

*Department of Physics
School of Science
The University of Tokyo*

Annual Report

2010

平成22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

序

平成 22 年度 (2010 年 4 月-2011 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報告をお届けします。この小冊子が物理学教室で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ら手がかりとなれば幸いです。

まず最初に、このたびの東日本大震災により命を落とされ、あるいは被災された方々、またそれに続く福島第一原子力発電所の事故により困難な避難・退避生活を余儀なくされている方々に、心よりお見舞いを申し上げます。また一日も早い、復興と生活再建を祈念いたします。物理学科/物理学専攻では、電力削減に最大限の協力を行いつつ、教育や研究のペースを落さぬよう、努力を続けています。

さて、教員の異動についてですが、光量子科学の五神真教授が東京大学工学系研究科から 10 月 1 日付けで着任されました。若手では、新たに助教として吉岡孝高氏、松浦 弘泰氏、伊部昌宏氏が着任され、助教の伊部昌宏氏、清水則孝氏、渡邊紳一氏、講師の小沢恭一郎氏、平野哲文氏が准教授として転出されました。

本年度も教室での活発な研究・教育活動の結果、多くの方々が受賞されております。有馬朗人名誉教授(原子核物理理論)が文化勲章を、山崎敏光名誉教授(原子核物理実験)が瑞宝重光章を受章され、佐藤勝彦名誉教授が「加速的宇宙膨張理論の研究」によって学士院賞を受賞されました。小林孝嘉名誉教授は「極限性能超短パルスレーザーと超高速分光法の開発」により文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門)を、五神誠教授は「レーザー分光法による固体における光量子物理学の研究」により松尾学術賞を、長谷川修司教授は「表面電気伝導と表面構造・電子状態との相関の研究」により日本表面科学会学会賞を、平原徹助教は「ビスマス量子薄膜における表面状態による電気伝導」により日本表面科学会奨励賞を、吉田鉄平助教は「La 系高温 超伝導体の研究」で第 5 回日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。

若い方々では、阿部喬博士(大塚研)、金澤拓也氏(初田研)、沙川貴大氏(上田研)が第 5 回日本物理学会若手奨励賞(金澤氏と沙川氏は加えて平成 22 年度理学系研究科研究奨励賞(博士))を、湯浅孝行氏(牧島・中澤研)が平成 22 年度理学系研究科研究奨励賞(博士)を、Dr. Simone De Liberato(上田研)が Prix Jeune Chercheur Daniel Guinier を、受賞されました。この他にも正田亜八香氏(坪野研)が重力波に関する物理天文国際会議の Best Student Poster Award を、加藤 康作君(酒井広文研)、遠藤晋平君(上田研)、西一郎君(藤森研)の 3 名が平成 22 年度理学系研究科研究奨励賞(修士)を受賞しておられます。

また、第 83 回五月祭において、理学部物理学科の学生有志が主催する企画「Physics Lab. 2010」が、『MF アワーズ学術文化発表部門第 1 位』と『MF アワーズ最優秀賞』を受賞しました。学術部門 1 位は 3 年連続、昨年度に創設された最優秀賞は 2 年連続の受賞となりました。物理学科五月祭準備委員会(代表 4 年生 川西裕基君)ら、学生達の努力が実ったものです。

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」のリサーチアシスタントとキャンパス外派遣援助に加え、平成 21 年度末からは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)が開始され、修士学生にも海外派遣支援が拡大されました。

物理学教室をとりまく情勢は厳しさを増しております。今後は今まで以上に社会に対して、基礎研究の面白さと重要性を発信してゆくことが必要であると痛感しております。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。

この年次報告書は、櫻井博儀教授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。

2011 年 4 月 30 日
物理学専攻長・教室主任
早野龍五

目 次

I 研究室別 2010 年度 研究活動報告	9
1 原子核・素粒子理論	11
1.1 原子核理論研究室 (大塚・初田・平野)	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	29
2 原子核・素粒子実験	33
2.1 原子核実験グループ 【早野・小沢】	33
2.1.1 反物質の研究 (早野研究室)	33
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)	34
2.1.3 K 中間子原子の精密分光 (早野研究室)	34
2.1.4 反 K 中間子原子核の研究 (早野研究室)	35
2.1.5 π 中間子原子の精密分光 (早野研究室)	36
2.1.6 ミュオニウム生成標的的研究 (早野研究室)	36
2.1.7 荷電ベクトル型スピン単極巨大共鳴の探索 (早野研究室)	36
2.1.8 クオーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の生成とその性質の研究 (小沢研究室)	37
2.1.9 原子核中の ϕ 中間子質量分布の高統計測定実験 (小沢研究室)	38
2.1.10 原子核中の ω 中間子の生成・崩壊同時測定実験 (小沢研究室)	39
2.2 駒宮研究室	44
2.2.1 電子・陽電子リニアコライダー ILC 計画	44
2.2.2 超冷中性子実験	45
2.2.3 LHC での物理解析	46
2.2.4 BES 実験	47
2.3 蓑輪研究室	50
2.3.1 PANDA - 原子炉ニュートリノモニター	50
2.3.2 Sumico, アクシオン・ヘリオスコープ実験	51
2.3.3 太陽 hidden sector photon 探索実験	51
2.4 相原・横山研究室	55
2.4.1 Belle 実験	55
2.4.2 Belle II 実験	55
2.4.3 HSC ダークエネルギー研究	56
2.4.4 T2K 長基線ニュートリノ振動実験	56
2.4.5 次世代大型水チエレンコフ検出器・ハイパー・カミオカンデ計画	58
2.4.6 ニュートリノ-原子核反応断面積の測定と短基線ニュートリノ振動探索	58
2.4.7 次世代水チエレンコフ検出器のためのハイブリッド光検出器開発	59
2.5 浅井研究室	64
2.5.1 LHC・ATLAS 実験での研究	64
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	66
3 物性理論	71
3.1 青木研究室	71

3.1.1	超伝導	71
3.1.2	磁性	72
3.1.3	Multiferroic 系	72
3.1.4	トポロジカル系	72
3.1.5	非平衡・非線形現象	73
3.1.6	フォトニック平坦バンドの設計	74
3.1.7	その他	74
3.2	宮下研究室	78
3.2.1	相転移協力現象の研究	78
3.2.2	量子統計力学の研究	79
3.3	小形研究室	84
3.3.1	高温超伝導の理論	84
3.3.2	鉄砒素系超伝導体に関する理論	84
3.3.3	有機導体に関する理論	85
3.3.4	超伝導体の理論	86
3.3.5	ディラック電子系	86
3.3.6	フラストレーションのある系での電子状態、スピン状態	87
3.3.7	重い電子系に関する理論	88
3.4	常行研究室	91
3.4.1	シミュレーション手法の開発	91
3.4.2	第一原理電子状態計算の応用	92
4	物性実験	96
4.1	藤森研究室	96
4.1.1	高温超伝導	96
4.1.2	強相関界面・スピントロニクス	96
4.2	内田研究室	103
4.2.1	2010年度の研究その1	103
4.2.2	高温超伝導体の擬ギャップ相	103
4.2.3	鉄化合物高温超伝導体の出現	105
4.2.4	T_c は上がるか?	106
4.3	長谷川研究室	109
4.3.1	表面電子輸送	109
4.3.2	表面ナノ構造	110
4.3.3	新しい装置・手法の開発	110
4.4	福山研究室	115
4.4.1	2次元フェルミ粒子系の強相関効果	115
4.4.2	超低温 LEED の設計	116
4.4.3	グラフェン/グラファイトの電子物性	117
4.4.4	超伝導超薄膜の伝導特性	118
4.4.5	その他	119
4.5	岡本研究室	121
4.5.1	劈開表面に形成された2次元電子系	121
4.5.2	金属超薄膜の超伝導	121
4.5.3	強相関2次元電子系	122
4.6	島野研究室	125
4.6.1	半導体高密度電子正孔系	125
4.6.2	分子性導体	125
4.6.3	光学ホール効果	125
4.6.4	マルチフェロイックス物質の動的電気磁気相関	126

4.6.5	高強度テラヘルツ波光源の開発	126
5	一般物理理論	129
5.1	宇宙理論研究室 (須藤)	129
5.1.1	観測的宇宙論	129
5.1.2	系外惑星	132
5.2	村尾研究室	137
5.2.1	分散型量子情報処理	137
5.2.2	エンタングルメント理論	138
5.2.3	量子トモグラフィ	139
5.2.4	量子力学基礎論	140
5.3	上田研究室	143
5.3.1	冷却原子気体	143
5.3.2	情報熱力学	144
6	一般物理実験	149
6.1	牧島研究室+中澤研究室	149
6.1.1	科学衛星の運用と稼働状況	149
6.1.2	質量降着するブラックホール	149
6.1.3	さまざまな磁場強度の中性子星	150
6.1.4	星間空間における高エネルギー現象	151
6.1.5	銀河団および銀河群の研究 [3, 4, 10, 16, 55, 88]	153
6.1.6	ASTRO-H衛星計画	154
6.2	高瀬研究室	162
6.2.1	TST-2実験	162
6.2.2	共同研究	164
6.3	坪野研究室	171
6.3.1	地上レーザー干渉計重力波検出器	171
6.3.2	宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO	171
6.3.3	磁気浮上重力波検出器	173
6.3.4	非古典光を用いたレーザー干渉計の高感度化	173
6.3.5	超高安定レーザー光源の開発	173
6.3.6	極小距離領域における重力法則の検証	174
6.4	佐野・原田研究室	178
6.4.1	非線形非平衡系の物理	178
6.4.2	非平衡ソフトマターの物理	181
6.4.3	生命現象の物理	183
6.5	山本研究室	188
6.5.1	はじめに	188
6.5.2	星形成の観測研究	188
6.5.3	スペクトル線サーベイ観測	189
6.5.4	テラヘルツ帯観測技術の開拓	191
6.6	酒井広文研究室	194
6.6.1	レーザー光を用いた分子配向制御技術の展開	194
6.6.2	量子状態選別された分子の配向状態を評価するシミュレーションコードの開発	195
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	196
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	196
6.6.5	その他	197
6.7	五神研究室	200
6.7.1	光励起された物質系の巨視的量子現象の探索	200
6.7.2	非自明な光学現象の探索とその応用	201

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	202
6.8 能瀬研究室	207
6.8.1 シナプラス形成の生物物理	207
6.8.2 回路構造と神経機能の発生機構	207
6.8.3 神経回路の活動ダイナミクス	209
6.8.4 その他	211
6.9 樋口研究室	213
6.9.1 筋肉ミオシン1分子の弾性とステップサイズの測定	213
6.9.2 組換えヒト細胞質ダイニン1分子の力・変位測定	213
6.9.3 ヘテロダイニンの運動特性	214
6.9.4 微小管動態イメージング	214
7 技術部門	217
7.1 実験装置試作室(大塚、柏葉、南城、阿部)	217
7.2 安全衛生(佐伯)	217
7.3 IT関連業務(藤代)	217
7.4 学生実験(佐伯、八幡、藤代、柏葉)	217
7.5 各種委員会	218
II Summary of activities in 2010	219
1 Theoretical Nuclear Physics Group	221
2 Theoretical Particle and High Energy Physics Group	223
3 Hayano Group	224
4 Ozawa Group	226
5 Komamiya group	228
6 Minowa-Group	228
7 Aihara/Yokoama Group	229
8 Asai group	230
9 Aoki Group	231
10 Miyashita Group	232
11 Ogata Group	234
12 Tsuneyuki Group	234
13 Fujimori Group	235
14 Uchida Group	236
15 Hasegawa Group	237
16 Group	238
17 Okamoto Group	240
18 Shimano Group	240
19 Theoretical Astrophysics Group	241
20 Murao Group	244
21 Ueda Group	245
21.1 Quantum States of Ultracold Atoms	245
21.2 Quantum Information, Quantum Measurement, and Information thermodynamics	246
22 Makishima Group & Nakazawa Group	247
23 Takase Group	248
24 Tsubono Group	249
25 Sano Harada Group	250
26 Yamamoto Group	251
27 Sakai (Hirofumi) Group	252
28 Gonokami Group	253

29	Nose Group	254
30	Higuchi Group	256

III 2010 年度 物理学教室全般に関する報告

259

1	学部講義概要	261
1	2年生 冬学期	261
1.1	電磁気学 I : 坪野 公夫	261
1.2	解析力学・量子力学 I : 常行 真司、上田正仁	261
1.3	物理実験学 : 長谷川 修司・溝川 貴司	262
1.4	物理数学 I : 青木 秀夫	263
1.5	物理数学 II : 浜口幸一	263
2	3年生 夏学期	263
2.1	電磁気学 II : 高瀬 雄一	263
2.2	量子力学 II : 初田 哲男	264
2.3	流体力学 I : 佐野 雅己	264
2.4	統計力学 I : 宮下 精二	265
2.5	現代実験物理学 I : (前半) 江尻 晶 (後半) 福山 寛	265
3	3年生 冬学期	265
3.1	物理数学 III : 村尾 美緒	265
3.2	量子力学 III : 大塚 孝治	266
3.3	電磁気学 III : 萩輪 真	266
3.4	生物物理学 : 樋口秀男、能瀬聰直	267
3.5	統計力学 II : 小形 正男	267
3.6	現代実験物理学 II : 早野龍五, 横山 将志	267
3.7	流体力学 I : 佐野 雅己	268
4	4年生 夏学期	268
4.1	場の量子論 I : 柳田 勉 諸井 健夫	268
4.2	素粒子原子核物理学 I : 浅井祥仁、小澤恭一郎	268
4.3	一般相対論 : 須藤 靖	268
4.4	プラズマ物理学 : 牧島 一夫	269
4.5	固体物理学 I : 内田 慎一	269
4.6	量子光学 : 酒井 広文	270
5	4年生 冬学期	270
5.1	現代物理学入門 : 島野 亮、諸井健夫	270
5.2	素粒子・原子核物理学 II : 駒宮幸男 初田哲男	271
5.3	生物物理学特論 : 樋口 秀男 北尾彰朗 野口博司	271
5.4	場の量子論 II : 松尾 泰	271
5.5	宇宙物理学 : 中澤知洋	271
5.6	固体物理学 II : 岡本 徹	272
5.7	化学物理学 : 藤森 淳	272
2	各賞受賞者紹介	273
1	有馬朗人 名誉教授 : 文化勲章	273
2	山崎敏光 名誉教授 : 瑞宝重光章	273
3	佐藤勝彦 名誉教授 : 学士院賞	273
4	小林孝嘉 名誉教授(現電気通信大学 特任教授) : 文部科学大臣表彰 科学技術賞・研究部門	274
5	五神真 教授 : 第 14 回松尾学術賞	274
6	長谷川修司 教授 : 日本表面科学会第 15 回学会賞	275
7	平原徹 助教(長谷川研究室) : 日本表面科学会奨励賞	275

8	吉田鉄平助教（藤森研究室）：第5回日本物理学会若手奨励賞	275
9	阿部喬博士（大塚研究室）：第5回日本物理学会若手奨励賞	275
10	Dr. Simone De Liberato (Ueda group): Prix Jeune Chercheur Daniel Guinier	275
11	金澤拓也氏（初田研）：第5回日本物理学会若手奨励賞（素粒子論領域）および平成22年度理学系研究科研究奨励賞（博士）	276
12	沙川貴大氏（上田研）：第5回（2011年）日本物理学会若手奨励賞（領域11）および平成22年度理学系研究科研究奨励賞（博士）	276
13	湯浅孝行氏（牧島・中澤研）：平成22年度理学系研究科研究奨励賞（博士）	276
14	正田亜八香氏（坪野研）：Best Student Poster Award	276
15	加藤康作氏（酒井広文研）：平成22年度理学系研究科研究奨励賞（修士）	277
16	遠藤晋平氏（上田研）：平成22年度理学系研究科研究奨励賞（修士）	277
17	西一郎氏（藤森研）：平成22年度理学系研究科研究奨励賞（修士）	277
3	人事異動	278
4	役務分担	279
5	教室談話会	281
6	物理学教室コロキウム	282
7	金曜ランチトーク	283

I

研究室別 2010年度 研究活動報告

1 原子核・素粒子理論

1.1 原子核理論研究室（大塚・初田・平野）

原子核理論研究室の概要

原子核構造と言われる分野には色々な問題が含まれるが、我々の研究室では

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

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

安定核とは、我々の身のまわりの物質を構成している原子核で、陽子の数と中性子の数はほぼ等しいか、中性子の方が少し多い程度である。名前とおり、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つてきた。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)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・エンゼンの論文以来、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。その原因是核力のスピン・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6年位前から分かつてきた。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、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。[55, 107, 108, 109, 110, 111, 113, 158, 159] また、それらを若手研究者に伝えるためにサマースクールでの講義も行った。[115, 116] さらに、一般向けの東京大学理学部講演会においてもこのような動きを説明した。[157]

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つた。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つても調べられ、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。[10, 107, 108, 109, 110, 111, 113]

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。[111, 161]

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と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つ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画像やWarburtonらの「Island of Inversion」模型では理解できないもので、重要なものである。さらに、通常の考えでは二重閉殻原子核のはずの⁴²Siがオブレートに大きく変形していることなどを示した。[7, 9, 11, 12] 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説明を、平均場理論の壁を越えて行うことも可能にしている。モンテカルロ殻模型を第一原理計算に使う研究も本格的に進行している。同時に、計算機用プ

ログラムを並列計算機用に大幅に改良し、又、外挿による厳密解の予知も行えるようになりつつある。それらによる、スーパーコンピューターによる計算を行い、次世代スパコンでのさらに大きな計算に備えている。ニュートリノと原子核の反応なども引き続き研究の対象であり、天体核現象への応用を行っている。[13, 160]

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100億にまで拡大した。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あきらかになって理解の深化が可能になるなど、発展の道が開かれた。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。[6, 14, 112, 114]

核子多体系どおしの反応や、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どおしの反応を計算してあらたな現象を探索している。[5, 8]

さらに、ボースAINシュタイン凝縮や量子カオスなどの量子多体系問題も独自の観点から研究している。

原子核構造

モンテカルロ殻模型におけるエネルギー分散外挿法

モンテカルロ殻模型によって得られた近似波動関数列を用いたエネルギー分散による外挿法を開発した。これにより、直接対角化が不可能であるような大次元の模型空間における原子核殻模型ハミルトニアン行列の固有値を精密に推定することができる。*pfg9* 模型空間における ^{64}Ge の殻模型計算は 10^{14} 次元のハミルトニアン行列の固有値問題に相当するが、外挿法をこの系に適用して固有値推定が実際に可能であることを示した。

また、次世代スーパーコンピュータ「京」での実行を想定して、上記手法のプログラムの開発、性能向上をおこなった。[13, 39, 117, 68, 69, 134, 135]

原子核殻模型計算における変分モンテカルロ法

マルコフ鎖モンテカルロ法に基づいた変分モンテカルロ法の原子核殻模型計算への応用をおこなった。対相関基底に Gutzwiller 因子を導入した試行関数を採用し、多数の変分パラメータを Stochastic Reconfiguration 法を用いて効率的に最適化した。*pf* 殻を模型空間とした ^{48}Cr の殻模型計算で実際に応用可能であることを示した。[136, 137]

軽い原子核におけるモンテカルロ殻模型による第一原理計算

近年、計算機性能と核子多体系における数値計算手法の飛躍的発展により、現実的核力を用いた核子多体系における第一原理計算が実現可能となった。しかしながら、芯を仮定しない殻模型などに代表される第一原理手法による大規模数値計算は、現在のスーパーコンピュータをもってしても、その適用領域は軽い原子核領域か閉殻近傍に限られる。そこで、従来の芯を仮定する殻模型計算において、より重い核へと適用領域拡大に成功を収めたモンテカルロ殻模型を第一原理手法のひとつである芯を仮定しない殻模型へと応用する試みを行っている。相互作用としては、3体力の効果を出来る限り2体力に繰り込んでいくと期待される JISP16 という現実的核力を用いた。現在、軽い原子核 ($^4\text{He}, ^6\text{He}, ^6\text{Li}, ^7\text{Li}, ^8\text{Be}, ^{10}\text{B}, ^{12}\text{C}$) において、束縛エネルギー、平均自乗半径、電気四重極モーメント、磁気双極子モーメントなどの物理量に対してベンチマークを行い、現在、その結果に関する論文を執筆中である。今後、さらに重い原子核へ適用可能であることが検証されれば、現実的核力に基づいた原子核における多体系構造の系統的理解へ向け、有力な手法のひとつとしてモンテカルロ殻模型による第一原理計算に対する期待がさらに広がるといえる。[40, 70, 72, 73, 118, 138]

核力に基づく核構造の記述

原子核の呈する様々な現象を核力に基づいて記述することは理論的な重要性を持つだけでなく、有効理論を通じて、原子核の微視的構造に対する予言能力の向上や、基本的物理法則の検証などその応用性も大きい。我々は、二重閉殻原子核の基底状態の計算、および殻模型の有効相互作用の導出に重点を置いて研究を行った。理論の出発点としてカイラル摂動論に基づく核子間ポテンシャルを用いた。核力の低エネルギー有効理論としてのカイラル摂動論においては、短距離の詳細は分解されず、典型的には核子とパイオニアの中間子を有効な自由度として記述される。我々は前年度に引き続き In-medium Similarity Renormalization Group (IM-SRG) を用いた。IM-SRG では、核子系の Hamiltonian に関するユニタリ変換を与え、多体系内における核子相関と誘起される多体力の効果を取り入れて、閉殻原子核の基底状態とバレンス核子間の有効相互作用、有効演算子を統一的に求めることができる。この方法は非摂動的であり、また Size extensivity であるため理論の誤差を質量数に比例する程度に抑えることができる。このような側面から In-medium SRG が第一原理の手法として核構造計算に適応できることを示した。

具体的には、二重閉殻原子核 (${}^4\text{He}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{40}\text{Ca}$) の基底エネルギーにと半径に関して Coupled Cluster 法と同等の高精度を持つことを示した。この際多体の波動関数に含まれる非物理的な重心励起の成分が非常に小さく抑えられることも示した。さらに、IM-SRG が有効ハミルトニアンの導出に関して低次の摂動論を厳密に含み、Q-box 展開法と同等の精度であることを解析的・数値的に示した。例として ${}^6\text{Li}$ の励起スペクトルを計算し、厳密対角化の結果と非常に良い一致をすることを確認した。

このようにして、原子核の第一原理計算、および有効理論の構築において、IM-SRG が極めて有用であることを示した。^[60, 74, 75, 120, 139, 163]

Shell model on grids

The method I developed during my Ph.D. work uses mathematical theorems from complexity theory to design efficient many-dimensional grids for the electronic structure problem. Using the formalism introduced in my Ph.D. thesis, I will generalise the grid-based formalism to provide accurate wave functions for the purposes of nuclear physics, that is solving the Schrödinger equation for nuclei with realistic interactions. One of the central topics of research interest to Prof. Takaharu Otsuka's group is performing efficient nuclear shell calculations. They have developed the Monte-Carlo Shell Model method for solving this problem. Monte-Carlo is a successful method, but does not necessarily take advantage of the inherent smoothness of the problem. The convergence for Monte-Carlo methods is $n^{-1/2}$ for n points. If one has a D-dimensional

function that is simultaneously m -times times differentiable with respect to every variable, then the convergence for the grid algorithm in my thesis, 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.

Since I have come to Japan, and continuing into the next year I anticipate formulating general approaches for solving the Schrödinger equation for nuclei with realistic interactions on grids. Specifically, I want to explore how these methods and exploit the advantages of using efficient grids like the ones I developed in my Ph.D. research.

スピノール BEC における相構造及び低エネルギー励起

冷却原子気体を用いたボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) は非常に操作性の高い系であり、光学的に原子集団をトラップすることで各原子のスピン自由度を保持したまま凝縮体を生成することが可能となっている。このような凝縮体はスピノール BEC と呼ばれており、スピン自由度のない凝縮体にはない新奇な性質を呈することが分かっている。

我々は熱力学的極限でのスピノール BEC の性質を調べるため、スピン 1 及び 2 の BEC において実験で実現可能な全ての相で Bogoliubov 理論解析を行った。我々の解析は実験において最も重要な 2 次 Zeeman 効果を考慮しているのが特徴である。我々は Bogoliubov 励起モードのみならず、これまで議論されてこなかった物理量の最初の量子補正である Lee-Huang-Yang 補正を求め、これらが各相で非自明な磁場応答を示すことを明らかにした。さらに我々はスピノール BEC における Nambu-Goldstone (NG) モードに関して調べ、これまで原子核理論研究で知られていた関係式と比較し議論した。

また、我々は素粒子物理学において重要な概念である擬 NG モードがスピン 2 のネマティック BEC で実現されることを示した。ここでいう擬 NG モードとは、古典解の対称性がハミルトニアンの対称性より大きくなることで出現するソフトモードのことであり、通常の NG モードとは違い、量子補正により mass を獲得することが知られている。我々は通常の NG モードの秩序変数空間で安定なトポロジカル励起が、量子効果が無視できる領域では擬 NG モードを放出することによって崩壊することを示した。^[15, 16, 61, 76, 140, 141, 142, 172, 173]

No-core MCSM calculations for ${}^{10}\text{Be}$ and ${}^{12}\text{Be}$ low-lying spectra

We performed no-core shell-model calculations using the Monte Carlo Shell Model (MCSM) and the nucleon-nucleon potential provided by the Unitary Correlation Operator Method (UCOM) in order to discuss the nuclear structure of light nuclei

theoretically. The excitation energies of the 2_1^+ and 2_2^+ states and the $B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_{g.s.}^+)$ for ^{10}Be in the MCSM show good agreement with experimental data. The effect of the Lawson method, which was applied to remove the contamination of the spurious center-of-mass motion, was discussed quantitatively and shown in Fig. 1.1. The deformation properties of the 2_1^+ , 2_2^+ states for ^{10}Be and the 2_1^+ state for ^{12}Be were studied in terms of quadrupole moments, E2 transitions and the occupations of single-particle orbits. The feature of triaxial deformation of ^{10}Be can be seen in the $B(E2)$ transition probabilities. [62, 17, 77]

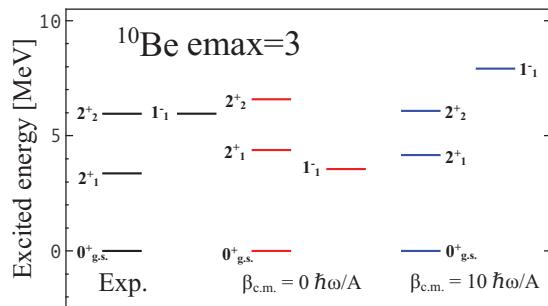


図 1.1.1: Excitation energies of 2_1^+ , 2_2^+ and 1_1^- states of ^{10}Be . The black, red, and blue lines denote the experimental values, the MCSM results without Lawson method, and the MCSM results with Lawson method, respectively.

回転核のボソン写像

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。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ある。

本研究ではフェルミオン・ボソン写像のアイデアに立脚して、変形核の回転バンドを微視的に計算する方法を提案した。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、従来の殻模型を用いた研究 [Otsuka et al. (1979)] や、最近の密度汎関数(DFT)を用いた研究 [Nomura et al. (2008)] など、IBMを核子の自由度から導きだす試みもなされ、特に変形度が比較的小さな原子核の記述において確立されている。

ところが、原子核が強く変形した場合には、IBMで微視的に計算される回転の慣性能率が実験値よりも数10パーセント小さくなるという問題が知られてきた。我々は、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、回転に対する応答の仕方にに関してボソンの波動関数と大きく異なる事、その相違が、回転スペクトル(慣性能率)の実験値との不一致の一つの起源である事を明らかにした。そこで、回転の操作に関するボソン系がDFT(核子)系と同様の応答をするように、IBMハミルトニアンの回転の運動エネルギーに対して微視的な補正を加えた。その結果、サマリウムやウランなどの強く変形した原子核の回転スペクトルを現象論的補正無しに再現する事に成功した [18, 19, 41, 42, 121, 164, 165, 78, 79, 80, 81, 174, 175]。

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.Bohr と B.R.Mottelson により 1980 年になされた。本研究では、全く新しい視点から、定式上非常にシンプルな方法によってこの批評に対する一つの解答を提供できたことに大きな意義がある。

中重核の形状相転移の微視的記述

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気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・発展してきた。本研究ではこの方法を応用して、白金、オスミウム、タンゲ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 ([14, 20, 41, 42, 121, 164, 165, 81]、一部は論文執筆中)。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 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 [14, 80, 81, 143]。

また、独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進めている。重要な結果が得られつつあり、中性子過剰なクリプトン同位体において中性子数 $N=60$ 近傍の臨界点の存在が明らかになってきた。

これらの研究とは独立に、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。研究成果は論文にまとめ、投稿準備中である。

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な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。一般に、核力は近距離に強い斥力芯を持つので、原子核構造を核力に基づいて探求するためには核力の有効相互作用を用いる必要がある。この有効相互作用において、テンソル力がもとの核力とほとんど変わらないという事は非自明な事実であり、それはテンソル力が繰り込みの効果を受けにくいという事を意味する。この結果は同時に既存の現象論的な不安定核の研究を基礎づける事になる。[43, 86, 83, 85]

反対称スピン軌道相互作用

核子間に働く反対称スピン軌道相互作用は相対パリティを破るスピン軌道相互作用として定義されるが、強い相互作用はパリティを保存するため、真空中の二核子間には働くない。しかし原子核中の二核子では並進対称性が失われるため、この成分が現れるということが、以前から知られていた。本研究では、まずこの相互作用がコアの一粒子と二つの価核子の間に働く三体力を起源とする有効二体力からも生じる事を指摘した。次いで、繰り込み群と多対摂動論に基づく有効相互作用の理論を用いて、原子核構造への影響の定量的解析をした。[44, 144, 84]

非縮退模型空間における有効相互作用の導出

殻模型計算は原子核構造を最も正確に計算できる方法の一つであり、その有効相互作用は多体摂動論によって求めることが出来る。しかし、最も重大な改善すべき点の一つに、この方法は本質的に、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事があった。一方、原子核の殻模型で安定核付近の原子核の性質を論じるためには、非摂動で縮退した一つの殻を模型空間とすれば十分であったが、近年実験的に観測できるようになつた中性子過剰核などを含めて核図表のより広い範囲を記述するためには、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、核図表のより広い範囲を、現象論的な補正を加える事なく記述する事を目指す。本年度は、そ

の始めとして、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。[86]

量子ハドロン物理学

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の形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。

フレーバー SU(3) 極限でのバリオン間相互作用

核力やハイペロン力を量子色力学(QCD)に基づいて統一的に理解する第一歩として、フレーバーSU(3)対称性が厳密の成り立つ場合に、クォークの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、バリオン間の相対波動関数を求めた。その結果、2バリオン系のフレーバー多重項によって、短距離でのバリオン間相互作用が異なること、その違いがクォークに関するパウリ原理と関係していることを見出した。さらに、得られた相対波動関数からバリオン間ポテンシャルを構成した。特に、フレーバー一重項については、短距離で引力芯が現れること、このために、フレーバーSU(3)極限では、このチャネルで束縛状態(H-ダイバリオン)が存在することを明らかにした[21]。

高密度 QCD 物質の相構造

高バリオン密度でおこる、ハドロン物質からクォーク物質への相転移に関して、我々がQCDの対称性とGinzburg-Landau理論を用いて予言していた新しい臨界点の存在の有無を、南部-Jona-Lasinio模型を

用いて検討した [22]。さらに、高密度物質の相構造に関して総合報告をまとめた [23, 24]。

2+1 フレーバー格子 QCD 数値実験による核子構造の研究

厳密に軸性ベクトル対称性を取り扱うことのできる格子フェルミオン形式、ドメインウォールフェルミオンを用いた、現実的な 2+1 フレーバーの格子 QCD 第一原理計算により、核子の構造関数の低次のモーメントに関して研究を行った。有限体積効果に充分留意し、二つの異なる物理サイズ(一辺が 2 fm と 3 fm に相当する大きさ)の計算結果が統計誤差の範囲で差異がないことを確認した。また、アップ・ダウンドクォークの質量は π 中間子質量に換算して 330 MeV に相当する、これまで行なわれてきた核子の構造関数に対する格子 QCD 計算よりも物理点に近い計算を行なった。物理量の繰り込みに際しては、格子上での繰り込み定数に関して RI/MOM スキームによる非摂動論的な繰り込みを行い、これまで大きな不定性となっていた摂動論による 1-loop 計算による繰り込みに由来する系統誤差を最大限縮小することに成功した。これら全ての試みによって、これまで最も精度の高い理論計算を成し遂げた。そのことによって、これまでの研究で示唆してきた、実験値との大きな差が(実験値よりも 5 割ほど大きな値が格子 QCD 計算によって計算してきた) クォークの質量を物理点に近づけるに従って縮小傾向にあることを確認し、QCD の赤外有効理論であるカイラル摂動論における 1-loop 計算の予言と矛盾しない事を確認した。[26]

