動や力発生仕組みとを結び、細胞質ダイニンの細胞内での調節機構研究の基盤となるものと評価できる。

7.2.4 組換えヒト細胞質ダイニンの力・変位測定

細胞質ダイニンは ATP 加水分解のエネルギーを使って微小管上を移動する分子モーターである。2 つの細胞骨格モーター「細胞質ダイニン」と「キネシン」は微小管上を移動しながらオルガネラやタン

パク質を輸送する役割を担っており、ダイニンは細胞膜から核付近まで輸送し、キネシンは反対方向核から細胞膜まで輸送を行う。細胞内では、この逆方向に移動するモータータンパク質をうまく調節して正確に輸送を行っていると考えられるが、その制御機構は分かっていない。この制御機構のモデルの 1 つに「綱引きモデル」がある。このモデルは輸送する荷物に結合しているダイニンとキネシンの数によって移動する方向が決定されるというものであり、荷物に結合する分子数と 1 分子が発生する事ができる最大力が重要な要素となる。ダイニンが発生する力に関しては我々のグループが天然ダイニンを用いて 7 pN であると主張しているのに対し、1 – 2pN しか出さないと主張するグループもあり、未だに論争が続いている。そこで我々はどちらが正しいかを確かめるために運動を制御する可能性のある尾部を切り取ったモーター部位のみヒト細胞質ダイニンを発現し、運動と力測定を行った。ダイニンを結合した 220 nm のビーズを光ピンセットを用いて捕捉してガラス上にある微小管上に結合させ、ATP を加えてダイニンを運動させた時のビーズの変位を計測する事により最大発生力を見積もった。その結果、ダイニンのモーター部位の最大力は約 7 pN であり、我々のグループが以前に報告したブタ精製ダイニンの最大力と同程度であった。さらに破断力を測定する事で微小管との結合状態の詳細を解析した。ヌクレオチドなし、AMPPNP、ADP、ADP?Vi 存在下でダイニンと微小管を結合させ、ステージ（微小管）を動かす事により、ダイニン・微小管に外部負荷をかけて結合を破断させた。その結果、ADP?Vi 存在下で破断しやすく、ヌクレオチドなし、AMPPNP、ADP 存在下では大きな破断力であった。ダイニンの進行方向に負荷をかけた時の方が順方向に負荷をかけた時よりも破断力が弱く、すなわち前進しやすいことを裏付ける結果を得た。以上により、ダイニンは大きな力を発生することができ、前進するのに都合の良い破断力を持つことが明らかとなった。

7.2.5 非侵襲 in vivo がん細胞・白血球のイメージング

これまでの in vivo イメージングでは、腫瘍部を切開して、癌腫瘍表面近くを観察できた。しかしながら、切開をすると、出血や免疫細胞の活性化などが起こり、生きたままの姿を観察する事は困難である。そこで、非侵襲で観察できる装置システムの改良と観察法の工夫をおこなった。明るくするため、倍率を下げ、レーザーの集光度を上げた。血量が見えるように、青い光の透過像を得られるようにした。観察法として、約 200 μ m の厚さしかない耳をえらび、蛍光を発する毛の脱毛をした。がん細胞をラベルするために Herceptin-量子ドット複合体を尾静脈注射した。細胞膜に結合した量子ドットの観察に成功した。また、白血球の中でも運動能が高い好中球やマクロファージに結合した多粒子化量子ドットを結合することで、血管中の好中球をより鮮明に量子ドットを観察する事ができた。また、耳に刺激剤を塗りクロ

ファージを誘発したところ、貪食した量子ドットの詰まった小胞の運動を観察することができ、小胞の位置を 50nm 精度で追跡することができた (図??)。また、細胞運動を観察でき、仮足が急速に伸びたのち、細胞体が仮足の方法に動き出した。好中球が生体内を動くメカニズムが解ってきた。

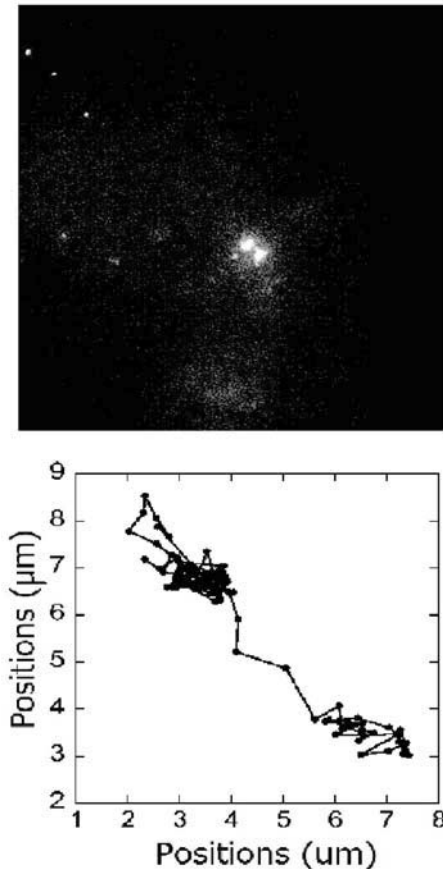


図 7.2.2: 非侵襲下で観察されたマクロファージ内に貪食された量子ドットの位置の解析結果

7.2.6 マウス骨格筋構造の in vivo イメージングの開発

骨格筋は生体内の器官の中でも極めて高次の構造を有し、その主要な構築物である筋収縮装置はおびただしい量のタンパク質の複合体により成り立っている。筋収縮装置は生体の代表的なナノマシンといえる生体分子モーターの一種である骨格筋ミオシンによるアクチン滑り運動を駆動力としている。筋肉はまさにこのナノレベルでの変化を生体運動という秩序だったマクロレベルの変化に変換するシステムであると言える。これまでの研究から骨格筋を構成

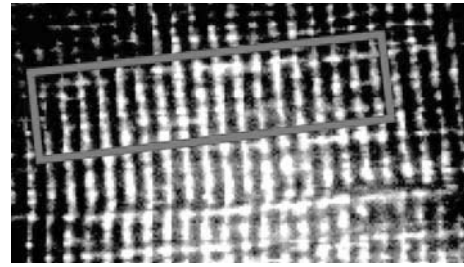


図 7.2.3: マウス内の筋肉収縮ユニットの GFP 標識

するタンパク質の特性や骨格筋の生理学的性質、収縮装置の物理学的性質が明らかになりつつある。これらの研究は筋肉から単離・精製されたタンパク質の挙動や、筋肉を筋繊維に分離したもの、さらに筋繊維細胞膜を溶解させたスキンドファイバーにより行われてきた。このような研究は骨格筋の部分ごとの詳細を知るためには極めて有力な方法であり、膨大な研究成果が報告されている。しかしながら、これらの生体内での計測は殆ど行われておらず、これらの性質が生体内でどのように反映されているかについては依然として多くの議論がある。すなわち骨格筋を構成するタンパク質のナノレベルでの性質とスポーツ科学、運動医学的知見とを地続きに議論できる実験系が必要とされているのである。本研究ではマウスを用いた蛍光ナノイメージング技術を応用することによりこの問題の解決を目指した。麻酔下に置いた生きたマウスを倒立顕微鏡に直接乗せ、レーザー共焦点蛍光顕微鏡法を用いて骨格筋内部構造の in vivo イメージングを行った。染色は標的タンパク質と GFP との融合タンパク質発現により行った。これまでに報告されている骨格筋内での遺伝子発現は、筋肉を筋繊維に分離して行っているものがほとんどであり、筋肉全体での遺伝子発現は少ない。今回我々は生体の筋肉での簡便な遺伝子発現方法を開発した。この方法はリポフェクションを利用した遺伝子導入法と薬剤の筋肉中への注入という手法の組み合わせによるものである。筋肉中への薬剤注入の効率性の評価のため、ミトコンドリア特異的な有機蛍光試薬である Mitotracker を用いたところ、標的筋肉全体でのサルコメア構造の可視化を確認した。同様の注入方法で α -アクチニン-GFP 融合タンパク質の遺伝子を骨格筋に導入したところ、Mitotracker と同様にサルコメア構造が観察された (図 7.2.3)。同様にして微小管系タンパク質も骨格筋内で発現・可視化することに成功した。筋収縮時における構造の変化を捉えるため、観察中に神経に直接電気刺激を与えて収縮させた。しかしながら収縮の瞬間は極めて速く、収縮に伴って観察対象が視野から外れてしまうという問題が起きた。この問題を解決するため、我々は高速カメラと高速ステージを用いたフィードバックシステムの一部を開発した。

< 報文 >

(原著論文)

[1] Numata N, Shima T, Ohkura R, Kon T, and Su-

- toh K C-sequence of the Dictyostelium cytoplasmic dynein participates in processivity modulation, FEBS Letter, 585: 1185-1190 (2011)
- [2] Shima T, Sutoh K, and Kon T Structural and Functional Modularity of Cytoplasmic Dynein, Biophysics, 51: 118-123(2011)
- [3] Kon T, Oyama T, Shimo-Kon R, Imamula K, Shima T, Sutoh K, and Kurisu G The 2.8 Å crystal structure of the dynein motor domain, Nature, Epub ahead of print(2012)
- (国際雑誌)
- [4] Y Toyoshima and H. Higuchi “ Motile and Enzymatic properties of native dynein molecules ” in Handbook of Dynein. K. Hirose and LA Amos ed. (2012)
- [5] Kon T, Shima T, and Sutoh K Chapter4.24, Cytoplasmic Dynein: Its ATPase Cycle and ATPase-dependent Structural Changes, Comprehensive Biophysics, Academic Press, in press (2012)
- [6] Shima T, Sutoh K, and Kon T Chapter3, Functional Analysis of the Dynein Motor Domain, Handbook of Dynein, Pan Stanford Publishing (2012)
- (国内雑誌)
- [7] 権田幸祐, 渡邊朋信, 大内憲明, 樋口秀男 「がん転移の生体ナノイメージング」生物物理学 51, 82-83 (2011.4)
- [8] 樋口秀男 「ナノバイオ」 理大科学フォーラム 8,19-24 (2011.8)
- [9] 樋口秀男 「マウス個体内の1分子計測」 現代化学 (2011.11)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [10] Shima T. "Walking mechanism of cytoplasmic dynein", Conferencia del Dep. De Fisica Aplicada iOptica Barcelona, Universitat de Barcelona, Spain, April 2011
- [11] Shima T. "The mechanism for coordination between two heads of cytoplasmic dynein", Evening BioSeminar in ETH Zurich, Die Eidgenossische Technische Hochschule Zurich, Switzerland, April 2011
- [12] Taketoshi Kambara, Yoshiaki Tani, Tomohiro Shima, and Hideo Higuchi. Unbinding force measurement of recombinant human cytoplasmic dynein. The Gordon Research Conference on Muscle & Molecular Motors. July 2011
- [13] Taketoshi Kambara, Yoshiaki Tani, Tomohiro Shima, and Hideo Higuchi. Unbinding force measurement of recombinant human cytoplasmic dynein. Dept. of Otolaryngology, Northwestern University Feinberg School of Medicine. July 2011
- [14] Shima T, Ito K, Kon T, Ohkura R, Higuchi H, Sutoh K. "Coordination of two heads of cytoplasmic dynein" The 9th International Conference on AAA Proteins, Kumamoto, Japan, November 2011
- 招待講演
- [15] Motoshi Kaya (2012) Application of optical tweezers to understand molecular mechanism of muscle contractions. International Symposium on Nanomedicine, Nagoya University, Japan (March 2012)
- [16] Higuchi, H. Kon, T., Vilfan, A., Dimeric recombinant dynein motor proteins stepping along microtubules. Burgess, S.A.11th HFSP Awardees Meeting Montreal, Canada, June 2011
- [17] Higuchi H. and M Kaya Single molecule biophysics in an in vivo and in vitro. Japan-Taiwan joint symposium. Kyoto. February 2012
- (国内会議)
- 一般講演
- [18] 神原丈敏, 谷芳明, 島知弘, 樋口秀男「ナノ粒子を用いた組換えヒト細胞質ダイニンの力・変位測定」ナノ学会第9回大会, 北海道大学・学術交流会館, 2011年6月2日
- [19] 小林琢也, 茅元司, 樋口秀男「局所的遺伝子導入を用いたマウス骨格筋構造のin vivo イメージングの開発」ナノ学会第9回大会, 北海道大学・学術交流会館, 2011年6月2日
- [20] 菊島健児, 喜多清, 樋口秀男「高輝度量子ドットを用いたマウス耳内血管の非侵襲イメージング」ナノ学会第9回大会, 北海道大学・学術交流会館, 2011年6月3日
- [21] 菊島健児, 喜多清, 樋口秀男「高輝度量子ドットを用いたマウス耳内血管の非侵襲イメージング」, 第49回日本生物物理学会, 兵庫県姫路市, 2011年9月16日
- [22] 神原丈敏, 谷芳明, 島知弘, 樋口秀男「細胞質ダイニンの構造変化と力発生」第49回日本生物物理学会, 兵庫県姫路市, 2011年9月16日
- [23] 神原丈敏, 島知弘, 樋口秀男「組換えヒト細胞質ダイニンの力測定」第49回日本生物物理学会, 兵庫県姫路市, 2011年9月17日
- [24] 菊島健児, 喜多清, 樋口秀男「非侵襲マウス耳介内での量子ドットを用いた白血球内の小胞運動解析」生体運動班会議, 筑波大学, 2012年1月7日
- [25] 島知弘「細胞質ダイニンの分子機構解明に向けて」第1回分子モーター討論会, 東京大学, 2011年6月22日
- 招待講演
- [26] 茅元司「骨格筋ミオシンの1分子計測から見てきた筋肉の巧みな収縮メカニズム」第2回イメージングワークショップ 東京理科大学野田キャンパス, 2011年7月25日
- [27] 茅元司「階層レベルを意識した筋収縮の分子機構の解明」定量生物学の会 名古屋大学, 2012年1月8日

<その他>

(特許)

- [28] 樋口秀男、下澤東吾 国際出願
PCT/JP2011/62551「共焦点顕微鏡画像システム」出願日：2011年5月31日

- 4. 図面の読み方
- 5. ハイトゲージ、ケガキ、ポンチ、ボール盤、タップの使い方

8 技術部門

その他

2012 年 3 月 29 日 ワイヤ放電加工機購入

(大塚、佐伯、八幡、柏葉、南野、* 南城、* 阿部)

* 技術補佐員

技術部門では、実験装置試作室業務、安全衛生・薬品管理業務、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。4 月から技術部門に南野を迎えた。技術部門の担当教員 (坪野、福山、相原、山本、須藤、岡本) とで月に 1 度の物理技術室ミーティングを行っている。また、試作室担当の他専攻の教員 (ゲラー (地惑)、長谷川 (化学)) および技術職員 (川島 (化学)) と一緒に月に 1 度の試作室ミーティングを行っている。

8.1 実験装置試作室 (大塚、柏葉、南城、阿部)

利用状況

2011 年 4 月から 2012 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 (563 件)
- 設計及び部品等の問い合わせ (外注を含む)
- 外注発注 (110 件)
- 他教室から作業依頼及び問い合わせ
主な依頼者 (五月祭、素粒子センター、地球惑星科学 並木研、日比野研、船森研、松本研、吉川研、生物科学 寺島研、化学 長谷川研、浜口研、山内研、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)

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 13 日から 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 : 28 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

8.2 安全衛生 (佐伯)

- 物理学専攻の安全衛生管理 (物理学専攻安全委員)
- 理学系研究科における産業医の巡視の同行 (衛生管理者)(4 月 ~ 9 月)
- 理学系研究科・理学部環境安全管理室室員 (4 月 ~ 9 月)
- 高圧ガス貯蔵量削減対策 WG メンバー
- 高圧ガス貯蔵庫理学部 1 号館管理者
1 号館高圧ガス貯蔵庫巡視を行った。(年 4 回)

理学系研究科・理学部 技術部の安全衛生担当者でのミーティングを立ち上げた。21 回ミーティングを開催した。

理学系研究科のガス検知器を調査し、定期点検と新規設置の取りまとめを行った。

東日本大震災後に、建物・施設の被害調査などの対応を行った。(佐伯、八幡)
1 号館・化学館合同防災訓練 (5/31) において、情報システムチームと連携してビデオ撮影を行い、またアンケートを実施した。(佐伯、八幡、南野)

8.3 IT 関連業務 (南野)

- 専攻サーバ運用管理 (ウェブ、メール、教務データベース)
ウェブサーバの仮想化等、管理体制の見直しを行った。
専攻ウェブサイトの更新
- 専攻内ネットワークシステムの運用管理
- 理学部情報システムチーム業務
新規サービスの構築・運用
講義等ビデオ撮影及び、研究者ビデオの編集
- ヘルプデスク業務
- テレビ会議システムの管理、ユーザサポート

8.4 学生実験(八幡、佐伯、南野)

- 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」を指導した。
- 物理学実験 II(佐伯)
3年生冬学期の物理学実験 II の「生物物理学」を指導した。
タンパク質の光吸収スペクトルの実験内容を一部改訂した。
- 物理学実験 II(八幡)
3年生冬学期の物理学実験 II の「相転移」を指導した。
- 物理学実験 I(南野)
3年生夏学期の物理学実験 I の「計算機実験」の技術指導をした。
実験用サーバの保守管理に携わった。
- 物理学実験 I、II のグループ編成、スケジューリング(八幡、佐伯、南野)
- 物理学実験機器更新(八幡)
「X 線回折」の安全対策に協力した。
「エレクトロニクス II」の実験機器を更新した。

8.5 各種委員会

- 技術委員会(佐伯)
- 運営委員会(佐伯)
理学系研究科・理学部 技術部の広報担当として、技術部ホームページの作成と更新を行っている。
- 1号館自衛消防検討委員(八幡)
- 理学系寒剤管理委員会(八幡)
実働担当者として液体窒素の継続供給を行っている。
新規汲み出しシステムの設計、更新を実施。

<報文>

- [1] 平成 22 年度技術報告集(東京大学大学院理学系研究科・理学部技術部、2012 年 3 月)。

<学術講演>

- [2] 八幡和志: エレクトロニクス教材の開発、第 26 回理学系研究科・理学部 技術シンポジウム(全林野協会(東京)2011 年 11 月)。
- [3] 佐伯喜美子: 安全衛生担当技術職員の共通系ミーティング、第 26 回理学系研究科・理学部 技術シンポジウム(全林野協会(東京)2011 年 11 月)。
- [4] 八幡和志: 物理学実験の要素技術としての FPGA 教材開発、日本物理学会第 67 回年次大会(関西学院大学、2012 年 3 月)。

II

Summary of group activities in 2011

1 Theoretical Nuclear Physics Group

Subjects: Structure and reactions of unstable nuclei, Monte Carlo Shell Model, Molecular Orbit Method, Mean Field Calculations, Quantum Chaos
Quark-Gluon Plasma, Lattice QCD simulations, Structure of Hadrons, Color superconductivity
Relativistic Heavy Ion Collisions, Relativistic Hydrodynamics, Color Glass Condensate

Member: Takaharu Otsuka, Tetsuo Hatsuda, Naofumi Tsunoda and Shoichi Sasaki

In the nuclear theory group, a wide variety of subjects are studied. The subjects are divided into three major categories: Nuclear Structure Physics, Quantum Hadron Physics and High Energy Hadron Physics.

Nuclear Structure Physics

In the Nuclear Structure group (T. Otsuka and N. Tsunoda), 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, (ii) shell model calculations including Monte Carlo Shell Model, (iii) collective properties and IBM, (iv) reactions between heavy nuclei, (v) other topics such as Bose-Einstein condensation, 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 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 tensor force effect has been clarified in [1, 2], while striking effect of three-body force has been shown in [3] for the first time. The structure of such unstable nuclei has been calculated by Monte Carlo Shell Model and conventional shell model with further developments, for example, a new extrapolation method [4]. Their applications have been made in collaborations with experimentalists in internationally spread, *e.g.*, [5, 6].

The mean-field based formulation of the Interacting Boson Model is a new original approach being developed, and a long-standing problem on strongly deformed nuclei has been solved [7]. This approach is so general and powerful that its applications are being spread very fast in big collaborations, for instance, the nature of triaxial deformation has been clarified [8].

We are studying on time-dependent phenomena like fusion and multi-nucleon transfer reactions in heavy-ion collisions. A new insight on the role of fast charge equilibration at the initial stage of the reaction has been presented [9].

Quantum Hadron Physics

In Quantum Hadron Physics group (T. Hatsuda and S. Sasaki), many-body problems of quarks and gluons are studied theoretically on the basis of the quantum chromodynamics (QCD). Main research interests are the quark-gluon structure of hadrons, lattice gauge theories and simulations, matter under extreme conditions, quark-gluon plasma in relativistic heavy-ion collisions, high density matter, neutron stars and quark stars, chiral symmetry in nuclei, color superconductivity, and many-body problem in cold atoms and in graphene. Highlights in research activities of this year are listed below:

1. Lattice QCD studies on H-dibaryon [10]
2. Lattice QCD studies on $Q\bar{Q}$ potential [11]
3. Chiral magnetic effect on the lattice [12]
4. U(1) gauge theory on a honeycomb lattice [13]
5. Relativistic viscous hydrodynamics [14]
6. Topological vortices in dense QCD [15]

- [1] N. Tsunoda, T. Otsuka, K. Tsukiyama and M. H. Jensen, “Renormalization persistency of the tensor force in nuclei”, *Phys. Rev. C*, **84**, 044322 (2011)
- [2] Takaharu Otsuka, Toshio Suzuki, Michio Honma, Yutaka Utsuno, Naofumi Tsunoda, Koshiro Tsukiyama, and Morten Hjorth-Jensen, “Novel Features of Nuclear Force and Shell Evolution in Exotic Nuclei”, *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 012501 (2010) (Selected for a Viewpoint in *Physics*)
- [3] T. Otsuka, T. Suzuki, J.D. Holt, *et al.*, “Three-Body Forces and the Limit of Oxygen Isotopes”, *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 032501 (2010)
- [4] N. Shimizu, Y. Utsuno, T. Mizusaki, T. Otsuka, T. Abe, M. Honma, “Novel extrapolation method in the Monte Carlo shell model”, *Phys. Rev.*, **C82**, 061305 (2010)
- [5] A. Gade, D. Bazin, B. A. Brown, C. M. Campbell, J. M. Cook, S. Ettenauer, T. Glasmacher, K. W. Kemper, S. McDaniel, A. Obertelli, T. Otsuka, A. Ratkiewicz, J. R. Terry, Y. Utsuno, and D. Weisshaar, “In-beam γ -ray spectroscopy of ^{35}Mg and ^{33}Na ”, *Phys. Rev. C* **83**, 044305 (2011).
- [6] T. Adachi, Y. Fujita, A. D. Bacher, G. P. A. Berg, T. Black, D. De Frenne, C. C. Foster, H. Fujita, K. Fujita, K. Hatanaka, M. Honma, E. Jacobs, J. Jänecke, K. Kanzaki, K. Katori, K. Nakanishi, A. Negret, T. Otsuka, L. Popescu, D. A. Roberts, Y. Sakemi, Y. Shimbara, Y. Shimizu, E. J. Stephenson, Y. Tameshige, A. Tamii, M. Uchida, H. Ueno, T. Yamanaka, M. Yosoi, and K. O. Zell, “High-resolution study of Gamow-Teller transitions via the $^{54}\text{Fe}(^3\text{He},t)^{54}\text{Co}$ reaction”, *Phys. Rev. C* **85**, 024308 (2012).
- [7] K. Nomura, T. Otsuka, N. Shimizu, and L. Guo, “Microscopic formulation of the interacting boson model for rotational nuclei”, *Phys. Rev. C* **83**, 041302(R) (2011).
- [8] K. Nomura, N. Shimizu, D. Vretener, T. Nikšić, and T. Otsuka, “Robust Regularity in γ -Soft Nuclei and its Microscopic Realization”, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 132501 (2012).
- [9] Y. Iwata, T. Otsuka, J.A. Maruhn, *et al.*, “Suppression of Charge Equilibration Leading to the Synthesis of Exotic Nuclei”, *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 252501 (2010)
- [10] T. Inoue, N. Ishii, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki [HAL QCD Collaboration], “Bound H-dibaryon in Flavor SU(3) Limit of Lattice QCD”, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 162002 (2011).
- [11] T. Kawanai and S. Sasaki, “Interquark potential with finite quark mass from lattice QCD”, *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 091601.
- [12] A. Yamamoto, “Chiral magnetic effect in lattice QCD with a chiral chemical potential”, *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 031601 (2011)
- [13] Y. Araki, “Phase structure of monolayer graphene from effective U(1) gauge theory on honeycomb lattice”, *Phys. Rev. B* **85**, 125436 (2012).
- [14] A. Monnai and T. Hirano, “Longitudinal Viscous Hydrodynamic Evolution for the Shattered Colour Glass Condensate”, *Phys. Lett. B* **703**, 583 (2011).
- [15] Y. Hirono, T. Kanazawa and M. Nitta, “Topological Interactions of Non-Abelian Vortices with Quasi-Particles in High Density QCD,” *Phys. Rev. D* **83**, 085018 (2011).