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。実際の数値計算は、すでに RBC+UKQCD collaborations によって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)を利用して行なった。本研究では、CKM 行列要素のユニタリティの検証に關係して、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。 π 中間子質量で 330 MeV 相当に対応するアップ・ダウンドクォークのシミュレーションにおいても、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こととなった。[88, 145]

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つたことを指摘した。[45, 87]

スピニ 3/2 バリオンスペクトルにおけるカイラルパートナーの存在可能性

ハドロൺスペクトルの低エネルギー部分はフレーバー対称性に基づく分類によって上手く記述することができる。これは QCD のカイラル対称性 $SU(N_f)_R \otimes SU(N_f)_L$ がフレーバー部分群に自発的に破れるからである。QCD の持つ本来のカイラル対称性は観測されるスペクトルには一般には反映されないが、その影響を残すカイラルパートナーと呼ばれる粒子群が存在する可能性があり、これはハドロൺスペクトルと QCD の対称性の関係を調べる際の面白い対象の 1 つである。

バリオン射影演算子を利用してカイラル群の高次表現に対する線形カイラル有効ラグランジアンを導出する方法を構築し、スピニ 3/2 バリオンスペクトルにおけるカイラルパートナーの質量関係式などを導出した。4 種類の重粒子がカイラル多重項を組む可能性として 2 組の候補

$$\begin{aligned} A : & (\Delta(1600), \Delta(1940), N(1520), N(1720)), \\ B : & (\Delta(1920), \Delta(1940), N(2080), N(1900)) \end{aligned}$$

を発見した。

Wilson 型フェルミオン行列式の研究

フェルミオン行列式は QCD の化学ポテンシャル依存性を決定する量であり有限密度格子 QCD において

て最も重要な量である。Wilson型フェルミオン行列式に対する簡約公式を導出した。この公式を用いるとクォーク行列式の化学ポテンシャル依存性をゲージ配位から分離し、かつ計算時間を $1/N_t^3$ に縮小することができる。また簡単な変形によりクォーク行列式をフガシティ展開することができるLee-Yangの零点探索などへの応用が期待できる。また、簡約公式に現れる転送行列の固有値やフガシティ展開の係数を格子QCDシミュレーションによって求め、それらの量がクォーク数に応じて特徴的な振る舞いを示すを見出した。

RHICにおける電子・陽電子対の放射についての研究

相対論的重イオン衝突におけるクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)の物性研究は、2010年11月からLarge Hadron Collider(LHC)での重イオン衝突が開始したこともあり、原子核物理の研究者のみならず近年QGPの物理との関連が指摘されている超弦理論の研究者からも注目を浴びている。本年度は、Relativistic Heavy Ion Collider(RHIC)における電子・陽電子対の放射についての研究を行った。RHICにおいて電子・陽電子対放射の詳細な実験データが得られ、他の研究者の計算によるとその量が既存の理論では説明できないほど多い、というのが現状である。我々は3+1次元の流体模型に基づき、電子・陽電子対の放射について

[1] 流体時空発展の状態方程式への依存性
[2] 輸送現象から特徴づけられる放射スペクトルの2点に着目して独自の研究を行った。

[1] 流体時空発展が状態方程式に強く依存していることが判明したが、電子・陽電子対の放射スペクトルはあまり状態方程式に依存していないことが分かった。これは電子・陽電子対の放射が、流体時空発展全体から起こっていることによる。

[2] 輸送理論によると、放射スペクトルは低エネルギー・運動量の領域で発散を生じることが知られている。我々は、これが実験データで見られた大量の電子・陽電子対と関連していると考え、実験データから逆に輸送理論のパラメタ、すなわち拡散係数Dと緩和時間 τ 、を引き出す計算を行った。その結果、拡散係数についてはQCDの摂動論に基づく弱結合理論による計算値に近く、緩和時間についてはAdS/CFTに基づく強結合理論による計算値に近くなつた。この結果の解釈ならびに正当性については、今後より厳密な理論研究の発展が不可欠である。

最後に、前年度までの研究に加え、今年度の[1]と[2]の研究成果を博士論文[63]としてまとめた。

高密度QCDのディラック演算子の解析的研究

有限温度密度QCDは初期宇宙や中性子星の内部構造、重イオン衝突等の幅広い物理に応用を持つ。その一方で、有限バリオン数密度では負符号問題によって格子ゲージ理論のモンテカルロ計算が困難と

なるため、高密度極限におけるカラー超伝導の予言等を除けば第一原理からの理解は今も十分に進んでいない。しかしゲージ群をSU(3)からSU(2)に変えると新しい対称性が存在し、格子シミュレーションが有限密度においても可能となるため注目を集めている。本研究ではこのゲージ群がSU(2)のQCDの高密度極限に関する理論的研究を行った。前年度の研究において、我々はSU(2)QCDの高密度極限がBCS機構に基づくカイラル対称性の自発的破れを通じて、ある有限体積領域でカイラル・ランダム行列模型に等価となることを示した。本年度は数学的手法によってこの行列模型を厳密に解き、行列の固有値の統計分布関数を解析的に導出した。これは上記の等価性によってSU(2)QCDのディラック固有値の統計分布を与える。これは高密度QCDにおいて非摂動的な結果が第一原理から得られる大変興味深い例である。厳密解から、ゼロ密度では固有値分布のスケールを決めるのはカイラル凝縮であるのに対し、高密度極限ではクォークのBCSギャップが支配的であることを明らかにした。また固有値は複素平面上に2次元的に分布し、負符号問題の有無によってその振る舞いを定性的に変えることが判明した。これらの結果は本質的にはSU(3)ゲージ群のQCDにおいても成り立つと考えられる。また、本研究の解析的結果を格子QCDによる第一原理計算でチェックすることも近い将来に可能と期待される。[29, 46, 58, 90, 127, 146, 147, 168, 169, 177, 178, 179, 180, 181]また、前年度から2年間の本研究の成果を博士論文としてまとめた。[64]

Heavy Quark Potential from the thermal Wilson Loop in Lattice QCD

In this final year of the doctoral course we have improved and generalized our previous results on how to non-perturbatively derive a spin-independent complex potential for the two-body system consisting of a heavy quark and anti-quark at any temperature. This non-relativistic description based on the spectral functions of the thermal Wilson loop is obtained as an expansion solely in orders of the inverse rest mass of the heavy quarks.

We manage to go beyond perturbation theory and shed the dependence on scale hierarchies by combining the non-relativistic Schroedinger picture in terms of Feynman path integrals with a space-time regularized implementation of the strong interactions, i.e. lattice QCD. Utilizing the non perturbative results for the medium surrounding the $Q\bar{Q}$ obtained by finite temperature Monte-Carlo simulations, we are able to extract the spectral function using the Maximum Entropy Method and consequently the potential at any temperature, especially in the phenomenologically important region around the deconfining phase transition.

A numerical evaluation of this potential in quenched lattice QCD ($T = 0.78, 1.17, 2.33T_C$) suggests that

instead of Debye screening, the growth of the imaginary part leads to a melting of bound states at temperatures above the deconfinement transition.

ボソン・フェルミオン混合系の相構造の研究

有限密度 QCDにおいては、高密度領域でカラー超伝導状態が実現し、低密度側では核子の形成が起こると考えられている。さらに、核子は高密度側の有効自由度であるダイクォークとクォークの束縛状態と見なすことが出来る。本研究は、ダイクォークをボソン、クォークをフェルミオン、核子を複合フェルミオンに抽象化したボソン・フェルミオン混合系の解析を主眼とする。今年度は、強結合ボソン・フェルミオン混合系をラージ N 模型に拡張し、複合フェルミオン間の有効相互作用を $1/N$ 展開に従い系統的に評価する手法を開発した。具体的に、BEC-BCS クロスオーバー現象を記述する二成分フェルミ原子気体を含むより広いモデルのラージ N 自由度への拡張法を提供し、非相対論的場の理論と $1/N$ 展開によるダイアグラム計算法を詳細に解析した。さらに $1/N$ 展開の最低次では、強結合ボソン・フェルミオン混合系の低エネルギー有効理論は複合フェルミオンの自由フェルミ気体で記述され、その次の次数まで考慮すると、複合フェルミオン間に弱い引力が働くことを示した。これにより、極低温では複合フェルミオンの超流動状態が実現するという前年度の解析を $1/N$ 展開によって基礎づけることに成功した。

[30, 93, 130]。

正方および六角格子上のゲージ理論を用いたグラフェンの電子物性の研究

真空中に宙吊り状態の单層グラフェンにおいては、電子間のクーロン相互作用が遮蔽されないため、相互作用の強さが量子電磁気学 (QED) の場合の約 300 倍と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。この機構は、量子色力学 (QCD) に代表される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、およびそれに伴う動的なフェルミオン質量生成の機構に類似したものである。

本研究では、グラフェンの低エネルギー有効理論として正方格子上のゲージ理論を用い、強結合ゲージ理論を扱う際に有用な手法の一つである強結合展開の手法を用いて強結合領域での系の安定性を調べた。これにより、強結合領域では確かにエキシトン凝縮によりギャップが開き、その大きさは結合の強さに連動することを示した。さらに対称性の破れに伴い、低エネルギーの南部-Goldstone モードに相当するボソン励起が出現することを示唆した。仮にこのような低エネルギー励起が実験的に観測できれば、それはエキシトン凝縮の有用な証拠となりうる。また、電磁場 ($U(1)$ ゲージ場) の定式化の方法としてコンパクト形式と非

コンパクト形式という 2 つの手法を採用し、それぞれから導かれる結果を比較した。本研究と同じモデルを用いたモンテカルロ計算による研究が海外のグループにより発表されており、本研究は強結合極限周辺についての相補的理解を与えることが期待される。[31, 32, 47, 48, 49, 94, 95, 96, 148, 182, 183, 184, 185]

一方、グラフェンの格子ひずみ (Kekulé distortion) の影響を導入するため、新たに元々の六角格子構造を残した格子ゲージ理論を導入した。この理論に強結合展開を適用し、部分格子対称性の破れ、および格子ひずみといった 2 種類の六角格子対称性の破れパターンの関係について研究を行った。六角格子対称性をもつ系においては、強結合極限では部分格子対称性が自発的に破れ、正方格子で得られた結果と同様にエキシトン凝縮によりギャップが開くことを示した。さらに格子ひずみを外部パラメータとして導入すると、部分格子対称性の破れは徐々に解消され、二次相転移の振舞いを示すことを明らかにした [97]。今後はこの手法を強結合展開の高次の項に拡張し、自発的な格子ひずみ生成の可能性についても議論する予定である。

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

チャーモニューム ($c\bar{c}$)-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、チャーモニューム-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、チャーモニューム-核子系ではパウリの排他律が働く。このことから、チャーモニューム-核子間の引力が十分に強ければ、チャーモニュームと原子核の束縛状態が実現する可能性がある。本研究では、チャーモニューム-原子核束縛状態の探索の第一段階として QCD 数値計算による第一原理計算からチャーモニューム-核子間ポテンシャルを導出することを試みた。その結果、クォークの真空偏極を無視したクエンチ近似の格子 QCD 計算により、 η_c -核子、 J/ψ -核子間ポテンシャルの導出に成功し、チャーモニューム-核子間のポテンシャルは引力的であり、且つ $r \sim 1$ fm で遮蔽される近距離力であることを明らかにした。これは、チャーモニューム原子核の実現のための必要条件となるチャーモニューム-核子間の引力的な相互作用が QCD の第一原理から導かれたことを意味する。さらに、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 0.091 fm で物理的格子サイズ 3 fm) を用いて、動的クォークの効果を含めた格子 QCD の計算も進行中であり、パイオン質量 410 MeV に対応するクォーク質量においてはチャーモニューム-核子間ポテンシャルの導出に成功している。[25, 45, 98, 99, 100, 101, 149]

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

現在まで、クォーク間ポテンシャルはクォーク質量無限大の極限においてよく研究されており、その性質が知られている。クォーク質量が有限の場合に関しては、クォーク質量の逆数を展開パラメーターとして、摂動的にその効果が見積もられている。しかしながら、そのような展開はチャームクォークの質量では破綻していると考えられ、チャームクォークの従うクォーク間ポテンシャルは完全には理解されていない。そして、このような有限クォーク質量でのクォーク間ポテンシャルは、チャーモニュームのスペクトル、特にエキゾチック中間子を考える上で重要だと考える。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することで、有限クォーク質量でのクォーク-反クォーク間ポテンシャルの導出に成功した。さらに、クォーク質量依存性を調べることで、このポテンシャルが本質的に異なる方法で求めたクォーク質量無限大でのクォーク間ポテンシャルと一致することを確認した。

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

現代物理学の重要な基礎概念のひとつである、対称性の自発的破れの帰結のひとつに、南部・ゴールドストーン (NG) ボソンの存在が挙げられる。特に、現れる NG ボソンの総数は大変興味深く、本研究の最大の動機となっている。例えば Lorentz 共変な系(例えば QCD)では、NG ボソン(パイオン)の数 = 破れた生成子の数という等号が成り立つが、Lorentz 共変でない系(例えば強磁性体)では、上記の等号は必ずしも成立せず、Type-II NG ボソン(マグノン)と呼ばれる、波数の偶数幕に比例した分散関係を持つ NG ボソンが出現する。本研究では、この Type-II NG ボソンを含む Higgs 機構がどのように働くかを、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模型を用いて研究した。その結果、上記のような数のミスマッチがある状況下でも、化学ポテンシャルの効果によって物理的スペクトルが影響されず、物理的全自由度が保存した形で Higgs 機構が働くことが分かった。

[66, 33, 50, 150]

くりこみ群様方程式を用いた非摂動的固有値問題の解析

量子多体系や場の量子論を用いて記述される系において、相互作用の大きさを特徴づけるパラメータ g が大きく変化する現象にしばしば出くわすことがある。例えば、冷却原子系における BEC-BCS クロスオーバーでは Feschbach 共鳴を用いて原子間の相互作用

の大きさや符号を変化させることができ、高密度量子色力学におけるハドロン-クォーク間の相転移では化学ポテンシャルに依存して結合の強さ g が変化し、クォークグルーオンプラズマの臨界温度付近では温度に依存して g が変化する。このような現象を扱うために、これまでに resummed perturbation、optimized perturbation、variational perturbation 等の、 g についての摂動を足し直す手法や、より収束性の優れた級数に展開し直す手法が研究してきた。我々は、弱結合展開をもとにした非摂動的手法を考え、一次元の量子系における非調和振動子や二重井戸型ポテンシャルに応用することで、弱結合から強結合までの広い領域の結合の強さ g について適用できることを確認した。この手法では、高次まで展開した摂動級数を足し直すかわりに、最低次の摂動展開を g をスケールしながら繰り返し行うことで、ハミルトニアの固有値、固有ベクトルの g 依存性を同時に求めることができる。基本となる微分方程式は、 g をカットオフスケールと読みかえれば厳密くりこみ群の方針と同様の形をしている。さらに、この g についての方程式を利用して、ポテンシャルの強さが時間依存する場合の時間依存した Schrödinger 方程式を解くことも可能である [34]。

高エネルギーハドロン物理学

高エネルギーハドロン物理学研究室では、高温・高密度状態における極限状態の核物質「クォーク・グルーオン・プラズマ (quark gluon plasma, QGP)」の実現の場としての高エネルギー原子核衝突反応に注目し、測定結果を基にして QGP の物性を議論する、いわば観測的 QGP 論の研究を展開している。特に、数値シミュレーションに基づくクォーク・グルーオン・プラズマの流体力学的記述、ハドロンガスの運動学的記述、クォーク・グルーオン・プラズマ中の高エネルギージェット、重いクォークやクオーコニウムの伝播、高エネルギーハドロン・原子核の普遍的な姿としてのカラーグラス凝縮など、多角的な視点から、高温クォーク・ハドロン物質の熱力学的性質、輸送的性質を解明することを目的としている。

相対論的粘性流体力学

高エネルギー重イオン衝突反応において生成されると考えられる高温物質の時空発展に対する相対論的流体力学モデルでは、非平衡過程の取り扱いが重要な課題となっている。まず位相分布関数における粘性歪みの議論 [52] を基に、粒子の生成消滅など非弾性散乱がある複数保存流かつ多成分の系における相対論的散逸流体力学を構築した [35, 53, 54, 102, 103, 104, 106, 152, 154]。素朴に線形応答として散逸の効果を記述すると因果律が破れるため、エントロピー流の高次の補正を考慮し、粘性散逸流に対する構成方程式に緩和項を得た。このとき新たなモーメント方程式を導入し、これまで最も一般的なテンソル構造の構成方程式を導出した。また得られた式はオ

ンサーガーの相反定理を自然に満たすことを示した。次にこの構成方程式に基づき時間1次元+空間1次元の粘性流体モデルを構築し、これを数値的に解いた。相対論的な系では衝突軸方向の解析は困難であるが、独自の解法を提倡しこの問題を解決した。さらにカラーグラス凝縮の描像から、相対論的重イオン衝突型加速器(RHIC)実験と大型ハドロン衝突型加速器(LHC)実験の初期条件を構築して評価した結果、ラピディティ分布に非自明な歪みが生じる事が分かった[155, 156]。これはLHC実験において中心ラピディティでの粒子生成がカラーグラス凝縮単独の理論予測よりも有意に大きいという最新の結果を説明しうることを示した。

また、相対論的粘性流体力学についての講義を行った[170]。

相対論的重イオン衝突反応の統合的記述

高エネルギー重イオン衝突反応は、エネルギースケール、タイムスケール、相互作用の強さのスケールに応じて、様々な様相を示す。したがって、反応全体を記述するためには、個々のスケールに有効なモデルを適切に組み合わせる必要がある。我々は、衝突初期のカラーグラス凝縮、中間状態としてのQGPの流体力学、終状態としてのハドロンの運動学を組み合わせたモデルの構築を行っている。

2010年11月に始まったLHCにおける重イオン衝突反応実験に先立ち、このエネルギー領域で測定される生成粒子の楕円型フローの予言を行った。従来から期待されている楕円型フローの粒子密度に対するスケーリングがLHCのエネルギーでは破れる可能性があることを指摘した[36]。

また、因果律を考慮に入れた相対論的粘性流体力学を採用し、衝突軸方向にBjorkenのスケーリング解を課し簡単化した流体数値シミュレーションを用いてQGP相を記述し、QGP相の粘性量の導出を行った[38]。

この統合的な立場から、現状のRHICにおける実験結果の包括的な解釈を行うレビュー記事の出版、及び、関連した講演、講義を行った[59, 105, 132, 133]。

高密度QCDにおける非可換渦と準粒子の相互作用

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)相と呼ばれる超伝導相では、トポロジカルに安定な位相欠陥として渦が存在することが、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。この渦に特徴的なのは、カラーの磁束を伴い、内部自由度を持つ、という点である。本研究では、この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[37, 67, 153]。

QGP媒質とジェットの相互作用

QGPを探索する手段の一つとして、QGPに対するプローブを調べる手法がある。QGPを通過する高エネルギーのパートン、重いパートン、直接的に放出される光子やレプトン対が挙げられる。媒質の時空発展に流体シミュレーションを利用する立場から、このような描像へのアプローチを紹介する講演を行った[131]。

<受賞>

- [1] 阿部喬: 新学術領域研究「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」主催国際シンポジウム「From Quarks to Supernovae」、ベストポスター賞、2010年11月
- [2] 阿部喬: 第5回日本物理学会若手奨励賞(第12回核理論新人論文賞)、2011年
- [3] 金澤拓也: 第5回日本物理学会若手奨励賞(素粒子論領域)、2011年3月
- [4] 金澤拓也: 東京大学理学系研究科研究奨励賞、2011年3月

<報文>

(原著論文)

- [5] Y. Iwata, T. Otsuka, J.A. Maruhn, *et al.*, “Geometric classification of nucleon transfer at moderate low-energies”, Nucl. Phys., **A836**, 108-118 (2010)
- [6] K. Nomura, N. Shimizu, T. Otsuka, “Formulating the interacting boson model by mean-field methods”, Phys. Rev., **C81**, 044307 (2010)
- [7] P. Fallon, E. Rodriguez-Vieitez, A.O. Macchiavelli, *et al.*, “Two-proton knockout from Mg-32: Intruder amplitudes in Ne-30 and implications for the binding of F-29, F-31”, Phys. Rev., **C81**, 041302 (2010)
- [8] 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)
- [9] A. Gade, T. Baugher, D. Bazin, *et al.*, “Collectivity at N=50: Ge-82 and Se-84”, Phys. Rev., **C81**, 064326 (2010)
- [10] T. Otsuka, T. Suzuki, J.D. Holt, *et al.*, “Three-Body Forces and the Limit of Oxygen Isotopes”, Phys. Rev. Lett., **105**, 032501 (2010)

- [11] A.N. Deacon, J.F. Smith, S.J. Freeman, *et al.*, “Cross-shell excitations near the ”island of inversion”: Structure of Mg-30”, Phys. Rev., **C82**, 034305 (2010)
- [12] P. Vingerhoets, K.T. Flanagan, M. Avgoulea, *et al.*, “Nuclear spins, magnetic moments, and quadrupole moments of Cu isotopes from N=28 to N=46: Probes for core polarization effects”, Phys. Rev., **C82**, 064311 (2010)
- [13] 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)
- [14] K. Nomura, T. Otsuka, R. Rodríguez-Guzmán, L. M. Robledo, and P. Sarriuguren, “Structural evolution in Pt isotopes with the interacting boson model hamiltonian derived from the Gogny energy density functional”, Phys. Rev. C **83**, 014309 (2011). [arXiv:1010.1078]
- [15] Shun Uchino, Michikazu Kobayashi, and Masahito Ueda: “Bogoliubov Theory and Lee-Huang-Yang Corrections in Spin-1 and Spin-2 Bose-Einstein Condensates in the Presence of the Quadratic Zeeman Effect”, Phys. Rev. A **81**, 630632 (2010).
- [16] Shun Uchino, Michikazu Kobayashi, Muneto Nitta, and Masahito Ueda: “Quasi-Nambu-Goldstone Modes in Bose-Einstein Condensates”, Phys. Rev. Lett. **105**, 230406 (2010).
- [17] L. Liu, “No-Core MCSM calculation for ^{10}Be and ^{12}Be low-lying spectra”, in preparation
- [18] Kosuke Nomura, Takaharu Otsuka, Noritaka Shimizu, and Lu Guo, “New formulation of the Interacting Boson Model and the structure of exotic nuclei”, J. Phys.: Conf. Ser. **267**, 012505 (2011).
- [19] Kosuke Nomura, Takaharu Otsuka, Noritaka Shimizu, and Lu Guo, “Microscopic formulation of the interacting boson model for rotational nuclei”, Phys. Rev. C Rapid Communications に掲載決定 (preprint: arXiv:1011.1056 [nucl-th])
- [20] K. Nomura, T. Otsuka, R. Rodríguez-Guzmán, L. M. Robledo, P. Sarriuguren, P. H. Regan, P. D. Stevenson, and Zs. Podolyák, “Spectroscopic calculations of low-lying structure in exotic Os and W isotopes”, Phys. Rev. C に掲載決定 (preprint: arXiv:1101.1699 [nucl-th])
- [21] T. Inoue, N. Ishii, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki [HAL QCD collaboration], “Baryon-baryon interactions in the flavor SU(3) limit from full QCD simulations on the lattice”, Prog. Theor. Phys. **124**, 591 (2010).
- [22] H. Abuki, G. Baym, T. Hatsuda and N. Yamamoto, “The NJL model of dense three-flavor matter with axial anomaly: the low temperature critical point and BEC-BCS diquark crossover”, Phys. Rev. **D81**, 125010 (2010).
- [23] K. Fukushima and T. Hatsuda, “The phase diagram of dense QCD”, Reports on Progress in Physics **74**, 014001 (2011).
- [24] R. S. Hayano and T. Hatsuda, “Hadron properties in the nuclear medium”, Reviews of Modern Physics, **82**, 2949 (2010).
- [25] T. Kawanai and S. Sasaki, “Charmonium-nucleon potential from lattice QCD”, Phys. Rev. **D82** (2010) 091501(R).
- [26] Y. Aoki, T. Blum, H.-W. Lin, S. Ohta, S. Sasaki, R. Tweedie, T. Yamazaki, J. Zanotti, “Nucleon isovector structure functions in 2+1 flavor QCD with domain-wall fermions”, Phys. Rev. **D82** (2010) 014501.
- [27] K. Nagata, “Quartet of spin-3/2 baryons in chiral multiplet $(1,1/2) \oplus (1/2,1)$ with mirror assignment” Phys. Rev. **D82** 034007 (2010).
- [28] K. Nagata , A. Nakamura, “Wilson fermion determinant in lattice QCD”, Phys. Rev. **D82**, 094027 (2010).
- [29] G. Akemann, T. Kanazawa, M.J. Phillips, T. Wetzig, “Random matrix theory of unquenched two-colour QCD with nonzero chemical potential”, JHEP **1103**, 066 (2011) (arXiv:1012.4461 [hep-lat])
- [30] Kenji Maeda, “Large N expansion for Strongly-coupled Boson-Fermion Mixtures”, Ann. Phys. **326**, 1032-1052 (2011).
- [31] Y. Araki and T. Hatsuda, “Chiral Gap and Collective Excitations in Monolayer Graphene from Strong Coupling Expansion of Lattice Gauge Theory”, Phys. Rev. B **82**, 121403(R) (2010).
- [32] Y. Araki, “Chiral Symmetry Breaking in Monolayer Graphene by Strong Coupling Expansion of Compact and Non-compact U(1) Lattice Gauge Theories”, arXiv:1010.0847 [cond-mat.str-el]. (to be published in Ann. Phys.)
- [33] Y. Hama, T. Hatsuda, S. Uchino: “Higgs Mechanism with Type-II Nambu-Goldstone Bosons at Finite Chemical Potential”, arXiv:1102.4145v1 [hep-ph]
- [34] T. Hayata, “Rescaled Perturbation Theory”, Prog. Theor. Phys., **124**, 1097 (2010).
- [35] A. Monnai and T. Hirano: “Relativistic Dissipative Hydrodynamic Equations at the Second Order for Multi-Component Systems with Multiple Conserved Currents”, Nucl. Phys. A **847**, 283 (2010).
- [36] T. Hirano, P. Huovinen and Y. Nara: “Elliptic flow in U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV: Prediction from a hybrid approach”, Phys. Rev. C **83**, 021902(R) (2011).
- [37] Y. Hirono, T. Kanazawa and M. Nitta: “Topological Interactions of Non-Abelian Vortices with Quasi-Particles in High Density QCD”, to appear in Phys. Rev. **D** (arXiv:1012.6042[hep-ph]).

- [38] H. Song, S. A. Bass, U. W. Heinz, T. Hirano and C. Shen: “200 A GeV Au+Au collisions serve a nearly perfect quark-gluon liquid”, to appear in Phys. Rev. Lett. (arXiv:1011.2783 [nucl-th]).
- (会議抄録)
- [39] N. Shimizu, Y. Utsuno, T. Mizusaki, T. Otsuka, T. Abe, and M. Honma, AIP Conf. Proc. **1355**, in press.
- [40] T. Abe, P. Maris, T. Otsuka, N. Shimizu, Y. Utaka, and J. P. Vary, “Benchmark calculation of no-core Monte Carlo shell model in light nuclei”, AIP Conf. Proc., Vol. **1355**, *in press* (2011).
- [41] Kosuke Nomura, “Microscopic derivation of IBM and structural evolution in nuclei”, AIP Conference Proceedings に掲載決定
- [42] Kosuke Nomura, “Derivation of the Interacting Boson Model from mean-field theory”, World Scientific に掲載決定
- [43] N. Tsunoda, T. Otsuka, K. Tsukiyama and M. Hjorth-Jensen, “Tensor force in effective interaction of nuclear force”, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 267, No. 1, “10th International Spring Seminar on Nuclear Physics: New Quests in Nuclear Structure 21-25 May 2010, Vietri sul Mare, Italy” 012020 (2011)
- [44] N. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu and T. Suzuki, “Antisymmetric spin-orbit force in the effective interaction for shell model and its effect on nuclear structure”, accepted in AIP Proceedings Series for Symposium “New faces of Atomic Nuclei (Okinawa, Nov. 15-17, 2010)”
- [45] T. Kawanai and S. Sasaki, “Charmonium-nucleon interaction from lattice QCD with a relativistic heavy quark action”, PoS **LAT2010** (2010) 156.
- [46] T. Kanazawa, T. Wettig, N. Yamamoto, “Exact results for two-color QCD at low and high density”, PoS **LAT2010**, 219 (2010) (arXiv:1101.0589 [hep-lat])
- [47] 荒木康史、初田哲男、「格子ゲージ理論を用いたグラフェンの相構造の解析」、素粒子論研究 **118**, A133 (2010).
- [48] Y. Araki and T. Hatsuda, “Chiral symmetry of graphene and strong coupling lattice gauge theory”, PoS (**Lattice 2010**), 045 (2010).
- [49] 荒木康史、初田哲男、「強結合 U(1) 格子ゲージ理論に基づくグラフェンのカイラル対称性と電子物性」、素粒子論研究電子版 Vol. **7**, No. 2, 44 (2011).
- [50] 濱祐介、初田哲男、内野瞬: “有限密度におけるアンダーソン・ヒッグス機構”, 『素粒子論研究』 **118** 卷 4 号 (2011 年 2 月号)
- [51] T. Hayata, “Rescaled Perturbation Theory”, Proc. TQFT2010, 素粒子論研究 **118** 卷, 4 号 (2011).
- [52] 門内晶彦、平野哲文: “On Viscous Hydrodynamic Description of a Multi-Component Hot QCD Matter”, 素粒子論研究 **118**, A167 (2010).
- [53] A. Monnai and T. Hirano: “Relativistic Viscous Hydrodynamics for Multi-Component Systems with Multiple Conserved Currents”, J. Phys.: Conf. Ser. **270**, 012042 (2011).
- [54] 門内晶彦、平野哲文: “Relativistic Dissipative Hydrodynamics with Conserved Currents and Onsager Reciprocal Relations”, 素粒子論研究 **118**, D119 (2011).
- (国内雑誌)
- [55] 大塚孝治, ”核力中のテンソル力が引き起こす原子核のシェル進化”, (日本物理学会誌、2011 年 66 卷 195-200) .
- [56] 初田哲男, “強い力と色のゲージ理論. 核力からクオーカ・グルーオンへ”, 数理科学 (サイエンス社), 8 月号, pp.27-33 (2010).
- [57] 青木秀夫、初田哲男、“超伝導への傾注. 物性物理とハドロン物理から”, 数理科学 (サイエンス社), 9 月号, pp.14-20 (2010).
- [58] 金澤拓也: “クオーカ物質とランダム行列理論”, (原子核研究、2011 年 55 卷 No. 2)
- [59] 大場一郎, 中里弘道, G. Zinovjev, 室谷心, 平野哲文: “クオーカグルーオンプラズマ流体の物理と並木先生”, 日本物理学会誌, **66**-4, 258 (2011).
- (学位論文)
- [60] Koshiroh Tsukiyama, “In-medium similarity renormalization group for nuclear many-body problems”, 博士論文
- [61] 内野瞬: “Phase structure and low-energy excitations in spinor Bose-Einstein condensates”, 博士論文.
- [62] L. Liu, Ph. D. thesis, the University of Tokyo, 2010
- [63] 赤松幸尚, “Transport properties of quark-gluon plasma”, 博士論文
- [64] 金澤拓也: “Dirac spectra in dense QCD”, 博士論文
- [65] Rothkopf Alexander: “Heavy Quark Potential from the thermal Wilson Loop in Lattice QCD” 博士論文
- [66] 濱祐介: “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”, 修士論文
- [67] 広野雄士: “Dynamics of non-Abelian quantum vortices in dense QCD”, 修士論文
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [68] N. Shimizu, “Extrapolation method in the Monte Carlo Shell Model”, 2nd EMMI-EFES workshop on neutron-rich nuclear matter, nuclear structure and nuclear astrophysics (EENEN-10), RIKEN, Wako-shi, Japan, Jun 16-18, 2010.

- [69] N. Shimizu, "Extrapolation method in the Monte-Carlo Shell Model and its applications", International Symposium "From Quarks to Supernovae", Atagawa, Izu, Shizuoka, Japan, Nov. 28-30, 2010.
- [70] T. Abe, "Benchmark calculation of "ab-initio" Monte Carlo shell model in light nuclei", University of Aizu-JUSTIPEN-EFES Symposium on "Cutting-Edge Physics of Unstable Nuclei", University of Aizu, Aizu-Wakamatsu, Japan, Nov. 10-13, 2010.
- [71] T. Abe, "Pairing correlations in low-density neutron matter and unitary Fermi gas from lattice EFT calculations", Halo2010 Symposium, Shonan Village Center, Hayama, Japan, Dec. 6-9, 2010.
- [72] T. Abe, "No-core Monte Carlo shell model in light nuclei", EFES-Iowa mini workshop on the ab initio Monte Carlo Shell Model, Iowa State U., Ames, Iowa, U.S.A., Feb. 23, 2011.
- [73] T. Abe, "No-Core Monte Carlo Shell Model in Light Nuclei", The 5th LACM-EFES-Justipen Workshop, Joint Institute for Heavy Ion Research, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA, Mar. 15-17, 2011.
- [74] K. Tsukiyama, S.K. Bogner and A. Schwenk, "In-medium Similarity Renormalization Group for Nuclear many-body problems", Cutting-Edge Physics of Unstable Nuclei, University of Aizu, Oct. 10-13, 2010.
- [75] K. Tsukiyama, S.K. Bogner and A. Schwenk, "In-medium Similarity Renormalization Group for Nuclei", Second EMMI-EFES Workshop on Neutron-Rich Nuclei, RIKEN, Jun 16-18, 2010.
- [76] Shun Uchino, Michikazu Kobayashi, Muneto Nitta, and Masahito Ueda: "Quasi-Nambu-Goldstone Modes in a spin-2 nematic Bose-Einstein Condensates", ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultracold Atoms and Molecules, Tokyo, Japan, January 24, 2011.
- [77] L. Liu, T. Otsuka, S. Shimizu, "Monte Carlo Shell Model calculation for light nuclei by using UCOM interaction", Second EMMI-EFES Workshop on Neutron-Rich Exotic Nuclei, RIKEN,Wako, Saitama, Japan
- [78] K. Nomura: "New formulation of the Interacting Boson Model and the structure of exotic nuclei" (口頭発表、査読有), 10th International Spring Seminar on Nuclear Physics New Quests in Nuclear Structure, ピエトリ, イタリア, 2010 年 6 月 21-25 日
- [79] K. Nomura: "Derivation of IBM Hamiltonian and low-lying states of heavy neutron-rich nuclei" (口頭発表、査読有), 2nd EMMI-EFES Workshop on Neutron-Rich Nuclei, 理化学研究所, 和光市, 2010 年 6 月 16-18 日
- [80] K. Nomura: "Mean-field derivation of IBM for deformed nuclei" (口頭発表、査読有), Pan-American Advanced Studies Institute on Rare Isotopes, ジョアンペソア, ブラジル, 2010 年 8 月 1-13 日
- [81] K. Nomura: "Microscopic derivation of IBM and structural evolution in nuclei" (口頭発表、査読有), International Symposium "New Faces of Atomic Nuclei", 沖縄科学技術大学院大学, 沖縄県国頭郡恩納村, 2010 年 11 月 15-17 日
- [82] N. Tsunoda, 10th International Spring Seminar on Nuclear Physics: New Quests in Nuclear Structure, "Tensor force in effective interaction of nuclear force", Oral presentation, 22nd May, 2010
- [83] N. Tsunoda, Second EMMI-EFES Workshop on Neutron-Roch Exotic Nuclei (EENEN 10), "Renormalization of the tensor force in the effective interaction of nuclear force", Oral presentation, 17th June, 2010
- [84] N. Tsunoda, University of Aizu-JUSTIPEN-EFES Symposium on "Cutting-Edge Physics of Unstable Nuclei", "Antisymmetric spin-orbit force in the effective interaction to the nuclear structure", 11th Nov. 2010
- [85] N. Tsunoda, Symposium "New faces of Atomic nuclei", "Anti-symmetric spin-orbit force in the effective interaction for the shell model and its effect on nuclear strucure", Poster presentation, 15-17th Nov. 2010
- [86] N. Tsunoda, Effective theories and the nuclear many-body problem, "Effective interaction for the shell model in non-degenerate model space", oral presentation, 10th March, 2011
- [87] T. Kawanai and S. Sasaki, "Low-energy charmonium-nucleon scattering with twisted boundary conditions." The XXVIII International Symposium on LATTICE FIELD THEORY (LATTICE 2010), June 14-19, Villasimius, Sardinia, Italy
- [88] S. Sasaki, "Hyperon vector coupling $f_1(0)$ from 2+1 flavor lattice QCD." International Conference on the structure of baryons (BARYONS'10), December 7-11, Osaka, Japan
- [89] Y. Akamatsu, "Dielectron spectrum from full 3D hydrodynamic model", Strong and Electroweak Matter, 口頭発表 平成 22 年 6 月 29 日
- [90] T. Kanazawa, T. Wettig, N. Yamamoto, "Chiral real Ginibre ensemble in high energy physics" (poster), Statphys24 satellite meeting "Combinatorics and Mathematical Physics", Brisbane, Australia, July 12-14, 2010
- [91] A. Rothkopf : "Proper Heavy Quark Potential from the Thermal Wilson Loop" Lattice QCD confronts experiment - Japanese German Seminar 2010, Mishima, Japan, Nov. 4th - 6th 2010
- [92] A. Rothkopf : "Proper Heavy Quark Potential from the Thermal Wilson Loop" Symposium on next generation lattice simulations, RIKEN, Wako, Japan Sep. 24th - 26th 2010

- [93] K. Maeda : “Large-N expansion for strongly coupled boson-fermion mixtures”, International Advanced School of Theoretical Physics HIC for FAIR Workshop and School, “Dense QCD phases in Heavy-Ion Collisions”, JINR, Dubna, Russia, Sep. 2, 2010.
- [94] Y. Araki: “Chiral Gap and Collective Excitations in Monolayer Graphene from Strong Coupling Expansion of Lattice Gauge Theory”, ECT* Workshop ”New frontiers in graphene physics”, Toreto, Italy, Apr. 12-14, 2010.
- [95] Y. Araki and T. Hatsuda: “Chiral Symmetry of Graphene and Strong Coupling Lattice Gauge Theory”, Lattice2010 (The 28th international symposium on lattice field theory), Villasimius, Italy, Jun. 17, 2010.
- [96] Y. Araki: “Chiral Gap and Collective Excitations in Monolayer Graphene from Strong Coupling Expansion of Lattice Gauge Theory”, “Electronic Properties of Graphene: 2010”, Princeton Center for Theoretical Science, USA, Oct. 8-9, 2010.
- [97] Y. Araki: “Spontaneous mass gap generation in monolayer graphene with strong coupling expansion of square/honeycomb lattice gauge theory”, International Symposium “Nanoscience and Quantum Physics 2011” (nanoPHYS’11), International House of Japan, Tokyo, Jan. 26-28, 2011.
- [98] T. Kawanai and S. Sasaki, ”Charmonium-nucleon potential from lattice QCD”, The XXVIII International Symposium on LATTICE FIELD THEORY (LATTICE 2010), Villasimius, Sardinia, Italy, June 14-19, 2010.
- [99] T. Kawanai, “Charmonium-nucleon potential from lattice QCD” From Quarks to Supernovae, atagawa, Japan, Nov. 28-30, 2010.
- [100] T. Kawanai and S. Sasaki, “Charmonium-Nucleon interaction from lattice QCD with 2+1 flavors of dynamical quarks” International Conference on the structure of baryons (BARYONS’10), Osaka, Japan, Dec 7-11, 2010.
- [101] T. Kawanai, “Charmonium-nucleon interaction from lattice QCD”, Asian School on Lattice Field Theory 2011, Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India, Mar. 14-25, 2010.
- [102] A. Monnai: “Viscous Hydrodynamics for Relativistic Systems with Multi-Components and Multiple Conserved Currents”, Berkeley School of Collective Dynamics in High Energy Collisions, Lawrence Berkeley National Laboratory, California, USA, Jun. 7-11, 2010.
- [103] A. Monnai: “Relativistic Viscous Hydrodynamics for Multi-Component Systems with Multiple Conserved Currents”, Hot Quarks 2010, La Londe-les-Maures, Côte d’Azur, France, Jun. 21-26, 2010.
- [104] A. Monnai: “Causal Viscous Hydrodynamics for Relativistic Systems with Multi-Components and Multi-Conserved Currents”, Strong and Electroweak Matter 2010, McGill University, Montreal, Canada, Jun. 29-Jul. 2, 2010.
- [105] T. Hirano: “Current status of QGP ideal hydro + hadronic cascade model”, The sixth Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy (WPCF2010) Kiev, Ukraine, Sep. 2010.
- [106] A. Monnai: “Viscous Hydrodynamics”, Heavy Ion Meeting 2010-12, Yonsei University, Seoul, South Korea, Dec. 10-11, 2010.
- 招待講演
- [107] T. Otsuka: “Role of tensor and three-body forces and exotic nuclei”, ECT* Workshop Reactions and Nucleon Properties in Rare Isotopes, European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas (ECT*), Apr. 8 (5-9), 2010.
- [108] T. Otsuka: “The nuclear three-body force and exotic nuclei”, Workshop of the Espace de Structure Nucleaire Theorique, Nuclear magic numbers: New features far from stability, Confronting theoretical approaches and experiment, Saclay, France, 2010, May 4 (3-5), 2010.
- [109] T. Otsuka: “Nuclear forces and shell evolution in exotic nuclei”, Nuclear Structure 2010, Berkeley, USA, Aug. 9 (8-13), 2010.
- [110] T. Otsuka: “Shell evolution in exotic nuclei”, 3rd Int. Conference on Frontiers in Nuclear Structure, Astrophysics and Reactions” (FINUSTAR 3), Rhodos, Greece, Aug. 23 (23-27), 2010.
- [111] T. Otsuka: “Shell Evolution in Continuum”, Japan-Italy EFES workshop on Correlations in Reactions and Continuum, Torino, Italy, Sept. 5 (5-7), 2010.
- [112] T. Otsuka: “IKP - Japan”, Symposium 50 Jahre Institut fuer Kernphysik IKP, Koeln, Germany, Sept.30 (30-1), 2010.
- [113] T. Otsuka: “Neutron-rich Exotic Nuclei and Nuclear Forces”, EMMI Physics Days, GSI, Darmstadt, November 3, 2010.
- [114] T. Otsuka: “Some future directions of nuclear structure theories”, 5th EFES-JUSTIPEN-LACM workshop, ORNL, Oak Ridge, March 16 (15-17), 2011.
- [115] T. Otsuka: “Shell model and exotic nuclei”, Nuclear Structure and Nuclear Astrophysics with Radioactive Ion Beams Doctoral Training Program, European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas (ECT*), Trento, Italy, May 6-7 (April 12 - June 11), 2010.
- [116] T. Otsuka: “The Structure of Rare Isotopes”, Pan-American Advanced Studies Institute on Rare Isotopes conference (PASI) Joao Pessoa, Brazil, August 6 (2-13), 2010.

- [117] N. Shimizu, "Extrapolation method in the Monte-Carlo Shell Model and its applications", International Symposium "New Faces of Atomic Nuclei", Okinawa Institute of Science and Technology (OIST), Okinawa, Japan, Nov. 15-17, 2010.
- [118] T. Abe, "No-core Monte Carlo shell model in light nuclei", Perspectives of the Ab Initio No-Core Shell Model, TRIUMF, Vancouver, BC, Canada, Feb. 10-12, 2011.
- [119] T. Abe, "Lattice EFT calculation of thermal properties of low-density neutron matter", International EFES-IN2P3 conference, "Many body correlations from dilute to dense nuclear systems", Institut Henri Poincaré, Paris, France, Feb. 15-18, 2011.
- [120] K. Tsukiyama, S. K. Bogner and A. Schwenk, "In-medium similarity renormalization group for nuclear many-body problems" Effective theories and the nuclear many-body problem, ECT* Italy, Mar. 7-11, 2011.
- [121] K. Nomura: "Derivation of the Interacting Boson Model from mean-field theory", French-Japanese Symposium on Nuclear Structure Problems, 理化学研究所, 和光市, 2011年1月5-8日
- [122] T. Hatsuda, "Nuclear Physics from Lattice QCD", *Lattice 2010: The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory*, (Sardinia, Italy, June 14-19, 2010).
- [123] T. Hatsuda, "Baryon-Baryon Forces from Lattice QCD", *T(r)opical QCD 2010*, (Cairns, Australia, Sep. 26 - Oct. 1, 2010).
- [124] T. Hatsuda, "Nuclear Physics: Overview", *From Quarks to Supernovae*, (Atagawa, Japan, Nov. 28-30, 2010).
- [125] T. Hatsuda, "From Yukawa and Nambu to Lattice Nuclear Force", *Barytons 2010*, (Osaka, Japan, Dec. 7-10, 2010).
- [126] Y. Akamatsu, "Di-lepton production in heavy ion collisions by full 3D hydrodynamic model" HESI10, 口頭発表 平成22年8月3日
- [127] T. Kanazawa, G. Akemann, M. J. Phillips, T. Wettig, "Random matrix theory for quark matter", International workshop "Nonperturbative Aspects of QCD at Finite Temperature and Density", CCS, Univ. of Tsukuba, Tsukuba, Japan, November 8-9, 2010
- [128] A. Rothkopf : "Recent Developments in Lattice QCD Calculations at Finite Temperature" Workshop on recent developments in Hadron Physics, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, Aug. 2nd 2010
- [129] A. Rothkopf : "Proper Heavy Quark Potential from Lattice QCD" Strong interactions: From methods to structures, 474th International Wilhelm und Else Heraeus Seminar Bad Honnef, Germany, Feb. 12th - 16th 2011
- [130] K. Maeda : "Simulating dense QCD matter with ultracold atomic boson-fermion mixtures", The Division of Atomic, Molecular and Optical Physics (DAMOP) 2010, Hyatt Regency Hotel, Houston, Texas, USA, Mar. 28, 2010.
- [131] T. Hirano: "Hydrodynamic evolution and jet propagation in dense matter", Symposium on Jet and Electromagnetic Tomography of Dense Matter, LBNL, Berkeley, CA, USA, Jun. 18, 2010.
- [132] T. Hirano: "Current status of QGP hydro + hadronic cascade approach", Quantifying the Properties of Hot QCD Matter, INT, Seattle, WA, USA, Jun. 14-18 (the 2nd hydro week), 2010.
- [133] T. Hirano: "Hydrodynamic Modeling: A Hybrid Approach", The Berkeley School, School of Collective Dynamics in High Energy Collisions, LBNL, Berkeley, CA, USA, Jun. 7-11, 2010.
- (国内会議)
- 一般講演
- [134] 清水則孝, 宇都野穣, 水崎高浩, 大塚孝治, 阿部喬, 本間道雄, "モンテカルロ殻模型における外挿法", 物理学会秋の分科会、九州工業大、2010年9月
- [135] 清水則孝, 宇都野穣, 水崎高浩, 大塚孝治, 阿部喬, 本間道雄, "多基底変分による大規模殻模型計算と外挿法", 日本物理学会第66回年次大会, 2011年3月
- [136] 水崎高浩, 清水則孝, "パフィアンを使った相関対基底による殻モデル計算", 日本物理学会秋の分科会、九州工業大、2010年9月
- [137] 水崎高浩, 清水則孝, "パフィアンを使った相関対基底による変分モンテカルロ計算", 日本物理学会第66回年次大会, 2011年3月
- [138] 阿部喬, Pieter Maris, 大塚孝治, 清水則孝, 宇都野穣, James P. Vary: "軽い原子核でのモンテカルロ殻模型による第一原理計算のベンチマーク", 日本物理学会 秋季大会、九州工業大学大学、2010年9月11-14日。
- [139] K. Tsukiyama, S. K. Bogner and A. Schwenk In-medium SRG による原子核の記述、日本物理学会 2010年秋季大会 (JPS meeting, 2010 autumn) 九州工業大学戸畠キャンパス, 2010年9月11日
- [140] 内野瞬、小林未知数、新田宗士、上田正仁: "スピノール BEC における相構造及び低エネルギー励起" 熱場の量子論とその応用 (京都大学、2010年9月1日)。
- [141] 内野瞬、小林未知数、上田正仁: "スピノール BEC における Bogoliubov 理論及び Lee-Huang-Yang 補正 (2)", 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学、2010 年 9 月 24 日)。
- [142] 内野瞬、小林未知数、新田宗士、上田正仁: "ボース・アインシュタイン凝縮体における擬-南部・ゴルドストーンモードのトポロジー" 対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象 (京都大学、2010 年 12 月 19 日)。

- [143] 野村昂亮: “²⁰⁸Pb 近傍の中性子過剰核の構造”(口頭発表、査読無), 日本物理学会秋季大会、九州工業大学戸畠キャンパス、北九州市、2010年9月11日-14日
- [144] 角田直文: 日本物理学会 2010 年秋季大会 核力の有効相互作用における反対称スピン軌道相互作用, 口頭発表, 2010 年 9 月 11 日
- [145] 佐々木勝一「ハイペロン β 崩壊におけるフレーバー SU(3) 対称性の破れ」次世代格子ゲージシミュレーション研究会、理化学研究所 大河内記念ホール、2010 年 9 月 24-26 日
- [146] 金澤拓也, G. Akemann, M.J. Phillips, T. Wettig, “Sign problem in the microscopic limit of two-color QCD”, 日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学戸畠キャンパス、2010 年 9 月 11-14 日
- [147] 金澤拓也: “Recent progress in random matrix theory” (poster), 第 3 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2010 年 12 月 11-13 日
- [148] 荒木康史: 「強結合 U(1) ゲージ理論に基づくグラフェンのカイラル対称性と電子物性」、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、2010 年 8 月 30 日-9 月 1 日
- [149] 河内太一、“格子 QCD に基づくチャーモニウム-核子間相互作用の研究”、ストレンジネス核物理 2010、高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、2010 年 12 月 2-4 日。
- [150] 濱祐介, 初田哲男、内野瞬: “有限密度におけるアンダーソン・ヒッグス機構” (ポスター), 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, 2010 年 8 月 30 日-9 月 1 日
- [151] 早田智也, 「くりこみ群様方程式を用いた非摂動的固有値問題の解析」熱場の量子論とその応用 2010、京都大学 基礎物理学研究所 湯川記念館 Panasonic 国際交流ホール、2010 年 8 月 30 日
- [152] 門内晶彦: “Relativistic Dissipative Hydrodynamics with Conserved Currents and Onsager Reciprocal Relations”, 热場の量子論とその応用 2010, 京都大学基礎物理学研究所, 2010 年 8 月.
- [153] 広野雄士: “カラー超伝導における非可換渦と環境のトポロジカルな相互作用”, 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、2010 年 8 月 30 日 - 9 月 1 日。
- [154] 門内晶彦: “複数の保存荷電流がある多成分系における相対論的粘性流体力学”, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 九州工業大学, 2010 年 9 月.
- [155] 門内晶彦: “Viscous Hydrodynamic Evolution for the CGC at RHIC and LHC”, 第 17 回 Heavy Ion Café, 東京大学, 2011 年 3 月.
- [156] 門内晶彦: “相対論的粘性流体モデルにおける高温 QCD 物質の 1 次元膨張”, 日本物理学会 2011 年春季大会, 新潟大学, 2011 年 3 月.
- 招待講演
- [157] 大塚孝治, “原子核の新しい顔”, 第 18 回東京大学理学部公開講演会、東京大学 安田講堂、2010 年 11 月 7 日
- [158] 大塚孝治, “Exotic nuclei and modern shell model”, Workshop on exotic nuclei and modern shell models, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 2010 年 2 月 9 日
- [159] 大塚孝治, “原子核の核力の楽しみ”, 武藤先生還暦記念研究会, 東京工業大学, 2010 年 10 月 16 日
- [160] 大塚孝治, “Challenges of nuclear structure calculations with peta and exa machines” (presented by Nakatsukasa), Aizu-JUSTIPEN-EFES Symposium ”Cutting-Edge Physics of Unstable Nuclei”, University of Aizu, Aizu-Wakamatsu, Japan, 2010 年 11 月 11(10-13) 日
- [161] 大塚孝治, “Halo nuclei and shell evolution by nuclear forces”, Symposium of 25th Anniversary of the Discovery of Halo Nuclei (Halo2010), Hayama, Kanagawa, Japan, 2010 年 12 月 9(6-9) 日
- [162] 阿部喬, “Nuclear EFT on the Lattice”, 次世代格子研究会、理化学研究所、和光キャンパス、大河内ホール、2010 年 9 月 24-26 日.
- [163] K. Tsukiyama, S. K. Bogner and A. Schwenk , In-medium similarity renormalization group for nuclear many-body problems, “Nuclear Theory Seminar”, 東京工業大学, 2011 年 3 月 3 日
- [164] 野村昂亮: “Low-lying states of medium-mass and heavy neutron-rich nuclei”, JPS シンポジウム “New direction in structure studies of unstable nuclei probed by gamma-ray spectroscopy”, 九州工業大学 戸畠キャンパス、北九州市、2010 年 9 月 11 日-14 日
- [165] 野村昂亮: “Microscopic IBM calculations on W, Os and Pt isotopes”, 第 2 回 KISS (KEK isotope separation system) 検討会, 理化学研究所, 和光市, 2011 年 3 月 5 日
- [166] 初田哲男, “熱々のクオークスープと宇宙の始まり”, 「日本物理学会主催市民科学講演会」(九州工業大学、北九州市、2010 年 9 月 12 日)
- [167] 初田哲男, “格子 QCD によるバリオン間相互作用”, 「バリオン物質と中性子星」(盛岡、2011 年 1 月 29 日-30 日)
- [168] 金澤拓也: “高密度物質における対称性の破れとランダム行列理論”、グローバル COE「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」中間報告会、東京大学、2011 年 2 月 5 日
- [169] 金澤拓也: “有限密度 QCD におけるディラック演算子の研究”、第 5 回日本物理学会若手奨励賞(素粒子論領域)受賞記念講演、日本物理学会第 66 回年次大会、新潟大学五十嵐キャンパス、2011 年 3 月 25 日
- [170] 平野哲文: “相対論的流体力学の基礎と高エネルギー重イオン衝突への応用”, 筑波大学集中講義, 2011 年 1 月.
- [171] 平野哲文: “相対論的流体力学の基礎と高エネルギー重イオン衝突への応用”, お茶の水女子大学集中講義, 2011 年 2 月.
- (セミナー)

- [172] Shun Uchino, Michikazu Kobayashi, Muneto Nitta, and Masahito Ueda: “Phase structure and low-energy excitations in spinor Bose-Einstein condensates”, Ueda group, the University of Tokyo, Japan, October 28, 2010.
- [173] Shun Uchino, Michikazu Kobayashi, Muneto Nitta, and Masahito Ueda: “Phase structure and low-energy excitations in spinor Bose-Einstein condensates”, APCTP, POSTECH, Korea, November 16, 2010.
- [174] K. Nomura: “Mean-field Derivation of the Interacting Boson Model for Deformed Nuclei”, European Center for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas, ECT* Doctoral training Program “Nuclear structure and nuclear astrophysics with radioactive ion beams”, ドイツ、2010年4月12日-6月11日
- [175] K. Nomura: “Microscopic Formulation of IBM by Mean-Field Theory”, Institut für Kernphysik, Universität zu Köln (ケルン大学原子核物理学研究所)、ケルン、ドイツ、2010年3月16日
- [176] Y. Akamatsu, “Heavy quarks in heavy ion collisions”, Heavy Ion Pub, 平成22年8月17日
- [177] 金澤拓也: “Exact results for two-color QCD at low and high density”, (大阪大学大学院素粒子論研究室、2010年5月25日)
- [178] 金澤拓也: “A matrix-model description of dense pseudo-real matter”, (京都大学大学院原子核理論研究室、2010年6月30日)
- [179] T. Kanazawa, “Random matrix theory for dense two-color QCD”, High energy physics group, Regensburg University, Germany, October 26, 2010
- [180] 金澤拓也: “Dirac spectra in dense QCD”, (素粒子原子核研究所、KEK、2011年1月6日)
- [181] 金澤拓也: “Dirac spectra in dense QCD”, (東京大学駒場原子核理論研究室、2011年2月23日)
- [182] 荒木康史: 「格子ゲージ理論の強結合展開によるグラフェン物性の研究」、(東京大学駒場、2010年4月28日)
- [183] 荒木康史: 「格子ゲージ理論の強結合展開に基づくグラフェンの動的ギャップ生成の解析」、(京都大学、2010年10月20日)
- [184] 荒木康史、「U(1) 格子ゲージ理論の強結合展開に基づく単層グラフェンの自発的ギャップ生成機構の解明」、(東京理科大学、2010年12月10日)
- [185] 荒木康史、「U(1) 格子ゲージ理論の強結合展開に基づく単層グラフェンの自発的ギャップ生成機構の解明」、(筑波大学、2010年12月17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く。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。

2010年度は伊部が助教として着任し、その後に転出した。

1.2.1 現象論

超対称模型の LHC 現象論

本格稼働を始めた LHC によって素粒子標準模型を超えた物理の発見が期待されている。

藪藤と諸井とは、超寿命荷電粒子（スタウ）が存在する場合の LHC 実験における超対称粒子生成のシグナルの研究を行った。そして、特にスタウのトラック情報を使う事で様々な超対称粒子の質量やスピン情報が得られる事を明らかにした [2]。

また、遠藤、濱口、中路はグラビティーノが最も軽い超対称性粒子 (LSP) であり、スタウが二番目に軽い超対称性粒子 (NLSP) であるような模型において高い宇宙の再加熱温度が実現されている場合、LHC で期待されるシグナルについて解析した [19]。

様々な標準模型を超えた物理が提案されているが、グラビティーノが $O(1)$ eV の小さな質量を持つ超対称性模型は現象論的問題点の少なく注目されている。しかし、宇宙論的制限からグラビティーノの質量に強い制限がついており、それに伴い SUSY 粒子の質量に強い上限がついている。佐藤、白井は真空構造が安定なタイプの模型について、LHC 実験のごく初期にテストできることを議論した [14]。さらに中村、白井はより一般的なタイプの模型についての LHC の発見能力についての議論を行い、真空構造が準安定なタイプの模型についても数年以内にテストできることを示した [16]。

暗黒物質

近年の ATIC、PAMELA、FERMI などの宇宙線観測に触発されて、宇宙線と暗黒物質の関係について注目されている。白井は齊藤（東大）との共同研究において、原始ブラックホールと暗黒物質となる粒子が同時に存在すると暗黒物質の対消滅が促進されて、近年観測された PAMELA による陽電子の過剰が説明できることを示した [15]。

諸井は、石渡（東大・宇宙線研）、松本（富山大）とともに、不安定な超対称暗黒物質が生成する高エネルギー宇宙線フラックスの詳細に計算し、観測と

無矛盾なフラックスが得られるパラメータ領域を明らかにした [1]。

また、ゲージ伝達模型では、通常グラビティーノが暗黒物質の候補となる。しかし、グラビティーノが暗黒物質であるという状況下では、その残存量とバリオン数を同時に説明することが困難であることが知られている。浜口、横崎は、ゲージ伝達模型に新たな相互作用を加えることによって、グラビティーノが暗黒物質になり、かつバリオン数も説明できるシナリオを作った [4]。

グラビティーノが $O(1)$ eV の小さな質量を持つ超対称性模型は現象論的問題の少ない模型だが、適切な暗黒物質の候補が存在しないという欠点がある。白井はメッセンジャーと呼ばれる粒子の複合状態が暗黒物質の候補になることを示し、その現象論的考察を博士論文にまとめた [24]。

超対称模型

柳田、米倉はグラビティーノが軽く宇宙論的問題がないようなゲージ伝達模型で、さらに暗黒物質の候補をも含む模型を提唱した [6]。

伊部、佐藤、柳田、米倉は、R-symmetry を保つ Gauge Mediation の模型について調べ、そのような模型では軽いグルイーノが予言されること、数 keV の質量を持つグラビティーノをエントロピー生成で薄めることによりダークマターの候補とすることができる事を示した。[17]

超対称シーソー模型は、ニュートリノの質量が小さいことを自然に説明することができる。この模型では、超対称性の破れが、レプトンのフレーバーを破る過程に対して寄与することが知られている。このような過程は MEG 実験などから厳しく制限されている。横崎は、Sin Kyu Kang(Seoul, Nat. U. Technol.)、両角（広島大）とともに、レプトンのフレーバーを破る過程に対し、これまで無視されていた寄与が重要な場合があることを示した。具体的には、右巻きスニュートリノとその反粒子間の混合が大きい場合に、レプトンのフレーバーを破る過程に大きな寄与があることを示した [3]。

B メソン混合

Tevatron で観測された like-sign dimuon charge asymmetry は、B メソン混合の CP 非対称性が、標準模型の予言より大きいことを示唆している。すなわち、B メソン混合の CP 非対称性に対して、標準模型を超える物理の寄与があると考えられる。遠藤、横崎は超対称パートナー粒子が軽いときには、中性子の電気双極子モーメントの制限により、このような大きな非対称性を説明するのが困難であることを示した。また、超対称パートナー粒子が重い場合には、現在の実験と矛盾せずに説明できることを示した [5]。

遠藤、白井、柳田は 1、2 世代のスカラーフェルミオンが第 3 世代に比べて軽い split generation model

において Tevatron で観測された like-sign dimuon charge asymmetry が自然に説明されることを指摘した [21]。

アノマリー問題

米倉は、超対称性を持った場の理論において古くから知られていたアノマリー問題に対する解決を提唱した [7]。

インフレーション模型

佐藤は、波場（大阪大）、松本（IPMU）とともに、Asymmetric Dark Matter と S neutrino Inflation という 2 つのシナリオを組み合わせ、現在の宇宙のダークマター、バリオン数の非対称性、インフレーションを 1 つの模型で説明できることを示した。[18]

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／重力対応を用いて仮想光子とハドロンの弹性散乱現象と、一般化されたパートン分布関数について詳しい解析を行った [64, 65, 66, 67]。

格子上のカイラルフェルミオン

格子ゲージ理論は Wilson により 1974 年に提唱され、場の量子論の摂動によらない定義を可能にしたが、当時の格子ゲージ理論は、カイラル対称性を格子上で実現できず、標準模型のごく一部である、カイラル対称性の無い QCD に対してのみ有効な形式であった。カイラル対称性をもつ QCD および WS 理論を格子上で扱えるようになったのは、Ginsparg-Wilson (GW) 関係式を満たすゲージ共変な Dirac 演算子 (Overlap 演算子) を用いて、格子上で厳密なカイラル対称性を実現できることが明らかになって以来のことと、比較的最近（1990 年代後半から 2000 年代）のことである。この発見以来、Overlap 演算子に基づく格子ゲージ理論に関する様々な研究が進められてきた。

しかしながら、GW 関係式に基づいた、格子上で厳密なカイラル対称性を保つ定式化に関する基礎的问题が完全に解決していた訳ではない。格子場理論は、ユークリッド空間で定式化されており、「量子論」としての性質は自明ではない。格子理論が、Unitarity を満たす量子論に正しく対応しているための条件を Reflection Positivity と呼ぶ。格子場の理論を場の量子論の正しい正則化とみなしそれを用いた解析を正当化するには、当該の格子場理論が Reflection Positivity を満足しないければならないが、Overlap fermion を用いた系に関する Reflection

Positivity の厳密な証明はこれまでには知られておらず、量子論としての Unitarity がどこまで成り立つかは不明であった。

臼井は、菊川（東大駒場）との共同研究で、ゲージ場との相互作用のない自由な Overlap Dirac フェルミオンの系を考え、この系が reflection positivity を満足することを、格子上で成り立つ厳密な定理として証明した [8]。

また、Overlap fermion を用いることにより、Wess-Zumino 模型を、格子上で $U(1)_R$ 対称性及び Free limit における $N = 1$ の超対称性を manifest に保つ定式化が可能であることが知られているが、臼井と菊川は、この定式化においては、Reflection positivity が破れてしまうことを指摘し、運動量空間において、Reflection positivity の破れの程度に対する定量的な評価を与えた [9]。

1.2.2 弦理論

F 理論による現象論

F 理論は超弦理論の一種であり、例外型のゲージ群を実現できる利点をもつことから、現象論への応用において有用である。川野、林、土屋は渡利（IPMU）との共同研究において、現象論への応用のひとつとして、F 理論から得られるフレーバー構造について議論した [12]。F 理論から実験で知られているフレーバー構造を出すシナリオはそれまでひとつ知られていたが、[12] では現実的なフレーバー構造を得るための新しい方法を見出した。

湯川結合のフレーバー構造と共に重要な問題として、超対称性大統一理論では次元四の陽子崩壊演算子が一般に存在することが挙げられる。川野、林、土屋は渡利（IPMU）との共同研究において、F 理論から構築した大統一理論における次元四の陽子崩壊演算子の禁止について議論した [13]。これまでよく考えられてきた方法は、随伴表現スカラー場の期待値を特殊に調節することで $U(1)$ 対称性を生成し、それによって危険な演算子を禁止していた。しかし、内部空間の詳細な解析を行うことにより、その $U(1)$ 対称性が実際には破れており、次元四の陽子崩壊演算子が生成されることを明らかにした。

林はこの F 理論における陽子崩壊問題に関する研究成果を博士論文にまとめた [25]。

4 次元超対称ゲージ理論と 2 次元重力との対応

以前より Seiberg-Witten 理論などを通じて 4 次元の超対称ゲージ理論が 2 次元リーマン面の知識を用いて解くことができる事が理解されていたが、最近 Gaiotto などによりさらに具体的に 2 次元の量子重力理論との対応が理解されるようになってきた。ゲージ群が $SU(2)$ の場合には Liouville 理論、 $SU(3)$ 以上の場合には Toda 方程式との対応が予想されている。菅野、松尾、柴は $SU(3)$ に対応する量子力学

的な戸田方程式の相関関数を具体的に構成し、ゲージ群が $SU(3)$ の直積の場合には対応関係がそのまま拡張できることを示し、その一方で異なる群の積の場合には問題が生じることを指摘した。[10]

また、張は松尾の指導の下、対応を確認する2つの方法について修士論文にまとめた。[28] 1つ目の方法は、ゲージ理論において摂動的に求めた Nekrasov の分配関数と、Toda 理論の n 点相関関数との直接的な比較である。もう1つの方法は、行列模型を介して2つの理論の対応を見るというものである。まず、ある行列模型の分配関数が Toda 理論の n 点相関関数を再現することを示し、次にその模型の量子スペクトラル曲線とゲージ理論側の Seiberg-Witten 曲線が一致することを示した。

AdS/CFT 対応、Kerr/CFT 対応

AdS/CFT 対応とは、AdS 背景上の重力理論と共形場理論の間に予想されている双対性である。この対応の応用として、取り扱いの難しい強結合ゲージ理論の解析を重力側で行うということが考えられる。実際に QCD や物性理論への AdS/CFT の応用が盛んに研究されている。

物性系では、固定点において、時間と空間のスケーリング次元が異なるスケーリング則を満たすような場合が多く知られている。このような系に双対な重力解 (Lifshitz 解) を構成する研究が近年行われている。田中は西岡 (プリンストン大) との共同研究 [20] で、結合定数が不連続に変化するような Lifshitz 解を、IIB 型超重力理論において構成した。さらに、IIB 型理論だけでなく、一般の次元の有効理論において同様の解の構成を行った。

松宮は Kerr/CFT 対応、及びその最近の発展についてのレビューを修士論文でまとめた。[27]

M5 ブレーン上の場の理論

福田は、M5 ブレーン上の場の理論に関する最近の発展を修士論文にまとめた。[26]

<受賞>

<報文>

(原著論文)

- [1] K. Ishiwata, S. Matsumoto and T. Moroi, “Decaying Dark Matter in Supersymmetric Model and Cosmic-Ray Observations,” JHEP **1012**, 006 (2010).
- [2] T. Ito and T. Moroi, “Spin and Chirality Determination of Superparticles with Long-Lived Stau at the LHC,” Phys. Lett. B **694**, 349 (2011).
- [3] S. K. Kang, T. Morozumi and N. Yokozaki, “Effects of Large Threshold Corrections in Supersymmetric Type-I Seesaw Model,” JHEP **1011**, 061 (2010) [arXiv:1005.1354 [hep-ph]].