2 Theoretical Particle and High Energy Physics Group

Research Subjects: The Unification of Elementary Particles & Fundamental Interactions

Members: Takeo Moroi, Tsutomu Yanagida, Koichi Hamaguchi, Yutaka Matsuo

The main research interests at our group are in string theory, quantum field theory and unification theories. String theory, supersymmetric field theories, and conformal field theories are analyzed relating to the fundamental problems of interactions. In the field of high energy phenomenology, supersymmetric unified theories are extensively studied and cosmological problems are also investigated.

We list the main subjects of our researches below.

1. High Energy Phenomenology.
 - 1.1 LHC Phenomenology [2] [12]
 - 1.2 Collider Phenomenology [9] [10] [1] [26]
 - 1.3 Higgs boson [3] [30] [32] [27] [36]
 - 1.4 SUSY Phenomenology [31] [33] [34] [29]
 - 1.5 SUSY gauge theories [35] [37]
 - 1.6 Cosmological constraints on dark matter models with velocity-dependent annihilation cross section [13]
 - 1.7 Inflation models in supergravity [14] [18] [19] [21]
 - 1.8 Solution to the moduli problem [15] [20]
 - 1.9 Curvature perturbation from velocity modulation [16]
 - 1.10 Isocurvature perturbations in extra radiation [17]
 - 1.11 Probing the early Universe with future gravitational wave detectors [22]
 - 1.12 Wino LSP detection in the light of recent Higgs searches at the LHC [23]
 - 1.13 Boltzmann equation for non-equilibrium particles and its application to non-thermal dark matter production [11]
 - 1.14 Gravitino Problem
 - 1.15 Holographic QCD [24] [25]
 - 1.16 Quantum field theory on the lattice
2. Superstring Theory.
 - 2.1 Multiple M5 branes [6]
 - 2.2 Correspondence between supersymmetric gauge theory and gravity [7] [8]
 - 2.3 F-Theory Compactifications [4] [5]

References

- [1] M. Asano, T. Saito, T. Suehara, K. Fujii, R. S. Hundi, H. Itoh, S. Matsumoto and N. Okada *et al.*, Phys. Rev. D **84** (2011) 115003 [arXiv:1106.1932 [hep-ph]].
- [2] S. Asai, Y. Azuma, M. Endo, K. Hamaguchi and S. Iwamoto, “Stau Kinks at the LHC,” JHEP **1112** (2011) 041 [arXiv:1103.1881].
- [3] M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto and N. Yokozaki, “Higgs Mass and Muon Anomalous Magnetic Moment in Supersymmetric Models with Vector-Like Matters,” Phys. Rev. D **84** (2011) 075017 [arXiv:1108.3071].
- [4] T. Kawano, Y. Tsuchiya and T. Watari, “A Note on Kahler Potential of Charged Matter in F-Theory,” Phys. Lett. B **709**, 254 (2012) [arXiv:1112.2987 [hep-th]].
- [5] H. Hayashi, T. Kawano and T. Watari, “Constraints on GUT 7-brane Topology in F-Theory,” Phys. Lett. B **708**, 191 (2012) [arXiv:1112.2032 [hep-th]].
- [6] P. -M. Ho, K. -W. Huang and Y. Matsuo, “A Non-Abelian Self-Dual Gauge Theory in 5+1 Dimensions,” JHEP **1107**, 021 (2011) [arXiv:1104.4040 [hep-th]].
- [7] S. Kanno, Y. Matsuo and S. Shiba, “W(1+infinity) algebra as a symmetry behind AGT relation,” Phys. Rev. D **84**, 026007 (2011) [arXiv:1105.1667 [hep-th]].
- [8] H. Zhang and Y. Matsuo, “Selberg Integral and SU(N) AGT Conjecture,” JHEP **1112**, 106 (2011) [arXiv:1110.5255 [hep-th]].
- [9] S. Matsumoto and T. Moroi, “Studying Very Light Gravitino at the ILC,” Phys. Lett. B **701** (2011) 422.
- [10] M. Asano, T. Ito, S. Matsumoto and T. Moroi, “Exploring Supersymmetric Model with Very Light Gravitino at the LHC,” JHEP **1203** (2012) 011.
- [11] K. Hamaguchi, T. Moroi and K. Mukaida, JHEP **1201**, 083 (2012) [arXiv:1111.4594 [hep-ph]].
- [12] S. Asai, E. Nakamura and S. Shirai, “Discriminating Minimal SUGRA and Minimal Gauge Mediation Models at the Early LHC,” JHEP **1204** (2012) 003 [arXiv:1202.3584 [hep-ph]].
- [13] J. Hisano, M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi, K. Nakayama and T. Sekiguchi, “Cosmological constraints on dark matter models with velocity-dependent annihilation cross section,” Phys. Rev. D **83**, 123511 (2011) [arXiv:1102.4658 [hep-ph]].
- [14] M. Kawasaki, N. Kitajima and K. Nakayama, “Cosmological Aspects of Inflation in a Supersymmetric Axion Model,” Phys. Rev. D **83**, 123521 (2011) [arXiv:1104.1262 [hep-ph]].

- [15] T. Moroi and K. Nakayama, “Domain Walls and Gravitational Waves after Thermal Inflation,” *Phys. Lett. B* **703**, 160 (2011) [arXiv:1105.6216 [hep-ph]].
- [16] K. Nakayama and T. Suyama, “Curvature perturbation from velocity modulation,” *Phys. Rev. D* **84**, 063520 (2011) [arXiv:1107.3003 [astro-ph.CO]].
- [17] M. Kawasaki, K. Miyamoto, K. Nakayama and T. Sekiguchi, “Isocurvature perturbations in extra radiation,” *JCAP* **1202**, 022 (2012) [arXiv:1107.4962 [astro-ph.CO]].
- [18] K. Nakayama and F. Takahashi, “Low-scale Supersymmetry from Inflation,” *JCAP* **1110**, 033 (2011) [arXiv:1108.0070 [hep-ph]].
- [19] K. Nakayama and F. Takahashi, “Higgs mass and inflation,” *Phys. Lett. B* **707**, 142 (2012) [arXiv:1108.3762 [hep-ph]].
- [20] K. Nakayama, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “On the Adiabatic Solution to the Polonyi/Moduli Problem,” *Phys. Rev. D* **84**, 123523 (2011) [arXiv:1109.2073 [hep-ph]].
- [21] K. Kamada, K. Nakayama and J. 'i. Yokoyama, “Phase transition and monopole production in supergravity inflation,” *Phys. Rev. D* **85**, 043503 (2012) [arXiv:1110.3904 [hep-ph]].
- [22] S. Kuroyanagi, K. Nakayama and S. Saito, “Prospects for determination of thermal history after inflation with future gravitational wave detectors,” *Phys. Rev. D* **84**, 123513 (2011) [arXiv:1110.4169 [astro-ph.CO]].
- [23] T. Moroi and K. Nakayama, “Wino LSP detection in the light of recent Higgs searches at the LHC,” *Phys. Lett. B* **710**, 159 (2012) [arXiv:1112.3123 [hep-ph]].
- [24] R. Nishio and T. Watari, *Phys. Rev. D* **84**, 075025 (2011) [arXiv:1105.2999 [hep-ph]].
- [25] R. Nishio and T. Watari, *Phys. Lett. B* **707**, 362 (2012) [arXiv:1105.2907 [hep-ph]].
- [26] R. Sato, S. Shirai and K. Yonekura, *Phys. Lett. B* **700**, 122 (2011) [arXiv:1104.2014 [hep-ph]].
- [27] R. Sato, S. Shirai and T. T. Yanagida, *Phys. Lett. B* **704**, 490 (2011) [arXiv:1105.0399 [hep-ph]].
- [28] M. Asano, T. Moroi, R. Sato and T. T. Yanagida, *Phys. Lett. B* **705**, 337 (2011) [arXiv:1108.2402 [hep-ph]].
- [29] M. Asano, T. Moroi, R. Sato and T. T. Yanagida, *Phys. Lett. B* **708**, 107 (2012) [arXiv:1111.3506 [hep-ph]].
- [30] T. Moroi, R. Sato and T. T. Yanagida, *Phys. Lett. B* **709**, 218 (2012) [arXiv:1112.3142 [hep-ph]].
- [31] T. Moroi and N. Yokozaki, *Phys. Lett. B* **701**, 568 (2011) [arXiv:1105.3294 [hep-ph]].
- [32] M. Asano, T. Moroi and N. Yokozaki, *Phys. Lett. B* **708**, 280 (2012) [arXiv:1107.4523 [hep-ph]].
- [33] K. Hamaguchi, K. Nakayama and N. Yokozaki, *Phys. Lett. B* **708**, 100 (2012) [arXiv:1107.4760 [hep-ph]].
- [34] K. Ishiwata, N. Nagata and N. Yokozaki, *Phys. Lett. B* **710**, 145 (2012) [arXiv:1112.1944 [hep-ph]].
- [35] Y. Tachikawa and K. Yonekura, “N=1 curves for trifundamentals,” *JHEP* **1107**, 025 (2011) [arXiv:1105.3215 [hep-th]].
- [36] K. Nakayama, N. Yokozaki and K. Yonekura, “Relaxing the Higgs mass bound in singlet extensions of the MSSM,” *JHEP* **1111**, 021 (2011) [arXiv:1108.4338 [hep-ph]].
- [37] K. Yonekura, “On the Trace Anomaly and the Anomaly Puzzle in N=1 Pure Yang-Mills,” *JHEP* **1203**, 029 (2012) [arXiv:1202.1514 [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

$\bar{p}$ -nucleus annihilation cross section at ultra-low energies At high energies, it is known that the $\bar{p}$ -nucleus annihilation cross sections scale as $\sigma_{\text{ann}} \propto A^{2/3}$ where A is the nuclear mass number. However, at very low energies, this scaling is expected to be violated, but no such measurements have been done due to the lack of ultra-low-energy antiproton beams. Using a radio-frequency quadrupole decelerator

(“inverse” linac), we have started the σ_{ann} measurements at 130 keV. In 2011, we developed and tested a beam chopper and detectors which consist of MPPC, plastic scintillator, and WLS fiber. We are now developing an electrostatic quadrupole triplet and the read-out electronics of the detectors. We will carry the measurement of the $\bar{p}$ -nucleus annihilation cross sections in 2012.

2) Laser spectroscopy of radioactive francium isotopes at the ISOLDE facility at CERN

Laser spectroscopy is a crucial tool for studying properties of nuclear ground states. At the ISOLDE facility at CERN, the new CRIS collaboration of Manchester, Leuven, Birmingham, Orsay, Max Planck Institute of Quantum Optics, and Tokyo has proposed to measure the isotope shifts and hyperfine structures of francium isotopes by collinear resonant ionization spectroscopy (CRIS). The CRIS method may provide evidence of the anomalous structure in neutron deficient francium isotopes.

In 2011, we succeeded in measuring one francium isotope with a relatively high yield. We used a nanosecond titanium-sapphire laser developed by the ASACUSA experiment at CERN. This laser was operated with a high output power of $\sim$ kW and a narrow linewidth of 100 MHz. In 2012, we plan to measure neutron deficient isotopes with relatively low yields.

3) Precision X-ray spectroscopy of kaonic atoms

The X-ray spectroscopy of kaonic atoms is a complementary tool to study kaon-nucleon/nucleus interaction. The advent of a new type of high-resolution x-ray detector, SDD, its combination with high-intensity beamline provides clean kaon beam and various trackers/counters technique, enables us to study kaonic atoms with unprecedented precision.

X-ray spectroscopy of kaonic atoms at DAΦNE In fiscal year 2011, we analyzed the data of hydrogen target and deuterium target measurements carried out during the beam time of SIDDHARTA experiment in the fiscal year 2009. From the first time ever deuterium target measurement of kaonic atom, we did not find distinguishable kaonic deuterium X-ray events from the spectrum. However, since the two measurements share the same kaon-origin X-ray background including kaonic oxygen and kaonic nitrogen X-rays produced by the kaons stopped inside the target cell, a simultaneous analysis of the spectra reduced both the statistic and the systematic errors in the shift and width of kaonic hydrogen $1s$ state. The new result achieved the best precision up to date, providing crucial constraints to the theoretical study of $\bar{K} - p$ interaction close to the production threshold of the system. ”

X-ray spectroscopy of kaonic helium The J-PARC E17, which is to be carried out at K1.8BR beamline in the J-PARC hadron experimental facility, will measure x-rays from kaonic helium 3 and kaonic helium 4 to determine the strong interaction shifts in their $2p$ level. They would impose strong constraint on $\bar{K}$ -nucleus interaction. In addition, we are proposing to measure the $2p$ width in kaonic helium 3 by using a method similar to the x-ray absorption spectroscopy. In fiscal year 2011, we started with the recovery works from the earthquake. SDDs and a liquid helium 3 target system were found to be not damaged. Damaged beam line chambers were fixed or replaced with new ones. Then, in February 2012, we successfully confirmed that the -0.9 GeV/c kaon beam was just as before the earthquake.

4) Study of antikaonic nuclei

Search for $\bar{K}NN$ deeply-bound antikaonic states at J-PARC The J-PARC E15 adopts ${}^3\text{He}(K^-, N)$ reaction to search for $\bar{K}NN$. E15 is a kinematically complete experiment in which all reaction products are detected exclusively for $K^-pp \rightarrow \Lambda p$ decay mode, and it aims to provide decisive information on the nature of the simplest antikaonic nucleus. Within the fiscal year 2011, J-PARC Main Ring was recovered from the earthquake to provide the slow-extracted beam, and the beam was actively used to tune the K1.8BR beamline to optimize for 1.0 GeV/c K^- . The simultaneous working of the beamline and central devices as well as the ${}^3\text{He}$ target system were also confirmed with the extracted

K^- beam, and we are now almost ready for the physics run planned within fiscal year 2012.

5) Precision spectroscopy of pionic atoms

Pionic atoms with ($d, {}^3\text{He}$) reaction We are planning a precise pionic-atom spectroscopy experiment with BigRIPS at RIBF, RIKEN. The goal is to study $1s$ and $2s$ pionic states in ${}^{121}\text{Sn}$ by the ${}^{122}\text{Sn}(d, {}^3\text{He})$ reaction. The measurement will help us better understand the strong interaction between the pion and the nucleus, which leads to quantitative evaluation of the magnitude of the quark condensate at the normal nuclear density. In 2011 we analyzed the result of a pilot experiment performed in 2010. From the analysis in 2010 we confirmed that all detectors worked correctly and ${}^3\text{He}$ could be identified and tracked in 1,000-times larger number of background particles at a focal plane. In 2011, we transformed these data to a position spectrum of ${}^3\text{He}$ at the focal plane, applying a modification from the ion transfer system of RIBF. As a result, we succeeded the first measurement of ${}^{121}\text{Sn}$ pionic atom in the world. It was also the first measurement of pionic atom in the experiment at RIBF. In addition, thanks for the large angular acceptance of RIBF we also succeeded the first measurement of the angular dependence of the ($d, {}^3\text{He}$) reaction cross section. Now further analysis to reconstruct Q-value spectrum and preparation for the next experiment, which aims more precise and systematic study, are on going.

Pionic atoms via inverse kinematics Previous pionic atom spectroscopy experiments with stable nuclear targets could derive chiral condensate only around $0.6 \rho_0$ (ρ_0 : normal nuclear density). In order to study chiral condensate at different densities, we consider the possibility of pionic atom spectroscopy with neutron rich nuclei. Then, inverse kinematics is very useful method for producing pionic atoms with neutron rich nuclei.

We plan to conduct pionic atom spectroscopy in $d(\text{HI}, {}^3\text{He})$ reaction by using a TPC (Time Projection Chamber) filled by D_2 gas which is also an active target, and stacked silicon detectors as a full energy detector. We finished the estimation of required detector performance and plan to perform a test experiment of stacked silicon detectors.

6) Study of η' mesic nuclei

η' meson has specially-large mass of $958 \text{ MeV}/c^2$. This mass is thought to be caused by $U_A(1)$ anomaly, through which η' meson interacts with quark-antiquark condensate(chiral condensate) in vacuum. In nuclear medium, where chiral condensate decreases, reduction of the η' mass is expected, and existence of η' mesic nuclei is predicted. In order to study the origin of the η' mass, we are planning an experiment to search and spectroscopy the η' mesic nuclei.

This experiment will be performed at GSI laboratory in Germany. We will create η' mesons in carbon nuclei by (p, d) reaction. Then energy of η' mesic nuclei will be derived by measuring momentum of outgoing deuterons with a magnetic spectrometer. In 2011, we developed an aerogel Cherenkov detector which is necessary for background rejection. In 2012, we will test the Cherenkov detector, and perform a pilot experiment with the whole setup at GSI.

7) Study of muonium production targets

Ultra-slow polarized muon beam with the energy of $0.5\sim 30 \text{ keV}$ is anticipated as a new “microscope for magnetism” for the investigation of the surface magnetism. The ultra slow muon beamline was established in the RIKEN RAL muon facility. In this site, $15\sim 20/\text{s}$ ultra-slow muons can be generated while initial muon beam intensity reaches to $1.3 \times 10^6 /\text{s}$. In order to increase the intensity of the ultra-slow muons, improvements of the escaping efficiency of the muoniums from the degrader, muonium formation target (3 %), and laser ionization ($\sim 10^{-5}$) are needed. We have searched a muonium production target by using μSR method, and found that the silica aerogel has muonium production efficiency comparable to silica powder (Cab-O-Sil EH-5) which had been known as a best muonium production target. In this year, we measured time evolution of muonium distribution on the target inside, by using MWDC as the decay positron and electron tracker. Analysis is in progress.

4 Sakurai Group

Research Subjects: Nuclear structure and dynamics of exotic nuclei, Origin of elements in universe, Equation-of-state in asymmetric nuclear matter, Nuclear reactions with exotic nuclei

Member: Hiroyoshi Sakurai, Kentaro Yako

Exotic nuclei located far from the stability line are new objectives for nuclear many-body problems. This laboratory 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 the RI Beam Factory (RIBF), RIKEN. The RIBF is a world-top leading facility where RI beam intensities are the highest in the world. This laboratory maximizes RIBF utilization to access nuclei very far from the 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 this laboratory are ;

- **Shell evolution and collective dynamics of exotic nuclei**

This laboratory is aiming to discover sudden changes of nuclear properties stemming from shell evolution, and to search for exotic collective motions.

- **Explosive processes in nucleosynthesis in universe such as the r-process path**

We measure nuclear properties of neutron-rich nuclei to discuss possible locations of the r-process path as well as the astrophysical site.

- **Equation-of-state in asymmetric nuclear matter**

We are willing to investigate dynamics of nucleons and their correlations in a dilute nuclear-system as well as in heavy-ion collisions.

- **Development of a new research domain of RI beam reactions**

Toward the island-of-stability, we are aiming to develop a new field of reactions with radioactive isotope beams.

Research activities in the fiscal-year 2011 are summarized as follows;

1. discovery of deformed magic number $N=64$ in the Zr isotopes
2. preparation of EURICA system for decay spectroscopy in 2012-2013
3. tentative assignment of the second 2^+ state in ^{110}Mo and its possible asymmetric collective motion
4. successful identification of the second excited state in ^{42}Si and finding of collective enhancement in spite of magic number of $N=28$
5. development of LaBr_3 detectors as a new generation gamma detector
6. study of $^{12}\text{Be}(p, n)$ reaction via development of missing mass technique with the WINDS system

5 Komamiya group

Research Subjects: (1) Preparation for an accelerator and an experiment for the International linear e^+e^- collider ILC; (2) Higgs boson and supersymmetric particle searches with the ATLAS detector at the LHC pp collider; (3) Experiment for studying gravitational quantum effects and searching for new medium range force using ultra-cold neutron beam; (4) Data analyses for the BES-II experiment at BEPC, Beijing.

Member: Sachio Komamiya, Yoshio Kamiya

We, particle physicists, are entering an exciting period in which new paradigm of the field will be opened at the TeV energy scale by new discoveries expected in experiments at high-energy frontier colliders, LHC and 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. It was internationally agreed upon to use for the main linac technology superconducting accelerator structures. In 2007 March, the Reference Design Report was issued by the Global Design Effort (GDE) and hence the project has been accelerated as an international big-science project. The technical design will be completed by the end of 2012. We are working on ILC accelerator related hardware development, especially on the final focus system. We are developing the Shintake beam size monitor at the ATF2, which is a test accelerator for ILC located at KEK. The Shintake beam size monitor is able to measure $O(10)[\text{nm}]$ (electron vertical) beam sizes, by using a high power laser interferometer. The electron beam is emitted to the interference fringe of the split laser beams. The total energy of photons, which are emitted from the inverse Compton scattering of beam electrons with the laser beam interference fringe, is measured by a multilayer CsI(Tl) detector in downstream section of the beamline. As the phase of the fringe is scanned step by step, the total photon energy is measured at each step, and the beam size is extracted from a fitting of modulation pattern of the total photon energy as a function of the phase. Additionally, we have been studying possible physics scenario and the large detector concept (ILD) for an experiment at ILC.

2) Experiment for studying quantum bound states due to the earth's gravitational potential to study the equivalent theorem at the quantum level and searching for new short-range force using an ultra-cold neutron beam: A detector to measure gravitational bound states of ultra-cold neutrons has been developed. We decided to use CCDs for the position measurement of the UCNs. The CCD is going to be covered by a ^{10}B layer to convert neutron to charged nuclear fragments. The UCNs traverse a neutron guide of $100[\mu]$ height and their density is modulated in height as forming bound states within the guide due to the earth's gravity. In 2008 we tested our neutron detector at ILL Grenoble. In 2009 we started the test experiment at ILL. We improved our detector and performed the experiment in 2011, and have been analyzing the data. acquired above

3) ATLAS experiment at LHC: The epoch of new paradigm for particle physics is going to open with the experiments at LHC. The high energy collision at 7 TeV (center-of-mass energy) commenced by the end of March 2010. The ATLAS detector is continuously recording data at high energies. Our students have been working on data analysis at LHC on search for Higgs boson in the very important decay mode of $H \rightarrow \gamma\gamma$ and supersymmetric partners of third generation quarks with the missing transverse energy and with b-quark signal. These results are presented at conferences and published in journals.