- [4] K. Hamaguchi and N. Yokozaki, “Soft Leptogenesis and Gravitino Dark Matter in Gauge Mediation,” Phys. Lett. B **694**, 398 (2011) [arXiv:1007.3323 [hep-ph]].
- [5] M. Endo and N. Yokozaki, “Large CP Violation in B_s Meson Mixing with EDM constraint in Supersymmetry,” JHEP **1103**, 130 (2011) [arXiv:1012.5501 [hep-ph]].
- [6] T. T. Yanagida, K. Yonekura, “A Conformal Gauge Mediation and Dark Matter with Only One Parameter,” Phys. Lett. **B693**, 281-286 (2010). [arXiv:1006.2271 [hep-ph]].
- [7] K. Yonekura, “Notes on Operator Equations of Supercurrent Multiplets and Anomaly Puzzle in Supersymmetric Field Theories,” JHEP **1009**, 049 (2010). [arXiv:1004.1296 [hep-th]].
- [8] Y. Kikukawa and K. Usui, “Reflection Positivity of Free Overlap Fermions,” Phys. Rev. D **82**, 114503 (2010) [arXiv:1005.3751 [hep-lat]].
- [9] Y. Kikukawa and K. Usui, “Reflection Positivity of $N=1$ Wess-Zumino model on the lattice with exact $U(1)_R$ symmetry,” arXiv:1012.5601 [hep-lat].
- [10] S. Kanno, Y. Matsuo and S. Shiba, “Analysis of correlation functions in Toda theory and AGT-W relation for $SU(3)$ quiver,” Phys. Rev. D **82**, 066009 (2010) [arXiv:1007.0601 [hep-th]].
- [11] 川野 輝彦、八木 太、「 a -Maximization in $\mathcal{N} = 1$ Supersymmetric Spin(10) Gauge Theories,’ Int. J. Mod. Phys. A **25**, 5595 (2010).
- [12] H. Hayashi, T. Kawano, Y. Tsuchiya and T. Watari, ”Flavor Structure in F-theory Compactifications,” JHEP **1008**, 036 (2010).
- [13] H. Hayashi, T. Kawano, Y. Tsuchiya, T. Watari, “More on Dimension-4 Proton Decay Problem in F-theory -Spectral Surface, Discriminant Locus and Monodromy-,” Nucl. Phys. **B840**, 304-348 (2010).
- [14] R. Sato, S. Shirai, ”LHC Reach of Low Scale Gauge Mediation with Perturbatively Stable Vacuum,” Phys.Lett.B692:126-129, 2010.
- [15] R. Saito, S. Shirai, ”Primordial Black Hole as a Source of the Boost Factor,” Phys.Lett.B697:95-100,2010.
- [16] E. Nakamura, S. Shirai, ”Discovery Potential for Low-Scale Gauge Mediation at Early LHC,” JHEP 1103:115, 2011.
- [17] M. Ibe, R. Saito, T. T. Yanagida and K. Yonekura, “Gravitino Dark Matter and Light Gluino in an R-invariant Low Scale Gauge Mediation,” arXiv:1012.5466 [hep-ph].
- [18] N. Haba, S. Matsumoto and R. Sato, “Sneutrino Inflation with Asymmetric Dark Matter,” arXiv:1101.5679 [hep-ph].

- [19] M. Endo, K. Hamaguchi, K. Nakaji, “Probing High Reheating Temperature Scenarios at the LHC with Long-Lived Staus,” JHEP **1011**, 004 (2010). [arXiv:1008.2307 [hep-ph]].

- [20] T. Nishioka, H. Tanaka, “Lifshitz-like Janus Solutions,” JHEP 02 (2011) 023

- [21] M. Endo, S. Shirai and T. T. Yanagida, “Split Generation in the SUSY Mass Spectrum and $B_s - \bar{B}_s$ Mixing,” to appear in PTP. [arXiv:1009.3366 [hep-ph]].

(会議抄録)

- [22] Y. Kikukawa and K. Usui, “Reflection positivity of the free overlap fermions,” PoS **LATTICE2010**, 267 (2010).

- [23] 白井耕太 “自由な Overlap Fermion の系における Reflection Positivity の証明” 基研研究会「場の理論と超弦理論の最先端」研究報告、 素粒子論研究 118(3), C90, 2010-11-20.

(国内雑誌)

(学位論文)

- [24] 博士論文 : S. Shirai, “Low energy scale gauge mediation and composite dark matter.”

- [25] 博士論文 : H. Hayashi, “F-theory and its Applications to Phenomenology.”

- [26] 修士論文 : 福田泰嵩, ”Attempts toward field theory for multiple M5-branes”

- [27] 修士論文 : 松宮就章, “3 次元ブラックホールの共形対称性について”

- [28] 修士論文 : 張弘, “ $\mathcal{N} = 2$ Gauge Theories, Toda Field Theories, and Quiver Matrix Models”

(著書)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [29] S. Shirai, “Aspects of Non-minimal Gauge Mediation,” SUSY10, Bonn University, August 2010

- [30] 横崎 統三, “Leptogenesis and Gravitino Dark matter in Gauge Mediation”, “Summer Institute 2010”, 富士 Calm, 2010 年 8 月 14 日

- [31] 横崎 統三, “Large CP violation in B_s meson mixing with EDM constraint in SUSY” “XXIII Workshop Beyond the Standard Model”, Physikzentrum Bad Honnef, 2011 年 3 月 16 日

- [32] K. Usui, “Reflection Positivity of Free Overlap Fermions”, The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory, Lattice2010 June 14-19, 2010, Villasimius, Italy.

- [33] S. Iwamoto, “Cosmological Constraints on R-parity violating SUSY”, 2nd Bethe Center Workshop, Bad Honnef, Germany, 4 October 2010.

- [34] H. Hayashi, “More on Dimension-4 Proton Decay Problem in F-theory,” Summer Institute 2010, Fuji Calm, August 2010

- [35] H. Hayashi, “More on Dimension-4 Proton Decay Problem in F-theory,” SUSY10, Physikalisches Institut Bonn, August 2010

- [36] Yutaka Matsuo, “Applications of Nambu bracket in M-theory”, RIMS International Conference “Perspectives in Deformation Quantization and Noncommutative Geometry”, November 1-12, 2010, RIMS Kyoto University

- [37] R. Sato, “Low Scale Gauge Mediation at Early LHC,” SUSY10, University of Bonn, August 2010

- [38] K. Nakaji, “Probing the reheating temperature at the LHC” Summer Institute 2010 Phenomenology, August 2010

- [39] K. Nakaji, “Identifying the origin of longevity of Stau at LHC” Beyond the Standard Model, Physikzentrum Bad Honnef, March 2011

招待講演

- [40] 諸井健夫、“Non-thermal right-handed sneutrino as cold dark matter” Non-thermal cosmological history of the universe, University of Michigan, Ann Arbor, U.S.A. , 2010 年 10 月

- [41] 諸井健夫, “SuperWIMP dark matter candidates” TeV Particle Astrophysics 2010, Paris, France, 2010 年 7 月

- [42] K. Hamaguchi, “Probing Reheating Temperature at the LHC with Long-Lived Staus”, COSMO/CosPA 2010, October 1, 2010, Tokyo.

- [43] K. Hamaguchi, “Probing reheating temperature at the LHC with long-lived staus.”, Non-Thermal Cosmological Histories of the Universe Workshop, October 20, 2010, University of Michigan.

- [44] 横崎 統三, “Soft Leptogenesis and Gravitino Dark matter in Gauge Mediation”, “2nd International Workshop on Dark Matter, Dark Energy and Matter-Antimatter Asymmetry”, Department of Physics, National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan, 2010 年 11 月 6 日

- [45] 川野 輝彦, “An introduction to F-theory GUTs,” Taiwan String Workshop 2011, Tung-Hai University, Taichung, 2010 年 12 月 15 日 - 18 日

- [46] H. Hayashi, “Phenomenological Aspects of Global F-theory Compactifications,” KEK Workshop on String Phenomenology 2010, KEK, December 2010

(国内会議)

一般講演

- [47] 白井智, “Aspects of Non-minimal Gauge Mediation,” 日本物理学会, 九州工業大学, 2010 年 9 月.

- [48] 白井智, “Gauge Mediation at Early Stage LHC,” 素粒子物理学の進展 2011, 京都大学, 2011 年 3 月.

- [49] 横崎 統三, “ゲージ媒介機構でのレプトン数生成”, “日本物理学学会 2010 年秋季大会”, 九州工業大学, 2010 年 9 月 13 日
- [50] 横崎 統三, “CP Violation in Bs-Bs bar mixing and the EDM constraint in MSSM” “新潟冬の研究会 2011 「素粒子物理学の展望」 II”, 新潟県「湯沢東映ホテル」, 2011 年 1 月 7 日
- [51] 横崎 統三, “Large CP Violation in Bs Meson Mixing with EDM constraint in Supersymmetry”, “基研研究会 素粒子物理学の進展 2011”, 京都大学 基礎物理学研究所, 2011 年 3 月 9 日
- [52] 米倉和也, “Single scale model of SUSY breaking, gauge mediation and dark matter”, 基研研究会「素粒子物理学の進展 2011」、基礎物理学研究所、2011 年 3 月
- [53] 白井耕太, “自由な Overlap Fermion の系における Reflection Positivity の証明” 基研研究会「場の理論と超弦理論の最先端」、京大基研、2010 年 7 月。
- [54] 白井耕太, “格子上の $U(1)_R$ 対称性をもつ $N = 1$ Wess-Zumino 模型の Reflection Positivity について”, 新潟大学、2011 年 3 月。
- [55] 岩本 祥, “Phenomenology of R-parity violating SUSY”, 原子核三者若手 夏の学校, パノラマランド木島平 (長野県), 2010 年 8 月 8 日。
- [56] 林博貴, “More on Dimension-4 Proton Decay Problem in F-theory,” 日本物理学会、九州工業大学、2010 年 9 月
- [57] 土屋陽一, “More on Dimension-4 Proton Decay Problem in F-theory -Spectral Surface, Discriminant Locus and Monodromy-,” 基研研究会「場の理論と超弦理論の最先端」、基礎物理学研究所、2010 年 7 月
- [58] 佐藤亮介, “Low Scale GMSB and early LHC reach,” LHC が切り拓く新しい物理、東京大学、2010 年 6 月
- [59] 佐藤亮介, “グラビティーノが軽い超対称模型と 7TeV の LHC,” 日本物理学会、九州工業大学、2010 年 9 月
- [60] 佐藤亮介, “Sneutrino Inflation and Asymmetric Dark Matter,” 素粒子物理学の進展 2011、京都大学基礎物理学研究所、2011 年 3 月
- [61] 中路紘平, “LHC signatures with high reheating temperature in long-lived stau scenario” Atlas 研究会, 2010 年 12 月
- [62] 中路紘平, “LHC signatures with high reheating temperature in long-lived stau scenario” 新潟冬の研究会, 2011 年 1 月
- [63] 中路紘平, “Identifying the Origin of Longevity of Metastable Stau at the LHC” 基研研究会 素粒子物理学の進展 2011, 2011 年 3 月
- [64] 西尾亮一, “Transverse Structure of Hadrons in Holographic QCD” 基研研究会「場の理論と超弦理論の最先端」、2010 年 7 月
- [65] 西尾亮一, “High-Energy Photon-Hadron Scattering in Holographic QCD” KEKPH2011、KEK、2011 年 3 月
- [66] 西尾亮一, “High-Energy Photon-Hadron Scattering in Holographic QCD” 基研研究会「素粒子物理学の進展」、2011 年 3 月
- [67] 西尾亮一, “High-Energy Photon-Hadron Scattering in Holographic QCD” 日本物理学会、新潟大学、2011 年 3 月
- 招待講演
- [68] 諸井健夫, “LHC の初期段階に期待する新発見,” 日本物理学会、2010 年秋季大会、九州工業大学、2010 年 9 月。
- [69] 松尾 泰, “Analysis of correlation functions in Toda theory and AGT-W relation for $SU(3)$ quiver,” 立教大学「場の理論、量子重力研究会」2011 年 1 月 5 日、6 日
(セミナー)

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。

2 原子核・素粒子実験

2.1 原子核実験グループ 【早野・小沢】

原子核実験グループは、早野研、小沢研(2010年度末まで)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。二研究室が取り組んでいる研究テーマは異なるが、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。

小沢研究室では、強い相互作用の非摂動論的側面に関わる諸問題を実験的に解明するための研究を行っている。特に、クオーク・グルーオン・プラズマ(QGP)の生成とその性質を調べる実験や陽子や中間子などのハドロンが動的な質量を獲得する機構を調べる実験に力を入れている。2010 年度は、米国ブルックヘブン国立研究所や欧州 CERN 研究所において QGP を探索する実験のデータ収集と解析を行いつつ、新たに東海村に建設された J-PARC において原子核密度中の中間子質量とカイラル対称性の回復に関わる、 ϕ 中間子の電子対崩壊による質量変化の直接測定実験と ω 中間子の質量変化と原子核束縛系の同時測定実験の 2 種類の実験を遂行している。また、高エネルギー加速器研究機構(KEK)、ブルックヘブン国立研究所、理化学研究所などと共に Gas Electron Multiplier(GEM) と呼ばれる新検出器の開発も行っている。

2.1.1 反物質の研究(早野研究室)

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

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原子(化学記号は $\bar{p}\text{He}^+$)とは、反陽子と電子、ヘリウム原子核から構成される三体系の原子である。電子は通常の $1s$ 軌道に束縛されているが、反陽子は主量子数 n と軌道角運動量 ℓ がともに ~ 38 程度の高励起状態に捕獲されている。この原子の遷移エネルギーをレーザー分光法で測定して、理論計算値と比較することによって、反陽子と電子の質量比を高精度で決定することができる。

2010 年、早野研究室とマックスプランク量子光学研究所は、 10^8 個という大量の反陽子ヘリウム原子を $T = 1.5\text{K}$ の極低温まで冷却して、その遷移エネルギーを 9 衍の精度で測定することに成功した。一般にレーザー分光では、測定対象の原子を冷却すると、その熱運動によるドブラー効果が抑えられるため、測定精度がおよそ $T^{-1/2}$ に比例する形で向上する事が期待できる。しかし、 $\bar{p}\text{He}^+$ 原子の場合は生成後、数マイクロ秒以内に反陽子が原子核に吸収されて消滅してしまうために、通常の方法で冷却するのは困難だと考えられていた。我々は $T = 1.5\text{K}$ で数ワットという高い冷却パワーをもつ特殊な超流動ヘリウム熱交換器を独自開発した。熱交換器は、 $7000 \text{ m}^3/\text{h}$ の排気速度を持つメカニカルブースターポンプと直結することによって、12 時間以上連続運転できる。この装置をもとに、温度 $T = 1.5\text{K}$ 、圧力 $P = 1 \text{ mb}$ 、容積 $V = 3000 \text{ cm}^3$ の低密度ヘリウムガス標的を開発した。この標的を用いてレーザー分光を行ったところ、 $\bar{p}\text{He}^+$ は他のヘリウム原子と散乱を繰り返して数 100 ns 以内に超流動ヘリウム温度まで熱化されることが確認できた。これは、反物質を含む原子としては、世界で最も低い達成温度と言える。この実験では、我々のグループで独自開発した高精度パルス Nd:YAG とチタンサファイアレーザーを用いた。

また、昨年まで行っていた $\bar{p}\text{He}^+$ 原子の二光子レーザー分光実験のデータ解析を完了した。この実験では、我々のグループで考案した手法で、 $\bar{p}\text{He}^+$ 原子に二方向からレーザー光線を同時に照射する事によって、上記ドブラー幅を打ち消すものを用いた。実験結果を JINR 研究所の Korobov の QED 計算と比較することによって、新しい反陽子と電子の質量比を求めることができたが、この論文は現在投稿中である(早野、轟、小林)。

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超えるような超低エネルギー($E_{\bar{p}} < 100 \text{ keV}$)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、100 keVでの反陽子-原子核吸収断面積測定に着手した。2010年度は超低速反陽子ビームモニター用の検出器の開発を行い、秋のテスト実験でこの検出器と理論計算を用いて超低速反陽子ビームの輸送を成功させた。現在は断面積測定のための検出器の開発を進めていて、2011年度秋のビームタイムで実際に100 keVでの反陽子-原子核吸収断面積の測定を行う予定である(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、パリティー、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、パリティー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、この実験で検証すべく2011年度に測定を行う予定である。

マックスプランク量子光学研究所と早野研究室では、CERNのASACUSA実験で開発したナノ秒チタンサファイヤレーザーを提供する。このレーザーの特徴は、数kWの高い出力パワーと100 MHzの狭い線幅(レーザー光子のエネルギー広がり)である。このレーザーを用いることで、生成量が比較的小ない(数個/秒)フランシウム同位体の同位体シフト(10 GHz程度)と超微細構造(100 MHz程度)を測定できる。2010年度には、2011年度の実験に向けたレーザーの準備を行った(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中間子水素原子X線の精密測定

K中間子水素原子は、クーロン力で束縛された K^- 中間子と陽子からなるエキゾチックアトムである。その原子エネルギー準位は、電磁相互作用のみで計算された値に、強い相互作用の効果によるシフトと幅を持つ。特に1s状態のシフトと幅から、低エネルギー極限における K^-p の散乱長を導出でき、K中間子と核子間の強い相互作用を定量的に評価することができる。

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 cm²のシリコンドリフト検出器(SDD)を使って検出した。6 keVで150 eVという高いエネルギー分解能(FWHM)に加えて、<1 μsの時間分解能を持つSDDを144個使用し、高い統計精度とS/N比を達成した。2010年度、我々は昨年度に収集した水素標的とヘリウム3標的の測定データを解析した。K中間子水素原子に関しては、電磁相互作用のみで計算された1s準位のエネルギーからの強い相互作用の効果によるシフトと幅の最終結果を2011年度中に公表する。このシフトと幅の値から、低エネルギー極限における K^-p の散乱長を導出でき、K-中間子と核子間の強い相互作用を定量的に評価することができる。また、初のヘリウム3標的の測定から、図2.1.1(原著論文[15])に示したK中間子ヘリウム3原子のX線スペクトルを取得し、2p原子状態のエネルギーが強い相互作用によって大きくなっていることを示した。この結論を確立するためには、より高い精度でK中間子ヘリウム3原子のX線を測定する予定のJ-PARC実験(E17)の結果が待たれる(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にするためK中間子ヘリウム3の分光実験を推進してきた。しかし、2010年末にSIDDHARTA実験が初のK中間子ヘリウム3の分光の結果を同様のセット

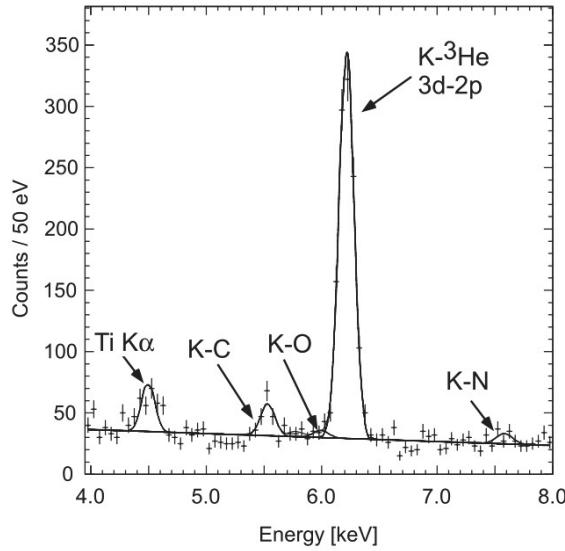


図 2.1.1: ヘリウム 3 標的の測定で得られた X 線スペクトル(全 SDD のデータ)。6.4 keV において 150 eV(FWHM) の分解能を実現した。K 中間子ヘリウム 3 原子の L α X 線(3d – 2p 遷移の特性 X 線)の測定は世界初。

アップでの K 中間子ヘリウム 4 の分光の結果とともに発表し、両者の 2p 状態の強い相互作用によるシフトに理論で説明できない差(同位体シフト)があることを示唆した。そこで、より系統誤差を抑えた測定が可能である我々は、E17 に於ける従来の計画である K 中間子ヘリウム 3 の分光に加え、K 中間子ヘリウム 4 の分光を同じセットアップで行い同位体シフトの有無を確認することを提案し、追加のビームタイムを要求している。

2010 年度においては KEK 北カウンターホールで準備を進めてきた X 線検出器 SDD 及び液体ヘリウム標的を J-PARC に移設し、E17 が行われるハドロンホール K1.8BR 実験エリアに主要検出器が全て揃った。秋のビームタイムでは E17 に於ける最適運動量である 0.9 GeV/c で K1.8BR ビームラインの調整を昨年度に引き続き進行するとともに、CDS(Cylindrical Detector System, 標的内事象選択のための 2 次粒子飛跡検出に用いる)及び SDD のビーム中での動作を確立した(図 2.1.2)。SDD についてはパイルアップ事象の除去や X 線入射角度による応答の変化等、線源を用いた系統的な R&D も進行した。

東日本大震災における我々の検出器へ被害は限定的であり、加速器施設が復旧次第速やかに E17 が実行できると期待される。(早野・鈴木・佐藤・橋本)。

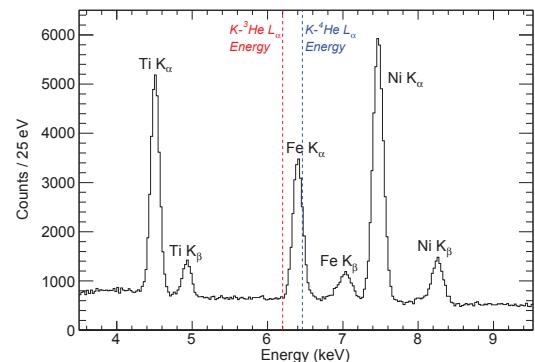


図 2.1.2: 2010 年 11 月に行われた SDD のビームコミッショニングによって得られた全 8 台を合計した典型的スペクトル。in-situ のエネルギー校正用に設置された Ti、Ni 箔及び液体 He 標的のかわりに設置した Fe 箔から、ビームによって励起された X 線を観測した。K 中間子ヘリウム L α のエネルギー(約 6 keV)においておよそ 150 eV(FWHM) の高分解能が達成された。

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なされている。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開く事が期待される。

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 GeV/c の (K^-, N) 反応によって $K^- pp/K^- pn$ を生成し、特に $K^- pp$ については崩壊で生じる Λp 対を CDS(Cylindrical Drift-chamber System) を用いて再構成する。

2010 年度においては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、 ${}^3\text{He}$ 標的及びビームライン検出器の構築を完了し、さらには先立って調整された 2.9 kW の加速器強度による K^- ビームを利用して $A(K^-, \Lambda K_s^0)$ 反応による CDS の校正を行って装置全体の健全性を確認した(早野・鈴木・佐藤)。

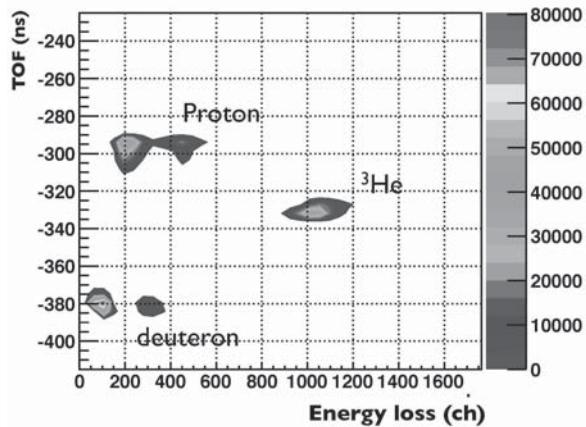


図 2.1.3: プラスチックシンチレーターによる ^3He とp、dの分離。p、dにはそれぞれdouble hitの要素も見られる。

2.1.5 π 中間子原子の精密分光 (早野研究室)

原子核中の π 中間子の束縛エネルギーの測定は、 π 中間子と核子の相互作用の研究において重要な意味を持つ。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 中間子原子の1s軌道のエネルギー及びその幅の高精度分光実験を計画しており、2010年度においてはその実験に向けたパイロット実験を行った。

RIBFでは、前回実験を行ったGSIに比べて10倍の強度 $10^{12}/\text{s}$ を持った重陽子ビームを用いることが出来るが、反面GSIと比較して運動量広がりが約3倍大きい。そこで、分散整合という特殊なイオン光学設定を適用し分解能の向上を行う。それにより世界で初めて2s軌道を観察することが出来ると予想されており、また1s軌道のエネルギー及びエネルギー幅の決定精度も向上すると期待されている。今回の実験では、まず250MeV/uの ^{14}N ビームを用いて分散整合の為の光学系が確立された。次に同じエネルギーの $\sim 4 \times 10^{11}/\text{s}$ の重陽子ビームを用いて光学系の確認、及び本実験で用いる予定であるmulti-wire drift chamber (MWDC)とプラスチックシンチレータの動作確認と性能測定が行われた。これらの検出器については、重陽子の分解反応による非常に多量の陽子のバックグラウンドの中から ^3He を同定し、その軌跡の測定が可能であるとの確認が主な目的であったが、実際プラスチックシンチレーターにより ^3He の同定が可能なことが確認され、また同定された ^3He のうち90%の軌跡がMWDCによって測定できることが確認された(早野・伊藤・西)。

2.1.6 ミュオニウム生成標的的研究 (早野研究室)

超低速偏極ミュオンビームはエネルギーが0.5~30 keV程度に抑えられたビームである。生成過程は、4 MeV程度のエネルギーを持つ表面ミュオンビームをミュオニウム生成標的に照射し、ミュオニウム(電子と正ミュオンの束縛状態)に転換した後、レーザーでイオン化し、さらに再加速するというものである。このような方法を取ることで、横方向運動量が小さく、運動量分散が小さい偏極ミュオンビームを得ることが出来るが、強度が弱いことが難点である。理研RAL超低速ミュオンビームラインでは、偏極ミュオンビームの強度 $1.3 \times 10^6/\text{s}$ に対し得られる超低速ミュオンは15~20個/sにとどまる。これはミュオンがミュオニウムへ転換し、かつミュオニウムがレーザー照射領域まで脱出する効率が全入射ミュオンに対して3%であり、尚且つレーザーによるイオン化効率が 10^{-3} と低いことが理由である。特に後者の問題を解決する手段として、レーザーの照射効率を上げることが考えられる。現在ミュオニウム生成標的として用いられている熱タンクステン箔に替わる、常温以下で用いる事のできる標的を開発することで、ミュオニウムの標的表面付近における密度分布を上げることが考えられる。我々はミュオニウム生成標的として、シリカエアロジエル等の材料に着目した。シリカ粉末は熱タンクステンとそのテスト実験をカナダ TRIUMF 研究所で行った。ミュオンをミュオニウムへ転換する効率は、シリカエアロジエルでタンクステン箔の7割であった。ミュオニウムの表面付近の分布に関しては現在解析中である。2011年度はシリカエアロジエルの密度を変化させて再度テスト実験を行うとともに、理研 RAL 超低速ミュオンビームラインにシリカエアロジエル標的を導入し実証試験を行う(早野・藤原)。

2.1.7 荷電ベクトル型スピン単極巨大共鳴の探索 (早野研究室)

原子核には、様々な集団的励起モードが知られている。それらは外界から原子核に与えられるスピン(ΔS)、荷電スピン(ΔT)、軌道角運動量(ΔL)で特徴づけられ、なかでも、 $\Delta S = \Delta T = \Delta L = 0$ の荷電スカラー型(陽子と中性子が同位相)等方的密度振動は、実験理論双方から理解が進められてきた。その一方で、荷電ベクトル型(逆位相)密度振動については知見が乏しく、今後の進展が新しいタイプの原子核物質圧縮率の研究につながることが期待される。我々は、原子核全体が荷電反転($\Delta T = 1$)、スピン反転($\Delta S = 1$)を伴って等方的($\Delta L = 0$)に密度振動($\Delta n = 1$)する励起状態である「荷電ベクトル型スピン単極巨大共鳴」(IVSMR)の研究を行った。 β^- 型、 β^+ 型の荷電交換反応それぞれを使った研究を報告する。

発熱型荷電交換反応による β^- 型 IVSMR の探索

本研究は、不安定核 ^{12}N を ^{90}Zr 標的に照射することによって引き起こされる発熱型の β^- 荷電交換反応 $^{90}\text{Zr}(^{12}\text{N}, ^{12}\text{C})^{90}\text{Nb}$ を用いて、残留核 ^{90}Nb の IVSMR を探索するというものである。

不安定核に誘起される原子核反応では、不安定核が崩壊するときに放出されるエネルギーが、小さな運動量移行 (q) のみをもって、標的核に付与される。即ち、適当な入射不安定核を選択することにより、高い励起エネルギー (ω) に対しても $q \sim 0$ という条件を達成し得、 $\omega > q$ の運動学領域の原子核応答を研究することが可能になる。IVSMR はそのような応答の一つであり、このために $^{90}\text{Zr}(^{12}\text{N}, ^{12}\text{C})^{90}\text{Nb}$ 反応は IVSMR 探索に最も有利な反応である。この実験は RIBF で供給される大強度の中間エネルギー重イオンビームと、高エネルギー・角度分解能の原子核分光が可能な SHARAQ スペクトロメタの組合せにより初めて可能となった。

実験は 2010 年 10 月に行った。超伝導リングサイクロトロンにて加速した 250 MeV/u の ^{14}N ビームを Be 標的に照射し、そこで生成した核破砕片を RI ビーム分離装置 BigRIPS に入射した。この結果、エネルギー約 175 MeV/u、強度 1.4 Mcps、純度 90% の ^{12}N ビームが得られた。この ^{12}N ビームを ^{90}Zr 標的に照射し、反応生成物 ^{12}C の運動量を SHARAQ スペクトロメタで測定することにより、 ^{90}Nb の励起エネルギースペクトルを取得することに成功した。

この際、発熱型反応に特有の物理的バックグラウンド事象を弁別するため、(1) 標的の直上・下流にプラスチック検出器を配置して入射・出射粒子を識別し、また、(2) 標的を NaI 検出器アレイ DALI2 で取り囲み、 γ 線を測定することで、出射核 ^{12}C が励起状態になっている事象を差し引いた。そのデータは現在鋭意解析中であり、今後、理論計算との比較などを通じて議論を深める予定である。

これまでの原子核分光において、不安定核は専らそのものが研究の対象であった。本研究は、不安定核を道具として原子核の未解明の状態を研究するという新展開を提示するものである。この意味で本研究は新しい原子核分光の端緒となることが期待される [79](野地)。

$(t, ^3\text{He})$ 反応を用いた β^+ 型 IVSMR の同定

β^+ 型 IVSMR に関しては、昨年度に引き続き $(t, ^3\text{He})$ 反応を用いた研究を推進した。この反応を用いる利点は、入射 t ビームを大強度かつ高純度に生成することが可能であり、高品質のデータが取得できるということにある。 $(t, ^3\text{He})$ 反応の発熱量は $(^{12}\text{N}, ^{12}\text{C})$ 反応のそれと比較して大きくはないが、 β^+ 型 IVSMR は比較的低励起に現れることが理論的に予想されており、 $(t, ^3\text{He})$ 反応でも β^+ 型に対しては十分な感度を有すると期待される。昨年度 SHARAQ を用いて取得した入射エネルギー 300 MeV/u における ^{90}Zr , $^{208}\text{Pb}(t, ^3\text{He})$ スペクトルに対し、本年度はよ

り詳細な解析を進め、 β^+ 型 IVSMR 成分の抽出を行った。

図 2.1.4[左] は、 $^{90}\text{Zr}(t, ^3\text{He})$ 微分断面積スペクトルに対して多重極展開の手法を適用し、各々の角運動量 (ΔL) 成分に分解したものである。本研究で注目する単極 ($\Delta L = 0$) 成分が、広範な領域に存在することが示されている。この $\Delta L = 0$ 成分の中から IVSMR のみを抽出するため、図 2.1.4[右上] に示す比較を行った。この図は、過去に取得された (n, p) スペクトルと今回取得した $(t, ^3\text{He})$ スペクトルに含まれる単極成分同士を比較したものである。 $(t, ^3\text{He})$ 反応は、 (n, p) 反応に比して IVSMR への感度が高いことが核反応計算から導かれており、 $(t, ^3\text{He})$ にみられる増分が IVSMR と同定される。最終的に IVSMR の断面積を導出したのが図 2.1.4[右下] である。点線で表される理論計算と比較すると、高励起部で過小評価の傾向がみられる点は興味深い。さらに、 $^{208}\text{Pb}(t, ^3\text{He})$ 反応スペクトルに対しても同様の解析を適用し、 β^+ 型 IVSMR 成分の抽出に成功した。これらは β^+ 型 IVSMR 研究初の定量的な実験成果である(三木・野地)。

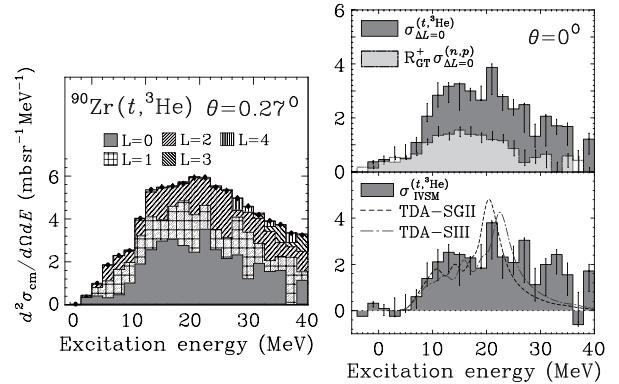


図 2.1.4: [左] $^{90}\text{Zr}(t, ^3\text{He})$ スペクトルについての多重極展開解析結果。[右上] $(t, ^3\text{He})$ 、 (n, p) 両反応の単極成分比較。[右下] 得られた β^+ 型 IVSMR 断面積。

2.1.8 クオーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の生成とその性質の研究 (小沢研究室)

米国ブルックヘブン国立研究所において、Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC、相対論的重イオン衝突加速器) を用いる実験 (PHENIX 実験) を遂行している。この実験の目的は、QCD の非摂動論的領域において長年の問題となっている QGP 状態の存在について決着をつけ、クオークの閉じ込め機構や高温・高密度状態でのカイラル対称性の回復に対する実験的知見を与えることである。

日本を含む世界各国のグループの参加により検出器の建設が進められ、2000 年 4 月から現在までに、

金-金衝突、陽子-陽子衝突、重陽子-金衝突、銅-銅衝突を核子あたり 200 GeV の重心系エネルギーでのデータを中心収集した。測定のための検出器系は、透過的なプローブであるレプトンやフォトンを捉える事を主眼に置いたもので、広いアクセプタンス、高い運動量分解能、高いパイオントン除去率などの能力を持つ。我々は、電子同定用検出器である Ring Image Čerenkov Counter (RICH) の運用、低質量ベクトル中間子 (ρ, ω, ϕ) や J/ψ 粒子の解析などで中心的な役割を果たしてきた。この実験によって、今までに見られていない様々な現象が観察され、我々はパートンレベルの流体模型で記述される新しい物質層が存在することを発見した。その後も精力的な解析が我々も含む共同研究者によって続けられ、本年度にも様々な重要な結果が得られた（渡辺・小沢）。[3, 5, 7, 8, 9, 10, 16, 17, 18, 19]

さらに、クォーク・グルオン・プラズマ状態を詳しく研究するため、欧州 CERN 研究所の Large Hadron Collider (LHC) を用いる実験 (ALICE 実験) を遂行している。LHCにおいては、本年度に核子当たり 2.76TeV の鉛鉛衝突を成功させ、既に多くの知見が得られている（小沢）。[21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30]

PHENIX 実験における電子対解析

我々のグループでは、現在、特に電子・陽電子崩壊を用いた低質量ベクトル中間子 (ρ, ω, ϕ) の物理に力を入れている。これは、我々のもうひとつの研究テーマであるハドロンの動的な質量獲得機構とも密接に関連したもので、RHIC で実現されている高温・高密度状態中で、カイラル対称性の回復によるベクトル中間子の質量変化や収量変化を捉えようというものである。特に、2009 年度から 2010 年度にかけて収集しているデータは、この物理解析を主目的としており、さらに精度の良いデータを収集するため電子・陽電子対測定に対する主要バックグラウンドである π^0 中間子の Dalitz 崩壊などを除去するための検出器として新しいタイプのガスチレンコフ検出器 (Hadron Blind Detector, 以下 HBD) がインストールした。安定動作に成功し、2009 年には陽子陽子衝突のデータ、2010 年には金金衝突のデータが取得された。現在、そのデータ解析を精力的に進めている。

HBD で除去すべき質量分布でバックグラウンドとなる電子には、以下の二つがある。

1. HBD にシグナルを残さないもの (HBD のバックプレーンなどで光子が電子陽電子対崩壊してできた電子)。
2. HBD にシグナルを二倍残すもの (π^0 の Dalitz 崩壊でできた電子など。これらは崩壊の開き角が小さいため、2 つの電子のチレンコフ光があわせて検出されるため)。

陽子陽子衝突や金金の周辺衝突では 1. のタイプの電子の HBD による除去は簡単であり、2. のタイプでも非常によい性能を示している。しかし、金金の中

心衝突では 1. の除去も簡単ではないことがわかった。これは、CF4 が荷電粒子のエネルギー損失によってヨウ化セシウムの有感領域にシンチレーション光を出すという性質に起因する。金金中心衝突では多くの荷電粒子が生成され、CF4 内にエネルギーを落とすので、シンチレーション光は、チレンコフ光に対して無視できない寄与を持つようになる。このため、本当は HBD にシグナルを残していない電子も、シンチレーション光のためにあたかもシグナルを残したかのように見えてしまう。

1. の除去をもっとも効率的に行うためのクラスタリングアルゴリズムの開発を行った。クラスタリングするには、HBD の情報を用いる場合と、トラッカーなど外部の検出器の情報を使う場合が考えられるが、HBD の情報だけでは望ましい性能が得られなかつた。そのため、トラッカーで決まる HBD への粒子の入射位置を利用して、性能の向上を図った。

現在は、2. のタイプのバックグラウンド除去の最適化や、それらのアルゴリズムを使ってつくった質量分布の詳細な解析を進めている（渡辺）。

2.1.9 原子核中の ϕ 中間子質量分布の高統計測定実験（小沢研究室）

当研究室ではハドロンの質量起源の問題に取り組んでいる。真空中では数 MeV しかないとされているクォークの質量がなぜハドロンとして集まつたとき、たとえば陽子では 1 GeV、というように重くなるのかという問題で、つまり我々の世界が質量を獲得する機構に関する実験的研究である。この機構として南部先生が提唱されたのが、強い相互作用により真空中反クォーク・クォーク対が凝縮し、これによりカイラル対称性が自発的にやぶれることで真空が変化し、ハドロンが質量を獲得するというメカニズムである。この質量獲得のメカニズムを実験的に調べることが、現代のハドロン物理学の大きな課題の一つである。いくつかの理論的モデルによると、カイラル対称性は原子核内でも部分的に回復しており、このことはベクトル中間子の核内での質量分布変化として観測されるはずである。

我々が理研との協力で計画している J-PARC の E16 実験においては、高統計のデータで原子核中の ϕ 中間子質量分布の決定的知見を与えることを目指す。E16 実験では、J-PARC のハドロン実験ホールに新たに高運動量ビームライン (30 GeV) を建設し、そのビームにより原子核標的中に ϕ 中間子を生成しその電子対崩壊を測定する。E325 のときの 10 倍のビーム強度にあたる 10^{10} Hz のビームを 0.1% interaction 標的にあてることで、 10^7 Hz の衝突レートの実験を行う。さらに、縦方向に 2 倍強の立体角を持つ検出器系を建設し、電子対のアクセプタンスとして 5 倍を実現する。これにビームエネルギーの増加から得られる生成断面積の増加 (2 倍) も加え最終的に約 100 倍の収量を得る予定である。

大型 GEM 検出器を用いた軌跡検出器の開発

E16 実験では、 ϕ 中間子の電子陽電子崩壊を利用してその原子核内での不变質量を測定し、その真空からの変化を調べる。電子と陽電子の運動量は、磁場内に 3 層の位置検出器をおくことによってその飛跡から決定する。大強度の陽子ビームにより、 10^7 Hz という非常に高いレートで反応が起こると予想される。従って我々の研究室では高計数率に対応できる位置検出器として、Gas Electron Multiplier (以下 GEM) を用いたトラッカーの開発を行ってきた。これは 25 kHz までの動作が報告されている。GEM とは多数の穴の開けられた銅電極付きのフォイルであり、電極間に高電場をつくることで電子雪崩を起こし、荷電粒子により電離された電子を增幅する。開発している GEM トラッカーは 10 cm 角、 20 cm 角、 30 cm 角の 3 層の GEM により構成されている。これまでに 10 cm 角の GEM については、 0° 、 15° 、 30° の入射角度に対して目標位置分解能 $100 \mu\text{m}$ を達成し、十分な性能が得られる事を確認した。これにより、質量分解能にして $5 \text{ MeV}/c^2$ (KEK での実験の半分) を達成可能となる。

本年度は、 20 cm 角、 30 cm 角という大型 GEM の開発を行い、位置分解能の試験を行った。大型 GEM の製作にあたり穴径の精度とフォイルのたるみによる増幅率の低下が問題となつたが、マスクの改良と専用のジグを開発することにより大型 GEM でも 10^4 倍の増幅率を得た。11月には東北大学電子光力学研究センターの陽電子ビームラインにおいてビームテストを行った。その結果、 0° 入射に対して大型 GEM を用いて位置分解能 $100 \mu\text{m}$ 、検出効率 95% を達成し、実機での使用に耐える大型 GEM の開発に成功した。図 2.1.5 に得られた残差分布を示す。

一方 GEM トラッカーの読み出し基板は x, y 方向の二次元 strip 構造になっているが、y 方向の strip が読み出す信号のパルスハイトが x 方向の $1/3$ 程度であることが分かった。これは x 方向の strip と y 方向の strip 間の絶縁物がチャージアップを起こしていることが原因と考え、表面にたまつた電荷を逃がすように高抵抗カーボンを塗布した基板や y strip 上の絶縁物を抜いた基板、表から裏にスルーホールを通して基板などを現在開発中である。2011 年 3 月には東北大学電子光力学研究センターの $\text{GeV}\gamma$ ビームラインにおいて、コンバータを用いてのハイレートテストと高抵抗カーボン塗布基板のテストを行った。裏面のパルスハイトについて若干の改善がみられたが、表面と同程度の強度は得られなかつたので、引き続き開発を行つてゆく。ハイレートテストでは最大 $\sim 14 \text{ kHz/mm}^2$ の環境に GEM を置いたが放電などにより損傷することなく動作した。現在はハイレート下でトラックを決定するアルゴリズムを開発中である(小松、高木)。

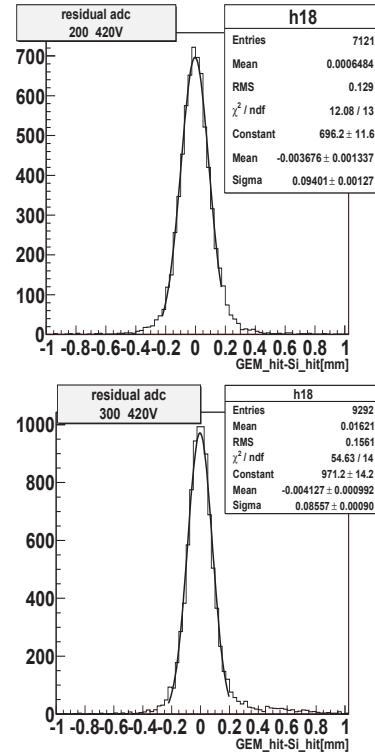


図 2.1.5: 上) 20 cm 角、 0° 入射での residual 分布。
下) 30 cm 角、 0° 入射の場合。分布の幅が位置分解能に対応する。

2.1.10 原子核中の ω 中間子の生成・崩壊 同時測定実験（小沢研究室）

前項の実験に加え、さらに多面的なアプローチを行うための実験も準備中である。原子核中での中間子質量の起源に関する研究に関しては、二つのアプローチが存在する。一つ目は小沢が KEK で行ったように原子核内で崩壊した中間子の質量分布を直接的に測定するというもの。二つ目は原子核内に中間子を束縛した系を生成し、その束縛状態のエネルギー順位を詳細にしらべるというものである。現在までの研究では、それぞれのアプローチを独立した実験として遂行しているが、両者を同時に測定する実験の準備も独立して進めている。

具体的には、J-PARCにおいて ω 中間子の原子核束縛状態と原子核中での ω 中間子質量に関する実験的知見を与えるための実験を準備している。 ω 中間子の原子核束縛状態は生成時の反応を用いた Missing mass 法で探索し、原子核中での ω 中間子質量はその $\pi^0\gamma$ 崩壊を用いた不变質量法で測定する。二つの方法を同時に行うことにより、 ω 中間子が存在する原子核が定まった状態にあることを担保した核中の中間子質量測定を行うことと、束縛状態の解析で得られる原子核の持つ中間子へのポテンシャルと不变質量観測を結びつけることが目的である。

実験は、J-PARC 加速器のハドロン実験ホール・K1.8 ビームラインを用いて行う。具体的には、原子核標的に π 中間子を入射させることで中性子と ω 中間子を生成する反応を用いる。その素過程は $p(\pi^-, n)\omega$ である。入射 π 中間子の運動量を適切に選び、反応中性子が 0 度方向で入射 π 中間子とほぼ同じ運動量を持っていることを要求する。その結果 ω 中間子を原子核内に静止して生成する。 ω 中間子の質量が原子核内で 50 MeV 程度軽くなると仮定して計算すると、入射する π 中間子の運動量が 1.8 GeV/c であれば、 ω 中間子がほぼ運動量ゼロで生成される。 ω は π^0 中間子と γ に崩壊し、さらに π^0 中間子は 2γ に崩壊する。最終生成物は中性子と 3γ となる。本実験では最終的に生じた中性子と γ 線を捕えるための検出器が必要である。この γ 線検出に十分な分解能を持つ大立体角の検出器を用いる。これには CsI を用いた γ 線検出器を使用する。前方 0 度方向に出る中性子は、シンチレーション検出器による飛行時間測定を用いて検出する。

本年度は、J-PARC 課題採択委員会により、本実験が正式に J-PARC E26 実験として採用された。

J-PARC E26 実験に向けた検出器開発

本実験には、生成物の測定用検出器として、 γ 線検出器と中性子検出器が必要であるが、そのための基礎的な検出器の開発を行った。また、検出器の評価結果に基づき期待される物理結果に関する評価を行った。

γ 線検出器は、過去に KEK E246 実験で使用され、現在は J-PARC での T-violation 実験 (E06) に向けて読出し回路を改良中の CsI(Tl) 結晶カロリメータを使用する。CsI(Tl) カロリメータは、E246 実験では Pin Photo Diode, shaper 及び PADC による読出しを採用していた。しかし、J-PARC で使用するにあたり高強度ビームに対応するため読出し回路の変更が必要である。E06 実験においては数百 kHz/module のレート耐性が要求されるが、E246 でのカロリメータのレート耐性は数十 kHz であった。そのため新しい読出し回路として、Avalanche Photo Diode (APD) 及び FADC の使用を検討し、その性能評価を東北大学電子光物理学研究センターの陽電子ビームラインにおいて行った。ビームテストでは、数 kHz の低レートのビームを用いて収集した FADC 波形に対してフィッティングを行い、エネルギー分解能を測定した。図 2.1.6 に結果を示す。また、数百 kHz～数 MHz のレートのビームを用いて FADC のパイルアップ波形を取得し、低レートのビームテストで得られた FADC 波形の関数を使用してパイルアップ波形をフィッティングし、レート耐性を評価した。結果、得られたエネルギー分解能から、Fast Monte Carlo シミュレーションにより ω 中間子質量分解能を見積もり、21 MeV/ c^2 という十分な質量分解能が得られた。また、1MHz 程度のレートで 200 MeV の陽電子に対し 0.5% 程度のエネルギー分解能の悪化が見られたが、これは本実験に大きな影響をあたえないため、1MHz/module 程度のレート耐性がある事が示せた。

中性子検出器は、シンチレーション検出器と中性子吸収物質の真鍮板で構成されている。各層には 6 本のシンチレーション検出器と真鍮板が配置され、合計 4 層から成り立つ。性能として 80 ps 以下という高い時間分解能と 30% 程度の中性子検出効率が求められており、Saint Gobain Crystals のプラスチックシンチレーター BC408 と浜松ホトニクスの H2431-50 を使用する。検出する中性子は 1.8 GeV/c 程度の運動量を持ち、この領域の中性子に対しての性能評価を Spring-8 LEPS 施設で行った。中性子検出器の一部を LEPS 施設の TOF wall の裏に設置し、LEPS の Physics run と同時にデータを取得した。その結果、荷電粒子に対しては 60 ps の時間分解能が得られた。中性子検出効率については現在解析中である。

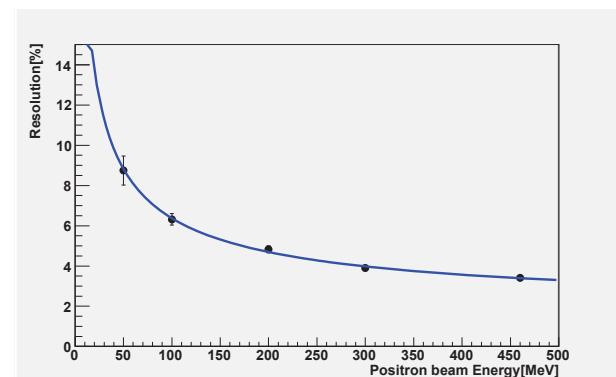


図 2.1.6: APD 及び FADC 読出しによる CsI(Tl) カロリメータのエネルギー分解能測定結果

<報文>

(原著論文)

- [1] R.S. Hayano, “Antihydrogen formation dynamics in a multipolar neutral anti-atom trap”, Phys. Lett. B **685**, 18 (2010).
- [2] M. Cargnelli *et al.*, “Kaonic atoms studies at DAFNE by the SIDDHARTA experiment”, Nucl. Phys. A **835**, 27 (2010).
- [3] A. Adare *et al.*, (PHENIX collaboration), “Detailed measurement of the e^+e^- pair continuum in $p+p$ and Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV and implications for direct photon production”, Phys. Rev. C **81**, 034911 (2010).
- [4] H. Yim *et al.*, “Search for strange tribaryons in the ${}^4\text{He}(K_{\text{stop}}^-, n\pi^\pm)$ reaction”, Phys. Lett. B **688**, 43–49 (2010).
- [5] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration), “Transition in Yield and Azimuthal Shape Modification in Dihadron Correlations in Relativistic Heavy Ion Collisions”, Phys. Rev. Lett. **104**, 252301 (2010).
- [6] G.B. Andresen *et al.*, “Evaporative Cooling of Antiprotons to Cryogenic Temperatures”, Phys. Rev. Lett. **105**, 013003 (2010).

- [7] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration), “Transverse momentum dependence of J/Ψ polarization at midrapidity in $p+p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV”, Phys. Rev. D **82**, 012001 (2010).
- [8] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration), “Transverse momentum dependence of η meson suppression in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV”, Phys. Rev. C **82**, 011902(R) (2010).
- [9] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration), “Elliptic and Hexadecapole Flow of Charged Hadrons in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV”, Phys. Rev. Lett. **105**, 062301 (2010).
- [10] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration), “Azimuthal Anisotropy of π^0 Production in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV: Path-Length Dependence of Jet Quenching and the Role of Initial Geometry”, Phys. Rev. Lett. **105**, 142301 (2010).
- [11] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration), “High p_T direct photon and π^0 triggered azimuthal jet correlations and measurement of k_T for isolated direct photons in $p+p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV”, Phys. Rev. D **82**, 072001 (2010).
- [12] Ryugo S. Hayano and Tetsuo Hatsuda, “Hadron properties in the nuclear medium”, Rev. Mod. Phys. **82**, 2949–2990 (2010).
- [13] R.S. Hayano, “EXOTIC HELIUM ATOMS”, Int. J. Mod. Phys. E **19**, 2586–2593 (2010).
- [14] G.B. Andresen *et al.*, “Search for trapped antihydrogen”, Phys. Lett. B **695**, 95–105 (2011).
- [15] M. Bazzi *et al.*, “First measurement of kaonic helium-3 X-rays”, Phys. Lett. B **697**, 199–202 (2011).
- [16] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration), “Measurement of neutral mesons in $p+p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV and scaling properties of hadron production”, Phys. Rev. D **83**, 052004 (2011).
- [17] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration), “Cross Section and Parity-Violating Spin Asymmetries of W^\pm Boson Production in Polarized $p+p$ Collisions at $\sqrt{s} = 500$ GeV”, Phys. Rev. Lett. **106**, 062001 (2011).
- [18] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration), “Cross section and double helicity asymmetry for η mesons and their comparison to π^0 production in $p+p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV”, Phys. Rev. D **83**, 032001 (2011).
- [19] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration), “Nuclear modification factors of ϕ mesons in $d+Au$, $Cu+Cu$, and $Au+Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV”, Phys. Rev. C **83**, 024909 (2011).
- [20] R.G.T. Zegers, *et al.*, “ $^{34}\text{P}(^{7}\text{Li}, ^{7}\text{Be} + \gamma)$ reaction at 100A MeV in inverse kinematics”, Phys. Rev. Lett. **104**, 212504 (2010).
- [21] K. Aamodt *et al.* (ALICE collaboration), “First proton-proton collisions at the LHC as observed with the ALICE detector: Measurement of the charged particle pseudorapidity density at $\sqrt{s} = 900$ -GeV”, Eur. Phys. J. **C65**, 111–125 (2010).
- [22] K. Aamodt *et al.* (ALICE collaboration), “Charged-particle multiplicity measurement in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 2.36 TeV with ALICE at LHC”, Eur. Phys. J. **C68**, 89–108 (2010).
- [23] K. Aamodt *et al.* (ALICE collaboration), “Charged-particle multiplicity measurement in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ALICE at LHC”, Eur. Phys. J. **C68**, 345–354 (2010).
- [24] K. Aamodt *et al.* (ALICE collaboration), “Midrapidity antiproton-to-proton ratio in pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 7 TeV measured by the ALICE experiment”, Phys. Rev. Lett. **105**, 072002 (2010).
- [25] K. Aamodt *et al.* (ALICE collaboration), “Transverse momentum spectra of charged particles in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 900$ GeV with ALICE at the LHC”, Phys. Lett. **B693**, 53–68 (2010).
- [26] K. Aamodt *et al.* (ALICE collaboration), “Two-pion Bose-Einstein correlations in pp collisions at $\sqrt{s} = 900$ GeV”, Phys. Rev. D **82**, 052001 (2010).
- [27] K. Aamodt *et al.* (ALICE collaboration), “Charged-particle multiplicity density at midrapidity in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, Phys. Rev. Lett. **105**, 252301 (2010).
- [28] K. Aamodt *et al.* (ALICE collaboration), “Centrality dependence of the charged-particle multiplicity density at mid-rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, Phys. Rev. Lett. **106**, 032301 (2011).
- [29] K. Aamodt *et al.* (ALICE collaboration), “Suppression of Charged Particle Production at Large Transverse Momentum in Central Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, Phys. Rev. B **696**, 30–39 (2011).
- [30] K. Aamodt *et al.* (ALICE collaboration), “Two-pion Bose-Einstein correlations in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, Phys. Lett. B **696**, 328–337 (2011).
- [31] K. Aoki *et al.*, “A development of HBD for the J-PARC E16 experiment”, Nucl. Instrum. Meth. **A628**, 300–303 (2011).
- (会議抄録)
- [32] T. Suzuki, J. Esmaili, and Y. Akaishi, “The investigation of $\Lambda(1405)$ state in the stopped K^- reaction on deuterium”, EPJ Web of Conferences, 07014 (2010).
- [33] M. Iliescu *et al.*, “Kaon-nucleon strong interaction in kaonic atoms”, Nucl. Phys. B – Proceedings Supplements, **207–208**, 208–211 (2010).

- [34] M. Bazzi *et al.*, “Performance of silicon-drift detectors in kaonic atom X-ray measurements”, Nuc. Instr. Meth. A **628**, 264–267 (2011).
- [35] A. Vidal *et al.*, “X-RAY SPECTROSCOPY OF KAONIC ATOMS AT DAΦNE”, Int. J. Mod. Phys. A **26**, 432–437 (2011).
- [36] T. Hiraiwa *et al.*, “THE SEARCH FOR DEEPLY BOUND KAONIC NUCLEAR STATES AT J-PARC”, Int. J. Mod. Phys. A **26**, 561–563 (2011).
- [37] D. Sirghi *et al.*, “KAONIC HELIUM MEASUREMENTS IN THE SIDDHARTA EXPERIMENT”, Int. J. Mod. Phys. A **26**, 601–603 (2011).
- [38] B. Wuenschek *et al.*, “STATUS AND PLANS OF EXPERIMENT E17 AT J-PARC”, Int. J. Mod. Phys. A **26**, 604–606 (2011).
- [39] T. Uesaka *et al.*, “Current status and future experimental program of the SHARAQ spectrometer”, AIP Conf. Proc. **1235**, 308–314 (2010).
- [40] T. Uesaka *et al.*, “SHARAQ Spectrometer—Current status and future experimental plans—”, AIP Conf. Proc. **1224**, 573–581 (2010).
- [41] K. Ozawa, “omega meson in nucleus, experimental study”, Prog. Theor. Phys. Suppl. **186**, 325–330 (2010).

(学位論文)

- [42] K. Todoroki, “Development of Beam Profile Monitor for Antiproton Annihilation Cross Section Measurements”, (早野研修士論文), 2011.
- [43] T. Kobayashi, “Laser spectroscopy of radioactive francium isotopes far from stability”, (早野研修士論文), 2011.
- [44] T. Hashimoto, “Performance Evaluation of Silicon Drift Detectors for a Precision Spectroscopy of Kaonic Helium-3 X-rays” (早野研修士論文), 2011.
- [45] S. Masumoto, “Performance of γ -ray calorimeter and neutron TOF detector for measurements of ω meson mass in nuclear medium”, (小沢研修士論文), 2011.
- [46] Y. Komatsu, “Development of GEM tracker for in-medium $\phi \rightarrow e^+ e^-$ measurement”, (小沢研修士論文), 2011.

<学術講演>

(国際会議)

ポスターセッション

- [47] H. Shi, “Kaonic helium X-ray measurement in the SIDDHARTA experiment”, International Nuclear Physics Conference 2010 (INPC 2010), Vancouver, Canada, July 2010.
- [48] K. Todoroki, “Development of a Beam Profile Monitor for Antiproton Annihilation Cross Section Measurement at ASACUSA Collaboration”, International Nuclear Physics Conference 2010 (INPC 2010), Vancouver, Canada, July 2010.

- [49] T. Hashimoto, “Performance Evaluation of Silicon Drift Detectors for a Precision X-ray Spectroscopy of Kaonic Helium-3”, International Nuclear Physics Conference 2010 (INPC2010), Vancouver, Canada, July 2010.

- [50] M. Sato, “Precision spectroscopy of kaonic 3He X-rays at J-PARC”, International Nuclear Physics Conference 2010 (INPC2010), Vancouver, Canada, July 2010.

- [51] S. Itoh, “Precision Pionic Atom Spectroscopy at RIKEN-RIBF”, International Nuclear Physics Conference 2010 (INPC2010), Vancouver, Canada, July 2010.

- [52] T. Kobayashi, A. Soter, S. Agha, and M. Hori, “Development of a titanium-sapphire laser for spectroscopy of radioactive isotopes at ISOLDE”, The 9th CNS-EFES International Summer School 2010.

一般講演

- [53] T. Suzuki, “Strange tribaryons studied in the ${}^4\text{He}(K_{\text{stopped}}^-, \Lambda N)$ reaction”, 12th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon, College of William and Mary, Williamsburg, Virginia, USA, May 31, 2010.

- [54] M. Sato, “Precision spectroscopy of kaonic 3He X-rays at J-PARC”, 12th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon, College of William and Mary, Williamsburg, Virginia, USA, June 1, 2010.

- [55] T. Suzuki, “Strange multibaryons studied in the ${}^4\text{He}(K_{\text{stopped}}^-, \Lambda N)$ reaction”, 11th International Workshop on Meson Production, Properties and Interaction, Krakow, Poland, June 10, 2010.

- [56] T. Suzuki, “Strange multibaryons studied in the ${}^4\text{He}(K_{\text{stopped}}^-, \Lambda N)$ reaction”, Chiral10 Workshop, Valencia, Spain, June 22, 2010.

- [57] T. Suzuki, “Strange multibaryons studied in the ${}^4\text{He}(K_{\text{stopped}}^-, \Lambda N)$ reaction”, 2010 International Nuclear Physics Conference, Vancouver, Canada, July 8, 2010.

- [58] T. Hashimoto, “Precision Spectroscopy of Kaonic Helium-3 X rays at J-PARC”, The Korean Physical society meeting (Korea-Japan Exchange Session), Pyeong-Chang, Korea, Oct 2010.

- [59] T. Hashimoto, “Precision Spectroscopy of Kaonic Helium-3 X rays at J-PARC”, International conference on the structure of baryons (Baryons’10), Osaka, Japan, Dec 2010.

招待講演

- [60] R.S. Hayano, “Kaonic atom experiments”, 12th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon, Williamsburg, USA, May 31, 2010.

- [61] R.S. Hayano, “Kaonic atoms and nuclei”, Chiral10 Workshop, Valencia, Spain, June 21, 2010.
- [62] R.S. Hayano, “Kaonic-Helium X-Rays”, 2010 International Nuclear Physics Conference, Vancouver, Canada, July 5, 2010.
- [63] R.S. Hayano, “Kaonic-Helium X-rays”, NAPP 2010 - 3rd International Conference on Nuclear and Particle Physics with CEBAF at Jefferson Lab, Dubrovnik, Croatia, Oct 3, 2010.
- [64] T. Suzuki, “Strange multibaryons studied in the ${}^4\text{He}(K_{\text{stopped}}^-, \Lambda N)$ reaction”, Strangeness in Nuclei, ECT*. Trento, Italy, Oct 5, 2010.
- [65] K. Ozawa, “Experimental Activities at University of Tokyo”, International Symposium on Nuclear Physics in Asia, Convention Center of Beihang University, Beijing, China, Oct 15, 2010.