4) BES-II/-III experiment at IHEP: The group has considered the BES-III experiment at the Beijing e^+e^- collider BEPC-II as the candidate for the middle term project before ILC. We have conducted research and development for TOF detector for the BES-III experiment together with IHEP, USTC. We successfully completed a test of over 500 photomultipliers in 1[T] magnetic field and they are already installed to the BES-II detector. We have studied the data analysis of Λ baryon-pair production in $J\psi$ decay to determine structure functions and to search for CP violation effects. Currently BEPC-II is operating smoothly and BES-III detector is taking large samples of ψ' and J/ψ data.

6 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.

We started a new R and D study of a compact mobile anti-electron neutrino detector with plastic scintillators to be used at a nuclear reactor station, for the purpose of monitoring the power and plutonium content of the nuclear fuel. It can be used to monitor a reactor from outside of the reactor containment

with no disruption of day-to-day operations at the reactor site. This unique capability may be of interest for the reactor safeguard program of the International Atomic Energy Agency(IAEA).

We propose a segmented antineutrino detector made of plastic scintillators called PANDA, Plastic Anti-Neutrino Detector Array. A small prototype was built and deployed for two months at Ohi Power Station in Fukui, Japan. A satisfactory unmanned field operation of the detector system was demonstrated there. The prototype detector consists of a 360-kg plastic scintillator array into which gadolinium-containing sheets are introduced. It is installed on a van, transported to the site, and held in the van outside of the reactor building during the measurement. We observed a difference in neutrino-like event rate before and after the shutdown of the reactor although cosmic-ray induced background events are predominant because of aboveground operation and small detector size. This is the world's first result to detect reactor anti-neutrinos with an aboveground detector.

We are running an experiment to search for axions, light neutral pseudoscalar particles yet to be discovered. Its existence is implied to solve the so-called strong CP problem. The axion would be produced in the solar core through the Primakoff effect. It can be converted back to an x-ray in a strong magnetic field in the laboratory by the inverse process. We search for such x-rays coming from the direction of the sun with the TOKYO AXION HELIOSCOPE, aka Sumico. We planned to continue the measurement in which we scan the mass region from 1 eV upward.

An experiment is being performed for a search for hidden sector photons kinetically mixing with the ordinary photons. The existence of the hidden sector photons and other hidden sector particles is predicted by extensions of the Standard Model, notably the ones based on string theory. The hidden sector photon is expected to come from the direction of the sun. It would be produced in the solar core or in the space by oscillation of the ordinary photon, and can transmute into the photon again in a long vacuum chamber in the laboratory. A photon sensor in the chamber would readily detects the ordinary photon. The detector is piggybacked onto the Sumico helioscope. We let the detector track the sun to search for the hidden sector photons coming from the sun and found no significant signal for the hidden sector photon. We put upper limits to the mixing angle χ of the normal photon and the hidden sector photon in the unexplored parameter region around the hidden sector photon mass region around a few millielectron volts. This is the world's first solar hidden sector photon search experiment with a dedicated solar hidden sector photon telescope.

We developed a low-cost gamma ray spectrometer for radioactivity inspection of foods aiming at personal use at home. It consists of a $25\text{mm}\phi \times 25\text{mm}$ CsI(Tl) scintillator and a PIN photodiode. It has cost-effective performance and can discriminate between 662keV and 796keV photoelectric peaks of ^{137}Cs and ^{134}Cs , respectively. We hope it helps the individual people suffering from radioactive fallout of Fukushima Daiichi nuclear power plant caused by the tsunami of the Great East Japan Earthquake.

7 Aihara/Yokoyama Group

Research Subjects: Study of CP -Violation and Search for Physics Beyond the Standard Model in the B Meson and the τ Lepton Systems (Belle & Belle II), Dark Energy Survey at Subaru Telescope (Hyper Suprime-cam), Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment (T2K), R&D for the Next Generation Neutrino and Nucleon Decay Experiment (Hyper-Kamiokande), Measurement of Neutrino-nucleus Interactions (SciBooNE), and R&D for Hybrid Photodetectors.

Members: H. Aihara, M. Yokoyama, and Y. Onuki

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.

The SuperKEKB project started in 2010. The upgraded accelerator, Super KEKB, 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. This year our group started to take responsibility to construct Belle II SVD. The R&D for the upgrade of the Belle II electromagnetic calorimeter was also carried out.

As an observational cosmology project, we are involved in building a 1.2 Giga pixel CCD camera (Hyper Suprime-Cam) to be 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, the camera was assembled and transported to Subaru telescope site at Hawaii.

The T2K long baseline neutrino oscillation experiment started in April 2009. We have searched for $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscillation using data collected from January 2010 to March 2011, and reported the first indication of ν_e appearance from ν_μ beam. The experiment recovered the damage from the earthquake in March 2011, and resumed data taking in March 2012. With more data, we expect to continue leading the study of neutrino oscillation.

In order to pursue the study of properties of neutrino beyond T2K, we have been designing the next generation water Cherenkov detector, Hyper-Kamiokande (HK). One of the main goals of HK is the search for CP violation in leptonic sector using accelerator neutrino and anti-neutrino beams. The sensitivity to CP violating phase is studied with full simulation by our group. It is shown that with HK and J-PARC accelerator, CP violation can be observed after five years of experiment for a large part of possible parameter space. We have published a document summarizing the baseline design and physics capabilities of Hyper-Kamiokande.

We have been developing hybrid photodetector (HPD) combining a large-format phototube technology and avalanche diode as photo-electron multiplier. This year, we have developed 8-inch HPD with all glass design, together with a compact high voltage supply and readout electronics. This device can be deployed for large water Cherenkov detectors, envisioned as the next generation proton-decay/neutrino detectors.

In order to reduce the uncertainty in the neutrino oscillation measurements, we have been analyzing data from SciBooNE, an experiment performed at Fermilab to study neutrino-nucleus interaction. We have also searched for neutrino oscillation together with MiniBooNE collaboration.

1. K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], “Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-produced Off-axis Muon Neutrino Beam,” *Phys. Rev. Lett.* **107**, 041801 (2011) [arXiv:1106.2822 [hep-ex]].
2. K. Abe, T. Abe, H. Aihara, Y. Fukuda, Y. Hayato, K. Huang, A. K. Ichikawa and M. Ikeda *et al.*, “Letter of Intent: The Hyper-Kamiokande Experiment — Detector Design and Physics Potential —,” arXiv:1109.3262 [hep-ex].
3. Hiroaki Aihara, “Hybrid Avalanche Photodiode Array Imaging,” in *Single-Photon Imaging*, Edited by Peter Seitz and Albert J. P. Theuvsen, Springer Series in Optical Sciences (2011).

8 Asai group

Research Subjects: (1) Particle Physics with the energy frontier accelerators (LHC) (2) Physics analysis in the ATLAS experiment at the LHC: (Higgs, SUSY and Extra-dimension) (3) Particles Physics without accelerator (4) Positronium and QED

Member: S.Asai

- (1) LHC (Large Hadron Collider) has the excellent physics potential. Our group is contributing to the ATLAS group in the Physics analyses: focusing especially on three major topics, the Higgs boson, Supersymmetry and Extra-dimension.
 - Higgs: Both the ATLAS and CMS detectors record the data more than 5 fb⁻¹ in 2011. The tantalizing hint of Higgs boson is found at M=124-126GeV. This is not yet enough statistically, but the various analyses and both detectors point the same mass region.

- SUSY: We have excluded the light SUSY particles (gluino/squark) whose masses are lighter than 1.4TeV.
- Extra-dimension If the extra-dimension is compactified at a few TeV scale, Mini-black hole and KK excitation are interesting signals. We search for these topologies and we have set the limit of about 2-4TeV for the planck scale.
- (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

9 Aoki Group

Subject: Theoretical condensed-matter physics

Members: Hideo Aoki, Takashi Oka

Our main interests are many-body and topological effects in electron systems, i.e., **superconductivity, magnetism and topological phenomena**, for which we envisage a **materials design for correlated electron systems** and novel **non-equilibrium** phenomena should be realised. Studies in the 2011 academic year include:

- Superconductivity
 - Superconductivity induced in non-equilibrium: Dynamical repulsion-attraction conversion in intense ac fields [1]
 - High-Tc cuprates: material- and pressure-dependence [2]
 - Superconductivity in solids of aromatic molecules [3]
 - Collective modes in multi-band superconductors
- Magnetism
 - Ferromagnetism in cold atoms and spin Hall effect
- Topological systems: Quantum Hall systems and graphene
 - Graphene QHE and generalised chiral symmetry[4]
 - Optica (THz) Hall effect in graphene[5]
 - Photovoltaic Hall effect in graphene [6]
 - Fractional quantum Hall effect in oxides [7]
- Non-equilibrium and nonlinear phenomena in correlated electron systems
 - Non-linear transport in the dielectrically broken Mott insulators
 - Thermalisation treated with AdS/CFT [8]

[1] N. Tsuji, T. Oka, P. Werner and H. Aoki: Changing the interaction of lattice fermions dynamically from repulsive to attractive in ac fields, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 236401 (2011) (Editors' Suggestion; Viewpoint); N. Tsuji, T. Oka, H. Aoki and P. Werner: Repulsion-to-attraction transition in correlated electron systems triggered by a mono-cycle pulse, *Phys. Rev. B* **85**, 155124 (2012).

[2] H. Sakakibara, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki: Origin of the material dependence of T_C in the single-layered cuprates, *Phys. Rev. B* **85**, 064501 (2012) (Editor's Suggestion).

[3] T. Kosugi, T. Miyake, S. Ishibashi, R. Arita and H. Aoki: First-principles structural optimization and electronic structure of picene superconductor for various potassium-doping levels, *Phys. Rev. B* **84**, 214506

(2011); Electronic structure of solid coronene — differences and commonalities to picene, *Phys. Rev. B* **84**, 020507(R) (2011) (Editors' Suggestion).

[4] T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai, T. Morimoto and H. Aoki: Generalized chiral symmetry and stability of zero modes for tilted Dirac cones, *Phys. Rev. B* **83**, 153414 (2011); Topologically protected Landau levels in bilayer graphene in finite electric fields, *Phys. Rev. B* **85**, 165410 (2012).

[5] T. Morimoto and H. Aoki: Two parameter flow of $\sigma_{xx}(\omega) - \sigma_{xy}(\omega)$ for the graphene quantum Hall system in ac regime, *Phys. Rev. B* **85**, 165445 (2012).

[6] T. Kitagawa, T. Oka, A. Brataas, L. Fu and E. Demler: Transport properties of non-equilibrium systems under the application of light — Photo-induced quantum Hall insulators without Landau levels, *Phys. Rev. B* **84**, 235108 (2011).

[7] D. Maryenko, J. Falson, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Onoda, H. Aoki and M. Kawasaki: Temperature dependent magnetotransport around $\nu=1/2$ in ZnO heterostructures, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 186803 (2012).

[8] K. Hashimoto, N. Iizuka, and T. Oka: Rapid thermalization by baryon injection in gauge/gravity duality, *Phys. Rev. D* **84**, 066005 (2011).

10 Miyashita Group

Research Subjects: Statistical Mechanics, Phase Transitions, Quantum Spin systems,
Quantum Dynamics, Non-equilibrium Phenomena

Member: Seiji Miyashita and Takashi Mori

10.1 Cooperative Phenomena and Phase Transition

Study on phase transitions and critical phenomena is one of main subjects of the statistical mechanics. We have studied various types of ordering phenomena in systems with large fluctuation. In the last year, we studied the following topics of phase transitions.

Phase transitions of long-range interacting systems

Systems with bistable local electric states, such as the spin-crossover, Jahn-Teller system, and martensite systems, have been attracted 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 have proposed a general structure of the ordered states including metastable state, where we find various new types of phase transitions. We also pointed out that difference of local structures of the lattice of the states causes a new aspect of the ordering phenomena. In the spin-crossover systems, the size of molecules in the high spin (HS) and low spin (LS) are different and the lattice distorts in the mixture of the both spin states. This lattice distortion causes an effective long range interaction among spin states, and realizes a phase transition of the mean-field universality class. The long range interaction prefers a uniform configuration and thus the systems keeps homogeneous configuration even near the critical temperature. However, when the systems change between the two states in open boundary condition, the systems show inhomogeneous structures. In a rectangle lattice, the changes start from the corners, but the domains which appear in the process are macroscopic. That is, the configurations are the same if we scale the sizes. We also studied the switch in a circular system which has no corner. In this system, a kind of nucleation occurs from the surface. Here we again find that shapes of the critical nuclei and also the following clusters growth are geometrically similar in systems of different sizes. This feature is qualitatively different from that of short-range interaction systems, in which the critical droplet has a specific size independently of the system size.[6]

We have also studied shape and dynamics of the domain wall. In the short-range model, the width of the domain wall is proportional to the square of the system size L . However, in the long-range model, it is found to be proportional to the system size L , and thus again the shapes are geometrically similar in

systems of different sizes. In Fig. 3.2.2, we show the configurations of the domain walls of different sizes.[21]

In the long-range model, configurations with large clusters are suppressed. However, if the short-range interaction is included, it causes a short range correlation. Thus the system shows a finite correlation length at the critical point. We studied a scaling relation of the shift of the critical point from the pure short range model as a function of the strength of the long-range interaction. We also studied a scaling relation of the correlation length at the critical point. We first study these properties in an Ising model of mixture of the nearest-neighbor interaction and infinite range interaction in a fixed lattice.[3] Then we found that the scaling relations work in the elastic model, too.[8]

Ordered states of long-range interacting system

We also studied in which condition systems with long range interaction are described by the mean-field theory. It is expected that in the cases where the interaction is non-additive, where the extensivity is not satisfied and the so-called Kac procedure is necessary, the thermal properties are described by the mean-field theory if the order parameter is not conserved. We investigate the condition in detail, and confirmed this property. Moreover, we found that even in this case, the properties in a fixed value of order parameter cannot be described by the mean-field theory in some parameter region. This indicates that the uniform configuration of the mean-field theory becomes unstable in such parameter region. We are studying the properties of such states. [11, 31, 51]

Phase transitions of the mixed phases

We have pointed out that the partially-disordered phase of the antiferromagnetic Ising model in the triangular lattice is a kind of mixed phase of a generalized six-states clock model. The mixed state is an equilibrium phase in which two of the six states are chosen to appear. We have studied general structure of the mixed states as a function of energy structure of the interaction. We have demonstrated a mixed phase with more than two states, and also successive phase transitions with different types of mixing. In Fig. 3.2.3, we show a temperature dependence of populations of the states. There we find a disordered phase at high temperature where all the six states have the same population, and then a phase of a 3-phase-mixing phase and then 2-state-mixing phase and finally a ferromagnetic phase (single state) as the temperature decreases.[20]

Stochastic process

Generalization of many particle Brownian motion has been proposed by using a differential-difference operator so-called Dunkl operator. Processes given by the operator are called Dunkl processes and have been studied in the field of mathematics. We have studied explicit expression of the effect of the intertwining operator. The processes are deeply related to the Dyson's Brownian motion, and we have studied relations of them to physical processes.[36, 42, 52]

10.2 Quantum Statistical Mechanics

Cooperative phenomena in quantum systems are also important subject in our group. In quantum systems, they show interesting non-classical behavior both in static and dynamical properties. In the last year, we studied the following topics.

Quantum phases

We studied ground and low temperature properties of antiferromagnetic Heisenberg model on the Kagome lattice. We investigated effects of types of Dzyaloshinskii-Moriya Interactions and also effects of distributions of the spin length(i.e., $S = 1/2$ and 1).[5]

We also propose an itinerant electrons model (Hubbard model) in which the total spin is controlled by the chemical potential, and proposed new types of molecular magnets[2]

Quantum response

We also studied the dynamical properties and also response where various interesting processes appear.[2] Coherent dynamics of quantum systems exhibits various nonclassical natures and the manipulation of such processes gives important basis of quantum information processing. We have developed formulations of the quantum master equation to describe quantum response in dissipative environments.

In the last year, we studied hybridization of a system with discrete energy structure (spins or atoms) in the cavity and the cavity photon. We studied how the nature of the system changes with the number of spins and also as a function of the strength of driving force (intensity of input field). We clarified how the system move from the weakly excited region where we observe the vacuum-field Rabi splitting to the strongly excited region where we observe the Rabi oscillation in the classical electromagnetic field.[10] We show the dependence of Rabi oscillation on the number of photons in the cavity in Fig. 3.2.4.

We provide numerical tool for super-computer to calculate the dynamics of quantum master equation (Portal site for Application Software Library: quantum-dynamics-simulator)[56].

We also developed a new master equation to study the cases with strong interaction between spins and photons, where interesting cooperativity appear. When the interaction becomes strong, the ground state of the system exhibits a phase transition and photon and polarization appear spontaneously which is called Dicke transition. Beside this transition, it is known that the system exhibits a nonequilibrium phase transition under driving force, which is called optical bistability. There, due to a change of balance between driving force and dissipation, a discontinuous changes of quantities in the stationary state take place. We studied the synergetic effects of the both phase transition, and obtained phase diagram as a function of the interaction between spin and photon and the strength of the driving force. In order to study dissipative phenomenon in strongly interacting system, we need to extend the master equation from the simple Lindblad form to ones in which effects of interaction are taken into account in dissipative mechanism. We built up such equation of motion and obtained the phase diagram for the Tavis-Cummings model and also for Dicke mode. [37, 43]

Dissipation of the Rabi oscillation

The Rabi oscillation has been measured as a prove of quantum coherence of spins (or any discrete energy level system). We have studied mechanism of decoherence due to the randomness of the parameters for each spin such as distribution of magnetic anisotropy and strength of the magnetic field, and also due to the dipolar-dipolar interaction by using large scale computation. [7]

We also propose an experiment to check the picture of wavefunction collapse in individual events in quantum mechanics. [8]

Quantum inverse scattering method for higher spin systems

As a study on the exact solvable models, we studied the exact property of spin chain by making use of algebraic Bethe ansatz. In particular, we investigated properties of boundary states of $S = 1$ spin chain, and studied effects of boundary condition on the ground state in quantum integrable systems. We also clarified the relation between nonlinear equation and the supersymmetric sine-Gordon model. [19]

Quantum transport phenomena

Classification of fluctuations in nonequilibrium statistical mechanics has been developed extensively. The so-called fluctuation theorem is one of the typical example. We have studied to verify the fluctuation theorem in quantum transport phenomena.[12] Moreover, the so-called additivity principle is also important property and we have extend the idea.[15] We also studied exact properties of the stationary nonequilibrium states in heat conducting quantum systems.[14, 16] We also studied general properties of

the thermodynamical efficiency in micro systems. [13, 17]

11 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, magnetic systems, low-dimensional electron systems, organic conductors, unconventional superconductivity, and Dirac electron systems in solids. The followings are the current topics in our group.

- High- T_c superconductivity
Mott metal-insulator transition and superconductivity.[6]
Theory on multi-layer cuprate superconductors.
- New superconductor: Iron-pnictide
Effects of nonmagnetic impurities in iron-pnictide superconductors.[11]
Quasi-particle interference patterns in d-wave superconductors.
Orbital-selective superconductivity and the effect of lattice distortion.[9]
- Organic conductors [7]
Modeling and magnetism in one-dimensional Fe-phthalocyanine compounds.[8]
Antiferromagnetic interaction between LUMO electrons in $(C_6H_6)^{2-}$.
Novel spin-liquid states in an anisotropic-triangular spin-system.
- Theories of anisotropic superconductivity
Spatial patterns of the two-dimensional FFLO superconductivity near zero temperature.
- Dirac electron systems in solids [4]
Spin-polarized currents in Dirac fermion systems.[5]
Spin Hall effects in Bi.
Electronic states in a new Dirac system: Ca_3PbO . [2,3]
Twin Dirac points realized in a antiperovskite material.
- Theories on heavy fermion systems and Kondo effect
Charge Kondo effect due to pair-hopping mechanism.
Heavy fermion behavior due to orbital degrees of freedom in transition metal compounds.
Microscopic theory on defect-induced Kondo effects in graphen.[10]

- [1] M. Ogata: Physica C online. “Stripe states in t - t' - J model from a variational viewpoint”
- [2] T. Kariyado and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 083704-1-4 (2011). “Three-Dimensional Dirac Electrons at the Fermi Energy in Cubic Inverse Perovskites: Ca_3PbO and Its Family”
- [3] T. Kariyado and M. Ogata: to appear in J. Phys. Soc. Jpn. “Low-Energy Effective Hamiltonian and the Surface States of Ca_3PbO ”
- [4] H. Fukuyama, Y. Fuseya, M. Ogata, A. Kobayashi, and Y. Suzumura: Physica B **407**, 1943-1947 (2012). “Dirac electrons in solids”
- [5] Y. Fuseya, M. Ogata and H. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 013704-1-4 (2012).
- [6] H. Yokoyama, T. Miyagawa, M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 084607-1-16 (2011).
- [7] A. Ardavan, S. Brown, S. Kagoshima, K. Kanoda, K. Kuroki, H. Mori, M. Ogata, S. Uji, and J. Wosnitza: J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 011004-1-27 (2012). “Recent Topics of Organic Superconductors”
- [8] H. Matsuura, M. Ogata, K. Miyake, and H. Fukuyama: submitted to J. Phys. Soc. Jpn. “Theory of Mechanism of π -d interaction in Iron-Phthalocyanine ”
- [9] N. Arakawa and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 0747041-1-11 (2011).

- [10] T. Kanao, H. Matsuura, and M. Ogata: to appear in J. Phys. Soc. Jpn. “Theory of Defect-induced Kondo Effect in Graphene: Numerical Renormalization Group Study”
- [11] H. Yang, Z. Wang, D. Fang, T. Kariyado, G. Chen, M. Ogata, T. Das, A. V. Balatsky, and Hai-Hu Wen: arXiv:1203.3123. “Unexpected weak spatial variation of local density of states induced by individual Co impurity atoms in $\text{Na}(\text{Fe}_{0.95}\text{Co}_{0.05})\text{As}$ as revealed by scanning tunneling spectroscopy”

12 Tsuneyuki Group

Research Subjects: Theoretical Condensed-matter physics

Member: Shinji Tsuneyuki and Yoshihiro Gohda

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.

For example, the transcorrelated (TC) method is a wavefunction-based approach to correlated electrons in solids, which we are trying to establish for an alternative of the density functional theory for years. In FY2011, we have developed a new method of optimizing so-called Jastrow function in the correlated wavefunction in the TC method.

We also developed a first-principles modeling method of the anharmonic lattice vibration in solids. After first-principles MD simulations, we systematically obtain parameters of an anharmonic potential model, with which thermal properties like thermal conductivity or thermal expansion are calculated with classical molecular dynamics.

In summary, our research subjects in FY2010 were as follows:

- New methods of first-principles calculation of material properties
 - First-principles wavefunction theory for solids based on the transcorrelated method
 - Generalized anharmonic lattice model of crystals for investigating thermal conductivity
 - Density functional theory for superconductors
 - FMO-LCMO method: a new method of electronic structure calculation of huge biomolecules based on the fragment molecular orbital (FMO) method
- Applications of first-principles calculation
 - Electric double layer and its capacitance formed on solid-liquid interfaces
 - Structural transition of graphene on GaN surface
 - Origin of ferroelectricity in BaTiO_3
 - Electric dipole layer at the water-electrode interface
 - Magnetic anisotropy in $\alpha''\text{-Fe}$

13 Fujimori Group

Research Subjects: Photoemission Spectroscopy of Strongly Correlated Systems

Member: Atsushi Fujimori and Teppei Yoshida

We study the electronic structure of strongly correlated systems using high-energy spectroscopic techniques such as angle-resolved photoemission spectroscopy and soft x-ray magnetic circular dichroism using synchrotron radiation. We investigate mechanisms of high-temperature superconductivity [1], metal-insulator transitions, giant magnetoresistance, carrier-induced ferromagnetism, spin/charge/orbital ordering in strongly correlated systems such as transition-metal oxides [2], magnetic semiconductors [3], and their interfaces and nano-structures.