(国内会議)

一般講演

- [66] 鈴木隆敏, “ ${}^4\text{He}$ 上の静止 K^- 反応に於けるハイパロン-核子相関によるストレンジマルチバリオンの探索(3)”, 日本物理学会 2010 年度秋季大会, 九州工業大学, 2010 年 9 月 11 日.
- [67] 橋本直, “K 中間子 ${}^3\text{He}$ 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 (II)”, 九州工業大学, 2010 年 9 月 12 日.
- [68] 横本新一, “J-PARC E06 実験及び P26 実験に向けた CsI(Tl) カロリメータ用新光読出し方式”, 九州工業大学, 2010 年 9 月 11 日.
- [69] 小松雄哉, “大型 GEM フォイルを用いた GEM トラッカー開発”, 第 7 回 Micro Pattern Gas Detector 研究会, 山形大学, 2010 年 11 月 27 日.
- [70] 橋本直, “K 中間子ヘリウム 3 X 線精密分光実験の準備状況”, KEK ストレングジネス研究会, つくば, 2010 年 12 月 4 日.
- [71] 小松雄哉, “大型 GEM Tracker の開発”, 『新ハドロン』領域研究会, 理研, 2011 年 2 月 28 日.
- [72] 小松雄哉, “J-PARC E16 実験で用いる大型 GEM Tracker の開発”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 2011 年 3 月 25 日.
- [73] 高木敦子, “J-PARC E16 実験 GEM Tracker の内部構成最適化と性能評価”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 2011 年 3 月 25 日.
- [74] 渡辺陽介, “核内 ω 中間子質量分布測定のための検出器開発”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 2011 年 3 月 25 日.
- [75] 橋本直, “K 中間子 ${}^3\text{He}$ 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 (III)”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 2011 年 3 月 25 日.
- [76] 西隆博, “($d, {}^3\text{He}$) 反応を用いた π 中間子原子の精密分光 (4)”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 2011 年 3 月 26 日.

- [77] 小林拓実, “ASACUSA 反陽子消滅検出器のシンチレータの性能評価”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 2011 年 3 月 27 日.

- [78] 藤孔一, “反陽子の原子核消滅断面積測定のためのビーム検出器開発”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 2011 年 3 月 28 日.

- [79] 野地俊平, “200 MeV/u における発熱型荷電交換反応 ${}^{90}\text{Zr}({}^{12}\text{N}, {}^{12}\text{C}) {}^{90}\text{Nb}$ 反応による荷電ベクトル型スピノン単極子共鳴状態の探索”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 2011 年 3 月 28 日.

- [80] 横本新一, “核内 ω 中間子質量分布測定のための検出器開発”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 2011 年 3 月 28 日.

招待講演

- [81] 小沢恭一郎, “GEM を用いた大アセプタンス検出器に用いる読み出し回路の開発”, 原子核ハドロン実験のための検出器と大規模読み出しに関するワークショップ, 原子力研究機構, 2010 年 6 月 4 日.

- [82] 小沢恭一郎, “Hadron Blind Detector”, PHENIX 検出器 Upgrade Mini workshop, 理研, 2011 年 1 月 21 日.

- [83] 小沢恭一郎, “ハドロン将来計画”, 第 4 回機構シンポジウム, KEK, 2011 年 2 月 28 日.

(セミナー等)

- [84] 早野龍五, “エネルギー”, 自然科学フォーラム (中学生対象), 小柴ホール, 2010 年 7 月 3 日.

- [85] 早野龍五, “原子核物理”, KEK サマーチャレンジ (素粒子・原子核コース), KEK, 2010 年 8 月 27 日.

- [86] 早野龍五, “エキゾチック原子”, 京都大学特別講義, 京都, 2010 年 9 月 29-30 日.

- [87] 早野龍五, “反物質”, 京都大学物理教室セミナー, 京都, 2010 年 9 月 30 日.

- [88] 早野龍五, “反物質”, 物理科学の最前線 (東北大学), 2010 年 10 月 6 日.

- [89] R.S. Hayano, “Antiproton experiments at CERN”, University of Giessen, Nov 11, 2010.

- [90] 小沢恭一郎, “Experimental study of hadron mass”, Weizmann Institute, Israel, 2010 年 5 月 24 日.

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。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 2.2.7) 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行なっている。特にナノスケールの精度を持つビームサイズモニターやビーム位置モニターの開発研究を行ない、かつ 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も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 のデータ解析を行なっている。

2.2.1 電子・陽電子リニアコライダー ILC 計画

電子と陽電子 (e^+ と e^-) は、素粒子とみなすことができるので、それらの衝突は素過程である。また、 e^+ と e^- は粒子と反粒子の関係にあるので、衝突によって対消滅が起こり、その全ての衝突エネルギーは新たな粒子の生成に使われる。従って、エネルギー・フロンティア（世界最高エネルギー）での e^+e^- 衝突反応の実験研究は、素粒子の消滅生成の素過程反応そのものを直接、詳細に観測できるという本質的利点を有する。しかし、LEP のような円形 e^+e^- コライダーではシンクロトロン放射によって電子や陽電子のエネルギーが急速に失われる。従って、電子・陽電子を向かい合わせて直線的に加速して正面衝突させるシンクロトロン放射の出ないリニアコライダーの方が経済的である。日本はいち早く e^+e^- リニアコライダーを高エネルギー物理の次期基幹計画として取り上げ、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

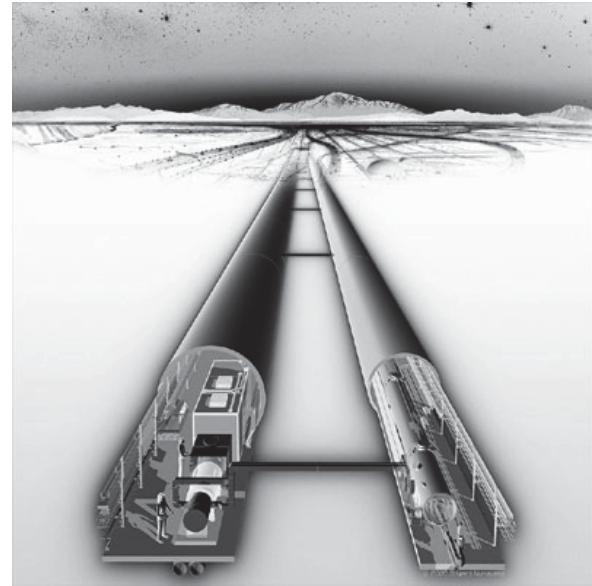


図 2.2.7: ILC 計画

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 に基づき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・測定器の研究を行なってきた。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に、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} 個の電子を縦方向 37nm (1σ) 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。また、このビームの軌道を 2nm の精度で制御できることを実証するのが、次期の目標である。小さなビームサイズと、精密なビーム軌道制御が可能となれば、電子と陽電子を高い頻度で衝突させることを保証できる。現在は、このような非常に小さい電子ビームの大きさや軌道を正確に求めるためのモニタの開発や、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

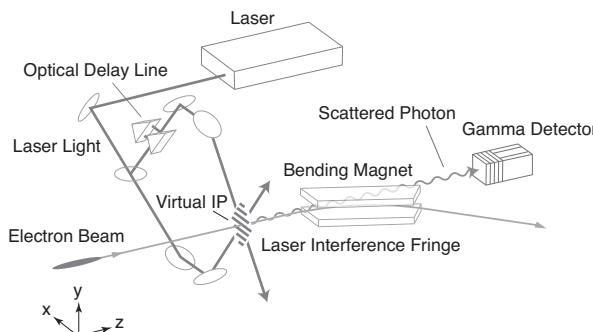


図 2.2.8: 新竹モニタの概念図

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、新竹モニタと呼ばれるモニターを研究開発している。

新竹モニタは、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パ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

2010 年 5 月のビーム試験では、新竹モニタのビームサイズ測定結果をビームチューニングにフィードバックして、ビームのサイズを徐々に絞る試みがなされた。このときのビームサイズの理論値は 100 nm であり、このサイズを目指してビームチューニングを行った。ビームサイズを下げていく過程で、このランで最終的に達成されたビームサイズは $310 \pm 30 \text{ (stat.)}^{-10}_{-70} \text{ (sys.)} \text{ nm}$ である。ここで (stat.) は統計誤差を、(sys.) は系統誤差を表す。このランにより新竹モニタのビームサイズ測定性能が実証され、ビームチューニングデバイスとしての利用を開始した。

それと並行して、現在バックグラウンド (BG) を減らすハードウェアアップグレードを行っている。これは収束点でのビームサイズがより小さくなるにつれ、逆にサイズが大きくなる場所が出てきてしまい、その位置でビームとビームパイプの散乱が生じて BG が増大するためである。したがって BG に対するアップグレードはより小さいビームサイズの測定にとって重要である。他方今後ビームサイズが小さくなるにつれて無視できなくなってくる系統誤差要因に対する評価を進め、新竹氏の研究では考慮されなかったレーザーの偏光状態が、測定精度に影響してくることを見つけた。それを受けて新たに偏光制御システムを考案し、今年度インストール予定である。今年度はこれらアップグレードにより ATF2 の目標である 37 nm のビームサイズ達成を目指す。

2.2.2 超冷中性子実験

超冷中性子の重力による量子状態を観測するための実験を遂行している。超冷中性子はその運動エネルギーが物質のフェルミオ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によって量子力学のレベルで等価原理を検証できる可能性があり、これがこの実

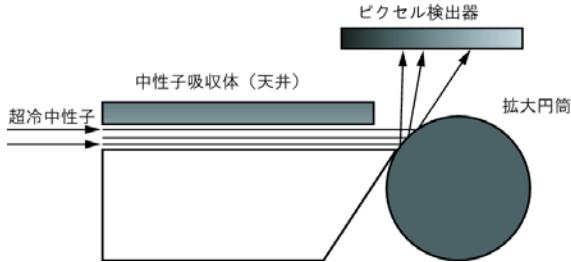


図 2.2.9: 超冷中性子実験セットアップ概念図

験の第一の目標である。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。

第一に、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ることにより、反射回数と吸収確率を飛躍的に増加させる。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ボテンシャルが小さくなるようにしてある。

第二に、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速い中性子も全反射するようにした。

第三に、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、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 $3 \mu\text{m}$ であることを測定した。

中性子ガイド、拡大機構、CCD 検出器を組合せることで、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。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、実験装置の様々な改良を行なった。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 倍に増やすようにした。また、分

布を明瞭に観測するため、拡大円筒への入射角を 45 度から 70 度に変更し、速い中性子も吸収される事なく全反射するように設計した。更に、大阪大学超精密科学研究所と共同して円筒表面を更に研磨して円滑にし、乱反射を防いだ。これによって統計を実効的に 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中であり、これにより統計を 1.6 倍に増やすことができる。

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することを目指している。測定時間も以前の 2 倍とし、全体として 15 倍に統計を増やし、より鮮明な量子効果の測定を行う。

2.2.3 LHC での物理解析

我々が長年探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、バックグラウンドも非常に低いが、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。シンクロトロン放射によって円形加速器を粒子が一周する毎に失うエネルギーは、 $(E/m)^4$ (E と m はビーム粒子のエネルギーと質量) に比例するので、質量の重い陽子を用いればエネルギーを失う事無く高い衝突エネルギーが得られる。これが LHC の有効性であるが、実験はバックグラウンドが高く且つ放射線レベルも高いので難しい。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が進んでいる。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 LEP での直接探索から 114 GeV よりも重く、LEP などでの電弱相互作用の精密測定から約 200 GeV よりも軽い事が分かっており、質量領域は絞られている。LHC ではバックグラウンドが低いヒッグスの生成・崩壊モードを見極めて探索が行なわれる。特にクォークから振りほどかれた W ボゾン同士が衝突してヒッグス粒子を生成し、ヒッグス粒子が $\gamma\gamma$ か $\tau\tau$ の対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、これらは何段階かのカスケード崩壊を行ない最も軽い超対称性粒子を生成するが、これらの事象の特徴を捉えて探索する。LHC の実験開始から早い時期にこれらの発見を目指す。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がある可能性もあり期待できる。

ATLAS 検出器による超対称性粒子の解析

超対称性粒子が存在する場合の特徴的な信号は、大きな横消失エネルギーとジェットと呼ばれるクォーク、グルーオンから生じる粒子群が多数発生することである。これらを組み合わせることで、標準理論から来るバックグラウンドを少なく抑えることができる。

現在行っている解析は特にボトムクォークを含む終状態の探索である。超対称性理論ではボトム、トップクォークの超対称性パートナー粒子（スカラーボトム、スカラートップ）が軽いと予言されており、この場合、それらの粒子生成が多くなり、最終的に標準理論のボトムクォークを放出して崩壊する。2010年のLHCの運転では 35 pb^{-1} のデータがATLAS検出器で取得され、これを用いて超対称性理論のモデルの検証を行った。図2.2.10は、得られたデータに1) レプトンがない、2) 3本以上のジェットを含む、3) 1本以上のボトムクォークジェットを含む、4) その他、標準理論のバックグラウンドを減らすための事象選択、を行った後のeffective mass（ジェットの横運動量と横消失エネルギーのスカラー和）の分布である。データは標準理論からの予測に矛盾がなく、点線で示されるような超対称性理論から予測される信号は得られなかつた。この結果、有力な超対称性理論モデルの一つ ($m\text{SUGRA } \tan\beta = 40, A_0 = 0, \mu > 0$)において、スカラーボトムに対しては $550\text{GeV}/c^2$ までが棄却された。

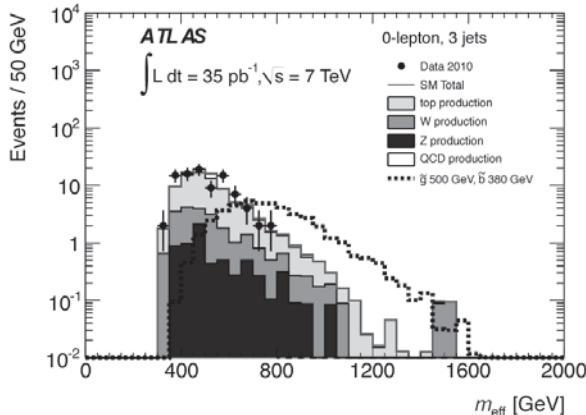


図 2.2.10: ボトムクォークを含む超対称性粒子探索のための事象選択後の effective mass 分布

2.2.4 BES 実験

Beijing Spectrometer(BES) 実験は中国・北京の高能研究所(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年よりおよそ12年間続いたBES-I実験の終了後、1996年からupgrade

され、BES-II実験(図2.2.11)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。

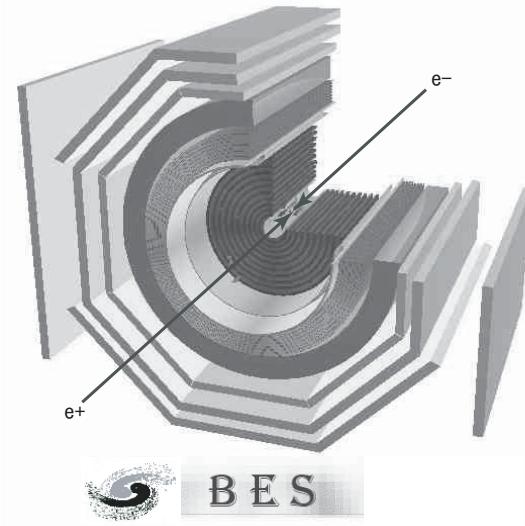


図 2.2.11: BES II detector

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。特に J/ψ 粒子はBES-I実験にて 7.8×10^6 、BES-II実験にて 5.77×10^7 事象得られており世界最大である。現在、加速器はBEPC-IIにupgradeしつつあり、2008年中には稼働し実験が始まる。ビームエネルギー 1.89 GeV でピークルミノシティを $10^{33}\text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に増強する。加速器のupgradeに伴い、実験装置の性能を更に向上させたBES-III実験が現在行われている。BES-III実験では1年間に109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。BES-IIIでは、 $\tau \rightarrow \mu\gamma$ 稀崩壊の探索などを行う予定である。当面は、BES-III測定器の建設とBES-IIでの J/ψ からのバリオン対の生成を研究している。

<受賞>

- [1] J. Yan, 2010 Distinguished Performance Award, 5th International Accelerator School for Linear Colliders, Villars-sur-Ollon, Nov. 2010

<報文>

(原著論文)

- [2] OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Invisibly Decaying Higgs Bosons in $e^+e^- \rightarrow$

- $Z0h0$ Production at $\sqrt{s} = 183\text{-}209$ GeV, Phys.Lett. B682 (2010) 381-390
- [3] BESIII Collaboration, M.Ablikim et al. : Design and Cosnstruction of the BES-III Detector, Nucl.Instrum.Meth. A614 (2010) 345-399
- [4] BESIII Collaboration, M.Ablikim et al. : Branching Fraction Measurements of χ_{c0} and χ_{c2} to $\pi 0 \pi 0$ and $\eta \eta$, Phys.Rev. D81 (2010) 052005
- [5] BESIII Collaboration, M.Ablikim et al. : Measurement of $h_c(^1P_1)$ in ψ' Decays, 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.Lett. 105 (2010) 261801
- [7] BESIII Collaboration, M.Ablikim et al. : First Observation of the Decay $\chi_{cJ} \rightarrow \pi 0 \pi 0 \pi 0 \pi 0$, Phys.Rev. D83 (2011) 012006
- [8] ILD-Concept Group-Linear Collider Collaboration, T. Abe et al.: The International Large Detector: Letter of Intent, FERMILAB-LOI-2010-03
- [9] B. Bambade et al., Present Status and First Results of the Final Focus Beam Line at the KEK Accelerator Test Facility, Phys.Rev.ST Accel.Beam 13 (2010) 042801
- [10] T. Suehara et al., A Nanometer Beam Size Monitor for ATF Nucl.Instru.Meth.A616 (2010) 1-8
- [11] The ATLAS Collaboration : “Search for supersymmetry in pp collisions at $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ in final states with missing transverse momentum and b-jets”, arXiv:1103.4344
- [12] J. Yan et al. : “Measurement of nanometer scale beam size by Shintake Monitor (IPBSM)” ICFA BD Newsletter No.54

(会議抄録)

- [13] Y. Kamiya, S. Komamiya, M. Oroku, S. Suehara, Y. Yagamuchi, T. Yamanaka, S. Araki, T. Okugi, T. Tauchi, N. Terunuma, J. Urakawa: Development of Shintake Beam Size Monitor for ATF2, Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference, Kyoto, Japan (2010)
- [14] Y.Yamaguchi :“Evaluation of Expected Performance of Shintake Beam Size Monitor for ATF2” IPAC ’10, Kyoto, Japan, 1014-1016, (2010)
- [15] M.Oroku :“The nanometer beam size monitor (Shintake monitor) at ATF2” IEEE proceeding, 2010 Nov

(学位論文)

- [16] 川崎真介「Development of a Pixel Detector for Ultra-Cold Neutrons and Measurement of Quantum States in the Earth Gravitational Field」博士論文（東京大学大学院理学系研究科），2010年6月

[17] 山口洋平：「レーザー干渉型電子ビームサイズモニタの開発研究」修士論文（東京大学大学院理学系研究科），2011年3月

(著書)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [18] Y.Yamaguchi : “Evaluation of Expected Performance of Shintake Beam Size Monitor for ATF2” IPAC ’10 (May 2010), Kyoto, Japan
- [19] T. Yamanaka for the ATLAS Collaboration : “The ATLAS Fast Calorimeter Simulation FastCaloSim”, CHEP 2010, (October 2010), Taipei, Taiwan
- [20] M.Oroku :“The nanometer beam size monitor (Shintake monitor) at ATF2” IEEE NSS, Knoxville, Tennessee, USA, 2010 Nov
- [21] M.Oroku :“IP-BSM status and plan: beamtime result in 2010 Nov & Dec”, ATF project meeting, SLAC, California, USA, 2011 Jan
- [22] J. Yan : “IPBSM Status and Plan” 11th ATF2 Project Meeting, Jan 13-14 2011, SLAC

(国内会議)

一般講演

- [23] ジャクリン ヤン：“Emittance Measurement in the ATF2 Beamline”, ILC 夏の合宿 (2010 年 8 月), 白石蔵王, 宮城
- [24] 山中隆志：「LHC-ATLAS 実験における第三世代粒子（ボトムクォーク）への崩壊を用いた超対称性粒子の探索」，日本物理学会 (2010 年 9 月), 九州工業大学, 北九州
- [25] 山口洋平：「レーザー干渉縞を用いた極小電子ビームサイズ測定 1」，日本物理学会 (2010 年 9 月), 九州工業大学, 北九州
- [26] 大錆誠広：「レーザー干渉縞を用いた極小電子ビームサイズ測定 2」日本物理学会 (2010 年 9 月), 九州工業大学, 北九州
- [27] 南雄人：「重力場による超冷中性子の量子状態観測 - 実験装置の概要と改良点」日本物理学会 (2011 年 3 月), 新潟大学, 新潟
- [28] 山中隆志：「LHC-ATLAS 実験におけるボトムクォークを含むマルチジェット事象を用いた超対称性粒子の探索」，日本物理学会, (2011 年 3 月), 新潟大学, 新潟
- [29] 大錆誠広：「レーザー干渉縞を用いた極小電子ビームサイズ測定：測定条件との関連」日本物理学会 (2011 年 3 月), 新潟大学, 新潟
- [30] 山口洋平：「レーザー干渉縞を用いた極小電子ビームサイズ測定：ハードウェアアップグレード」，日本物理学会 (2011 年 3 月), 新潟大学, 新潟

- [31] ジャクリン ヤン：「新竹モニターの性能評価とビームチューニング」，日本物理学会（2011年3月），新潟大学，新潟

招待講演

- [32] 駒宮幸男：「巨大加速器が解明する素粒子と宇宙の謎」，東京大学エキゼクティブ・マネージメント・プログラム（2010年5月）東京大学

- [33] 駒宮幸男：「巨大加速器が解明する素粒子と宇宙の謎」，東京大学エキゼクティブ・マネージメント・プログラム（2011年1月）東京大学

(セミナー)

- [34] 駒宮幸男：「巨大加速器で素粒子と宇宙の謎を解く」，電力館・科学ゼミナール（2010年6月）東京電力館

2.3 蓑輪研究室

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

2.3.1 PANDA – 原子炉ニュートリノモニター

比較的小型で移動が可能な反電子ニュートリノ検出器(Plastic AntiNeutrino Detectyor Array – PANDA)を開発している。このニュートリノ検出器は原子炉中の核反応に伴って生じる反電子ニュートリノを検出対象としており、原子炉近傍に設置し、原子炉の熱出力あるいは核燃料の燃焼状況などをモニタすることを目的としている。

IAEA（国際原子力機関）は、NPT（核不拡散条約）締約国の原子力活動に対し、平和的利用から核兵器製造等の軍事的目的に転用されないことを確保するための保障措置システムとしての監視装置を必要としている。この監視装置は、その信頼性確保のために、当該原子炉の運転者側の提供する情報に一切依拠しないで、独立かつ自己完結的モニターであることが必要とされる。その意味で、ニュートリノによる原子炉運転モニターは大変有効な監視装置で、IAEAは最近の報告書の中で、日本を含む締約国に対して、ニュートリノによる原子炉運転モニターの feasibility study を提案している。本研究では、このようなニュートリノ検出器による原子炉運転モニターを開発しようとするものである。

我々が開発している小型反電子ニュートリノ検出器は、おおまかにはプラスチックシンチレータと、ガドリニウム含有塗料塗布済みフィルムにより構成されている。検出器に入射してきた反電子ニュートリノ($\bar{\nu}_e$)は、プラスチックシンチレータ中に含まれる陽子(p)と逆 β 崩壊反応を起こし、陽電子(e^+)と中性子(n)が生成される。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、シンチレータ中を平均60 μs 程度の時間をかけながら動き回り、徐々にそのエネルギーを失っていく。この中性子は十分にエネルギーを失った段階で、検出器を構成するガドリニウム(Gd)に吸収されて合計約8MeVの γ 線を放出する。以上2つの(陽電子と中性子の)信号をシンチレータで捉え、遅延同時計測法を用いてニュートリノ信号として検出する。

検出器は、図2.3.12に示すように、100本の10cm×10cm×100cmの大きさの棒状プラスチックシンチレータの間にガドリニウムを含有する膜を挟むという構造を計画している。その重さは約1トンと比較的軽量であり、また有機液体シンチレータよりも燃えにくいプラスチックシンチレータを用いるという特徴により、原子力発電所敷地内に持ち込むための障害が少ないと考えられる。

平成22年度は、主に昨年度作成した16本のモ

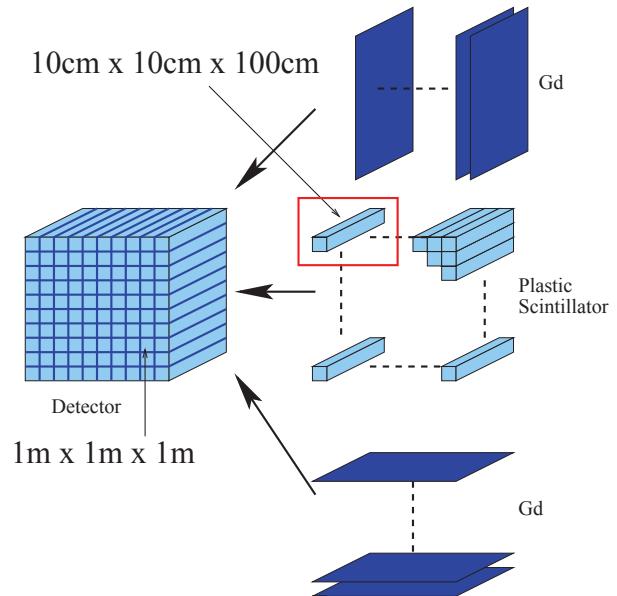


図 2.3.12: 検出器のおおまかな構造

ジユールからなるプロトタイプ (lesser PANDA) の改良を行った。大きく分けると、検出器全体を保持する構造物の改良、エネルギーキャリブレーション方法の改良、遠隔地における無人測定にむけてのモニタリングシステムの導入の3点である。

まず、検出器の可搬性を向上するため、検出器の構造を見直した。移動用のキャスターを設置し、さらにトラックでの移動時にかかる負荷に対する耐久性を向上させるためPMT抑え機構の改良を行った。また、検出器のエネルギー較正を行う際に標準線源を挿入するためのスリットをシンチレータ間に設けた。その後、データ転送速度に関するデータ取得系の改良も行った。その結果として測定の live time が向上した。

lesser PANDA の各モジュールのエネルギー較正に関しては、当初下から一段ずつ組み立てつつ較正のための測定を行う方法を採用していたが、この方法では組み立て後には容易に較正を行えない点が問題となる。そこで組み立て後にエネルギー較正を行うことができる手法として、モジュール間に6mm程度の隙間をあけ、そこに線源を挿入しコンプトン後方散乱を利用して各モジュールの較正を行う方法を検討した。

モニタリングシステムは、測定中のデータや温度などの状況をリアルタイムに表示する機能と、非常に緊急事態を連絡をする機能から構成される。どちらもインターネットを利用しており、原子力発電所に駐車しているのトラック内からはドコモの通信端末を利用して通信を行っている。リアルタイムの表示は、発電所内のPCにおいて簡単な解析を行った後に、Webとして公開している。これにより検出器のトリガーレートやエネルギースペクトル、温度湿度変化などを確認することができる。アラートシステムは、Webで公開されている情報を元に判断を



図 2.3.13: トラックに積み込んだ状態のプロトタイプ検出器

行い、異常事態の場合には決められた連絡先にメールを送信する。また、ディスクの容量が溢れたり、ドコモによる通信が途絶えたりなど PC やネットワークの異常時にも警告メールを送信するように設計している。

lesser PANDA の改良後、実際に 2t トラックに積み込み、2 日間にわたり、屋外におけるバックグラウンド測定試験を行った(図 2.3.13)。屋外における試験を通じて、実際にトラックで測定する場合に生じる問題を洗い出し、温度湿度の変化する屋外環境下で測定が行えること、室内と屋外でバックグラウンドとなる環境放射線の成分が異なることが分かった。

年度末より中部電力浜岡原子力発電所にて、プロトタイプ lesser PANDA による測定を開始した。プロトタイプは、現在メンテナンスで停止中の 3 号炉から約 40m の距離に設置しており、3 号炉の起動前と起動後のニュートリノ量の変化を測定する予定である。

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) には実験事実に反して 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。予想される質量範囲はまだ広いが、もし 1 eV オーダーであれば太陽がよいアクシオン源となることが知られている。

我々は太陽由来の太陽アクションを捉るために、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ができるアクシオンヘリオスコープ (Tokyo Axion Helioscope) を開発した。この装置は、太陽起源のアクションを磁場領域で光子へと変換(逆プリマコフ変換)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ョ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ョン由来と考えられる有意な事象は捉えられていないが、アクションの質量として $m_a < 0.27 \text{ eV}$ 、 $0.84 \text{ eV} < m_a < 1.00 \text{ eV}$ という範囲でアクションと光子の結合定数に対して $g_{a\gamma\gamma} < 5.6 - 13.4 \times 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$ という上限値を得ることに成功している(図 2.3.14)。現在は質量 1 eV 以上のアクション探索を行うべく、実験装置の改修を行い、測定準備をしている。

昨年はまず、磁場領域中に He ガスを導入する為の He ガス管中で、温度差が発生する問題を解決するための配管改修に取り組んだ。ガスに温度差が発生するとアクションに対する感度が保てないため、温度差をなくすことはこの実験を行う上で必要不可欠である。配管の改修を行った後は実験装置の真空性能検査を行っていたが、その途中で He ガス管に取り付けている X 線窓が破損してしまった。その後予備の X 線窓を取り付けて装置の冷却まで準備を進めたが、冷却の途中で予備の X 線窓まで破損してしまい、実験の中止を余儀なくされた。ほぼ同時期に超伝導磁石を冷却する GM 冷凍機の不具合にも見舞われ、X 線窓と冷凍機の修理を行った。これらの修理が完了した後は冷却を再開し、超伝導磁石の励磁を行い、測定準備を行っている。

なお、欧州原子核研究機構 (CERN) において同じ仕組みで大規模な装置を用いた CAST グループも 2002 年より探索実験を始めており、我々の後にアクション模型が予想する領域に到達している。その後も探索質量範囲を拡大しているが、彼らの実験装置では 1.2 eV 以上の質量を持つ太陽アクション探索は行われない。我々の実験ではそれよりも大きい質量の太陽アクション探索を計画しており、Sumico 実験の強みとなっている。

2.3.3 太陽 hidden sector photon 探索実験

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 sector photon が挙げられる。hidden sector 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_γ 、走行距離、エネルギー、媒質密度、hidden sector photon と光子の混合角 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

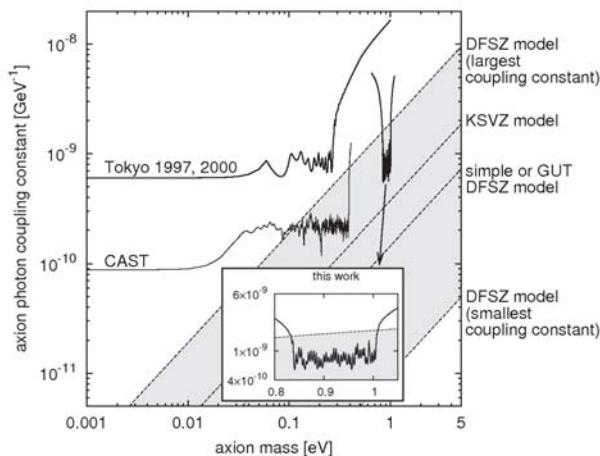


図 2.3.14: 太陽アクシオンに対する制限

sector 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 sector 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 sector photon の探索実験を検討し hidden sector photon 検出装置の設計、製作を行ってきた。hidden sector photon 検出装置は hidden sector 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アクシオン望遠鏡に本検出装置を搭載し、アクシオン望遠鏡の太陽追尾システムを利用する手段を用いた(図 2.3.15 参照)。本年度は hidden sector photon 検出用に設計、製作した検出装置を用いてエネルギー数 eV の太陽 hidden sector photon の探索実験を行った。また、次期測定を行う際に更に感度の高い測定を行うための検討を行ってきた。以下に本年度の研究実績をまとめた。

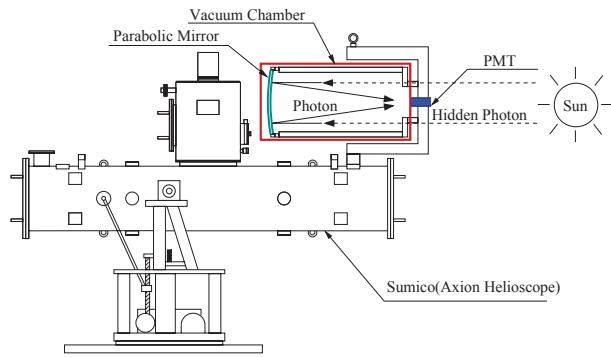


図 2.3.15: hidden sector photon 探索装置の模式図



図 2.3.16: Sumico の上に載せられた hidden sector photon 探索装置

エネルギー数 eV の太陽 hidden sector photon の探索実験

hidden sector photon 検出装置の組み立て、検出装置のアクシオン望遠鏡への取り付け、光軸の方向を決定するための測量等の準備の後、22 日間にわたる測定実験を行った(図 2.3.16 参照)。測定期間中、太陽追尾測定は日の出、日の入り前後に 1 日当たり合計約 10 時間行い、それ以外の時間帯にバックグラウンド測定を行った。

解析の際には hidden sector photon イベントレートを求めるために太陽追尾データとバックグラウンドデータのダークカウントレートの差を調べる手法を用いた。ただし、PMT のダークカウントレートは温度の影響を受けるため温度変化の影響を取り除く必要がある。測定期間中、平日には実験室の換気状況の変化に伴う激しい温度変化がみられたので解析には休日のデータのみ用い、 0.1°C の温度幅ごとにデータを分けて考察することにより温度変化の影響を取り除いた。そして、宇宙線の影響、PMT のゲイン変動の影響、ダークカウントレートの長期的減衰の影響等を系統誤差として考慮し、測定結果から hidden sector photon イベントレートを求めたが有意に大きなイベントレートは得られなかった。そこで、hidden sector photon イベントレートの上限値を決定し、このイベントレート上限値と光検出器の

検出効率、転換長、転換領域の有効面積等の測定条件を考慮することにより hidden sector photon と光子の混合角 χ の上限値の決定を行った。混合角 χ の上限値は hidden sector photon 質量 $m_{\gamma'}$ の関数の形で決定され、図 2.3.17 実線の通りである。

本結果において、質量数 meV の領域において世界でもっとも厳しい上限値をつけることに成功した。また hidden sector photon の質量が meV 領域の場合、hidden sector photon が宇宙初期に大量に生成された可能性があるが、この検証の一部を行ったことになる。

この実験は、太陽 hidden sector photon 専用探索実験で世界ではじめて有意な結果を出した実験である。

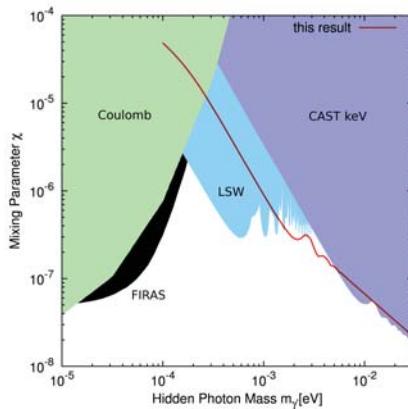


図 2.3.17: 本測定により得られた χ の上限値 (実線、preliminary)。塗りつぶし領域は他グループの実験結果、考察結果によって否定された領域。

次期測定に向けての更なる感度向上のための検討

hidden sector photon 探索実験において更なる検出感度の向上のための検討を行った。特に、PMT は温度を下げるによりダークカウントレートを減少させることができるので PMT を冷却し、かつダークカウントレートが安定するように PMT の温度を安定化させることは重要である。そこでスターリング冷凍機、断熱容器、温度調節器等で構成される PMT 冷却用の装置を作製し、PMT 冷却試験を行った。PMT 冷却中は PMT の結露を防ぐために断熱容器内部を乾燥窒素で満たしている。長期間の冷却試験の結果、PMT の温度は $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 程度の精度で制御することができ、 -20°C まで冷却することにより常温の場合に比べてダークカウントレートを 1Hz 程度減らすことができた。

また、現在使用している PMT 以外の検出器の導入の検討を行った。特に非常に高価ではあるが CCD 検出器の中には可視光領域において 100% 近い高量子効率、低バックグラウンドのものがありこれを用いて測定することにより大幅な測定感度の向上が期

待できる。今後、次期測定に向け最適な検出感度向上の手法の検討を引き継ぎ行っていく予定である。

<報文>

(原著論文)

- [1] Yoshihiro Iwata, Yoshizumi Inoue, Makoto Minowa: Development of a Compact Resonance Ionization Mass Spectrometer for Trace Element Analysis of Potassium, arXiv:1010.5902v2 [physics.atom-ph].
- [2] S. Oguri, Y. Inoue, M. Minowa: Pulse-shape discrimination of CaF₂(Eu), Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research A **662** (2010), 588–591, arXiv:1007.4750v2 [physics.ins-det].