[1] A. F. Santander-Syro, M. Ikeda, T. Yoshida, A. Fujimori, K. Ishizaka, M. Okawa, S. Shin, B. Liang, A. Zimmers, R.L. Greene, and N. Bontemps: Two-Fermi-surface superconducting state and a nodal d -wave energy gap of the electron-doped $\text{Sm}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_{4-\delta}$ cuprate superconductor, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 197002–1-4 (2011).

[2] K. Yoshimatsu, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Yoshida, A. Fujimori, and M. Oshima: Metallic quantum well states in artificial structures of strongly correlated oxide, *Science* **333**, 319-322 (2011).

[3] T. Kataoka, Y. Yamazaki, V.R. Singh, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, and C.T. Chen, G.Z. Xing, J.W. Seo, C. Panagopoulos, and T. Wu: Ferromagnetic interaction between Cu ions in the bulk region of Cu-doped ZnO nanowires, *Phys. Rev. B* **84**, 153203–1-4 (2011).

14 Uchida Group

Research Subjects: High- T_c superconductivity

Member: Uchida Shin-ichi (professor), Kakeshita Teruhisa. (research associate)

1. Project and Research Goal

The striking features of low-dimensional electronic systems with strong correlations are the “fractionalization” of an electron and the “self-organization” of electrons to form nanoscale orders. In one dimension (1D), an electron is fractionalized into two separate quantum-mechanical particles, one containing its charge (holon) and the other its spin (spinon). In two dimensions (2D) strongly correlated electrons tend to form spin/charge stripe order.

Our study focuses on 1D and 2D copper oxides with various configurations of the corner-sharing CuO_4 squares. The common characteristics of such configurations are the quenching of the orbital degree of freedom due to degraded crystal symmetry and the extremely large exchange interaction (J) between neighboring Cu spins due to large $d - p$ overlap (arising from 180° Cu-O-Cu bonds) as well as to the small charge-transfer energy. The quenching of orbitals tends to make the holon and spinon to be well-defined excitations in 1D with quantum-mechanical character, and the extremely large J is one of the factors that give rise to superconductivity with unprecedentedly high T_c as well as the charge/spin stripe order in 2D cuprates. The experimental researches of our laboratory are based upon successful synthesis of high quality single crystals of cuprate materials with well-controlled doping concentrations which surpasses any laboratory/institute in the world. This enables us to make systematic and quantitative study of the charge/spin dynamics by the transport and optical measurements on the strongly anisotropic systems. We also perform quite effective and highly productive collaboration with world-leading research groups in the synchrotron-radiation, μSR and neutron facilities, and STM/STS to reveal electronic structure/phenomena of cuprates in real- and momentum-space.

2. Accomplishment

(1) Ladder Cuprate

Significant progress has been made in the experimental study of a hole-doped two-leg ladder system $\text{Sr}_{14-x}\text{Ca}_x\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ and undoped $\text{La}_6\text{Ca}_8\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$:

1) From the high pressure (P) study we constructed and x - P phase diagram (in collaboration with Prof. N. Mōri's group). We find that the superconductivity appears as a superconductor-insulator transition only under pressures higher than 3GPa and that the superconducting phase is restricted in the range of x larger than 10. In lower P and smaller x regions the system is insulating.

- 2) The pairing wave function in the superconducting phase has an s-wave like symmetry which is evidenced by a coherence peak at T_c in the nuclear relaxation rate, revealed by the first successful NMR measurement under high pressure.
- 3) The origin of the insulating phase dominating the whole $x - P$ phase diagram is most likely the charge order of doped holes or hole pairs as suggested by the presence of a collective charge mode in the $x=0$, $\text{Sr}_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$, compound in the inelastic light scattering (with G. Blumberg, Bell Lab.), microwave and nonlinear conductivity (with A. Maeda and H. Kitano, U. of Tokyo), and inelastic X-ray scattering (with P. Abbamonte and G. A. Sawatzky).
- 4) In the undoped compound $\text{La}_6\text{Ca}_8\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ spin thermal conductivity is remarkably enhanced to the level of silver metal along the ladder-leg direction due to the presence of a spin gap and to a ballistic-like heat transport characteristic of 1D.

(2) Observation of Two Gaps, Pseudogap and Superconducting Gap, in Underdoped High- T_c Cuprates.

The most important and mysterious feature which distinguishes cuprate from conventional superconductors is the existence of “pseudogap” in the normal state which has the same d-wave symmetry as the superconducting gap does. We employed c-axis optical spectrum of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.8}$ as a suitable probe for exploring gaps with d-wave symmetry to investigate the inter-relationship between two gaps. We find that the two gaps are distinct in energy scale and they coexist in the superconducting state, suggesting that the pseudogap is not merely a gap associated with pairs without phase coherence, but it might originate from a new state of matter which competed with d-wave superconductivity.

(3) Nanoscale Electronic Phenomena in the High- T_c Superconducting State

The STM/STS collaboration with J. C. Davis’ group in Cornell Univ. is discovering numerous unexpected nanoscale phenomena, spatial modulation of the electronic state (local density of states, LDOS), in the superconducting CuO_2 planes using STM with sub-Å resolution and unprecedentedly high stability. These include (a) “+” or “×” shaped quasiparticle (QP) clouds around an individual non-magnetic Zn (magnetic Ni) impurity atom, (b) spatial variation (distribution) of the SC gap magnitude, (c) a “checkerboard” pattern of QP states with four unit cell periodicity around vortex cores, and (d) quantum interference of the QP. This year’s highlights are as follows:

1) Granular structure of high- T_c superconductivity

The STM observation of “gap map” has been extended to various doping levels of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$. The result reveals an apparent segregation of the electronic structure into SC domains of $\sim 3\text{nm}$ size with local energy gap smaller than 60meV, located in an electronically distinct background (“pseudogap” phase) with local gap larger than 60meV but without phase coherence of pairs. With decrease of doped hole density, the (coverage) fraction of the superconducting area decreases or the density of the number of superconducting islands decreases. Apparently, this is related to the doping dependence of superfluid density as well as the doping dependence of the normal-state carrier density.

2) Homogeneous nodal superconductivity and heterogeneous antinodal states

Modulation of LDOS is observed even without vortices, at zero magnetic field. In this case, the modulation is weak and incommensurate with lattice period, showing energy (bias voltage) dependence. The dispersion is explained by quasiparticle interference due to elastic scattering between characteristic regions of momentum-space, consistent with the Fermi surface and the d-wave SC gap determined by ARPES (angle-resolved-photoemission).

These dispersive quasiparticle interference is observed at all dopings, and hence the low-energy states, dominated by the states on the “Fermi arc” formed surrounding the gap nodes, are spatially homogeneous (nodal superconductivity). By contrast, the quasiparticle states near the antinodal region degrade in coherence with decreasing doping, but have dominant contribution to superfluid density. This suggests that the volume fraction of spatial regions all of whose Fermi surface contributes to superfluid decreases with reduced doping. The result indicates the special relationship between real-space and momentum-space electronic structure.

15 Hasegawa Group

Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics

Members: Shuji HASEGAWA and Toru HIRAHARA

Surfaces of materials are platforms of our research where rich physics is expected due to the low-dimensionality and symmetry break down. (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 semiconductor surfaces, topological surfaces, and nano-scale phases such as surface superstructures and ultra-thin films. We use ultrahigh vacuum experimental techniques such as 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 transport: Monolayer superconductivity. Current-induced spin polarization effect in strong spin-orbit-interaction materials. Control of surface electronic states and their conductivity of topological insulators. Anisotropic transport on a quasi-one-dimensional metallic surface.

(2) Surface phases, ultra-thin films, and phase transitions: 2D topological materials. Doping into topological insulators. Topological phase transition. Order-disorder phase transition, charge-density-wave transition, Mott transition on various metal-induced surface superstructures of Si. Quantum-well state in ultra-thin metal films. Rashba effect in surface state and hybridization with quantum-well states in thin films.

(3) Surface magnetism: Monolayer ferromagnetic surfaces. Diluted magnetic surface states. Kondo effect and RKKY interaction in surface states.

(4) Construction of new apparatuses: Low-temperature strong-magnetic-field scanning tunneling microscope. Micro-four-point probes apparatus at mK under strong magnetic field.

- [1] T. Hirahara, G. Bihlmayer, Y. Sakamoto, M. Yamada, H. Miyazaki, S. Kimura, S. Bluege, and S. Hasegawa: *Interfacing 2D and 3D topological insulators: Bi(111) bilayer on Bi₂Te₃*, Phys. Rev. Lett. **107**, 166801 (Oct, 2011).
- [2] M. D' Angelo, R. Yukawa, K. Ozawa, S. Yamamoto, T. Hirahara, S. Hasegawa, M.G. Silly, F. Sirotti, and I. Matsuda: *Hydrogen-induced surface metallization of SrTiO₃(001)*, Phys. Rev. Lett. **108**, 116802 (Mar, 2012).
- [3] N. Miyata, H. Narita, M. Ogawa, A. Harasawa, R. Hobara, T. Hirahara, P. Moras, D. Topwal, C. Carbone, S. Hasegawa, and I. Matsuda: *Enhanced spin relaxation in a quantum metal film by the Rashba-type surface*, Phys. Rev. B **83**, 195305 (May, 2011).
- [4] N. Fukui, T. Hirahara, T. Shirasawa, T. Takahashi, K. Kobayashi, and S. Hasegawa: *Surface Relaxation of Topological Insulators: Influence on the Electronic Structure*, Phys. Rev. B **85**, 115426 (Mar, 2012).
- [5] Y. Saisyu, T. Hirahara, R. Hobara, and S. Hasegawa: *Magnetic anisotropy of Co ultrathin films*, Journal of Applied Physics **110**, 053902 (Sep, 2011).
- [6] Y. Fukaya, I. Matsuda, M. Hashimoto, K. Kubo, T. Hirahara, W. H. Choi, H. W. Yeom, S. Hasegawa, A. Kawasuso, and A. Ichimiya: *Atomic structure of two-dimensional binary surface alloy: Si(111)- $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ superstructure*, Surface Science **606**, 919 (Feb, 2012).

16 Fukuyama Group

Research Subjects: Low Temperature Physics (Experimental):

Quantum fluids and solids with strong correlations and frustration,
Scanning tunneling microscopy and spectroscopy of two dimensional electron systems in graphene and superconductivity in nanometer scale.

Member: Hiroshi Fukuyama, Tomohiro Matsui

Our current interests are (i) quantum phases with strong correlations and frustration in two dimensional (2D) helium three (³He), (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, scanning tunneling microscopy and spectroscopy (STM/S), low energy electron diffraction (LEED) and transport measurement, *etc.*

1. Ground-state of two dimensional ^3He :

It is an interesting open question to ask whether the critical point, i.e., the gas-liquid transition, exists in strictly 2D ^3He . The previous quantum many-body calculations predict interestingly that ^3He does not have the critical point but ^4He does in pure 2D case. We have measured low-temperature heat capacities (C) of the first three atomic layers of ^3He adsorbed on a graphite surface to elucidate if the ground state of each layer is gas or liquid phase. The elucidation is based on the fact that the coefficient (γ) of T -linear term in $C(T)$ in degenerated fermion system is determined by the surface area over which the fermions spread and the quasi-particle effective mass. It had been found until last year that there is the critical point over second layer and ^3He atoms form 2D paddles at low densities ($\rho < 1.5 \text{ nm}^{-2}$). This year, we found that even the first layer, where the confinement potential from the substrate is stronger, does have the critical point, too. Moreover, the density of the 2D paddle is comparable with that in second and third layers. Therefore, we can conclude that the ground state of 2D ^3He is the liquid phase, and that the interaction between ^3He atoms in 2D is attractive in average.

Though graphite is an ideal substrate for adsorbing atoms, it contains some inhomogeneous regions unavoidably, which affects the physical properties of adsorbed systems. However, the amount of the inhomogeneous regions had not been well evaluated and the areal density had not been precise enough. In our experiments, we succeeded to evaluate the amount as $\sim 5 \%$ of the total surface area, in our substrate, through the analysis of the heat capacities of the first layer ^3He on graphite by clearly demonstrate that the measured heat capacities can be decomposed into the one of the two dimensional ^3He and of the amorphous ^3He on graphite.

2. The $4/7$ phase of second layer ^4He on graphite:

We have prepared a new sample cell for high-precision heat capacity measurements of the possible order-disorder transition around $T = 1 \text{ K}$ using a ZYX exfoliated graphite substrate which has much larger micro-crystalline size than the previous one. With this set-up, the heat capacities and the vapor pressures are measured for the first and second layers of ^4He .

For the first layer ^4He , a peak structure is observed in the temperature dependence of the heat capacity at the areal density of $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ commensurate phase more clearly than that observed on the other substrate.

For the second layer ^4He , the gradual change of the peak in the heat capacity is observed, which suggest the growth of two dimensional phase from fluid, commensurate solid and then incommensurate solid. In addition, a clear evidence of the $4/7$ phase is observed in the density dependence of the vapor pressure as a sub-step at the density. It can also be confirmed that the $4/7$ phase is occurred before the promotion of the third layer from the density dependence of the isosteric heat. Our experimental results clearly show the existence of the $4/7$ commensurate phase around which many interesting quantum phenomena are proposed to emerge at low temperatures.

In addition, a LEED (low energy electron diffraction) experiment below 0.5 K is also designing in order to determine the structures of the commensurate $4/7$ phase unambiguously.

3. Bandgap tuning in functionalized graphene:

Graphene, a single layer of graphite, has attracted considerable attention owing to its remarkable electronic and structural properties and its possible applications in many emerging fields such as graphene-based electronic devices. The charge carriers in graphene behave like massless Dirac fermions, and graphene shows ballistic charge transport, turning it into an ideal material for circuit fabrication. However, graphene lacks a band gap around the Fermi level, which is essential for controlling the conductivity by electronic means. One of the routes to open a band gap is the adsorption of atoms. An energy gap is observed in Kekulé-type structure on graphene, and such structure is expected to be induced by adsorbing atoms on the hollow sites of graphene honeycomb lattice in a $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ commensurate structure since the nearest-neighbor hopping amplitudes would acquire alternating values. Based on this idea, we are studying band gap formation by adsorbing Kr atoms on graphene by measuring the local density of states with STM/S and transport properties.

4. Superconducting nano-particles on Graphite:

Since graphene is fabricated on top of a substrate, one can directly couple dopants with 2D electron gas in graphene, whose carrier density and type can be tuned by an applied gate voltage. Thus, graphene could provide an ideal substrate for study of superconducting proximity effect, and at the same time, superconducting nano-particles on 2D electron/hole system. This year, we have studied

Indium superconducting nano-particles self-assembled on graphite, instead of graphene, by means of STM/S. On an In nano-particle, unexpectedly large and deep superconducting gap with small coherence peaks are observed suggesting the localization of the Cooper pairs in superconducting nano-particles. The density of states are remained suppressed at $V = 0$ mV without coherence peaks even in higher temperatures and magnetic fields than critical temperature and field. It suggests that the Cooper pairs are pre-formed without macroscopic coherence above critical values which is usually defined from the macroscopic properties like conductivity and magnetisation.

17 Okamoto Group

Research Subjects: Experimental Condensed Matter Physics,

Low temperature electronic properties of two-dimensional systems.

Member: Tohru Okamoto and Ryuichi Masutomi

We study low temperature electronic properties of semiconductor 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 2011, we have started to use a scanning tunneling microscope.

2. Superconductivity of ultrathin Pb films on cleaved GaAs surfaces:

We have performed magnetotransport measurements on ultrathin Pb films down to submonolayer thicknesses. We observed superconductivity even for a film of 0.22 nm thickness, which is below one monolayer. While the critical magnetic field is 0.3 T in the perpendicular orientation, the superconductivity is not suppressed even at 9 T in the in-plane orientation. An in-plane magnetic field of $B_{\parallel} = 8.5$ T does not cause a significant change in the resistivity ρ vs T curve. Furthermore, we have studied the orbital effect of the perpendicular component $B_{\perp}$ of the magnetic field at $T = 0.5$ K and found that the ρ vs $B_{\perp}$ curve does not depend on the in-plane component at least up to $B_{\parallel} = 9$ T. These observations are surprising since a theoretical critical field is estimated to be 1.7 T from the Pauli paramagnetism. In our system, the structure inversion symmetry is broken and the spin-orbit interaction is expected to be strong. It is likely that the Rashba effect plays an essential role on the formation of the superconducting state.

3. Strongly correlated two dimensional systems:

Cyclotron resonance of two-dimensional electrons is studied for a high-mobility Si/SiGe quantum well in the presence of an in-plane magnetic field, which induces spin polarization. The relaxation time τ_{CR} shows a negative in-plane magnetic field dependence, which is similar to that of the transport scattering time τ_t obtained from dc resistivity. The resonance magnetic field shows an unexpected negative shift with increasing in-plane magnetic field.

18 Shimano Group

Research Subjects: Optical and Terahertz Spectroscopy of Condensed Matter

Member: Ryo Shimano and Ryusuke Matsunaga

We study light-matter interactions and many body quantum correlations in solids. 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 $\sim$ 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 the exciton Mott transition in Si by optical pump and terahertz probe experiments. We observed the excitonic correlation above the mean-field Mott density, as manifested by the non-vanishing 1s-2p transition of excitons at 3 THz in the high density regime. From the spectral analysis of the optical conductivity and the dielectric function, the following parameters were determined: the plasma frequency, 1s-2p transition energy of excitons, the density of free carriers and excitons, the ionization ratio of excitons, the carrier scattering rate and the damping constant of excitons associated with the 1s-2p transition. The carrier scattering rate is largely enhanced at the proximity of exciton Mott transition density, which is attributed to the non-vanishing excitonic correlation. Moreover, we found a coupled behavior of excitons and plasmons in the behavior of loss function spectrum $\text{Im}(-1/\epsilon(\omega))$ in the density region across the Mott density, indicating the coupling of charge density fluctuation with the excitonic polarization.
2. **Optical control of superconductivity by intense THz pulses:** By using an intense THz light source generated by optical rectification of femtosecond laser pulses in a LiNbO₃ crystal, we have investigated the ultrafast dynamics of a non-equilibrium BCS state in a superconducting NbN film. After the instantaneous photo-injection of high density quasiparticles by the THz pump pulse, ultrafast suppression of BCS superconducting order is observed in the optical conductivity spectrum, associated with the spatially inhomogeneous distribution of the order parameter.
3. **Dynamical magnetoelectric effect at the resonance of electromagnon in a multiferroic helimagnet:** Dynamical magnetoelectric effect, namely the dynamical cross-coupling of spontaneous polarization(**P**) and magnetization(**M**) is discovered in a multiferroic helimagnet (Eu,Y)MnO₃ at the resonance of electromagnon, i.e. the electrically driven magnetic excitation, in sub-THz frequency range. Due to the dynamical cross-coupling of **P** and **M**, the material is found to exhibit colossal directional dichroism- a difference in the absorption of light propagating in opposite directions-at the resonance frequency associated with the electromagnon.

References

- [1] R. Shimano, Y. Ikebe, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, N. Nagaosa, and Y. Tokura: Terahertz Faraday rotation induced by an anomalous Hall effect in the itinerant ferromagnet SrRuO₃, EPL **95**, 17002 (2011). Selected for the EPL Best of 2011 collection.
- [2] D. Okuyama, S. Ishiwata, Y. Takahashi, K. Yamauchi, S. Picozzi, K. Sugimoto, H. Sakai, M. Takata, R. Shimano, Y. Taguchi, T. Arima, and Y. Tokura: Phys. Rev. B **84**, 054440 (2011).
- [3] Y. Takahashi, R. Shimano, Y. Kaneko, H. Murakawa, and Y. Tokura: Magnetoelectric resonance with electromagnons in a perovskite helimagnet, Nature Physics **8**, 121 (2012).
- [4] Ryo Shimano, Shinichi Watanabe, and Ryusuke Matsunaga: Intense terahertz pulse-induced nonlinear responses in carbon nanotubes, The Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, to be published(invited paper).

19 Takagi Group

Research Subjects: Physics of Correlated Electron Systems

Member: Hidenori Takagi

We study the properties of correlated electron systems, such as superconductivity, magnetism, spin-orbit-interaction-induced Mott transition, thermoelectric power. The summary of our research in this year is as following.

1. **Superconductivity of transition metal Pnictide:** We have studied of binary ruthenium pnictides, RuP and RuAs, with an orthorhombic MnP structure. We have found that these compounds show a metal-nonmagnetic insulator transition at $T_{MI} = 270$ and 200 K, respectively. These transitions

are suppressed by substituting Ru with Rh. We confirmed appearance of superconductivity with a maximum $T_c = 3.7$ and 1.8 K in a narrow composition range around the critical point for the pseudogap phase. It is characteristic that the critical point here is neither antiferromagnetic nor ferromagnetic, as is usually the case in widely discussed superconductivity at a critical point.

2. **The study of Sr_2IrO_4 with resonant inelastic X-ray scattering (RIXS):** We have performed an Ir $L3$ edge resonant inelastic x-ray scattering measurement of the low-lying electronic excitations in Sr_2IrO_4 over the complete Brillouin zone of the IrO_2 plane. A remarkably strong inelastic signal which exceeds the elastic scattering in intensity is observed. Peaks observed at 0.5, 3.2, and 6.0 eV are respectively ascribed to an interband transition across the Mott gap and charge-transfer excitations from the O 2p band to the Ir 5d bands. We have observed that the dispersion of the Mott gap excitation is weak. This indicates that the narrow 5d band of Sr_2IrO_4 is governed by the spin-orbit interaction, which induces the novel Mott insulating state.
3. **Optical study of pressure-induced metal-insulator transition in LiV_2O_4 :** The metal-insulator (MI) transition in LiV_2O_4 has been studied by optical measurements in infrared regions at low temperatures and under high pressures. At 40 K, the metal phase under ambient pressure changes gradually into the insulating state under pressures above 7 GPa. At pressures higher than 8 GPa, the precursor of the structural phase transition is observed as a softening of optical phonon peak in the far-infrared region with decreasing temperatures. We have found that the pressure-induced MI transition occurs not only at low temperatures but also at room temperature. The phonon-softening behavior is only observed near the boundary to the insulator phase, where a complete homogeneous structural change seems to occur. On the contrary, an inhomogeneous structural change is realized in the intermediate phase between the metal and insulator phases.
4. **Thermoelectric performance of pseudogap system Ru_2Sn_3 :** We have investigated a material with pseudo gap as a candidate for high performance thermoelectric material. Since pseudo gap system has a steep density of states around the Fermi level, high Seebeck coefficient could be expected by adjusting a position of the Fermi level through carrier doping. In this study, we have focused on Ru_2Sn_3 , which is a semi-metal with pseudo gap. We observed relatively high figure of merit, $ZT = 0.15$, which is realized through asymmetric dispersion of electron- and hole-bands. In addition, we have improved figure of merit up to $ZT = 0.30$ through suppression of a thermal conductivity by introducing a Sn deficiency.

20 Theoretical Astrophysics Group

Research Subjects: Observational Cosmology, Extrasolar Planets,

Member: Yasushi Suto, & Atsushi Taruya

The Theoretical Astrophysics Group carries out a wide range of research programmes. However, astrophysics is a very broad field of research, and it goes without saying that our group alone cannot cover all the various important astrophysical research topics on hand. Among others we place emphasis on the “Observational Cosmology”.

“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.

Let us summarize this report by presenting recent titles of the doctor and master theses in our group;

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

2008

- Holographic non-local operators
- Neutrino Probes of Core-collapse Supernova Interiors
- Inhomogeneity in Intracluster Medium and Its Cosmological Implications
- Nuclear “pasta” structure in supernovae
- Investigation of the Sources of Ultra-high-energy Cosmic Rays with Numerical Simulations
- Formation of Pulsar Planet Systems -Comparison with the Standard Scenario of Planetary Formation-

2007

- The Rossiter effect of extrasolar transiting planetary systems ? perturbative approach and application to the detection of planetary rings
- Stability of flux compactifications and de Sitter thermodynamics
- Study of core-collapse supernovae in special relativistic magnetohydrodynamics
- Spectroscopic Studies of Transiting Planetary Systems
- The relation of the Galactic extinction map to the surface number density of galaxies
- Brane Inflation in String Theory 2006
- Numerical studies on cosmological perturbations in braneworld
- Inflationary braneworld probed with primordial black holes
- Galaxy Biasing and Higher-Order Statistics
- Probing circular polarization of Gravitational Wave Background with Cosmic Microwave Background Anisotropy
- Gravitational Collapse of Population III Stars

2005

- Brane gravity and dynamical stability in warped flux compactification
- Neutrino Probes of Galactic and Cosmological Supernovae
- Detectability of cosmic dark baryons through high-resolution spectroscopy in soft X-ray band
- Propagation of Ultra-High Energy Cosmic Rays in Cosmic Magnetic Fields
- The study of nuclear pasta investigated by Quantum Molecular Dynamics

2004

- Strong Gravitational Lenses in a Cold Dark Matter Universe
- Effect of Rotation and Magnetic Field on the Explosion Mechanism and Gravitational Wave in Core-Collapse Supernovae
- ” Bulk Fields in Braneworld ”
- “ Gravitational collapse and gravitational wave in the brane-world ”
- Magnetohydrodynamical Simulation of Core-Collapse Supernovae
- A Search for the Atmospheric Absorption in the Transiting Extrasolar Planet HD209458b with Subaru HDS
- Baryogenesis and Inhomogeneous Big Bang Nucleosynthesis
- The large-scale structure of SDSS quasars and its cosmological implication

2003

- Non-Gravitational Heating of Galaxy Clusters in a Hierarchical Universe
- Discoveries of Gravitationally Lensed Quasars from the Sloan Digital Sky Survey
- One, Two, Three ? measuring evolved large scale structure of the Universe
- Higher-order Statistics as a probe of Non-Gaussianity in Large Scale Structure
- Primordial black holes as an imprint of the brane Universe
- Probing the Extra Dimensions with Gravitational Wave Background of Cosmological Origin

21 Murao Group

Research Subjects: Quantum Information Theory

Member: Mio Murao, Peter Turner

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 last two decades. Entanglement is nonlocal correlation that appears in certain types of quantum states (non-separable states) and has become considered as a fundamental resource for quantum information processing. In our group, we investigate new properties of multipartite and multi-level entanglement and the use of these properties as resources for quantum information processing. Our current projects are the following:

- Distributed quantum information processing
 - Quantifying “Globalness” of unitary operations on quantum information [1]

- Implementability of unitary operations over the butterfly network [2]
- Multi-cast quantum network coding for the butterfly network
- Entanglement theory
 - Random states generation by Hamiltonian dynamics with multi-body interactions [3]
 - Analysis of phase transitions and entanglement properties of a non-uniform one-dimensional spin model [4]
 - Entanglement of phase-random states and their approximate generation [5]
 - Multipartite entanglement in graph states
 - Control of entanglement generation for two spins with anisotropic Heisenberg interactions
- Quantum algorithms
 - Universal controllization of unknown unitary operations
 - Thermalization algorithm
- Quantum measurement
 - Evaluation and improvement of estimation errors in quantum tomography [6]
 - Continuous variable 2-designs [7]
- Foundation of quantum mechanics
 - Exchange fluctuation theorem for correlated quantum systems [8]
- General probabilistic theories describing strong nonlocal correlations
 - Analysis of information causality by a generalized mutual information
 - Analysis of phases and possibility of computational speed-up in general probabilistic theories

Please refer our webpage: <http://www.eve.phys.s.u-tokyo.ac.jp/indexe.htm>

References

1. A. Soeda, P. S. Turner and M. Murao, *Entanglement cost of implementing controlled-unitary operations*, Phys. Rev. Lett. **107**, 180501 (2011)
2. A. Soeda, Y. Kinjo, P.S. Turner and M. Murao, *Quantum Computation over the Butterfly Network*, Phys. Rev. A **84**, 012333 (2011)
3. Y. Nakata and M. Murao, *Simulating typical entanglement with many-body Hamiltonian dynamics*, Phys. Rev. A **84**, 052321 (2011)
4. J. Hide, Y. Nakata and M. Murao, *Entanglement and the Interplay between Staggered Fields and Couplings*, Phys. Rev. A **85**, 042303 (2012).
5. Y. Nakata, P. S. Turner and M. Murao, *Phase-random states*, arXiv:1111.2747 (2011)
6. T. Sugiyama, P. S. Turner, and M. Murao, A-optimal adaptive experimental design for 1-qubit state estimation with finite data, accepted for publication in Phys. Rev. A, arXiv:arXiv:1203.3391(quant-ph)
7. R. Blume-Kohout and P. S. Turner, *The curious non-existence of Gaussian 2-designs*, arXiv:1110.1042 (2011)
8. D. Jennings, T. Rudolph, Y. Hirono, S. Nakayama and M. Murao, *Exchange Fluctuation Theorem for correlated quantum systems*, arXiv1204.3571 (2012)

22 Ueda Group

Research Subjects: Bose-Einstein condensation, Fermionic superfluidity, cold molecules, measurement theory, quantum information, quantum control

Member: Masahito Ueda and Yuki Kawaguchi

22.1 Quantum States of Ultracold Atoms

Measurement of an Efimov Trimer Binding Energy in a Three-Component Mixture of ^6Li

The existence of the Efimov states has been confirmed indirectly in several ultracold atomic systems via the inelastic collision enhancements and minima occurring at particular magnetic-field values. In this work, we directly measured the binding energy of an Efimov trimer state in a three-component mixture of ^6Li via radio-frequency association. It is found that the measurement results shift significantly with temperature, but that the shift becomes negligible at the lowest temperature in our experiment. Eliminating this shift by lowering the temperature, we precisely determined the trimer binding energy, and found that the shift-free part of the binding energy significantly deviates from the universal theory prediction and a nonuniversal theory prediction based on a three-body parameter with a monotonic binding-energy dependence. This result was published in Physical Review Letters [Nakajima, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 143201 (2011)].

Dissipative hydrodynamic equation of a ferromagnetic Bose-Einstein condensate: Analogy to magnetization dynamics in conducting ferromagnets

The hydrodynamic equation of a spinor Bose-Einstein condensate (BEC) gives a simple description of spin dynamics in the condensate. We introduced the hydrodynamic equation of a ferromagnetic BEC with dissipation originating from the energy dissipation of the condensate. The dissipative hydrodynamic equation has the same form as an extended Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) equation, which describes the magnetization dynamics of conducting ferromagnets in which localized magnetization interacts with spin-polarized currents. Employing the dissipative hydrodynamic equation, we demonstrated the magnetic domain pattern dynamics of a ferromagnetic BEC in the presence and absence of a current of particles, and found that the superfluid current accelerates the pattern-formation dynamics. This result was published in Phys. Rev. A [Kudo and Kawaguchi, Phys. Rev. A **84**, 043607 (2011)].

Effects of thermal and quantum fluctuations on the phase diagram of a spin-1 ^{87}Rb Bose-Einstein condensate

We investigate the effects of thermal and quantum fluctuations on the phase diagram of a spin-1 ^{87}Rb Bose-Einstein condensate (BEC) under the quadratic Zeeman effect. Due to the large ratio of spin-independent to spin-dependent interactions of ^{87}Rb atoms, the effect of noncondensed atoms on the condensate is much more significant than that in scalar BECs. We find that the condensate and spontaneous magnetization emerge at different temperatures when the ground state is in the broken-axisymmetry phase. In this phase, a magnetized condensate induces spin coherence of noncondensed atoms in different magnetic sublevels, resulting in temperature-dependent magnetization of the noncondensate. We also examine the effect of quantum fluctuations on the order parameter at absolute zero and find that the ground-state phase diagram is significantly altered by quantum depletion. This result was published in Physical Review A [Phys. Rev. A **84**, 043645 (2011)].

Symmetry classification of spinor Bose-Einstein condensates

We proposed a method for systematically finding ground states of spinor Bose-Einstein condensates by utilizing the symmetry properties of the system. By this method, we can find not only an inert state, whose symmetry is maximal in the manifold under consideration, but also a noninert state, which has lower symmetry and depends on the parameters in the Hamiltonian. We establish the symmetry-classification method for the spin-1, 2, and 3 cases at zero magnetic field, and find an additional phase in the last case. The properties of the vortices in the spin-3 system were also discussed. This result was published in Phys. Rev. A [Kawaguchi and Ueda, Phys. Rev. A **84**, 053616 (2011)].

Abe homotopy classification of topological excitations under the topological influence of vortices

A monopole with charge $+1$ transforms to a monopole with charge -1 by making a complete circuit around a vortex. This phenomenon is called the influence of vortices on a monopole. What is at issue is that the charge $+1(-1)$ is not topological invariant under the influence of vortices. We have provided an Abe homotopy group to classify the topological excitations under the influence of vortices. The Abe homotopy group consists of a semi-direct product of the first homotopy group and the n th homotopy group, and we have pointed out that the semi-direct product represents the influence of vortices. By applying the Abe homotopy group to an ordered material, we have found that a monopole is classified by $\mathbb{Z}_2$ rather than $\mathbb{Z}$, and so there exists two possibilities: a monopole exists or not. These results were published in Nuclear Physics B [Kobayashi, *et al.*, Nucl. Phys. B **856**, 577 (2012)].

22.2 Quantum Information, Quantum Measurement, and Information thermodynamics**Proposal of a thermalization mechanism in isolated quantum systems**

We exploited the numerical exact diagonalization of the 1-dimensional and 2-dimensional hard-core Bose-Hubbard model and calculated the expectation values of the momentum distribution over each energy eigenstate. As a result, we found the behavior that the expectation values fluctuate randomly as the energy eigenvalues increase, and named such a behavior the eigenstate randomization hypothesis (ERH). Furthermore, regarding the ERH hold, we justified the applicability of the microcanonical ensemble in isolated quantum systems under the assumption that the weights on each energy eigenstate of the initial state are smooth against the energy eigenvalue. These results were published in Physical Review E [Ikeda, Watanabe, and Ueda, Phys. Rev. E **84**, 021130 (2011)].

Uncertainty relation revisited from quantum estimation theory

In 1927, Heisenberg discussed a thought experiment of the position measurement of a particle by using a γ -ray microscope, and found a trade-off relation between the error of the measured position and the disturbance in the momentum caused by the measurement process. However, at the time Heisenberg found the complementarity, quantum measurement theory was not established yet, and the exact lower bound of the errors of two observables has yet to be clarified. We have found that the estimation process is essential to characterize the error in an arbitrary measurement, and formulated the error by using the Fisher information. We have obtained the attainable bound of the errors of two observables. The bound is stronger than the bound set by the commutation relation of the observables. These results are published in the Physical Review A [Watanabe, Sagawa, and Ueda, Phys. Rev. A **84**, 042121 (2011)].

23 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*, and are developing new instruments for future satellite missions.

Mass Accreting Black Holes: Mass accretion onto black holes provides a very efficient way of X-ray production. Utilizing wide-band *Suzaku* spectra, we are diagnosing hot “coronae” that form around stellar-mass black holes, when their mass accretion rate is below a certain threshold [5]. In active galactic nuclei

(massive black holes), our new variability-assisted spectroscopy technique is revealing various emission components in a model independent manner [3]. This is expected to settle several long-lasting issues as to AGNs, including their angular momenta and the matter distribution around them.

Neutron Stars with Various Magnetic Fields: Using *Suzaku*, we are studying neutron stars (NSa) with a variety of magnetic field strengths, B . Based on new *Suzaku* data [1], we are attempting to measure the mass and radius of an NS with $B < 10^9$ G. NSs in some “fast transient” objects may have $B \sim 10^{13}$ G. We have revealed that about 10 “magnetars”, supposed to have $B = 10^{14-15}$ G, emit unusual hard X-ray components. This lead us to propose a novel possibility: magnetars can be a more dominant form of new-born neutron stars, rather than ordinary binary X-ray pulsars with $B \sim 10^{12}$ G. We further speculate that the magnetism of neutron stars is a manifestation of ferromagnetism in nuclear matter.

Plasma Physic in Clusters of Galaxies: The most dominant known component of cosmic baryons exists in the form of X-ray emitting hot ($\sim 10^8$ K) plasmas associated with clusters of galaxies. We have obtained novel evidence that the member galaxies in each cluster have been falling, over the Hubble time, to its potential center [2]. This is presumably due to magneto-hydrodynamic interatcons between the galaxies and the plasma, that takes place as as the former keep moving through the latter. The interaction may also explain why these plasmas are surviving their radiative cooling.

Galactic Diffuse X-ray Emission: From the 1980’, an apparently extended X-ray emission was known to distribute along our Galactic plane. Using *Suzaku*, we showed that this can be explained as an assembly of numerous X-ray emitting white dwarfs. Nevertheless, the diffuse emission is significantly enhanced around the Galactic Center region, where some truly diffuse hot plasmas may be present.

Future Instrumentation: In collaboration with many domestic and foreign groups, we are developing a successor to *Suzaku*, *ASTRO-H*. Scheduled for launch in 2014, it 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 onboard instruments, the Hard X-ray Imager and the Soft Gamma-ray Detectors. Our effort includes mechanical/thermal designs of the instruments, as well as the development of large BGO scintillators, double-strip silicon detectors, and related electronics.

1. Sakurai, S., Yamada, S., Torii, S., Noda, H., Nakazawa, K., Makishima, K., Takahashi, H.: “Accretion Geometry of the Low-Mass X-ray Binary Aquila X-1 in the Soft and Hard States”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **64**, in press (2012)
2. Gu, L. Xu, H., Gu, J. Kawaharada, M., Nakazawa, K., Qin, Z., Wang, J., Wang, Y., Zhang, Z., Makishima, K.: “Two-phase ICM in the Central Region of the Rich Cluster of Galaxies A1795: A Joint *Chandra*, *XMM-Newton*, and *Suzaku* View”, *Astrophys. J.* **749**, id 186 (2012)
3. Noda H., Makishima K., Yamada S., Torii S., Sakurai S., & Nakazawa, K.: “Suzaku Studies of Wide-Band Spectral Variability of the Bright Type I Seyfert Galaxy Markarian 509”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, S925–S936 (2011)
4. Uchiyama, H., Nobukawa, M., Tsuru, T.G., Koyama, K., & Matsumoto, H.: “Global Distribution of Fe $K\alpha$ Lines in the Galactic Center Region Observed with the Suzaku Satellite”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, S903–S911 (2011)
5. Torii, S., Yamada, S., Makishima, K., Sakurai, S., Nakazawa, K., Noda, H., Done, C., Takahashi, H. & Gandhi, P.: “Spectral and Timing Studies of Cyg X-1 in the Low/Hard State with Suzaku”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, S771–S783 (2011)

24 Takase Group

Research Subjects: High Temperature Plasma Physics Experiments, Spherical Tokamak, Wave Heating and Current Drive, Nonlinear Physics, Collective Phenomena, Fluctuations and Transport, Advanced Plasma Diagnostics Development

Member: Yuichi Takase, Akira Ejiri

Thermonuclear fusion, the process that powers the sun and stars, is a promising candidate for generating abundant, safe, and clean power. In order to produce sufficient fusion reactions, isotopes of hydrogen, in the form of a hot and dense plasma, must be confined for a long enough time. A magnetic configuration

called the tokamak has reached the level where the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) is being constructed to study the behavior of a burning plasma. However, improvement of the cost-effectiveness of the fusion reactor is still necessary. The spherical tokamak (ST) offers a promising approach to increasing the efficiency by raising the plasma beta (the ratio of plasma pressure to magnetic pressure). High beta plasma research using ST is a rapidly developing field worldwide, and is being carried out by our group using the TST-2 spherical tokamak. Our group is tackling the problem of creating and sustaining ST plasmas using radio frequency (RF) waves.

Noninductive plasma current (I_p) initiation and ramp-up experiments are being conducted on TST-2 with up to 100 kW of RF power in the lower hybrid (LH) frequency range (200 MHz). The plasma forms a toroidal configuration spontaneously, and subsequent I_p ramp-up to 15 kA was achieved. X-rays in various energy ranges were measured to investigate the interaction between the wave and the electrons. Soft X-ray (SX) measurements revealed that the fast electron population increases as I_p increases. Hard X-ray spectral measurements showed that the photon flux is an order of magnitude higher and the photon temperature is higher in the co-current-drive direction (~ 60 keV) than that in the counter-current-drive direction (~ 40 keV). These are clear evidences that the LH wave (LHW) produced fast electrons and induced anisotropy in the velocity distribution function. The floating potential (V_f) measured by a Langmuir probe in an LHW driven plasma was below -1 kV, more than an order of magnitude more negative than in typical inductively driven plasmas. The angular profile of V_f had a large negative peak, indicating a flow of high energy electrons. This result agrees with the expectation that electrons are accelerated in one direction by the traveling wave excited by the antenna. The combine antenna used in these experiments excites electric fields which match the polarization of the fast wave (FW), but there is evidence that the LHW is excited nonlinearly, based on the frequency spectra measured by magnetic probes in the plasma edge region. While the “pump wave” at 200 MHz has a stronger toroidal component (FW polarization), the nonlinearly excited lower sideband has a stronger poloidal component (LHW polarization). It is expected that the effectiveness of current drive would improve if the LHW can be excited directly by the antenna. A new dielectric-loaded waveguide array antenna (“grill antenna”) was designed, fabricated and installed on TST-2 for this purpose. It consists of four waveguides loaded with alumina, arrayed in the toroidal direction. Initial experimental results show that the antenna-plasma coupling is strongly affected by the phase differences between adjacent waveguides. The reflection coefficient could be reduced to 15% in the optimum case. Noninductive I_p start-up to kA has been achieved with an injected RF power of up to 50 kW. Together with up to 15 kW of ECW power at 8.2 GHz which is now available, the operating regime for I_p ramp-up experiments can be extended to higher toroidal fields (~ 0.3 T), where accessibility of the LHW to the plasma core is improved.

Plasma turbulence induces “anomalous transport” in addition to collisional transport, and is an important research topic in fusion science. The 2-dimensional structure of plasma turbulence was measured in a poloidal cross section using radially and poloidally movable Langmuir probes in inductively formed TST-2 plasmas. MHD fluctuations (~ 10 kHz) were observed inside the last closed flux surface (LCFS), and electrostatic fluctuations (~ 70 kHz) localized in the upper region of the plasma were observed. The poloidal propagation direction of floating potential fluctuation was found to reverse across the LCFS. The result of bi-spectral analysis indicated the existence of nonlinear coupling of MHD fluctuations and 70 kHz fluctuations with broad-band turbulence.

Several novel plasma diagnostic techniques are being developed, including the double-pass Thomson scattering system to measure the electron temperatures (both parallel and perpendicular to the confining magnetic field) and the electron density, a 2-D multi-chord interferometry to measure the 2-D density profile, and a compact Rogowskii coil probe to measure the local current density.

25 Tsubono Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Gravitational Wave, Laser Interferometer

Member: Kimio TSUBONO and Yoich ASO

The detection of gravitational waves is expected to open a new window into 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
 - Design of KAGRA interferometer
 - Alignment control
 - Parametric instability
 - Study of cryogenic contacts
- Space laser interferometer, DECIGO
 - Development of DECIGO pathfinder, DPF
 - SWIM _{$\mu\nu$}
 - Study of the effect of the residual gas
- Development of TOBA (Torsion Bar Antenna)
 - Data analysis for the background gravitational waves
 - new type of actuators for TOBA
- Development of the ultra stable laser source
 - Laser stabilization using a cryogenic cavity
 - Prestabilized laser
 - Vibration isolation for cavity
 - Properties of material at cryogenic temperature
- High sensitive laser interferometer using non-classical light
- Gravitational force at small distances
- Study of space isotropy

reference

- [1] Koji Ishidoshiro, Masaki Ando, Akiteru Takamori, Hirotaka Takahashi, Kenshi Okada, Nobuyuki Matsumoto, Wataru Kokuyama, Nobuyuki Kanda, Yoichi Aso, and Kimio Tsubono: First Observational Upper Limit on Gravitational Wave Backgrounds at 0.2 Hz with a Torsion-Bar Antenna, *Phys. Rev. Lett.* **106** (2011) 161101.

26 Sano Harada Group

Research Subjects: Physics of out-of-equilibrium systems and living matter

Members: Masaki Sano, Takahiro Harada, and 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 take comparable effects, (iii) 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) Universal fluctuations of growing interfaces evidenced in turbulent liquid crystal [1]
- (2) Dynamics of topological defects in liquid crystal
- (3) Thermal transport and temperature profile induced by boiling[5]
- (4) Reversible-irreversible transition in low-Reynolds fluid with non-Brownian particles
- (5) Collective motion of microtubules as self-propelled particles [13]
- (6) Individual and collective motion of self-propelled asymmetric particles
- (7) Instability of interfaces and pattern dynamics of dense suspensions [2]

2. Microscopic systems out of equilibrium

- (1) Cooling due to feedback control and its relation to information [4]
- (2) Maximal efficiency in conjugation chemical reactions and information thermodynamics [11]
- (3) Experimental test on information heat engines in microscopic scales
- (4) Motion of colloids under thermal gradient

3. Biological systems

- (1) Force field of cells in motion and on division
- (2) Geometrical models of cell locomotion[7, 12, 14]
- (2) Microfabrication and its applications to biophysics of cells

References

1. K. A. Takeuchi, M. Sano, T. Sasamoto, and H. Spohn: Growing interfaces uncover universal fluctuations behind scale invariance, *Sci. Rep. (Nature)*, **1**, 34 (2011).
2. H. Ebata and M. Sano, Self-Replicating Holes in a Vertically Vibrated Dense Suspension: *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 088301 (2011).
3. K. A. Takeuchi, H. Chaté, F. Ginelli, A. Politi, and A. Torcini: Extensive and Subextensive Chaos in Globally Coupled Dynamical Systems, *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 124101 (2011).
4. S. Ito and M. Sano: Effects of error on fluctuations under feedback control, *Phys. Rev. E* **84**, 021123 (2011).
5. M. Bienia and M. Sano, Non-destructive ultrasonic velocimetry for central region velocity fields in turbulent Rayleigh-Benard convection of mercury, *Journal: Flow Measurement and Instrumentation*, **22**, 291-294 (2011).
6. M. Y. Mastuo, Hierarchical mechanism of development of wealth and structure for a premodern local society , *Phys. Rev. E* **83**, 066110 (2011).
7. M. Y. Matsuo and M. Sano, Geometrical model of a self-propelled broken interface, *J. Phys. A: Math. Theor.* **44**, 285101 (2011).
8. H. Kitahata, N. Yoshinaga, K. H. Nagai, and Y. Sumino: Spontaneous motion of a droplet coupled with a chemical wave, *Phys. Rev. E*, **84**, 015101(R) (2011).
9. K. A. Takeuchi, H.-l. Yang, F. Ginelli, G. Radons, and H. Chaté: Hyperbolic decoupling of tangent space and effective dimension of dissipative systems, *Phys. Rev. E*, **84**, 046214 (2011).