(会議抄録)

- [3] R. Ohta, M. Minowa, Y. Inoue, Y. Akimoto, T. Mizumoto, A. Yamamoto: Prospects of Search for Solar Axions with Mass over 1 eV and Hidden Sector Photons, Proceedings of the 5th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs, Eds. Joerg Jaeckel, Axel Lindner and Javier Redondo (Verlag Deutsches Elektronen-Synchrotron), pp.82-85, RESCEU-50/09, arXiv:0911.0738 [astro-ph.IM].
- [4] Makoto Minowa: Tokyo Axion Helioscope, AXIONS 2010, Proceedings of the International Conference, Eds. David B. Tanner and K. A. van Bibber, AIP conference proceedings 1274, pp. 133–137, arXiv:1004.1308v1 [astro-ph.IM].

(学位論文)

- [5] 水本哲矢: Experimental search for solar hidden sector photons in the eV energy range using kinetic mixing with photons, 平成 23 年 3 月博士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻。

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [6] S. Oguri: PANDA – a mobile reactor neutrino monitor, AAP2010, Sendai, Japan, 3–5 August 2010.
- [7] Y.Kuroda, S.Oguri1, Y.Kato, C.Ito, Y.Inoue, M.Minowa: PANDA - a mobile reactor neutrino monitor, poster session at International Neutrino Summer School 2010, Tokai, Ibaraki, 30 August 2010.
- [8] Y. Inoue: Tokyo axion helioscope, Horiba International Conference COSMO/CosPA 2010, The University of Tokyo, Hongo, Tokyo, Japan, 27 September–1 October 2010.

招待講演

- [9] Y. Inoue: Tokyo axion helioscope experiment and other axion experiments, The XLVIth Rencontres de Moriond (Electroweak Interactions and Unified Theories), La Thuile, Aosta Valley, Italy, 13–20 March 2011.

(国内会議)

一般講演

- [10] 蓑輪 真: Tokyo Axion Helioscope, Hidden photon search and Anti-neutrino monitor of reactor operations、RESCEU・DENET 共催夏の研究会・サマースクール、「第 10 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、高知県高知市「高知パレスホテル」、2010 年 8 月 29 日。
- [11] 太田良介: 質量 1eV 以上の太陽アクション探索、日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学 2010 年 9 月 13 日。
- [12] 水本哲矢: エネルギー数 eV の太陽 Hidden Photon の探索実験 2、日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学 2010 年 9 月 13 日。
- [13] 堀江友樹 : Hidden Photon 探索実験のための PMT 冷却システムの開発、日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学 2010 年 9 月 13 日。
- [14] 黒田康浩: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA)[1] 原子炉近傍に於ける予備実験、日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学 2010 年 9 月 13 日。
- [15] 加藤陽: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA)[2] 新しいエネルギー較正手法の検討、日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学 2010 年 9 月 13 日。
- [16] 小栗秀悟: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA)[3] 原子炉ニュートリノの測定、日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学 2010 年 9 月 13 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、GCOE「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」第 5 回 RA キャンプ、静岡県伊豆の国市 2011 年 2 月 18 日。
- [18] 太田良介: 質量 1eV 以上の太陽アクション探索、日本物理学会 2011 年第 66 回年次大会、新潟大学（中止：講演資料公開）。
- [19] 水本哲矢: エネルギー数 eV の太陽 Hidden Photon の探索実験 3、日本物理学会 2011 年第 66 回年次大会、新潟大学（中止：講演資料公開）。
- [20] 堀江友樹 : Hidden Photon 探索実験のための PMT 冷却システムの開発 2、日本物理学会 2011 年第 65 回年次大会、新潟大学（中止：講演資料公開）。
- [21] 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] 測定器の無人稼働中の制御について、日本物理学会 2011 年第 65 回年次大会、新潟大学（中止：講演資料公開）。
- [22] 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 [2] エネルギー較正について、日本物理学会 2011 年第 65 回年次大会、新潟大学（中止：講演資料公開）。

- [23] 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予備実験、日本物理学会 2011 年第 65 回年次大会、新潟大学（中止：講演資料公開）。

セミナー

- [24] 蓑輪 真: 原子炉ニュートリノモニター、若狭湾エネルギー研究センター、2010 年 6 月 23 日。
- [25] 蓑輪 真: 原子炉ニュートリノモニター、第 4 回 Nuclear Salon Fuji-ie & 理研懇談会、理化学研究所 仁科加速器研究センター 2010 年 7 月 26 日。
- [26] 蓑輪 真: 低エネルギーニュートリノ実験の方法、グローバル COE「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」、第 5 回 RA キャンプ、静岡県伊豆の国市長岡、2011 年 2 月 17 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)、次世代大型水チエレンコフ検出器(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2.4.18)。今後は、2014年に予定されるSuper KEKB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バラダイムを越える新しい、より根源的な原理の探求を行う。本年度は、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開始した。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_ℓ/Λ)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2.4.19参照)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できる。

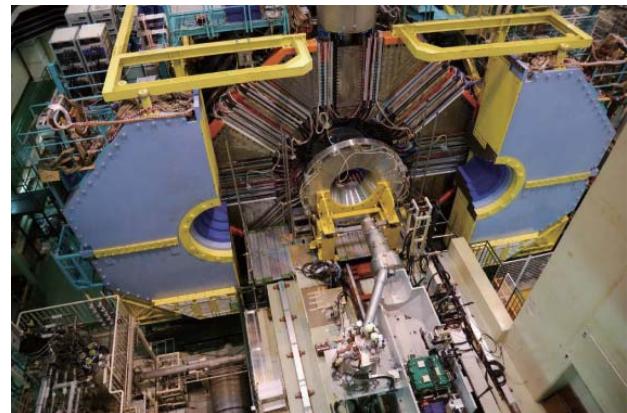


図 2.4.18: 改造するためにビームラインから引き出したBelle測定器

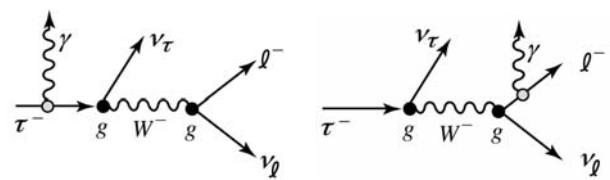


図 2.4.19: タウレプトンの輻射レプトン崩壊の最低次のファインマンダイアグラム

2.4.2 Belle II 実験

2010年10月より、Super KEKB加速器とBelle II測定器の建設が始まった。Super KEKB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測定器は、その加速器から最大限の物理成果を引き出すために最先端技術を駆使して作る測定器である。本年度、われわれは衝突点近傍デザインのための研究を行った。Super KEKBにおける加速器からのバックグラウンド、特に、バンチ内の粒子が相互作用して発生するTouschekバックグラウンドとビームの真空パイプ中の残存ガスによる散乱で発生するビームガスバックグラウンドの見積りを行った。これは、KEKB加速器の特別運転による実測値とシミュレーションによって得られたKEKBのバックグラウンドをSuper KEKBでのバックグラウンドに外挿する係数を組み合わせることによって得られた。さらに、ビームパイプの冷却システムをデザインするために模擬模型を制作し、検討中の冷却方法の冷却能力を測定した。これらの結果は、修士論文にまとめられた。

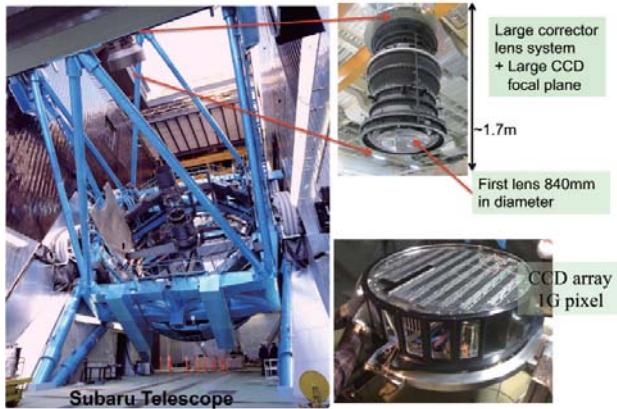


図 2.4.20: 完成した Hyper Suprime-Cam 補正光学システムと製作中の CCD カメラ

2.4.3 HSC ダークエネルギー研究

物質階層であるバリオンは宇宙の全エネルギーのわずか4%を占めるに過ぎず、実に73%のエネルギーが現在の理論では説明のつかないダークエネルギーと呼ばれる真空のエネルギーで占めらることが明らかになっている。このダークエネルギーの正体は全く不明であり、21世紀の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。

この計画で、当研究室は、国立天文台と共同で、すばる望遠鏡の主焦点に、広視野 1.77 平方度 1.2 ギガピクセルの CCD カメラ (Hyper Suprime-Cam) を製作してきた。この新装置を用いて、2000 平方度の広域探査を行い、探査天域に含まれる 1.5 億個程度の銀河の形状解析から、弱い重力レンズ効果による系統的形状歪みを検出し、遠方銀河と我々の間に介在する（ダークマターを含めた）全質量の分布を求め、宇宙の 3 D 質量分布図を作成する。さらに、宇宙大規模構造の形成と進化、銀河の個数分布と形状進化などの観測的宇宙論の研究を進めることによって、ダークエネルギーの正体に迫る。図 2.4.20 に、2011 年 3 月に完成した広視野補正光学システムと組み立て途中の CCD カメラを示す。これらは、2011 年夏にすばる望遠鏡に設置され、HSC のファーストライトは 2011 年 11 月に予定されている。また、今年度は、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、弱重力レンズ効果解析法を適用し、宇宙論パラメータに制限をつけるために、銀河団撮像データをすばる望遠鏡主焦点広視野カメラ Suprime-Cam を用いて取得した。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）を行った。

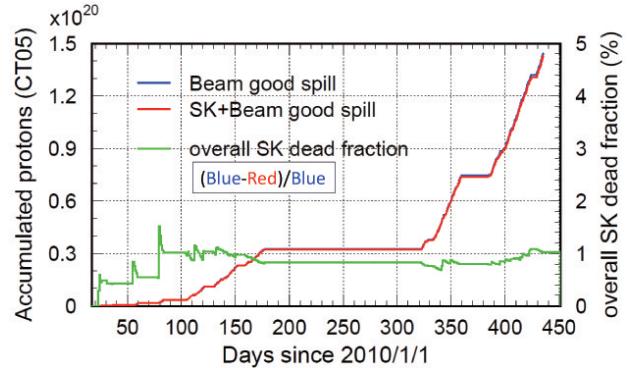


図 2.4.21: T2K のデータ収集状況。横軸：日数、縦軸：標的に当てた陽子の数。

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、茨城県東海村に新たに建設した 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。本研究室では、2007 年度より本格的にニュートリノビームライン機器、特に一次陽子ビームラインの陽子ビームモニター、の製作及び設置を行ってきた。また、横山は 2004 年からニュートリノビームライン最下流のミューオンモニターおよび前置ニュートリノ検出器群の開発・建設を主導してきた。

2009 年度までに実験全体のコミッショニングが終了し、2010 年度は本格的なデータ収集が始まった。陽子ビームの強度を徐々に上げながら実験を行い、2010 年夏までに 0.32×10^{20} 個、2011 年 3 月 11 日までには 1.43×10^{20} 個の陽子を標的に照射した（図 2.4.21）。

我々は実験開始当初から、当研究室で開発し、運用に責任を負っているビームプロファイルモニター SSEM 及びビーム位置モニター ESM を活用して陽子ビームのプロファイル及び中心位置を継続して測定し続けている。陽子ビームモニターは、運転時に大強度のビームを高精度で制御するために不可欠の情報を供給するとともに、陽子が標的に照射される軌道やその安定性を確認し、ビーム由来の系統度差を削減するために重要である。図 2.4.22 に、陽子ビームモニタの測定から求めた標的上の陽子ビームプロファイルを、これまでの全データについて積分した図を示す。直径 26mm の標的上に陽子ビームが良く絞られて照射されていることが分かる。

J-PARC 構内に設置した前置検出器群では、ニュートリノ振動を起こす前、生成された直後のニュートリノビームのフラックス、エネルギースペクトル、ニュートリノの種類を測定する。T2K 前置検出器は、大きく二つの検出器に分けられる。一つは、鉄とプラスチックシンチレータのサンドイッチ構造を

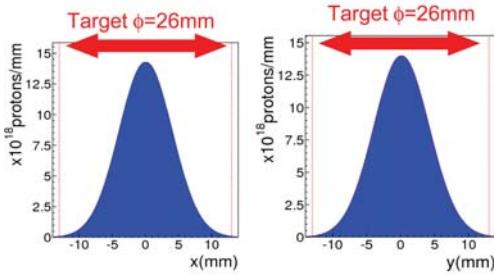


図 2.4.22: 標的上の陽子ビームプロファイル。陽子ビームモニタの測定から、全データに対する積分を求めたもの。

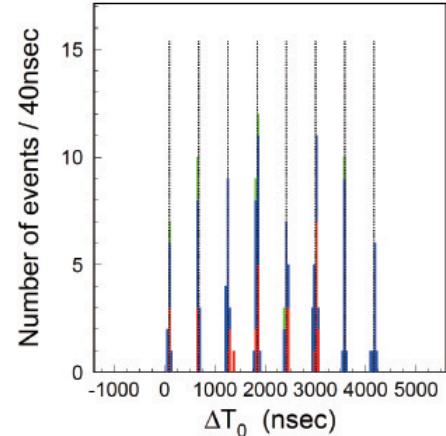


図 2.4.24: T2K 実験でのビーム照射タイミングに対する、スーパーカミオカンデ検出器での反応事象の時間分布。点線は J-PARC 加速器のバンチ構造から予想されるタイミング。

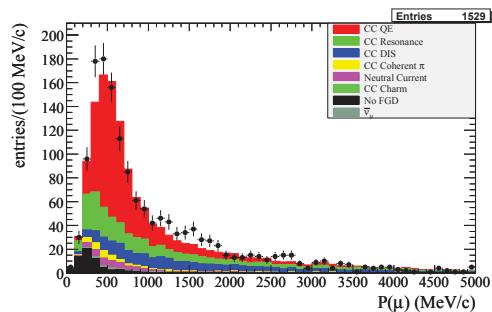


図 2.4.23: オフアクシス前置検出器で測定した、ニュートリノ反応で生成されたミューオンの運動量分布。点がデータ（エラーバーは統計誤差のみ）、ヒストグラムはシミュレーションによる予測。

した $1.2 \times 1.2 \times 1.2 \text{ m}^3$ の検出器モジュールを縦横に 7 つずつ並べ、ビームの中心から $\pm 5 \text{ m}$ 程度の面積をカバーする INGRID 検出器である。INGRID 検出器では各モジュールでのニュートリノ反応事象数を数えることで、ニュートリノビームの空間分布、方向、強度をモニターする。もう一つはオフアクシス検出器と呼ばれ、ヨーロッパの CERN 研究所から移設した巨大な電磁石の中にニュートリノ検出装置を組み合わせて設置し、ニュートリノビームの強度、エネルギー分布、種類や反応の様子を詳しく測定することを目的とする。

INGRID 検出器では、ニュートリノ反応事象数と、ニュートリノビームの中心方向が、ともに実験期間を通じて安定していることを確認した。オフアクシス検出器では、ミューオンニュートリノの荷電カレント反応で生成されたミューオンを選択し、磁場中での曲率をタイムプロジェクションチェンバーで測定することで、その運動量分布を測定した（図 2.4.23）。ミューオンの運動量は親のニュートリノのエネルギーと強い相関がある。分布が概ね予想と一致していることから、我々の使っているシミュレーションにおいてニュートリノエネルギーの予想が大きく間違っていない

いことがわかる。また、ニュートリノフラックスと断面積の不定性が大きいため、ニュートリノ反応の反応数は前置検出器で実測することで系統誤差をおさえる必要がある。今年度、この反応数の T2K で最初の測定を行い、シミュレーションに比べ 1.06 ± 0.03 (統計誤差) ± 0.04 (検出器由来系統誤差) ± 0.04 (ニュートリノ反応モデル) であると測定された。

後置検出器、スーパーカミオカンデはこれまでのデータ収集期間を通じて非常に安定に動作しており、データ収集効率はおよそ 99% であった。2010 年夏までのデータを解析した結果、有効体積 (22.5 キロトン) 内での反応は 23 事象であった。これらの事象は、GPS を用いて J-PARC 加速器でのビーム照射のタイミングと同期したものを見びだしておらず（図 2.4.24）、T2K のビーム由来でないバックグラウンド事象は 10^{-3} 程度であり無視できる。ミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの変換現象を探索するため、チerenコフ光の電荷や時間情報のパターンを使い電子ニュートリノ事象を見びだす事象選択を行った結果、図 2.4.25 に示す 1 事象が候補として残った。ビームラインや前置検出器の測定をもとにしたシミュレーションでの予想背景事象は 0.3 事象であった。今回の結果は、電子ニュートリノ発現事象として統計的に優位な結果ではなく、ニュートリノ振動のパラメータ θ_{13} に制限を与えた（図 2.4.26）。これは、過去の実験の結果を更新するものではなかったが、実験として基本的な解析の枠組みを確立することができた。今後さらにデータを蓄積して研究を進め、世界初の電子ニュートリノ発現事象の観測を目指す。

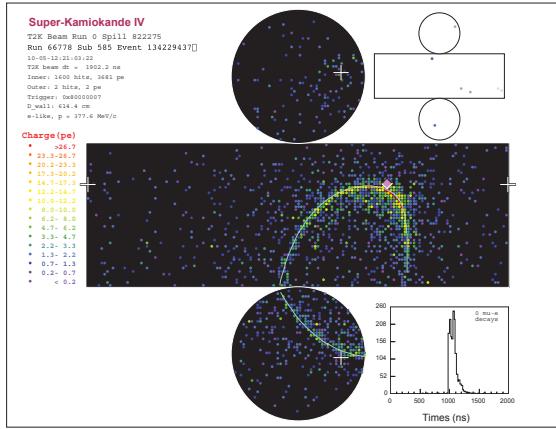


図 2.4.25: T2K 実験における電子ニュートリノ反応事象の候補。

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 2.4.27）の実現のための研究を進めている。ハイパーカミオカンデ検出器は、100 万トンの総質量をもつ水チェレンコフ検出器で、ニュートリノの CP 非対称性測定だけでなく、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。

今年度我々は、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た。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ったところ、以前は 10 年の運転期間が必要と考えられていたところ、5 年の実験期間でもかなりのパラメータ領域で十分な感度が得られることが示された（図 2.4.28）。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確定性が 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 実験で電子ニュートリ

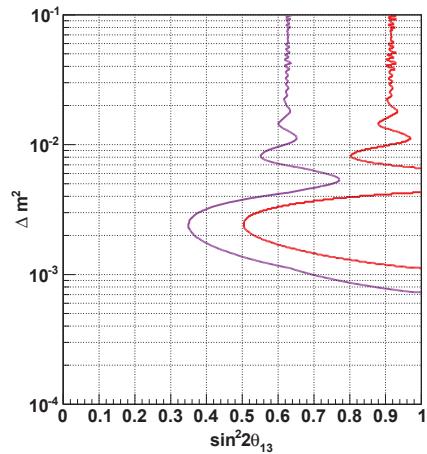


図 2.4.26: ニュートリノ振動のパラメータ θ_{13} への制限。縦軸はニュートリノ質量の二乗差、横軸は θ_{13} で線の右側が排除される領域。左側の線はシミュレーションから予想される感度、右側の線は実際のデータによる結果。

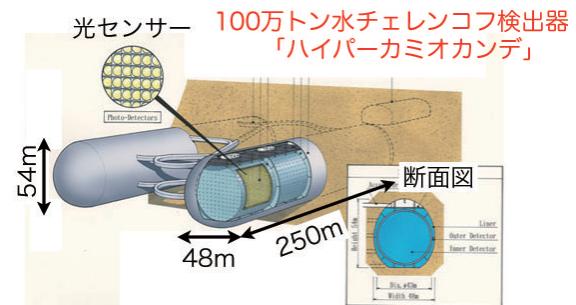


図 2.4.27: ハイパーカミオカンデ検出器の概念図。

ノ発現事象が観測された場合には、ニュートリノにおける CP 対称性の破れに対する感度を充分に持った実験が可能であることを示した。

2.4.6 ニュートリノ-原子核反応断面積の測定と短基線ニュートリノ振動探索

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となる。しかし、断面積自身が非常に小さいこと、入射ニュートリノのフラックスやエネルギー分布の正確な見積もりが難しいこと、様々な反応モードが混じって存在するエネルギー領域であること、標的原子核中の終状態ハドロンの二次散乱の効果が大きいこと、などの

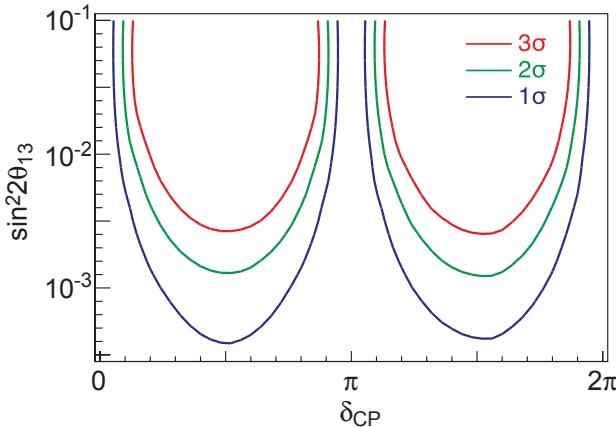


図 2.4.28: ハイパーカミオカンデ検出器を使った実験で予想される、 CP 非対称性への感度。曲線の内側の領域であれば、5年間の実験でニュートリノ振動で CP 対称性が破れていることを示すことができる。

理由により、現在のニュートリノ振動実験で最も重要な領域であるニュートリノエネルギー 1GeV 付近の断面積の測定精度は十分でない。この状況を改善するために、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)を提案し、T2K 実験の前身である K2K 実験のために制作した重量約 20 トンの SciBar 検出器を高エネルギー加速器研究機構からフェルミ研究所のブースターニュートリノビームラインへと移設して、2007-2008 年の約 1 年間データ収集を行った。

今年度は、荷電カレント反応の測定結果を公表した。SciBar 検出器で測定された約 4 万事象のニュートリノ反応を用い、反応率の測定を 3% の精度で、ニュートリノフラックスの不定性を含めた断面積の測定としては 8% の精度で行った。これは、炭素原子核とニュートリノの散乱について、ニュートリノエネルギー 1GeV 付近では世界初の測定である。

さらに、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 eV² でのニュートリノ振動を予言するものがある。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 2.4.29 に、今回の測定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。

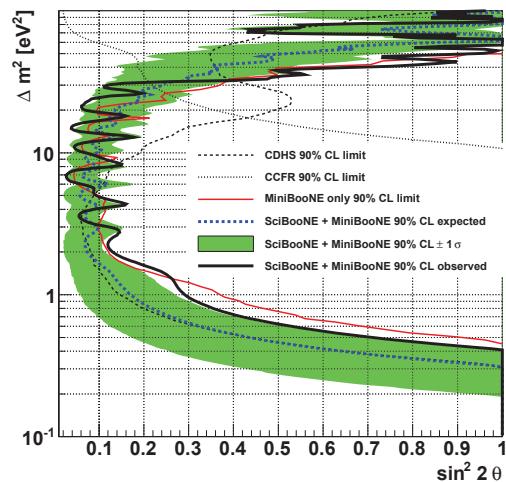


図 2.4.29: SciBooNE/MiniBooNE 実験による、ニュートリノ振動パラメータに対する制限。太い実線の右側が今回の測定で排除された領域を示す。

2.4.7 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、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 より優れた基本性能を確認した。昨年度からは 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 の開発を行っている。

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、かつ増幅率のは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



図 2.4.30: オールガラス製 8 インチ HPD 試作機

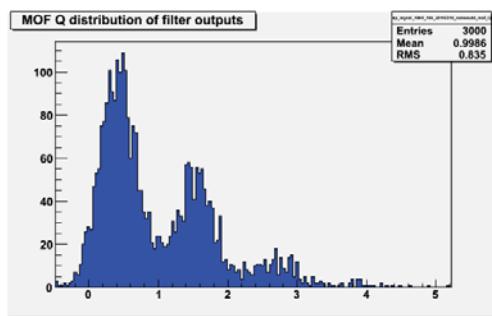


図 2.4.31: オールガラス製 8 インチ HPD の波高分布。ノイズ、単一光電子、二光電子信号のピークが見られる。

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（図 2.4.30）。この HPD の波高分布を図 2.4.31 に示す。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、20%(σ)を確かめ、オールガラス製の HPD でも、今までの金属フランジを用いた HPD と同様の性能が得られていることを確認した。暗電流カウントレートについても測定し、約 2kHz という結果を得た。これは、同サイズの PMT の暗電流カウントレート 4kHz と同等の値である。また、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も確認した。

HPD の使用性を向上するために、電源ケーブル(5V)とネットワークケーブルを接続するだけで、デジタル信号データが簡単に取得できるデジタル HPD の開発を進めている。HPD 用の読み出し回路では、PMT に比べて約 1/100 という低い電子増幅をカバーするために、最新のデジタル信号処理技術をもちい

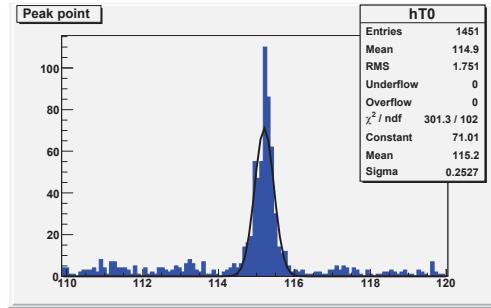


図 2.4.32: 8 インチ HPD と小型読み出し基板を用いたときの時間分解能

た、低ノイズプリアンプ、低消費電力高速サンプリング、デジタル信号処理、などの機能が必要となるが、デジタル HPD では、読み出し回路と高電圧電源をまとめて HPD 端部の狭いスペースに搭載する必要がある。我々は、上記の諸機能に加え更にイーサネット出力機能を実装した読み出し回路を 8 インチ HPD 端部に搭載するための小型化を進め、その開発に成功した。この小型化した読み出し回路と 8 インチ HPD との接続試験を行った結果、図 2.4.32 に示すように、全面照射で時間分解能 250ps(σ)という期待通りの性能を得た。

現在、さらなる読み出し回路の小型化、高性能化のために、低消費電力高速サンプリングを行う IC に ADC の機能を内蔵する試みを進めている。ASIC 技術を用いて開発を行い、入力ダイナミックレンジ約 2V、分解能 8bit を確認した。さらに、目標とする 12bit の分解能を目指して、開発を進めている。

<受賞>

- [1] 阿部利徳, 第 99 回日本医学物理学会 CyPos 賞, 日本医学物理学会。

<報文>

(原著論文)

- [2] M. J. Lee *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the branching fractions and the invariant mass distributions for $\tau^- \rightarrow h^- h^+ h^- \nu_\tau$ decays,” Phys. Rev. D **81**, 113007 (2010) [arXiv:1001.0083 [hep-ex]].
- [3] B. R. Ko *et al.* [Belle collaboration], “Search for CP violation in the decays $D_{(s)}^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+$ and $D_{(s)}^+ \rightarrow K_S^0 K^+$,” Phys. Rev. Lett. **104**, 181602 (2010) [arXiv:1001.3202 [hep-ex]].
- [4] C. C. Chiang *et al.* [Belle collaboration], “Search for $B^0 \rightarrow K^{*0} \bar{K}^{*0}$, $B^0 \rightarrow K^{*0} K^{*0}$ and $B^0 \rightarrow K^+ \pi^- K^\mp \pi^\pm$ Decays,” Phys. Rev. D **81**, 071101 (2010) [arXiv:1001.4595 [hep-ex]].
- [5] N. J. Joshi *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the branching fractions for $B^0 \rightarrow D_s^{*-} \pi^-$ and $B^0 \rightarrow D_s^{*-} K^+$ decays,” Phys. Rev. D **81**, 031101 (2010).