10. F. Ginelli, K. A. Takeuchi, H. Chaté, A. Politi, and A. Torcini: Chaos in the Hamiltonian mean field model, *Phys. Rev. E*, **84**, 066211 (2011).
11. K. Kawaguchi and M. Sano: Free energy transduction in autonomous systems, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **80**, 083003 (2011).
12. M. Y. Matsuo and M. Sano, Reflection antisymmetric spatiotemporal chaos under field-translational invariance, *Phys. Rev. E* **85**, 036215 (2012).
13. Y. Sumino, K. H. Nagai, Y. Shitaka, D. Tanaka, K. Yoshikawa, H. Chaté, and K. Oiwa: Large-scale vortex lattice emerging from collectively moving microtubules, *Nature*, **483**, 448-452 (2012).
14. M. Sano, M. Y. Matsuo, and T. Ohta, Dynamics of deformable self-propelled particles: relation with cell migration, "Series in Soft Condensed Matter - Vol. 4 NON-EQUILIBRIUM SOFT MATTER PHYSICS", edited by S. Komura and T. Ohta, Chapter 7 (pp.365- pp.415), World Scientific (2012).

27 Yamamoto Group

Research Subjects: Submillimeter-wave and Terahertz Astronomy, Star and Planet Formation, Chemical Evolution of Interstellar Molecular Clouds, Development of Terahertz Detectors

Member: Satoshi Yamamoto and Nami Sakai

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 the protoplanetary disks.

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 $^{13}\text{CO } J = 8 - 7$ line emission. We are expecting the scientific run from 2012.

- [1] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., Abundant Carbon-Chain Molecules toward the Low-Mass Protostar IRAS04368+2557 in L1527, *ApJ*, **672**, 371 (2008).
- [2] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., Deuterated Molecules in Warm Carbon Chain Chemistry: The L1527 Case, *ApJ*, **702**, 1025 (2009).
- [3] 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).
- [4] M. Sugimura, T. Yamaguchi, T. Sakai, T. Umemoto, N. Sakai, S. Takano, Y. Aikawa, N. Hirano, S.-Y. Liu, T.J. Millar, H. Nomura, Y.-N. Su, S. Takakuwa, and S. Yamamoto, Early Results of the 3 mm Spectral Line Survey toward the Lynds 1157 Shocked Region, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **63**, 459-472 (2011).

28 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) Suppression of high-order-harmonic intensities observed in aligned CO_2 molecules with 1300-nm and 800-nm pulses [1]

High-order-harmonic generation from aligned N_2 , O_2 , and CO_2 molecules is investigated by 1300-nm and 800-nm pulses. The harmonic intensities of 1300-nm pulses from aligned molecules show harmonic photon energy dependence similar to those of 800-nm pulses. Suppression of harmonic intensity from aligned CO_2 molecules is observed for both 1300- and 800-nm pulses over the same harmonic photon energy range. As the dominant mechanism for the harmonic intensity suppression from aligned CO_2 molecules, the present results support the two-center interference picture rather than the dynamical interference picture.

(2) Measuring polarizability anisotropies of rare gas diatomic molecules by laser-induced molecular alignment technique [2]

The polarizability anisotropies of homonuclear rare gas diatomic molecules, Ar_2 , Kr_2 , and Xe_2 , are investigated by utilizing the interaction of the induced electric dipole moment with a nonresonant, nanosecond laser pulse. The degree of alignment, which depends on the depth of the interaction potential created by the intense laser field, is measured, and is found to increase in order of Ar_2 , Kr_2 , and Xe_2 at the same peak intensity. Compared with a reference I_2 molecule, Ar_2 , Kr_2 , and Xe_2 are found to have the polariz-

ability anisotropies of 0.45 ± 0.13 , 0.72 ± 0.13 , and $1.23 \pm 0.21 \text{ \AA}^3$, respectively, where the uncertainty (one standard deviation) in the polarizability anisotropies are carefully evaluated on the basis of the laser intensity dependence of the degree of alignment. The obtained values are compared with recent theoretical calculations and are found to agree well within the experimental uncertainties.

(3) Effect of nuclear motion observed in high-order harmonic generation from D_2/H_2 molecules with intense multi-cycle 1300 nm and 800 nm pulses [3]

We investigate high-order harmonic generation from D_2/H_2 molecules with intense multi-cycle pulses centered both at 1300 nm (60 fs) and at 800 nm (50 fs) together with that from N_2/Ar as a reference. The experimental observations with 1300 nm pulses are different from those with 800 nm pulses both in spectral shapes and in intensity ratios I_{D_2}/I_{H_2} . The effect of nuclear motion in D_2 and H_2 is more distinctive for 1300 nm pulses than for 800 nm pulses. With multi-cycle pulses of 50-60 fs, the intensity ratios I_{D_2}/I_{H_2} are found to be higher for both 800 nm and 1300 nm pulses than those with few-cycle pulses of 8 fs, which is attributed partly to the contribution of the coupling between the $1s\sigma_g$ and $2p\sigma_u$ states in D_2^+ and H_2^+ molecular ions during the higher order returns of the electron wave packets.

- [1] Kosaku Kato, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Suppression of high-order-harmonic intensities observed in aligned CO_2 molecules with 1300-nm and 800-nm pulses," *Physical Review A* **84**, 021403(R) (4 pages) (2011). Selected for *Virtual Journal of Ultrafast Science* Vol. 10, Iss. 9 (2011).
- [2] Shinichirou Minemoto and Hirofumi Sakai, "Measuring polarizability anisotropies of rare gas diatomic molecules by laser-induced molecular alignment technique," *The Journal of Chemical Physics* **134**, 214305 (9 pages) (2011).
- [3] Hiroki Mizutani, Shinichirou Minemoto, Yuichiro Oguchi, and Hirofumi Sakai, "Effect of nuclear motion observed in high-order harmonic generation from D_2/H_2 molecules with intense multi-cycle 1300 nm and 800 nm pulses," *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* **44**, 081002 (5 pages) (2011) (Fast Track Communication).

29 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 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. This year, in collaboration with RIKEN, the Foundation for Coherent Photon Science Research was established. This is one of the Advanced Research Foundation initiatives from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. Within this initiative, we are developing intense and stable coherent light sources at a high repetition rate (That facility is named "Photon Ring").

This year the following activities included:

1. The quest for macroscopic quantum phenomena in photo-excited systems:
 - (a) Systematic observation of the Bose-Einstein condensation transition of excitons using a dilution refrigerator
 - (b) Low-temperature, many-body phenomena in electron-hole systems in diamond
 - (c) Study strongly-correlated many-body systems using ultra-cold atomic gases
2. The quest for non-trivial optical responses and development of applications:
 - (a) Photo-induced three-dimensionall chirality and acitive control of THz optical activity
 - (b) Vectorial control of THz oscillation in crystals with vector-field shaped optical pulses
 - (c) Terahertz vector beam generation using segmented nonlinear optical crystals
3. Development of novel coherent light sources and spectroscopic methods
 - (a) Mode-locked fiber lasers
 - (b) Accumulation of femtosecond laser pulses in passive cavities
 - (c) Higher-order photon correlation measurements using a photon-counting streak camera
 - (d) Established the Foundation for Coherent Photon Science Research

References

- [1] K. Yoshioka, E. Chae, and M. Kuwata-Gonokami: Transition to a Bose-Einstein condensate and relaxation explosion of excitons at sub-Kelvin temperatures, *Nat. Commun.*, **2**, 328 (2011).
- [2] T. Unuma, Y. Ino, K. Peiponen, E. M. Vartiainen, M. Kuwata-Gonokami, and K. Hirakawa, Causality-based method for determining the time origin in terahertz emission spectroscopy, *OPTICS EXPRESS*, **19** (19), 12759/1-7 (2011).
- [3] N. Kanda, T. Higuchi, H. Shimizu, K. Konishi, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, The vectorial control of magnetization by light, *Nat. Commun.*, **2**, 362 (2011).
- [4] J. Li, T. Higuchi, N. Kanda, K. Konishi, S. G. Tikhodeev, and M. Kuwata-Gonokami, *OPTICS EXPRESS*, **19** (23), 22550/1-7 (2011).

30 Nose Group

Research Subjects: Formation and function of neural networks

Member: Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka and Etsuko Takasu

The aim of our laboratory is to elucidate the mechanisms underlying the formation and function of neural networks, by using as a model, the simple nervous system of the fruitfly, *Drosophila*. A part of our recent research activity is summarized below.

1. Optical dissection of neural circuits that regulate larval locomotion

A major challenge in neuroscience today is to understand neural information processing in the brain. Techniques to acutely inhibit neural activity provide effective methods towards this goal. We are interested in the mechanism underlying the seamless activation of motor neurons in successive segments, particularly how it is generated by the central circuits in *Drosophila* larvae. For this investigation, we generated a transgenic line that allows halorhodopsin (NpHR) to be expressed in specific neurons and performed temporally and spatially restricted inhibition of motor neurons. NpHR is a chloride pump, which, when activated by a yellow light, suppresses the firing of neurons. Our results suggest that (1) Firing of motor neurons at the forefront of the wave is required for the motor wave to proceed to more anterior segments, and (2) The information about the phase of the wave, namely which segment is active at a given time, can be memorized in the neural circuits for several seconds.

2. Gene regulation of synaptic components

Communication between pre- and post-synaptic cells is a key process in the development and modulation of synapses. Reciprocal induction between pre- and postsynaptic cells involves regulation of gene transcription, yet the underlying genetic program remains largely unknown. To investigate how innervation-dependent gene expression in postsynaptic cells supports synaptic differentiation, we performed comparative microarray analysis of *Drosophila* muscles and identified 84 candidate genes that are potentially up- or downregulated in response to innervation. We found that one of the downregulated genes, *longitudinals lacking (lola)*, which encodes a BTB-Zn-finger transcription factor, is required for proper expression of glutamate receptors. When the function of *lola* was knocked down in muscles by RNAi, the abundance of glutamate receptors (GluRs), GluRIIA, GluRIIB and GluRIII, as well as that of p-21 activated kinase (PAK), was greatly reduced at the neuromuscular junctions (NMJs). *Lola* appears to regulate the expression of GluRs and PAK at the level of transcription, and the transcriptional level of *lola*, in turn, is downregulated by increased neural activity. *Lola* thus may coordinate expression of multiple postsynaptic components by transcriptional regulation.

References

- [1] Inada K., Kohsaka H., Takasu E., Matsunaga T., and Nose A.: Optical dissection of neural circuits responsible for *Drosophila* larval locomotion with halorhodopsin. PLoS One 6, e29019 (2011).
- [2] Fukui, A., Inaki, M., Tonoe, G., Hamatani, H., Homma, M., Morimoto, T., Aburatani, H. and Nose, A.: *Lola* regulates glutamate receptor expression at the *Drosophila* neuromuscular junction. Biol. Open, in press (2012).

31 Higuchi Group

Research Subjects: Motor proteins in in vitro, cells and mice

Member: Hideo Higuchi and Motoshi Kaya

Synthesis of multiple quantum dots in a particle

Quantum dots (QDs) show good photostability and strong fluorescence compared to conventional organic dyes and fluorescent proteins. However, they show irregular blinking which hinder observation continuously for long time. To overcome this drawback and to manufacture brighter fluorescence conjugate in order to observe motility of the fluorophore under non-invasive conditions, we created quantum-dot aggregation by quick freezing in the liquid N₂. This quantum-dot aggregation glows continuously in time and bright enough for imaging under non-invasive conditions. We were actually able to observe the aggregation on the opposite side of the mouse ear, and flowing in the blood vessel in mouse ear.

The power stroke and force generation of cytoplasmic dynein

Cytoplasmic dynein is a two-headed motor protein, which moves and generates force towards the minus end of microtubules (MT). Previous works have shown that a dynein motor domain takes the primed and unprimed conformations during the ATP hydrolysis cycle. Structural change from the primed to the unprimed conformation is widely believed to produce the power stroke of dynein, which principally drives dynein movement along MT. Here, we use optical tweezers to evaluate force produced by the power stroke. A dimer of the Dictyostelium dynein motor domain exerts the force up to 3 pN on a MT. However, this stall force of the dimer would be limited by the low unbinding force of the dynein (the external force needed to unbind dynein from a microtubule) because the motor domain immediately detached from a MT at load above the stall force. To increase the affinity, the MT binding site in the motor domain was replaced with the counterparts of human cytoplasmic dynein. The chimera motor domain resisted the force of 5 pN and a dimer of the chimera motor domain exerts the stall force up to 5 pN. These results suggest that the power stroke itself could produce the force more than 5 pN but the unbinding force limit the stall force of the dynein. Next, we made a heterodimer with one head always taking the unprimed conformation. The heterodimer moved processively along a MT but exerted only a small force (1 pN). Thus, taking the primed conformation would be important to bind the forward binding site on MT against high load.

Force measurement of recombinant human cytoplasmic dynein.

Dynein is a molecular motor that moves toward the minus-end of microtubules. Cytoplasmic dynein plays roles in positioning the Golgi complex and other organelles in cells, movement of chromosomes, and positioning the mitotic spindles during mitosis. Force generation by a dynein molecule, thus, is one of the important factors for understanding molecular properties of dynein. To examine the binding mode between dynein and a microtubule, we measured the unbinding force of dynein in various nucleotide conditions. We expressed truncated C-terminal motor domain of human cytoplasmic dynein using baculovirus expression system. We, thus, can eliminate possible effects of tail region and/or accessory proteins on the motor activity of dynein. Dynein with the biotin-tag was attached to avidin-coated polystyrene beads, and the bead was trapped by optical tweezers. The external load was imposed by moving the stage. The mean values of the unbinding force of strongly bound state of dynein were 8.6 - 11.3 pN upon backward (plus-end of microtubule) loading. These were about 30 % smaller when force was applied to the minus end of microtubules. Furthermore, we could observe the unbinding force of weakly bound state of dynein in the presence of ADP·Vi by increasing the loading rate. The unbinding force of dynein·ADP·Vi did not show directional dependency of load. These data indicate that dynein can support greater force than 7 pN and unbinds from microtubules easily toward the minus end of microtubules to which dynein moves.

Development of in vivo mouse skeletal muscle imaging

Skeletal muscles are important organs for the control of body movements and postural maintenance. How-

ever, there are a few in vivo experiments which elucidate the molecular mechanism in muscles. We developed the in vivo fluorescence imaging of mouse skeletal muscle which molecular structures are visualized by using the gene transfer of GFP-fused proteins. Not only the individual sarcomeres but also microtubule associated proteins in in vivo muscles were successfully visualized by expressing α -actinin-GFP and GFP-fused microtubule associated proteins and using the confocal microscope. In order to understand dynamics of these proteins during muscle contractions, we are currently developing the imaging feedback system to capture the same target images continuously during muscle contractions, where the images are normally disappeared within a few milli-seconds in $50 \times 50 \mu\text{m}$ of the microscopic view.

III

2011年度 物理学教室全般に関する報告

9 学部講義概要

1 2年生 冬学期

1.1 電磁気学Ⅰ：駒宮幸男

- | | |
|------------|-----------------------|
| 1. 特殊相対性理論 | 5. 電磁誘導と Maxwell の方程式 |
| 2. 相対論的運動学 | 6. 電磁場中での荷電粒子の運動方程式 |
| 3. 電場 | 7. 準定常電磁場と交流理論 |
| 4. 磁場 | 8. 相対論的な電磁気学の形式 |

1.2 解析力学・量子力学Ⅰ：常行 真司、上田正仁

- | | |
|-----------------------------------|------------------------|
| 1. ニュートンの法則からラグランジュ形式へ | 4.1 回転座標系とコリオリ力 |
| 1.1 ニュートンの法則 | 4.2 ローレンツ力 |
| 1.2 ガリレイ変換 | 4.3 摩擦のある系 |
| 1.3 オイラー-ラグランジュ方程式 | 5. ハミルトン形式と正準変換 |
| 1.4 一般化座標と拘束条件 | 5.1 ルジャンドル変換 |
| 1.5 ダランベールの原理 | 5.2 ハミルトニアンと位相空間 |
| 2. 最小作用の原理 | 5.3 正準方程式 |
| 2.1 最小作用の原理 | 5.4 正準変換と母関数 |
| 2.2 オイラー-ラグランジュ方程式の導出 | 5.5 正準変換の例 |
| 2.3 自由粒子のラグランジアン | 5.6 ポアソン括弧式 |
| 2.4 相互作用する質点からなる孤立系のラグランジアン | 5.7 ハミルトン-ヤコビの方程式 |
| 3. 対称性と保存則 | 5.8 リウヴィルの定理 |
| 3.1 時間の一様性 → エネルギー保存則 | 6. 量子力学の基礎 |
| 3.2 空間の一様性 → 運動量保存則 | 6.1 アインシュタイン-ド・ブロイの関係式 |
| 3.3 空間の等方性 → 角運動量保存則 | 6.2 シュレーディンガー方程式 |
| 3.4 循環座標 | 6.3 重ね合わせの原理 |
| 3.5 ネーターの定理 | 6.4 オブザーバブル |
| 4. さまざまなラグランジアン：回転座標系、電磁場、摩擦のある系論 | 6.5 対称性と保存則 |
| | 6.6 ヒルベルト空間と状態ベクトル |

7. 波動関数の解釈**7.1** コペンハーゲン解釈**7.2** 多世界解釈**7.3** 観測問題**8. 時間発展と表示****8.1** シュレーディンガー表示**8.2** ハイゼンベルグ表示**8.3** 相互作用表示**9. 不確定性関係****9.1** ハイゼンベルグの不確定性関係**9.2** 非可換観測量の同時測定**9.3** 一般の非可換観測量の間の不確定性関係**9.4** 時間とエネルギーの不確定性関係**10. 簡単な例****10.1** 調和振動子**11.2** トンネル効果と量子反射**1.3 物理実験学 : 藤森 淳, 酒井 広文****1. 序論 (物理実験の魅力)****2. 単位****2.1** SI 基本単位の定義**2.2** 代表的な物理量の単位**2.3** 各種の常用単位系とその変換**3. 各種の計測法****3.1** 光の計測

出力の測定、パルス幅の測定、超高速ストリークカメラ、強度相関法

3.2 放射線の計測

放射線の基礎、放射線と物質の相互作用、放射線検出器

4. 実験の基礎技術**4.1** 実験環境技術

真空、低温、磁場、強電場

4.2 試料作製技術**5. 誤差論**

実験誤差、確率統計、最小二乗法

6. 実験レポートや論文を書く上での注意事項**1.4 物理数学 I : 小形正男****1. 複素関数の性質****1.1** 複素数の物理学における意義**1.2** 複素関数とリーマン面**1.3** 初等関数と収束半径**1.4** 対数関数**2. 複素関数の微分と正則性****2.1** 微分可能性**2.2** コーシー・リーマンの関係式**2.3** 調和関数**2.4** 解析関数**3. 複素積分****3.1** 定義といくつかの性質**3.2** コーシーの積分定理**3.3** 留数**3.4** 定積分への応用**4. コーシーの積分定理の応用****4.1** コーシーの積分公式とテイラー展開**4.2** ローラン展開**4.3** 孤立特異点と留数**4.4** 解析接続**4.5** δ 関数と積分の主値**5. 等角写像とその応用****5.1** 写像としての正則関数**5.2** 等角写像の例**5.3** ポテンシャル問題への応用

6. ガンマ関数とベータ関数

- 6.1 ガンマ関数の解析的性質
- 6.2 無限乗積表示とハンケル表示
- 6.4 漸近展開と鞍点法：Stirling の公式
- 6.5 ベータ関数
- 6.6 ディガンマ関数、 ζ 関数

7. フーリエ変換と Sturm-Liouville の理論

- 7.1 汎関数微分
- 7.2 フーリエ級数とフーリエ変換
- 7.3 固有関数展開
- 7.4 δ 関数のフーリエ変換

1.5 物理数学 II : 浜口幸一

講義の目標・概要 量子力学や電磁気学など物理学一般に広く用いられる数学的道具・手法を解説する。

1. 偏微分方程式と Fourier 変換

波動方程式、熱伝導方程式など

2. 特殊関数論

ベッセル関数、ルジャンドル多項式、超幾何関数など

3. 角運動量の代数的性質：回転群

2 3年生 夏学期

2.1 電磁気学 II : 高瀬 雄一

1. Maxwell 方程式

- 1.1 微視的描像と巨視的描像
- 1.2 電磁場とポテンシャル

2. 静電場

- 2.1 誘電体
- 2.2 境界値問題の解法
- 2.3 Laplace 方程式の一般解
- 2.4 Green 関数

3. 静磁場

- 3.1 磁性体
- 3.2 境界値問題の解法
- 3.3 強磁性体

4. 準静的問題

- 4.1 電磁誘導

4.2 電磁場の拡散

4.3 表皮効果

4.4 渦電流

5. 電磁場の保存則

5.1 Poynting の定理

5.2 インピーダンス

6. 物質中の電磁波

6.1 誘電率と屈折率

6.2 分散と吸収

6.3 プラズマ中の波動

6.4 群速度

6.5 波束の拡散

6.6 因果律

2.2 量子力学 II : 初田 哲男

1. 3次元空間でのシュレーディンガー方程式

量・角運動量

- 1.1 3次元のシュレーディンガー方程式, 動径運動

1.2 角運動量演算子とその性質

- 1.3 方向量子化の直感的描像
- 1.4 球面調和関数とその性質
- 1.5 動径シュレーディンガー方程式, 動径量子数と主量子数
- 1.6 水素原子のエネルギー準位, Rydberg 定数と種々の系列
- 1.7 水素原子の動径波動関数とラゲール多項式
- 1.8 ビリアル定理
- 1.9 3次元調和振動子

2. スピン

- 2.1 スピンとパウリ行列、スピン波動関数
- 2.2 ゼーマン効果
- 2.3 一様磁場中でのスピンのラーモア才差運動
- 2.4 スピン共鳴

3. 角運動量、対称性と保存則

- 3.1 角運動量の合成則と Clebsch-Gordan 係数

- 3.2 ウィグナー・エッカルトの定理
- 3.3 空間回転、空間並進、空間反転とその生成子
- 3.4 スピン波動関数の変換性
- 3.5 時間反転, Wigner の定理と反ユニタリー演算子

4. 様々な近似法

- 4.1 Rayleigh-Ritz の変分法
- 4.2 Rayleigh-Schroedinger の摂動論
- 4.3 Brillouin-Wigner (BS) の摂動論
- 4.4 縮退のある場合の摂動論
- 4.5 水素原子の Stark 効果 (基底状態の場合)
- 4.6 水素原子の Stark 効果 (2s,2p 状態の場合)
- 4.7 時間依存の摂動論とフェルミの黄金律
- 4.8 WKB 法と接続公式
- 4.9 ガモフの透過因子、ボーア・ゾンマーフェルトの量子化条件

2.3 現代実験物理学 I : (前半) 江尻 晶 (後半) 福山 寛

前半は、物理実験 I、II の理解を深めることを目的に、歴史的な実験も紹介しつつ、基礎的な物理実験技術とその原理を主に解説する。後半は、物性物理学分野の実験技術とその物理について、歴史的な実験や最先端技術の紹介も交えながら回折する。

物理実験技術の基礎とその原理 (江尻担当)

1. 回路

- 1.1 アナログ回路の雑音、応答
- 1.2 雑音との戦いの歴史

2. 真空

- 2.1 真空の歴史
- 2.2 真空を作る、測る
- 2.3 真空容器、表面洗浄

2.4 流体力学 : 佐野 雅己

1 連続体の力学

2 様々の流れと流体運動の記述

2. 可視赤外分光

- 3.1 分光の歴史
- 3.2 各種分光法と性能
- 3.3 光束、立体角、レンズ
- 3.4 PMT と Photo Diode

物性実験技術とその物理 — 物質の多様性を探る (福山担当)

4. 極限実験環境の実現と計測

超高真空、極低温、強磁場など

5. 物性測定法とその原理

粒子線回折、走査プローブ、熱測定、磁気測定、伝導度測定など

3 流体力学の基礎方程式

4 完全流体の運動

5 粘性流体の運動

6 低レイノルズ数と高レイノルズ数の流れ

7 流れの安定性、カオス

8 乱流

2.5 統計力学 I : 宮下 精二

1. 熱力学 (復習として行う)

1.1 熱力学の基本概念

1.2 熱力学第一法則

1.3 熱力学第二法則

1.4 熱力学第三法則

1.5 熱力学関数

2. 統計力学の手法

2.1 小正準集団

2.2 正準集団

2.2 大正準集団

3. 量子統計力学

3.1 量子統計力学

3.2 黒体輻射

3.3 量子磁性体

3.4 理想フェルミ気体

3.5 理想ボース気体

3 3年生 冬学期

3.1 物理数学 III : 松尾 泰

1. 群論

1.1 物理学と対称性

1.2 基礎概念

1.3 指標とその直交性

1.4 点群

1.5 分子振動への応用

1.6 リー群とリー代数

1.7 回転群とスピノル

1.8 $SU(3)$ の表現とクォーク模型

2. 微分形式

2.1 外積代数

2.2 微分形式とその基本的な性質

2.3 ベクトル解析との関係

2.4 電磁気学への応用

3.2 量子力学 III : 大塚 孝治

1. 散乱問題

1.1 散乱断面積

1.2 ポテンシャルによる散乱

1.3 グリーン関数による散乱振幅の計算

1.4 ボルン近似

1.5 量子論での断面積と光学定理

1.6 ボルン近似の成り立つ場合

1.7 拡がりのあるポテンシャル源による散乱

1.8 量子論での断面積と光学定理

2. 部分波展開による散乱問題

2.1 部分波展開と位相のずれ

2.2 低いエネルギーでの散乱

2.3 部分波展開による断面積

2.4 共鳴散乱

2.5 クーロン散乱

3. 同種粒子系

3.1 同種粒子とは

- 3.2 多数の同種粒子から成る系
- 3.3 スレーター行列式とパウリの排他律
- 3.4 ボソンから成る系
- 3.5 フェルミオンの第2量子化
- 3.6 第2量子化による物理量の表現
- 3.7 2体演算子の第2量子化による表現

- 3.8 ハートリー・フォック法
- 3.9 原子の中の電子系の構造

4. 経路積分

- 4.1 経路積分の考え方
- 4.2 シュレーディンガー方程式の導出

3.3 固体物理学 I : 島野 亮

1. 固体の凝集機構

- 1.1 ファン・デル・ワールス結合
- 1.2 金属結合
- 1.3 共有結合
- 1.4 イオン結合
- 1.5 水素結合

2. 結晶構造

- 2.1 単位格子
- 2.2 ブラベー格子
- 2.3 逆格子
- 2.4 X線回折
- 2.5 ブリリュアン・ゾーン

3. 自由電子気体

- 3.1 状態密度
- 3.2 フェルミエネルギー
- 3.3 電子気体の比熱
- 3.4 静電遮蔽

4. 周期ポテンシャル中の電子

4.1 ブロッホの定理

- 4.2 ほとんど自由な電子の近似
- 4.3 空格子の近似
- 4.4 強束縛近似
- 4.5 バンド構造と金属・絶縁体

5. 結晶中の電子の運動

- 5.1 有効質量
- 5.2 群速度
- 5.3 一様電場下でのブロッホ電子の運動
- 5.4 正孔

6. 金属と半導体

- 6.1 金属とフェルミ面
- 6.2 電気伝導
- 6.3 ホール効果
- 6.4 電子と正孔の統計
- 6.5 真性半導体のキャリア密度
- 6.6 ドープされた半導体のキャリア密度

3.4 現代実験物理学 II : 早野龍五, 横山 将志

素粒子・原子核・宇宙物理学実験の測定法の基礎を学ぶ

1. なぜ実験するのか

2. 素粒子標準理論に至る道

3. 単位系, 相対論的運動学, 断面積, 寿命

4. 粒子と物質の相互作用と粒子検出器

5. 加速器

6. 誤差と統計処理

3.5 電磁気学 III : 蓑輪 眞

1. 電磁波概説

1.1 電磁波のエネルギーと運動量

2. 電磁波の伝播

2.1 電磁波の反射・屈折・回折

2.2 Brewster 角

2.3 Evanescent 場

2.4 導波管

2.5 空洞共振器

2.6 光ファイバー

2.7 プラズマ中の電磁波

3. 電磁波の放射

3.1 遅延ポテンシャル

3.2 双極子放射

3.3 アンテナ

4. 荷電粒子の放射する電磁波

4.1 Lienard-Wiechert のポテンシャル

4.2 シンクロトロン軌道放射

4.3 チェレンコフ放射

4. 電磁気学と特殊相対論

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ックス

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ックス

7. バイオイメージング、生体分子計測

8. 脳・神経系の生物物理

3.7 統計力学 II : 青木 秀夫

1. 相転移

1.1 秩序パラメータと対称性の破れ

1.2 二次相転移と Ginzburg-Landau 理論

1.3 相転移における臨界指数と空間次元

2. 同種粒子系の統計力学

2.1 有限温度における Fermi 気体

2.2 有限温度における Bose 気体

2.3 多体問題と平均場近似

2.4 Bose-Einstein 凝縮と超伝導

3. 非平衡統計力学への序論

3.1 輸送現象と Boltzmann 方程式

3.2 線形応答理論

4 4年生 夏学期

4.1 場の量子論Ⅰ：諸井 健夫

1. 相対論的量子力学

- 1.1 電磁場の相対論的取り扱い
- 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

2. 特殊相対性理論

- 2.1 Klein-Gordon 場の量子化
- 2.2 Dirac 場の量子化
- 2.3 電磁場の量子化

4.2 サブアトムック物理学：早野龍五

学部・大学院共通講義として新設されたこの講義は、原子核物理学と素粒子物理学の入門として位置づけられる。

1. 原子核の大局的性質

- 1.1 原子核の安定性
- 1.2 原子核による電子の散乱
- 1.3 原子核の形状
- 1.4 準弾性散乱

2. 核子の性質

2.1 核子による電子散乱

2.2 核子の深部非弾性散乱

3. 標準模型

- 3.1 クォーク，グルオンと強い相互作用
- 3.2 弱い相互作用の現象論

4. サブアトムック物理の研究手段

- 4.1 加速器
- 4.2 放射線と物質の相互作用
- 4.3 放射線検出器

4.3 宇宙物理学：須藤 靖

1. 宇宙物理学とは

- 1.1 窮理学
- 1.2 寺田寅彦語録
- 1.3 自然界の論理構造
- 1.4 宇宙物理学とは何か

2. 自然界のスケール

- 2.1 物理定数の次元とスケール
- 2.2 自然界の特徴的スケール

3. 宇宙の階層構造

- 3.1 地球：惑星
- 3.2 太陽：恒星
- 3.3 太陽系

3.4 太陽系外惑星

3.5 天の川：我々の銀河系

3.6 銀河

3.7 銀河群

3.8 銀河団

3.9 銀河宇宙

3.10 宇宙の階層構造のまとめ

4. 物理法則と天体

- 4.1 物理法則と初期条件
- 4.2 木星型（ガス）惑星
- 4.3 地球型（岩石）惑星
- 4.4 恒星（主系列星）
- 4.5 白色矮星

4.6 中性子星

4.7 銀河

4.8 銀河団

4.9 宇宙の階層と基本物理法則

5. 恒星

5.1 光度と等級

5.2 黒体輻射と色指数

5.3 ポリトロープ星

5.4 ヘルツシュプリング・ラッセル図

5.5 元素の起源

6. コンパクト天体

6.1 白色矮星

6.2 中性子星

4.4 プラズマ物理学：牧島 一夫

1. プラズマ物理学の意義

2. 磁場の無いプラズマ

3. 単一荷電粒子の運動

4. プラズマの運動方程式

5. 磁気プラズマ中の電流

6. 磁気プラズマの平衡と安定性

7. プラズマ中の波動：磁場の無い場合

8. プラズマ中の波動：磁場のある場合

4.5 固体物理学Ⅰ：内田 慎一

1. バンド理論と結晶結合（基底状態）

1.1 ブロッホ電子、結晶運動量、電子と正孔

1.2 バンド理論、金属と絶縁体、周期表

1.3 半導体、化合物半導体

1.4 結晶結合

2. 固体の励起状態と物性

2.1 電子－正孔対励起

2.2 外場に対する応答

3. 金属の安定性・不安定性

3.1 フェルミ液体

3.2 金属の不安定性、磁性・超伝導

4.6 量子光学：五神 真

1. 光と物質

1.1 誘電媒質中の電磁波

1.2 2準位原子と光の相互作用

1.3 非線形光学とレーザー

2. 光の量子論

2.1 輻射場の量子性

2.2 輻射場の量子状態

2.3 量子化された輻射場と物質の相互作用

3. トピックス

5 4年生 冬学期

5.1 現代物理学入門：村尾 美緒、溝川貴司

1. エンタングルメントと量子情報

1.1 概論

- 1.2 量子情報を学ぶために必要な量子力学の復習
- 1.3 エンタングルメント
- 1.4 LOCC とエンタングルメントの定性的・定量的解析
- 1.5 量子情報処理とエンタングルメントの関連
- 1.6 量子テレポーテーションと量子テレクロニング
- 1.7 測定ベース量子計算と量子鍵配布

5.2 素粒子物理学：浅井祥仁

- 1. 単位系、概論
- 2. クォークモデル
- 3. Dirac 方程式
- 4. Dirac 方程式とスピン
- 5. 反応の運動学

2. 強相関電子論

- 2.1 バンド理論、電子ガス、1 電子近似
- 2.2 多重項構造、配位子場理論
- 2.3 モット絶縁体でのスピン・軌道の秩序と無秩序
- 2.4 強相関金属での電子質量増大（重い電子系）
- 2.5 スピン・電荷・軌道揺らぎと超伝導

5.3 生物物理学特論：樋口 秀男 北尾彰朗 野口博司

- 1. 蛋白質と膜の生物物理学
 - 1.1 蛋白質及び膜の生物物理学とは
 - 1.2 蛋白質立体構造決定の方法
 - 1.3 蛋白質のダイナミクスと折れ畳み
 - 1.4 蛋白質のシミュレーションとデザイン
- 1.5 生体膜の構造と機能
- 1.6 膜曲面の熱力学
- 1.7 膜の相転移
- 1.8 赤血球のダイナミクス

5.4 固体物理学 II：岡本 徹

- 1. 格子振動
 - 1.1 フォノン
 - 1.2 デバイ模型
 - 1.3 比熱と諸物性
- 2. 金属および半導体における輸送現象
 - 2.1 電気伝導
 - 2.2 半導体中の電子と正孔
 - 2.3 熱電効果と熱伝導
 - 2.4 半導体デバイス
- 3. 低次元電子系の量子現象
 - 3.1 量子ホール効果
 - 3.2 メゾスコピック伝導
- 4. 磁性
 - 4.1 反磁性と常磁性
 - 4.2 スピン間相互作用
 - 4.3 磁気秩序
 - 4.4 磁気デバイス
- 5. 超伝導と超流動
 - 5.1 マイスナー効果

5.2 BCS理論**5.3 ジョセフソン効果****5.4 超流動****5.5 原子核物理学：櫻井博儀****1. 原子核の大きさと密度****2. 原子核の質量と遷移****3. フェルミガスと平均ポテンシャル****4. 調和振動子模型と魔法数****5. 殻模型****6. 核力の基礎****7. アイソスピン対称性****8. 集団運動****9. 核分裂、核融合、放射線****5.6 物性物理学特論 (大学院「表面物理学」共通)：長谷川修司、小森文夫、****1. 概論 —ナノサイエンス・ナノテクと表面—****2. 表面構造****2.1 表面超構造と相転移****2.2 回折法****2.3 顕微鏡法****2.4 動的過程****3. 表面電子状態****3.1 表面電子状態・トポロジカル表面状態****3.2 (逆) 光電子分光法****3.3 トンネル分光法****3.4 光電子分光によるバンド分散・原子結合状態測定****3.5 時間分解測定****4. 走査トンネル顕微鏡****4.1 走査トンネル顕微鏡の原理****4.2 表面原子構造観察****4.3 局所電子状態測定****4.4 表面バンドの観測****4.5 表面電子定在波****4.6 原子マニピュレーション****5. 表面電子輸送****5.1 表面空間電荷層の2次元電子系****5.2 表面電子バンドの2、1次元電子系****5.3 表面スピン輸送****6. 表面超薄膜磁性****6.1 磁気モーメントと相転移****6.2 強磁性超薄膜****6.3 表面ナノ強磁性体****6.4 スピンダイナミクス****5.7 電子回路論：坪野 公夫****1. 線型応答系****1.1 フーリエ変換****1.2 ラプラス変換****1.3 出力の積分表示****1.4 伝達関数****1.5 線型系と因果律****2. 信号と雑音の処理****2.1 パワースペクトル****2.2 自己相関関数****2.3 最適フィルター****2.4 積算平均効果****3. MATLAB 入門****3.1 コマンド入力の基本****3.2 行列の作り方**

3.3 演算**3.4 グラフィックス****4. デジタル信号処理****4.1 有限時間データであるための効果****4.2 離散時間データである効果****4.3 デジタル信号のパワースペクトル****4.4 z 変換****4.5 デジタルフィルタ****5. 回路の安定性****5.1 ナイキストの安定条件****5.2 ボーデ線図とナイキスト線図による安定性判別法****5.3 フィードバック系の特性****5.4 フィードバック系の補償****6. 低雑音回路****6.1 増幅器の雑音****6.2 A/D 変換の基礎****6.3 周波数安定性—アラン分散****5.8 化学物理学：山本 智****1. 原子の電子構造とスペクトル****1.1 水素原子と水素様原子****1.2 多電子系 1：ヘリウム原子****1.3 多電子系 2：ハートリー・フォック法による取り扱い****1.4 組立の原理****1.5 スピン軌道相互作用、LS 結合、jj 結合****1.6 原子スペクトル****2. 分子の対称性と群論****2.1 点群の分類****2.2 対称操作の行列表現****2.3 既約表現と可約表現****2.4 指標表による表現の簡約****2.5 直積の表現****2.6 群論の応用例****3. 分子の電子構造****3.1 核と電子の運動の分離****3.2 原子価結合法と分子軌道法****3.3 二原子分子の電子状態****3.4 非経験的分子軌道法計算****3.5 配置間相互作用****3.6 近似的分子軌道法****3.7 分子軌道と化学反応****4. 分子スペクトルの概要****4.1 回転スペクトル****4.2 振動スペクトル****4.3 電子スペクトル****4.4 光解離、前期解離、光イオン化****5. 分子間相互作用****5.1 配光力、誘起力****5.2 分散力****5.3 分子間力の現れ****5.3 ファン・デル・ワールス分子とクラスター****5.4 分子間力と化学反応**

10 各賞受賞者紹介

1 小林孝嘉 名誉教授：フンボルト賞（Humboldt Research Award）

受賞対象業績 “Development of ultrashort pulse laser and its applications to ultrafast spectroscopy”

小林孝嘉名誉教授（現電気通信大学特任教授、及び同大学先端超高速レーザー研究センター・センター長）がドイツのアレキサンダー・フォン・フンボルト財団よりフンボルト賞（Humboldt Research Award）を受賞されました。

小林先生は長年にわたり超短パルスレーザーの開発及びそれを用いた基礎・応用研究を推進し世界をリードする成果を上げておられます。今回受賞対象となった上記の業績の具体的内容は、（１）世界最短パルス幅可視光レーザーの開発、（２）超高性能スペクトル特性紫外・深紫外超短パルス光の開発、（３）コヒーレント軟 X 線単一パルス発生用に重要な搬送波包絡位相 (CEP) 安定化レーザーの開発、（４）超高感度同時測定分光法による振動実時間分光・遷移状態分光研究、及び（５）同時観察レーザー顕微鏡高性能超短パルス多色レーザーの開発であり、関連する分野に極めて大きなインパクトを与えました。

2 小林孝嘉 名誉教授：第 64 回日本化学会賞

受賞対象業績「超高速分光法の開発と極短寿命種・遷移状態の測定による化学反応過程」

小林孝嘉名誉教授（現電気通信大学特任教授、及び同大学先端超高速レーザー研究センター・センター長）が日本化学会より第 64 回日本化学会賞を受賞されました。

小林先生は自ら開発した極限的超短パルスレーザーと広帯域検出器を構成要素とし、広帯域極限的超高速分光装置を開発されました。さらにそれを用いて、従来はきわめて困難、あるいは不可能とされてきた遷移状態を含めた超高速ダイナミクスを実時間で追跡する方法論を確立し、実験研究者の永年の夢であり、理論研究のみであった遷移状態の構造を測定する事に成功しました。これにより、化学反応遷移状態の構造情報を含む超高速反応の機構解明に多大な貢献をなさいました。さらに、ノーベル賞授賞対象の絶対位相安定化法と異なり、その 3 つの困難点を解決した新安定化法を開発し、X 線レーザー開発に重要な役割を持つ高強度フェムト秒レーザーの絶対位相安定化を実現しました。

3 大塚孝治教授： GENCO 会員賞

物理学専攻（兼原子核科学研究センター長）の大塚孝治教授がドイツの GSI（重イオン研究所）による GENCO 会員賞（Membership Award）を受賞しました。GSI はドイツのフランクフルト郊外のダルムシュタットにあり、原子核、素粒子、生物に関わる物理学、核化学、核医学の研究を進める、ドイツでも屈指の大きな研究所です。GENCO とは GSI Exotic Nuclei Community の略称であり、GENCO 会員賞は 2006 年から毎年、国際的な委員会によって選ばれた、原子核に関する科学に於いて顕著な業績を挙げた 1 ～ 3 名の研究者に対して授与されてきました。今回、テンソル力や 3 体力などの核力の特徴に基きエキゾチック原

子核の存在限界や殻進化などの新たな性質を予言・説明し、又、殻模型計算を始めとする様々な原子核構造の理論研究を進めてきた大塚教授に授与されることになりました。

4 宮下精二教授： フランスベルサイユ大学名誉博士号 Docteur Honoris Causa

宮下精二教授がフランスベルサイユ大学から名誉博士号 Doctuer Honoris Causa を授与されました。今回の名誉博士号は、社会学、国際関係、数学、映画文化、自然科学、歴史学に対してであり、米国3名、ドイツ、イスラエル、日本から各1名が授与されました。宮下教授は、相転移に関する統計力学、非平衡統計力学、量子スピン系ダイナミクスの研究において、グルノーブル研究所との単分子磁性体の研究、ベルサイユ大学とのスピנקロスオーバー相転移の研究など、長年の日仏の共同研究を評価されての授与です。

5 初田哲男教授： 第17回 日本物理学会論文賞

核力を量子色力学 (QCD) から明らかにすることは、原子核物理学における長年の懸案事項でした。初田氏は、格子 QCD 計算により、2007 年に世界で初めて核力を第一原理的に導くことに成功しました。今回の受賞論文、S. Aoki, T. Hatsuda, N. Ishii, “Theoretical Foundation of the Nuclear Force in QCD and its applications to Central and Tensor Forces in Quenched Lattice QCD Simulations” (Prog. Theor. Phys. 123 (2010), 89-128) には、この核力ポテンシャルを導く手法の詳細な理論的な基礎づけが与えられています。核力やハイペロンなどに働く相互作用を QCD から定量的に明らかにすることは、通常の原子核だけでなく中性子星コアの物質組成や元素の起源を理解する上でも重要であり、京コンピュータの本格稼動ともあいまって、今後さらなる進展が期待されています。

6 平野哲文客員准教授： 第1回 Zimanyi Nuclear Theory Medal : 日本表面科学会第15回学会賞

平野客員准教授が、第1回 Zimanyi Nuclear Theory Medal を受賞されました。この賞はハンガリーの著名な高エネルギー物理学者、故 Zimanyi 博士の名を冠したもので、40 歳以下で高エネルギー原子核物理の発展に多大な寄与をした若手理論物理学者1名に与えられるものです。授賞理由は以下の通りです。”For his outstanding contributions to heavy ion phenomenology through his extensive work on relativistic hydrodynamics applied to the understanding elliptic and radial flow as well as jet-medium observables and on quantifying the interplay between initial state effects, full three dimensional ideal fluid expansion, and the role of final state nonequilibrium decoupling dynamics.”

7 川口由紀 助教（上田研）： 第4回井上リサーチアワード

川口氏は、スピンという内部自由度を持った原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) の量子多体効果に関する研究に対して、井上リサーチアワードを受賞されました。井上リサーチアワードは自然科学の基礎的研究で優れた業績を挙げた将来性豊かな若手研究者の支援を目的としたものであり、物理学分野では川口氏が初めての受賞になります。通常の BEC とは異なり、メゾスコピック系で実現されるフラグメ

ント BEC では複数の 1 粒子状態にマクロな数の原子が凝縮する結果、非自明な凝縮状態が生じます。川口氏は、マクロな系からメソスコピック系へと系のサイズを連続的に変化させることで、対称性の破れ・回復、すなわちフラグメント BEC の出現と崩壊が制御できる点に着目し、量子揺らぎおよび熱揺らぎによる対称性の破れと回復のダイナミクスを明らかにする研究を進めています。このようなダイナミクスの研究は、宇宙・高エネルギー物理から超伝導・超流動まで自発的に対称性の破れた系全般に広く波及効果を及ぼすものと期待されます。

8 松永隆佑 助教（島野研）：第 28 回井上研究奨励賞

松永隆佑助教は、「半導体カーボンナノチューブの励起子構造に関する研究」で顕著な業績を挙げ、それをまとめた博士論文（京都大学 2010 年）が高く評価されて井上研究奨励賞を受賞した。松永氏は、顕微分光の手法を用いて一本のカーボンナノチューブを対象にアハラノフ・ボーム効果の観測、光学遷移禁制の暗励起子の発光の観測に成功し、励起子構造を精密に決定した。続けて、励起子にさらに一つの正孔が結びついた 3 体の束縛状態であるトリオン（荷電励起子）の観測に初めて成功した。有機物質等の交換相互作用が非常に強い物質系において、多体粒子系がどのような多体の束縛状態をとりうるかは未解明の問題であり、カーボンナノチューブのトリオンの発見はその物性解明に向けての大きな進展になると期待されている。

9 竹内一将 助教（佐野研）：第 28 回井上研究奨励賞

相転移現象はスケール不変法則の理解は統計力学の中心的課題の一つである。平衡統計力学においては、20 世紀半ばにスケール不変性に注目することにより、相転移における普遍挙動が実験と理論の両面から確立された。一方、非平衡系については理論上の進展にもかかわらず、実験的な検証が極めて困難であった。例えば、非平衡系相転移のユニバーサリティーが見つかる可能性が指摘され、多くの実験が行われたが、どれも不十分な結果に終わり、確実と言える実験は長い間存在しなかった。竹内氏は、スケール不変な非平衡現象に関する過去の実験研究に共通する問題点を見出し、液晶電気対流の乱流状態がそれを全て克服した理想的な系であることを看破した。この点に着目し徹底的な実験を行った結果、既に理論の一大分野にまで成長していた吸収状態転移と界面成長の両現象に対して、竹内氏は比類なき精度の実験証拠を提示するとともに、対応する理論を世界で初めて定量的に検証することに成功した。具体的な成果として、1) 吸収状態転移における普遍挙動の初めての実験証拠と徹底検証。2) 界面成長における普遍挙動の最高精度実験と普遍揺らぎの初の実験証拠。3) 大自由度カオスの集団挙動と有効自由度の研究手法の開発が挙げられる。

10 吉岡孝高 助教（五神研）：第 6 回日本物理学会若手奨励賞

吉岡孝高氏は、半導体中の励起子系について、水素原子様のエネルギー準位構造を活用した精密なレーザー分光法を開発した。これを用いて、長年励起子ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) の検証に向けて研究が行われてきた、亜酸化銅結晶における光学不活性な励起子-パラ励起子-の有効質量や寿命、励起子間の二体非弾性散乱断面積を初めて定量的に計測した。この結果から、BEC 実現のためにはサブケルビン領域まで温度を下げる必要があることを突き止めた。実際に励起子を 3 次元トラップ中で 0.8 ケルビンまで冷却し、理想ボース粒子系の BEC 転移点近傍において、BEC 転移の傍証をとらえることに成功した。

11 竹内一将 助教（佐野研）：第6回日本物理学会若手奨励賞

竹内一将氏は、Directed Percolation の臨界的性質、および、界面成長における界面幅のゆらぎの分布について、それぞれ決定的な実験を行い、法則の普遍性を確立した。前者のテーマである Directed Percolation は、理論や数値実験の膨大な研究にも関わらず、それに対応する明快な実験がなかった。そこで、「Directed Percolation を示す実験系を構築せよ」という未解決問題が提示されていた。多くの挑戦が完全解答に至れない状況に対して、竹内氏は誰もが満足しうる結果に到達した。後者では、可解格子模型で近年研究されてきた高度に数学的な分布関数がテーマである可解模型の研究者グループの範囲で急速に進展した問題に対して、それが数学だけで閉じていないことを他に先駆けて鮮やかに示し、分布関数レベルの普遍性が確かに存在することを実験により示した。問題設定自体がきわめて独創的であり、可解模型研究の最新成果と実験による可能性の両方を熟知しないと問題を認識することさえも不可能である。そして、竹内氏は、その問題に対して明快な実験結果を得ることにより、分布関数レベルの普遍性が確かに存在することを明示した。これらは、問題の背景の理解、理論的状況の把握、実験の実行、実験データの処理の全てにおいて極めて高いレベルに達しているからこそ成し遂げられた成果である。そしてこの研究成果は、非平衡相転移、非平衡統計力学、数理解物理の各分野に大きな影響を与えていることから若手奨励賞が授与された。

12 渡邊紳一氏（元島野研）：第6回日本物理学会若手奨励賞

渡邊紳一氏は、物理学教室助教在任中に行った「時間分解テラヘルツ分光計測による低次元有機物質の非平衡キャリア動力学の研究」が高く評価されて日本物理学会若手奨励賞（領域5）を受賞した。主要な成果は以下の三つである。(1) 通常大きなスペースを必要とするテラヘルツ分光系を極端に微小化することに成功し、有機導体などの微小試料の計測や、極低温や強磁場などの極限環境下での計測に道を拓いた。(2) 擬1次元有機導体のスピン密度波状態のエネルギーギャップの観測に成功し、光励起によるスピン密度波融解ダイナミクスを明らかにした。(3) 世界最高強度のテラヘルツ電場パルスの発生に成功し、これをカーボンナノチューブに適用して、テラヘルツ周波数帯の高次非線形光学過程を観測した。一連の研究はテラヘルツ波領域の物性研究に大きく貢献するとともに、テラヘルツ非線形光学の道を拓くものとして高く評価された。

13 榎戸輝揚氏（元牧島・中澤研）：第6回日本物理学会若手奨励賞

銀河系やマゼラン雲にある約20個のX線源は、マグネターと呼ばれる特殊な中性子星で、 10^{13-15} G の超強磁場を消費してX線を放射すると考えられる。榎戸博士は稼働中の宇宙X線衛星「すざく」を用い、約10個のマグネターを1–100 keV の広帯域で観測した結果、それらが共通して、軟成分と硬成分から成る特異なX線スペクトルを示すこと、またその形状がマグネターの特性年齢と強く相関して進化することを、世界で初めて明らかにした。さらに同博士は、マグネターの硬X線成分は、電子陽電子の対消滅などで生じたガンマ線が、超強磁場中で2光子分裂を繰り返すことで作られたという斬新な学説も提唱した。これらの結果は、マグネターが真に超強磁場をもつという解釈を強化するものであり、天体物理学だけでなく、核物質とその磁性、超強磁場の物理学などに、広くインパクトを与えるものである。

14 石徹白晃治氏（元坪野研）：第6回日本物理学会若手奨励賞

石徹白 晃治氏（現東北大学）は、博士論文“Search for low-frequency gravitational waves using a superconducting magnetically-levitated torsion antenna”によって第6回（2012年）日本物理学会若手奨励賞を

受賞しました。彼は TOBA(Torsion Bar Antenna) とよばれる超伝導磁気浮上型のねじれアンテナを開発し、これを用いて観測を行うことにより 0.1Hz 帯における重力波探索を行いました。これまではこのような低周波帯の重力波検出は地上では困難とされていました、彼の研究はこの限界を打ち破る可能性を示しました。このように新しい観測装置を用いて初めて低周波における重力波の上限を提出したことが評価されての受賞となりました。

15 山本直希氏 (元初田研): 第 28 回 井上研究奨励賞

2010 年 3 月に理学系研究科 (物理学専攻) において博士号を取得した山本直希氏が、過去 3 年間に優れた博士論文を提出した若手研究者に対して送られる井上研究奨励賞を受賞しました。受賞理由は「高密度 QCD におけるハドロン・クォーク連続性と双対性」です。山本氏の博士論文では、量子色力学 (QCD) の相構造、ハドロンの存在形態、トポロジカル励起の 3 つの観点から、ハドロン相とカラー超伝導相が連続的に繋がっていることを示唆する「ハドロン・クォーク連続性」の理論を展開すると同時に、両相をつなぐ新たな双対性としての「ハドロン・クォーク双対性」が提唱されています。これらの理論は、中性子星の中心部における高密度ハドロン物質や高密度クォーク物質の問題とも密接に関係しており、今後のさらなる進展が期待されています。

16 河内太一氏 (初田研): ヨーロッパ物理学会金賞 (原子核物理学に関するエリーチェ夏の学校での最優秀講演賞) (博士)

2011 年 9 月に開催された Erice 国際夏の学校において、河内太一氏が、大学院生の最優秀講演 1 件に対して与えられるヨーロッパ物理学会金賞を受賞しました。講演タイトルは、「Interquark potential for the charmonium system with almost physical quark masses」で、これまで現象論的に与えられていた重いクォーク間のポテンシャルを格子 QCD の第一原理計算から導出することに成功したという成果を発表したものです。

17 中島正道氏 (内田研) European Materials Research Society (EMRS), Best Oral Award) (博士)

Warsaw, Poland で 2011 年 9 月 19 日—23 日に開催された European Materials Research Society (E-MRS) Fall Meeting において、中島正道氏が Best Oral Award を受賞しました。口頭発表 ” Anisotropic charge dynamics in Ba Fe As studied by optical spectroscopy ” に対して、新しい鉄系高温超伝導体の電子状態に関する理解を光学実験により進展させ、今後の研究の方向を示したことが高く評価されての受賞です。

18 宮崎彬氏 (浅井研) NEW TALENT AWARD for an original presentation in Experimental Physics & Isidor Rabi DIPLOMA (博士)

毎年シシリア島の Erice で行われている International School of Subnuclear Physics とは、A. Zichichi 氏を director として擁する Ettore Majorana Foundation and Centre for Scientific Culture が主催する世界で最も

歴史ある素粒子サマースクールである。このスクールでは目立った活躍のあった参加者を DIPLOMA として表彰する制度がある。本賞 Isidor Rabi DIPLOMA は、特に本スクールの開設に携わった Rabi 先生の名を冠した大変名誉ある賞である。以上とは別に、本スクールでは伝統的に希望者がセミナー形式で個人の研究を発表する時間がとられ、New Talent Session と呼ばれている。その発表内容が特に優れている数人の参加者には New Talent Award が授与されるが、本賞 in Experimental Physics は実験部門で最高の発表を称えるものである。

19 宮崎彬氏（浅井研）First Place outstanding student paper, 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves（博士）

International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves とは、テラヘルツ業界最大の国際学会である。本学会では今回の 36 回大会から学生参加者の発表に対し、Best Student Presentation Award というコンペティションを開催することになった。予め 100 人程度の学生の講演概要から 6 人のファイナリストを選考し、学会期間中に選考委員の前で行われる口頭発表によって最終的に優勝者を決める。本賞はその優勝者に与えられる賞である。

20 渡辺優氏（上田研）：平成 23 年度 理学系研究科研究奨励賞（博士）

ハイゼンベルグは γ 線顕微鏡による思考実験で、測定精度（誤差）とその反作用（擾乱）の間に今日不確定性関係と呼ばれる不等式が成立することを指摘した。しかし、ハイゼンベルグの時代には測定行為を精密に記述する量子測定理論が存在しなかったために、測定誤差と擾乱の間にどんな定量的な取引関係があるのかという問題は未解決なまま今日に至っている。渡辺優氏は、近年確立された量子測定理論を量子推定理論と組み合わせることでこの問題を定式化することに成功し、測定誤差と擾乱が満たす不確定性関係の新たな下限を導出し、この問題に決着をつけた。アインシュタインらによって指摘されたように、量子系には「物理的実在 (elements of physical reality)」は存在しないため、古典系のように「測定値と真の値の差」で誤差を定量化することができない。渡辺氏は、量子推定理論を用いることで、測定誤差と擾乱が Fisher 情報量で定量化できることを示した。Fisher 情報量を一般的に計算することは非常に困難だが、渡辺氏は Lie 代数を用いることで、Fisher 情報量を様々な系に対して具体的に計算する手法を開拓し、測定誤差や擾乱の間に成立する不等式を導出した。これまで、不確定性関係の下限は物理量の交換関係によって与えられると広く予想されていたが、渡辺優氏は、従来予想されていた下限が一般には達成不可能であることを示し、等号達成可能なより強い下限を導出することに成功した。更に、その下限を達成する測定法を具体的に構成した。これらの結果は、量子論の基礎の確立に貢献するだけでなく、超精密測定に対する最適な測定法を見出すために応用できるものと期待される。

21 山口洋平氏（駒宮研）：高エネルギー物理学研究者会議 第 1 回測定器開発・優秀修士論文賞（博士）

この賞は、2011 年度に始まった賞で、高エネルギー物理学の分野の修士論文は測定器開発に関するものが多いため、測定器の開発においてその年に最も優秀なもの（2 件まで）を表彰するものです。山口氏は、リニ

アコライダーのビームサイズを測定するために開発された「新竹ビームサイズモニター」の研究を行ないました。このビームサイズモニターの原理は、レーザービームを2つに分けて干渉縞を作り、この縞と電子ビームを衝突させ逆コンプトン効果で前方に散乱された光子の数を数えます。この干渉縞をナノスケールでずらしていった、光子の数の濃淡のパターンをフィットしてビームサイズを測定します。 $O(100\text{nm})$ 以下のビームサイズ測定できる唯一の現実的な方法です。山口氏はこのビームサイズモニターの原理を深く理解して、装置を改良し、実際に KEK の ATF2 試験加速器においてビームサイズの測定を行ないました。修士論文では、新竹氏が開発した時にはまだ考慮されていなかった偏光などの系統誤差の原因を詳細に詰めて 30 ナノメートル位のビームサイズならばビームサイズが絞れば測定可能である事を示しました。

22 橋本直氏 (早野研): J-PARC ハドロン実験ユーザー会 最優秀修士論文賞 (博士)

本賞は J-PARC における原子核・素粒子実験に関連した最も優れた修士論文を顕彰すべく創設されたもので、橋本氏は記念すべき第一回の受賞者となった。受賞論文は、「K 中間子ヘリウム 3 原子の X 線精密分光実験に用いるシリコンドリフト検出器の性能評価」(本文は英文)である。橋本氏は、K 中間子とヘリウム原子の強い相互作用を解明することを目的として、シリコン・ドリフト検出器 (SDD) による K 中間子原子の X 線分光を準備中である。この論文では、低温環境下での SDD の動作と解析の最適化と、J-PARC のビーム環境下でのテストを行い、6 keV の X 線エネルギーの絶対値を 1 eV で決定できることを示して高い評価を得た。

23 野村昂亮氏 (大塚研): 平成 23 年度 理学系研究科研究奨励賞 (博士)

原子核は陽子と中性子から成る量子多体系であるが、核力の性質から密度が一定になろうとし、表面がはっきりしている。表面の形は必ずしも球形ではなく、楕円体になり、時間とともに球との間で振動したり、楕円体の形を保って回転したりする運動をする。それらに対応して励起状態のエネルギーが特徴的なパターンを示す。振動や回転ばかりでなく、中間的な場合も多く、それを統一的に表すのは原子核物理学の長年の課題であった。有馬とヤケロにより 70 年代後半に提唱された相互作用するボソン模型は、現象論的にパラメータをフィットすることによってそれを可能にした。この模型を陽子や中性子というフェルミ粒子多体系とそこでの相互作用から構築する試みは、ある程度はできていたが、あらゆる状況を扱う理論は存在していなかった。野村氏は修士課程から一貫してこの問題に取り組み、表面の変形を平均場模型 (密度汎関数法) によって表わした上で、それを発現するボソンハミルトニアンを導く研究を行った。これによって、陽子、中性子から出発してボソン模型が導けるようになり、予言能力も得られた。それは、今日的な課題のエキゾチック原子核の予言にも必要不可欠であり、世界的にも注目される成果となり、本賞が授与された。

24 櫻井壮希氏 (中澤・牧島研): 平成 23 年度 理学系研究科研究奨励賞 (修士)

2014 年夏に打ち上げ予定の JAXA の宇宙 X 線衛星 *ASTRO-H* には、6 種類の最新鋭の観測装置が搭載され、その 1 つが、5–80 keV で天体の撮像分光を行なう、硬 X 線撮像検出器 (HXI) である。櫻井氏は HXI のデータ処理部の開発実験に参加し、検出器の多チャンネルデジタル出力を模擬する多機能シミュレータを構築した。これを用いて多チャンネルのデータを高速処理するデジタル回路を試験し、さらに後段の CPU 処理

部のソフトウェア開発も担うなど、大きな貢献を行なっている。

25 早田智也氏 (初田研): 平成 23 年度 理学系研究科研究奨励賞 (修士)

早田氏は、量子色力学 (QCD) の非摂動的解析手法の一つである QCD 和則についての新しい定式化を行うとともに、これまで知られていなかった新しいタイプの和則を導出しました。従来の方法では、局所演算子の相関関数についての Wilson の演算子積展開と分散関係式を併用することで、スペクトル和と真空凝縮の関係が導かれていました。一方、早田氏の方法は、多体問題でお馴染みのハミルトニアンと演算子の交換子を、場の量子論における紫外発散や交換子異常に注意しながら解析するというもので、従来の QCD 和則を包含するだけでなく、その拡張にもなっており、今後ハドロン物理学への様々な応用が期待できます。

26 渡辺悠樹氏 (青木研): 平成 23 年度 理学系研究科研究奨励賞 (修士)

渡辺氏は Brauner (Bielefeld 大) とともに、南部・ゴールドストーン・ボソンの数と、自発的に破れた対称性の数の間関係を明らかにし、修士論文にまとめたとともに、活躍の場を UC Berkeley にも広げている。

11 人事異動

[物理学教室にいられた方々]

櫻井 博儀	教授	2011 年 4 月 1 日	採用（独立行政法人理化学研究所・主任研究員）
中山 和則	助教	2011 年 4 月 1 日	採用（KEK・特任助教）
松永 隆佑	助教	2011 年 4 月 1 日	採用
内村 奈緒美	物理図書	2011 年 4 月 1 日	配置換（文学部・係長）
熊崎 丈晴	物理事務	2011 年 4 月 1 日	復帰（独立行政法人日本学術振興会・係長）
南野 真容子	技術職員	2011 年 4 月 1 日	採用
山川 真紀子	物理事務	2011 年 8 月 16 日	採用
吉田 祐子	第 2 事務分室	2011 年 8 月 16 日	採用
中村 千佳子	物理教務	2011 年 8 月 18 日	採用（派遣）
高木 英典	教授	2011 年 10 月 1 日	配置換（新領域創成科学研究科・教授）
角田 直文	助教	2011 年 10 月 1 日	採用
菊地 薫	第 1 事務分室	2011 年 10 月 16 日	採用
杉浦 かおり	第 2 事務分室	2012 年 2 月 13 日	採用（派遣）
黒羽 美由紀	第 1 事務分室	2012 年 2 月 20 日	採用（派遣）
山野 真裕	特任研究員	2012 年 3 月 1 日	採用

[物理学教室から移られた方々]

北村 星子	物理教務	2011 年 4 月 27 日	任期満了（派遣）
上田 美樹	第 1 事務分室	2011 年 8 月 31 日	辞職
小野田 恵子	第 2 事務分室	2011 年 8 月 31 日	辞職
中村 千佳子	物理教務	2011 年 9 月 7 日	任期満了（派遣）
佐藤 梨沙	物理事務	2011 年 9 月 22 日	任期満了（派遣）
半田 奈央美	第 1 事務分室	2011 年 10 月 31 日	辞職
菊地 薫	第 1 事務分室	2012 年 2 月 29 日	辞職
南 文	物理図書	2012 年 2 月 29 日	辞職
吉田 祐子	第 2 事務分室	2012 年 2 月 29 日	辞職
初田 哲男	教授	2012 年 3 月 31 日	辞職（独立行政法人理化学研究所・主任研究員）
齊藤 圭司	助教	2012 年 3 月 31 日	辞職（慶応義塾大学理工学部物理学科・准教授）
佐々木 勝一	助教	2012 年 3 月 31 日	辞職（東北大学理学研究科物理学専攻・准教授）
南城 良勝	試作室	2012 年 3 月 31 日	任期満了退職
山川 真紀子	物理事務	2012 年 3 月 31 日	任期満了退職
高坂 洋史	助教	2012 年 4 月 1 日	配置換（新領域創成科学研究科・助教）
佐々木 陽子	物理教務	2012 年 4 月 1 日	配置換（低温センター・主査）
田中 春美	物理事務	2012 年 4 月 1 日	配置換（工学系研究科学務課専攻チーム・係長）

12 役務分担

役務	担当教員	技術職員・事務職員
専攻長・学科長	早野	熊崎、佐々木、田中
幹事	相原、宮下	熊崎、佐々木、田中
専攻主任	初田	佐々木
専攻副主任	佐野	佐々木
常置委員	蓑輪、上田	佐々木
教務係	宮下、藤森（大学院）、小形、長谷川	佐々木
学生実験	山本、浅井、岡本	八幡
就職係	牧島	横山
奨学金	青木	佐々木
G-COE	島野	佐藤
部屋割	駒宮	熊崎
安全衛生	岡本、(福山)	佐伯
放射線管理	蓑輪	丸屋
技術室	坪野（総括）、相原（幹事）	大塚、柏葉
（技術室会議メンバー）	坪野（試作室）	大塚、柏葉
	山本（学生実験）	八幡
	岡本（安全衛生・低温・安全）、(福山)	佐伯
	須藤（I T 関連）	南野
図書係	上田、樋口、村尾、浅井	内村
コロキウム	諸井、佐野、福山、青木、須藤	田中、伊藤
年次報告	櫻井	横山、八幡
記録係	横山、中澤、濱口	
物品供用官	内田	熊崎
事務分室	第1：佐野	河野、上田、菅原、半田
	第2：大塚	今堀、和田、小野田

*太字は責任者

役務	担当教員	技術職員・事務職員
理交会	五神	熊崎
親睦会	松尾	
進学指導	早野 , 横山, 中澤, 小形	佐々木
進振委員	酒井	佐々木
ホームページ	早野	南野
オープンキャンパス	牧島	
物理オリンピック	長谷川	

*太字は責任者

13 教室談話会

- 平成 23 年 4 月 1 日（金） 16:30-18:00

高柳 匡 氏 (数物連携宇宙研究機構)

「超弦理論における物性物理学の視点」

- 平成 23 年 10 月 21 日（金） 16:30-18:00

小松 雅宏 氏 (名古屋大学)

「Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGSbeam」

14 物理学教室コロキウム

- 平成 23 年 4 月 15 日（金）16:30-18:00
井田 茂 氏（東京工業大学）
「銀河系に充満する地球惑星」
- 平成 23 年 5 月 20 日（金）16:30-18:00
鳥谷部 祥一 氏（中央大学）
「情報と物理学の深い関係 -マルクスウェルの悪魔をめぐって-」
- 平成 23 年 6 月 10 日（金）16:30-18:00
前野 悦輝 氏（京都大学）
「スピン・トリプレットの超伝導：実在は確定したのか？」
- 平成 23 年 7 月 8 日（金）16:30-18:00
田中 宏幸 氏（東京大学、地震研究所）
「高エネルギー地球物理学 -ミューオンやニュートリノで地球内部を見る-」
- 平成 23 年 10 月 14 日（金）16:30-18:00
横山 将志 氏（東京大学）
「ニュートリノでさぐる素粒子から宇宙まで」
- 平成 23 年 11 月 25 日（金）16:30-18:00
T. M. Rice 氏（スイス連邦工科大学）
「Superconductivity in the Anomalous Pseudogap Phase of the Cuprate Superconductors」
- 平成 23 年 12 月 16 日（金）16:30-18:00
高木 英典 氏（東京大学）
「自己組織化する相関電子 -遷移金属酸化物の物理と化学-」

15 金曜ランチトーク

- 2011 年 4 月 8 日 (金) 12:15-12:30
牧島一夫 氏 「X線で探る宇宙の最強磁場」
- 2011 年 4 月 22 日 (金) 12:15-12:30
小形正男 氏 「相転移としての金属絶縁体転移」
- 2011 年 5 月 6 日 (金) 12:15-12:30
能瀬聡直 氏 「メゾスコピック神経回路から探る脳の情報処理基盤」
- 2011 年 5 月 13 日 (金) 12:15-12:30
坪野公夫 氏 「ついにスタート！ LCGT」
- 2011 年 6 月 10 日 (金) 12:15-12:30
内田慎一 氏 「高温超伝導はどうなっているのか？」
- 2011 年 6 月 24 日 (金) 12:15-12:30
相原博昭 氏 「Subaru Dark Energy Survey」
- 2011 年 7 月 1 日 (金) 12:15-12:30
濱口幸一 氏 「長寿命スタウ@LHC (とスタウ核融合)」
- 2011 年 7 月 22 日 (金) 12:15-12:30
宮下精二 氏 「スピנקロスオーバー系での新奇相転移」
- 2011 年 9 月 30 日 (金) 12:15-12:30
村尾美緒 氏 「情報を取り出さない測定を用いた量子情報処理」
- 2011 年 10 月 14 日 (金) 12:15-12:30
駒宮幸男 氏 「素粒子物理の動向とリニアコライダー」
- 2011 年 10 月 28 日 (金) 12:15-12:30
中澤知洋 氏 「次期 X 線衛星 ASTRO-H で探る宇宙の非熱的エネルギー」
- 2011 年 11 月 11 日 (金) 12:15-12:30
岡 隆史 氏 (青木研) 「光誘起トポロジカル相転移」
- 2011 年 11 月 25 日 (金) 12:15-12:30
竹内一将 氏 (佐野研) 「液晶乱流で調べる非平衡臨界現象のユニバーサリティ」

- 2011 年 12 月 9 日 (金) 12:15-12:30
樽家 篤史 氏 (須藤研)「宇宙の彼方の非線形性」
- 2011 年 12 月 16 日 (金) 12:15-12:30
佐々木勝一 氏 (初田研)「格子 QCD 計算とクォークの閉じ込め」
- 2012 年 1 月 13 日 (金) 12:15-12:30
吉田鉄平 氏 (藤森研)「鉄系超伝導体のクーパーペア対称性」
- 2012 年 1 月 27 日 (金) 12:15-12:30
川野輝彦 氏 (松尾研)「素粒子の標準模型への超弦理論的アプローチ」
- 2012 年 2 月 10 日 (金) 12:15-12:30
峰本紳一郎 氏 (酒井研)「原子や分子の構造を高次高調波で調べる」
- 2012 年 2 月 24 日 (金) 12:15-12:30
松永隆佑 氏 (島野研)「高強度テラヘルツ波を用いた新しい非線形光学応答の研究」