- [6] T. Aushev *et al.*, “Study of the $B \rightarrow X(3872)(\rightarrow D^{*0}\bar{D}^0)K$ decay,” Phys. Rev. D **81**, 031103 (2010).
- [7] M. Petric *et al.* [Belle Collaboration], “Search for leptonic decays of D^0 mesons,” Phys. Rev. D **81**, 091102 (2010) [arXiv:1003.2345 [hep-ex]].
- [8] A. Poluektov *et al.* [The Belle Collaboration], “Evidence for direct CP violation in the decay $B^\pm \rightarrow D^{(*)}K^\pm, D \rightarrow K_s\pi^+\pi^-$ and measurement of the CKM phase ϕ_3 ,” Phys. Rev. D **81**, 112002 (2010) [arXiv:1003.3360 [hep-ex]].
- [9] A. Drutskoy *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of $\Upsilon(5S)$ decays to B^0 and B^+ mesons,” Phys. Rev. D **81**, 112003 (2010) [arXiv:1003.5885 [hep-ex]].
- [10] H. J. Hyun *et al.* [Belle Collaboration], “Search for a Low Mass Particle Decaying into $\mu^+\mu^-$ in $B^0 \rightarrow K^{*0}X$ and $B^0 \rightarrow \rho^0X$ at Belle,” Phys. Rev. Lett. **105**, 091801 (2010) [arXiv:1005.1450 [hep-ex]].
- [11] A. Bozek *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of $B^+ \rightarrow \bar{D}^{*0}\tau^+\nu_\tau$ and Evidence for $B^+ \rightarrow \bar{D}^0\tau^+\nu_\tau$ at Belle,” Phys. Rev. D **82**, 072005 (2010) [arXiv:1005.2302 [hep-ex]].
- [12] S. Esen *et al.*, “Observation of $B_s \rightarrow D_s^{(*)+}D_s^{(*)-}$ using e^+e^- collisions and a determination of the $B_s-\bar{B}_s$ width difference $\Delta\Gamma_s$,” Phys. Rev. Lett. **105**, 201802 (2010) [arXiv:1005.5177 [hep-ex]].
- [13] K. Hara *et al.* [Belle collaboration], “Evidence for $B^- \rightarrow \tau^-\bar{\nu}_\tau$ with a Semileptonic Tagging Method,” Phys. Rev. D **82**, 071101 (2010) [arXiv:1006.4201 [hep-ex]].
- [14] C. C. Peng *et al.* [Belle Collaboration], “Search for $B_s^0 \rightarrow hh$ Decays at the $\Upsilon(5S)$ Resonance,” Phys. Rev. D **82**, 072007 (2010) [arXiv:1006.5115 [hep-ex]].
- [15] S. Uehara *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of $\eta\eta$ production in two-photon collisions,” Phys. Rev. D **82**, 114031 (2010) [arXiv:1007.3779 [hep-ex]].
- [16] Y. Nakahama *et al.* [BELLE Collaboration], “Measurement of CP violating asymmetries in $B^0 \rightarrow K^+K^-K_S^0$ decays with a time-dependent Dalitz approach,” Phys. Rev. D **82**, 073011 (2010) [arXiv:1007.3848 [hep-ex]].
- [17] H. Guler *et al.* [Belle Collaboration], “Study of the $K^+\pi^+\pi^-$ Final State in $B^+ \rightarrow J/\psi K^+\pi^+\pi^-$ and $B^+ \rightarrow \psi' K^+\pi^+\pi^-$,” Phys. Rev. D **83**, 032005 (2011) [arXiv:1009.5256 [hep-ex]].
- [18] W. Dungel *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the form factors of the decay $B^0 \rightarrow D^{*-}\ell^+\nu$ and determination of the CKM matrix element $|V_{cb}|$,” Phys. Rev. D **82**, 112007 (2010) [arXiv:1010.5620 [hep-ex]].
- [19] G. Pakhlova *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of $e^+e^- \rightarrow D_s^{(*)+}D_s^{(*)-}$ cross sections near threshold using initial-state radiation,” Phys. Rev. D **83**, 011101 (2011) [arXiv:1011.4397 [hep-ex]].
- [20] R. Wendell *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Atmospheric neutrino oscillation analysis with sub-leading effects in Super-Kamiokande I, II, and III,” Phys. Rev. D **81**, 092004 (2010).
- [21] Y. Kurimoto *et al.* [SciBooNE Collaboration], “Improved measurement of neutral current coherent π^0 production on carbon in a few-GeV neutrino beam,” Phys. Rev. D **81**, 111102 (2010).
- [22] M. Yokoyama *et al.*, “Performance of Multi-Pixel Photon Counters for the T2K near detectors,” Nucl. Instrum. Meth. A **622**, 567 (2010).
- [23] K. Matsuoka *et al.*, “Design and performance of the muon monitor for the T2K neutrino oscillation experiment,” Nucl. Instrum. Meth. A **624**, 591 (2010).
- [24] Y. Nakajima *et al.* [SciBooNE Collaboration], “Measurement of inclusive charged current interactions on carbon in a few-GeV neutrino beam,” Phys. Rev. D **83**, 012005 (2011).
- [25] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Solar neutrino results in Super-Kamiokande-III,” Phys. Rev. D **83**, 052010 (2011).
- [26] C. Mariani *et al.* [K2K Collaboration], “Measurement of inclusive π^0 production in the Charged-Current Interactions of Neutrinos in a 1.3-GeV wide band beam,” Phys. Rev. D **83**, 054023 (2011).
- (会議抄録)
- [27] Yutaka Komiyama, Hiroaki Aihara, Hiroki Fujimori, Sogo Mineo, Hironao Miyatake, et al., “Hyper Suprime-Cam: camera design,” Proceedings of SPIE, 7735, 77353F, 2010.
- [28] Hidehiko Nakaya, Hironao Miyatake, Hiroki Fujimori, Sogo Mineo, Hiroaki Aihara, et al., “Hyper Suprime-Cam: development of the CCD readout electronics,” Proceedings of SPIE, 7735, 77352P, 2010.
- [29] H. Fujimori, H. Aihara, S. Mineo, H. Miyatake, S. Miyazaki, H. Nakaya, T. Uchida, “Back-End Readout Electronics for Hyper Suprime-Cam,” IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, N14-9, 2010.
- [30] Sogo Mineo, et al., “Distributed parallel processing analysis framework for Belle II and Hyper Suprime-Cam” Proceedings of Science ACAT2010, 026 (2010).
- [31] Sogo Mineo, et al., “Development of an analysis framework for HSC and Belle II” Proceedings of SPIE 7740, 77401P (2010).
- [32] Hisanori Furusawa, et al., “A prototype of Hyper Suprime-Cam data analysis system” Proceedings of SPIE 7740, 77402I (2010).

- [33] Masashi Yokoyama, "SciBooNE and other neutrino cross section measurements," Proceedings of 45th Rencontres de Moriond, Electroweak Interactions and Unified Theory.
- [34] K. Matsuoka, A. Ichikawa, H. Kubo, T. Maruyama, A. Murakami, T. Nakaya and M. Yokoyama, "Development and production of the ionization chamber for the T2K muon monitor," Nucl. Instrum. Meth. A **623**, 385 (2010).
- [35] M. Otani, M. Yokoyama *et al.*, "Design and construction of INGRID neutrino beam monitor for T2K neutrino experiment," Nucl. Instrum. Meth. A **623**, 368 (2010).
- [36] D. Orme, M. Yokoyama *et al.*, "Development of multi-pixel photon counters for the T2K long baseline neutrino experiment," Nucl. Instrum. Meth. A **623**, 321 (2010).
- [37] T. Abe, H. Aihara, M. Iwasaki, K. Kasimura, S. Mineo, T. Uchida, M. Tanaka, Y. Kawai, H. Kyushima, M. Suyama, M. Shiozawa "R&D status of large aperture Hybrid Avalanche Photo-Detector," Nucl.Instrum.Meth.A623:279-281,2010.
- (国内雑誌)
- [38] 横山将志, "ニュートリノを測る—素粒子計測の最先端—," 放計協ニュース第 45 号, 2010 年 4 月。
- [39] 中家剛, 横山将志, "T2K ニュートリノ実験の検出器," 応用物理学会放射線分科会誌「放射線」第 36 卷 3 号 (2010).
- [40] 松岡広大, 久保一, 横山将志, "T2K ミューオンモニターの開発," 高エネルギーニュース 第 29 卷 1 号 (2010).
- [41] 王佳寅, "CERN Summer School 2010 活動報告," 高エネルギーニュース 第 29 卷 3 号 (2010).
- (学位論文)
- [42] 杉原進哉, 修士論文 : "Design Study of Belle II Interaction Region" (2011 年 3 月)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [43] Sogo Mineo, "Development of an analysis framework for HSC and Belle II," SPIE "Space Telescopes and Instrumentation 2010: Optical, Infrared, and Millimeter Wave ", June 27, 2010.
- [44] Hidekazu Kakuno, "Overview of T2K facility," 7th International Workshop on Neutrino Beams and Instrumentation, Tokai, Japan, August 2010.
- [45] Masashi Yokoyama, "Measuring neutrino with near detectors," II International Neutrino Summer School, Yokohama/Tokai, Japan, Aug. 23-31 2010.
- [46] H. Fujimori, H. Aihara, S. Mineo, H. Miyatake, S. Miyazaki, H. Nakaya, T. Uchida, "Back-End Readout Electronics for Hyper Suprime-Cam," IEEE Nuclear Science Symposium, Knoxville, Tennessee, USA, Oct.30-Nov.6, 2010.
- [47] Masashi Yokoyama, "Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment with Hyper-Kamiokande and J-PARC," 11th International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors Toyama, Japan, December 13 - 16, 2010
- [48] Jiayin Wang, "CP sensitivity study for Hyper-Kamiokande," *ibid.*
- [49] Hironao Miyatake and Masahiro Takada, "Shapes Using Multiple Exposures," Jan. 27, 2011, From Pixels to Shear (2011 GREAT Workshop 1), Edinburgh, UK
- 招待講演
- [50] H. Aihara, "HEP Community in Japan," 87th Plenary ECFA Meeting, July 1st, 2010, Frascati
- [51] H. Aihara, "Status of KEKB upgrade," 87th Plenary ECFA Meeting, July 2nd, 2010, Frascati
- [52] H. Aihara, "PEP4 program at LBNL and SLAC," The US/Japan Collaboration in High Energy Physics: The 30th Anniversary Symposium October 20-21, 2010 Kailua-Kona, Hawaii
- (国内会議)
- 一般講演
- [53] 阿部利徳, "超高感度光センサー用読み出しシステムの開発," 第 99 回日本医学物理学会学術大会, 横浜, 2010 年 4 月
- [54] 阿部利徳, "大口径 HAPD の開発," 日本物理学会 2009 年秋季大会, 九州工業大学, 2010 年 9 月
- [55] 阿部利徳, "大口径 HAPD の開発," 二重ベータ崩壊研究懇談会, 宮城県岩沼市, 2010 年 12 月
- [56] 宮武広直, "弱重力レンズ効果高精度測定法の開発," グローバル COE 「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」第 5 回 RA キャンプ, 伊豆, 2011 年 2 月 19 日
- [57] 宮武広直, "弱重力レンズ効果の高精度測定法の開発," 日本天文学会 2011 年春季年会, つくば, 2011 年 3 月 19 日
- [58] 峯尾聰吾, "大規模 HSC 銀河サーベイのための高精度天文データ処理パイプライン法の開発," 日本物理学会 第 66 回年次大会, 2011 年 3 月
- [59] 横山将志, "Hyper-Kamiokande を用いた長基線ニュートリノ振動実験における CP 非対称性の測定感度に関する研究 (1)," 同上
- [60] 王佳寅, "Hyper-Kamiokande を用いた長基線ニュートリノ振動実験における CP 非対称性の測定感度に関する研究 (2)," 同上
- 招待講演

- [61] 相原博昭, “素粒子・原子核研究の最先端と KEK への期待,” 小林ホール記念シンポジウム、KEK、平成 22 年 4 月 21 日

その他

- [62] 相原博昭, “素粒子原子核分野の大型プロジェクトについて” 文部科学省「学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会」2010 年 5 月 13 日

- [63] 相原博昭, “KEKB ファクトリー加速器の目指す物理,” 国立天文台談話会、2011 年 1 月 19 日

- [64] 相原博昭, “素粒子物理のマスターplan,” 学術の大型施設計画・大規模研究計画（マスターplan）に関する物理系シンポジウム平成 23 年 1 月 31 日 日本学術会議講堂

(セミナー)

- [65] 横山将志, “T2K 実験の最新結果と今後の展望,” 首都大学東京, 2011 年 1 月 20 日

- [66] 宮武広直, “Hyper Suprime-Cam のための読み出しエレクトロニクスの開発,” KEK CMB グループセミナー, つくば, 2011 年 2 月 7 日

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にLHC・ATLAS実験でのヒッグス粒子や超対称性粒子や余剩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行い、標準理論を超えた新しい素粒子現象の探索を別の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 は昨年より重心系エネルギー 7TeV での運用を開始し、TeV (テラ電子ボルト) 領域の研究の新たな時代がはじまった。図 1 に示す様にテラ電子ボルトのエネルギーを持つ素粒子反応を直接探っている。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 の発見で新しいパラダイムが拓かれると思われている。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、超対称性粒子、余剩次元 (ブラックホール) の研究と、それらの発見で重要な ATLAS 検出器のパフォーマンス評価の研究を行っている。

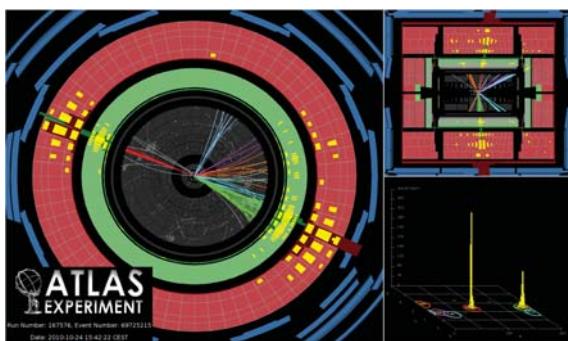


図 2.5.33: 7TeV での衝突実験で観測された高い横方向運動量 (1.3TeV) をもつ 2 ジェット事象 (実データ)

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 (mET と呼ぶ) が大きい特徴がある。この図 2 は、レプトンを一個含む探索モードで横方向消失運動量 (mET) 分布であり、実験データとバックグラウンド、期待されるシグ

ナルを重ねてある。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 mET を持っている。更に、信号からは高い横向き運動量 (PT) を持った複数のジェットが放出される特徴があるので、mET とジェットの PT のスカラー和 (Meff) も、信号はバックグラウンドに比べて高くなる。(図 2 b) 実験の結果、実験データはバックグラウンド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つた。超対称性研究で我々のグループが行った成果をまとめると、

1. 検出器全体に同期したノイズで大きな偽の消失運動量が生じる。これを除くことに成功した。
2. 宇宙線やビームハロー・バックグラウンドを除く方法を考案し、そのバックグラウンドレベルを評価した。
3. 超対称性粒子発見の 4 つの主要なモード (レプトンを含まないモード、含むモード、b クォークを含む探索モード、 τ レプトンを含む探索モード) で、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。

重要な 4 つの探索モードで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。グルイーノとスカラーコークの質量が、800GeV 程度まで棄却され、暗黒物質を説明する比較的軽い超対称性粒子の可能性は無くなかった。図 3 にグルイーノとスカラーコークの質量等高線と暗黒物質で期待されている領域、及び 2010 年のデータで棄却した領域を示す。mSugra (簡単な重力超対称性モデル) の超対称性モデルはこれでかなり厳しくなった。これは、暗黒物質の直接探索を行う実験にも大きなインパクトを与えた。これから、より一般的な場合 (超対称性粒子が縮退しているケースや、スカラーコークやグルイーノだけが重くて暗黒物質候補のニュートラリノなどは比較的軽いケースに探索範囲を拡張する。また重力子の超対称性パートナー (gravitino) が暗黒物質であるモデルの研究も重要なになってきた。我々に研究により、これから数年の間に、超対称性研究は重要な結果が得られることになると思われる。

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。

一方寿命が、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を示した。図 5 に TRT 連続飛跡検出器第 3 層でのヒット数分布を示す。寿命が

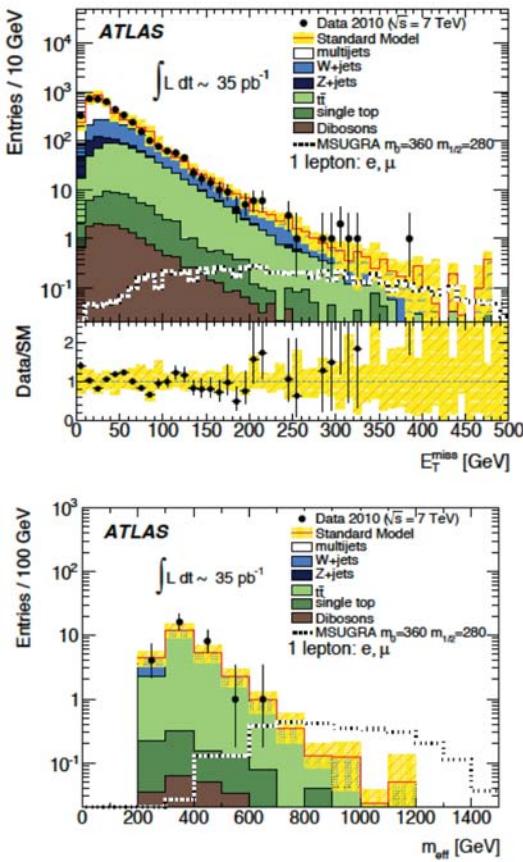


図 2.5.34: レプトンを 1 つ含む超対称性探索モードで期待される横方向消失運動量分布(上)と横方向消失運動量とジェットの横運動量のスカラー和分布(M_{eff}):共に黒点が 2010 年度実験したデータ、実線ヒストグラムがバックグラウンド(標準モデル過程)、点線が期待される信号

長い(安定な)粒子は平均 1.5 程度のヒットがあるのに対して、途中で崩壊した粒子はノイズの効果も入れて 5 以下のヒット数である。観測されたデータは、標準モデルバックグラウンドと一致しており信号領域には、事象は観測されなかった。これにより、AMSB モデルでチャージーノ 75GeV、グルイーノ 750GeV の制限が得られた。

長寿命荷電粒子の寿命が $O(1\text{m})$ 以上と長い場合は、遅い($\beta < 1$)ミューオンの様な信号がミューオン検出器で捉えることが出来る。この長寿命荷電粒子がイオン化でエネルギーを失い、カロリメーターで確率は少ないが停止する可能性がある。この過程を用いてこの寿命を測定する新しい方法を開発した。

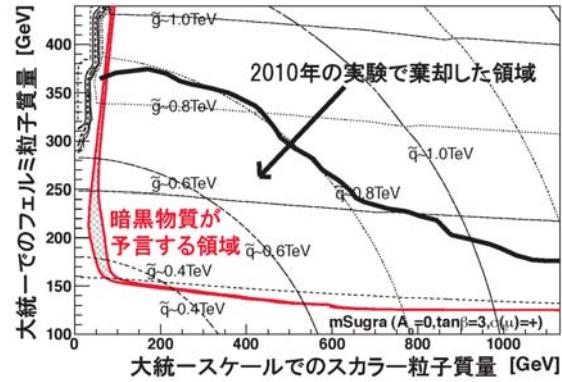


図 2.5.35: mSugra モデルで棄却された領域 縦軸/横軸は GUT でのゲージーノ/スカラー粒子質量、LHC でのグルイーノとスカラークォークの質量等高線を点線で示してある。赤バンドが暗黒物質から期待される領域・黒実線の左側が今回棄却した領域(95%CL)

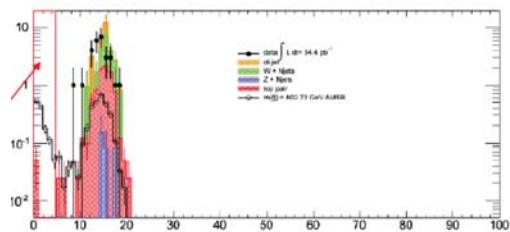


図 2.5.36: TRT 連続飛跡検出器第 3 層でのヒット数分布: 黒点が 2010 年度実験したデータ、カラーヒストグラムがバックグラウンド(標準モデル過程)、OPENHIST が期待される信号

ヒッグス粒子発見へ向けての研究

物質の質量を解明する上で鍵となるのが、ヒッグス粒子の発見であり、この粒子の研究を通して、「真空」の持つ豊かな構造が解明されると考えられている。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: $H \rightarrow \gamma\gamma, \tau\tau, W^+W^- (\rightarrow l\nu l\nu)$ の 3 つのモードが重要な発見モードである。我々のグループは、この 3 つのモードに絞って研究を行っている。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 4 に $H \rightarrow W^+W^- (\rightarrow l\nu l\nu)$ モードの探索結

果を示す。2010 年度に観測されたデータは、期待される標準理論バックグラウンドと一致しておりヒッグスからの信号は発見出来なかった。3つ全てのモードで 2010 年の実験データでは不十分であり、2011 と 12 年度の実験データで発見が可能になる。

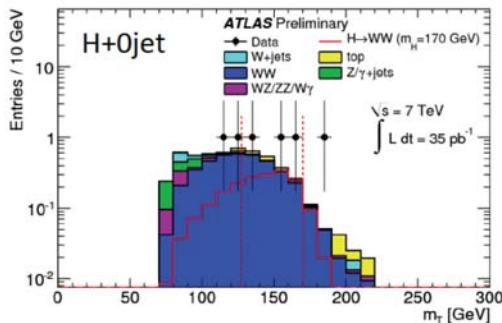


図 2.5.37: ヒッグス粒子が W^+W^- に崩壊した時の横方向質量分布)

ブラックホールやモノジェットを用いた余剰次元探索

重力が他の力に比べて 40 枠も弱いのか（階層性問題）を考える上で余剰次元は魅力あるものであり LHC での TeV の大きさにコンパクト化された余剰次元が発見される可能性が指摘された。我々は、TeV スケール余剰次元によって期待されるブラックホールが LHC で発見が可能であることを世界で初めて示した。現在、ブラックホールの 3 本の毛である「質量」「電荷」「角運動量」の再構成を行い、LHC での研究から余剰次元の形などの情報を得る理論的な研究も行っている。2010 年の実験データを用いて、ブラックホールの直接の探索を行い、余剰次元の大きさ（長さとしては小ささ）が $1.08\text{--}1.76\text{TeV}$ （余剰次元 $n=2\text{--}7$ ）である制限が得られた。これはブラックホールが出来る条件も加味したものであり初めて TeV の感度でブラックホールの存在を探ったものである。

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。天体现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 2010 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 $2\text{--}2.5\text{TeV}$ （余剰次元 $n=3\text{--}6$ ）である制限が得られた。これは既存の中でも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FRONTIER 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FRONTIER 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pin = 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。

本年度は主に、ミリ波源であるジャイロトロンからミリ波を蓄積するファブリペロー共振器まで、モードを変換しつつロス無く伝送するシステムの開発を行った。完成後は、既に開発が終了している他の装置と組み合わせることにより、世界初の Ps HFS 直接遷移測定を行った。共振器中で生成された Ps に対して 5 Hz でミリ波の照射を繰り返し、ミリ波のありなしでの Ps 崩壊シグナルを比較する事で、o-Ps から p-Ps への誘導遷移がおきている事を確認した。これは世界初の Ps HFS 直接遷移の測定であり、今後、周波数可変ジャイロトロンを開発することにより、Ps HFS のミリ波分光を目指す。

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) もズれており、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 (0.87T) を印加してゼーマン分裂した o-Ps の準位差 (3GHz) を測定する事で、間接的に Ps HFS の値を求める。そのための装置である、高精度超伝導磁石、 500W の連続 RF 印加装置、Q 値 1 万超の共鳴空洞、陽電子タグ、ガンマ線

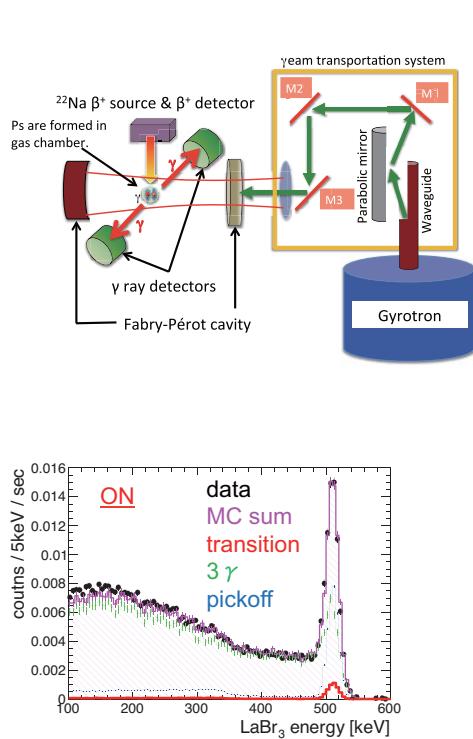


図 2.5.38: 上: 実験装置の概念図。ジャイロトロンで生成したミリ波を、モード変換しつつファブリペロー共振器へ導く。共振器中のPsにミリ波を照射して遷移をおこし、ガンマ線で遷移を確認する。下: 確認された遷移のシグナル。 $\text{o-Ps} \rightarrow \text{p-Ps}$ の遷移により、511keV のガンマ線イベントが増えた事が確認された。

検出器はすべて完成し、約 7 ヶ月間測定を行った。その結果、現在のところ途中経過ながら、統計誤差 12ppm、系統誤差 9.5ppm で過去の測定値とも理論計算値とも無矛盾な結果が得られている。今後は主にガスにシミュレーションに起因した系統誤差と物質の効果の系統誤差をつめ、さらに測定量を増やす事によって ppm の精度で HFS を検証する。

なお、実験は KEK つくばキャンパスでおこなっており、3 月 11 日の地震により測定が中断している。ただし、装置に異常がないことはすでに確認されており、電力事情の改善とともに測定を再開する予定である。

<報文>

(原著論文)

- [1] The ATLAS Collaboration, "Search for high mass dilepton resonances in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS experiment", arXiv:1103.6218

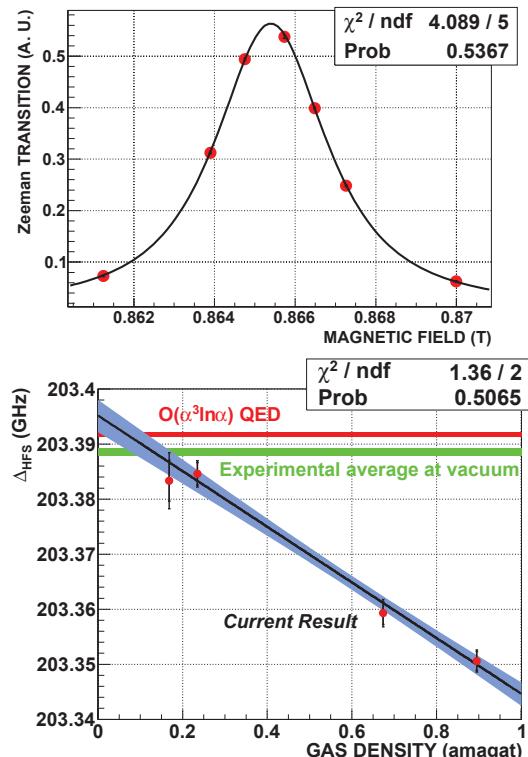


図 2.5.39: 上: 0.895amagat のイソブタンガス中のゼーマン共鳴曲線。このゼーマン共鳴値から Ps HFS を間接的に計算する。下: 各ガス圧での値を外挿して真空中での HFS を求めたプロット。現在のところ、 $203.3951 \pm 0.0024(\text{stat.}) \pm 0.0019(\text{syst.})$ GHz の結果が得られている。

- [2] The ATLAS Collaboration, "Search for an excess of events with an identical flavour lepton pair and significant missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector", arXiv:1103.6208
- [3] The ATLAS Collaboration, "Search for supersymmetric particles in events with lepton pairs and large missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions", arXiv:1103.6214
- [4] The ATLAS Collaboration, "Search for a heavy particle decaying into an electron and a muon with the ATLAS detector in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions at the LHC", arXiv:1103.5559
- [5] The ATLAS Collaboration, "Search for supersymmetry in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in final states with missing transverse momentum and b-jets", arXiv:1103.4344
- [6] The ATLAS Collaboration, "Search for New Physics in Dijet Mass and Angular Distributions in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV Measured with the

- ATLAS Detector" ,arXiv:1103.3864
- [7] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the Muon Charge Asymmetry from W Bosons Produced in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector" ,arXiv:1103.2929
- [8] The ATLAS Collaboration, "Search for Stable Hadronising Squarks and Gluinos at the ATLAS Experiment at the LHC" ,arXiv:1103.1984
- [9] The ATLAS Collaboration, "Measurements of underlying event properties using neutral and charged particles in p-p collisions at 900 GeV and 7 TeV with the ATLAS detector at the LHC" ,arXiv:1103.1816
- [10] The ATLAS Collaboration, "Search for high-mass states with lepton plus missing transverse energy using the ATLAS detector with 36 pb⁻¹ of pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV" ,arXiv:1103.1391
- [11] 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" ,arXiv:1102.5290
- [12] The ATLAS Collaboration, "Measurement of Dijet Azimuthal Decorrelations in pp Collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV" ,arXiv:1102.2696
- [13] The ATLAS Collaboration, "Search for supersymmetry using final states with one lepton, jets, and missing transverse momentum with the ATLAS detector in $\sqrt{s}=7$ TeV pp collisions" ,Phys. Rev. Lett. 106, 131802 (2011)
- [14] The ATLAS Collaboration, "Search for Massive Long-lived Highly Ionising Particles with the ATLAS Detector at the LHC" ,Phys. Lett. B698 (2011) 353-370
- [15] The ATLAS Collaboration, "Luminosity Determination in pp Collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV Using the ATLAS Detector at the LHC" ,arXiv:1101.2185
- [16] The ATLAS Collaboration, "Study of Jet Shapes in Inclusive Jet Production in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS Detector" ,Phys. Rev. D 83, 052003 (2011)
- [17] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the centrality dependence of J/Psi yields and observation of Z production in lead-lead collisions with the ATLAS detector at the LHC" ,Phys Lett. B697 (2011) 294-312
- [18] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the production cross section for W-bosons in association with jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector" ,Phys. Lett. B698 (2011) 325-345
- [19] The ATLAS Collaboration, "Charged-particle multiplicities in pp interactions measured with the ATLAS detector at the LHC" ,arXiv:1012.5104
- [20] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the inclusive isolated prompt photon cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector" ,Phys. Rev. D 83, 052005 (2011)
- [21] The ATLAS Collaboration, "Search for Diphoton Events with Large Missing Transverse Energy in 7 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector" ,Phys. Rev. Lett. 106, 121803
- [22] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the top quark-pair production cross section with ATLAS in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV" ,arXiv:1012.1792
- [23] The ATLAS Collaboration, "Measurement of underlying event characteristics using charged particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 900$ GeV and 7 TeV with the ATLAS detector" ,arXiv:1012.0791
- [24] The ATLAS Collaboration, "Studies of the performance of the ATLAS detector using cosmic-ray muons" ,EPJC 71 (2011) 1593
- [25] The ATLAS Collaboration, "Observation of a centrality-dependent dijet asymmetry in lead-lead collisions at $\sqrt{s}_{NN} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector at the LHC" ,Phys. Rev. Lett. 105, 252303
- [26] The ATLAS Collaboration, "Measurement of the $W \rightarrow l\nu$ and $Z/\gamma\gamma^* \rightarrow ll$ production cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector" ,JHEP 12 (2010) 060
- [27] The ATLAS Collaboration, "Measurement of inclusive jet and dijet cross sections in proton-proton collisions at 7 TeV centre-of-mass energy with the ATLAS detector" ,EPJC 71 (2011) 1-59
- [28] The ATLAS Collaboration, "Search for Quark Contact Interactions in Dijet Angular Distributions in 7 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector at the LHC" ,Phys. Lett. B694 (2011) 327-345
- [29] The ATLAS Collaboration, "Search for New Particles in Two-Jet Final States in 7 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector at the LHC" ,Phys. Rev. Lett. 105, 161801
- [30] The ATLAS Collaboration, "Readiness of the ATLAS tile calorimeter for LHC collisions" ,EPJC 70 (2010) 1193
- [31] The ATLAS Collaboration, "Commissioning of the ATLAS Muon Spectrometer with Cosmic Rays" ,EPJC 70 (2010) 875
- [32] The ATLAS Collaboration, "Performance of the ATLAS Detector using First Collision Data" ,JHEP 09 (2010) 056
- [33] The ATLAS Collaboration, "The ATLAS Simulation Infrastructure" ,EPJC 70 (2010) 823
- [34] The ATLAS Collaboration, "The ATLAS Inner Detector commissioning and calibration" ,EPJC 70 (2010) 787

- [35] Tomohiro Abe, Tatsuya Masubuchi, Shoji Asai, and Junichi Tanaka, "Drell-Yan Production of Z' in the Three-Site Higgsless Model at the LHC", arXiv:1103.3579
- [36] Shoji Asai, Yuya Azuma, Motoi Endo, Koichi Hamaguchi, and Sho Iwamoto, "Stau Kinks at the LHC", arXiv:1103.1881
- [37] A. Ishida, G. Akimoto, Y. Sasaki, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, M. Yoshida, K. Tanaka, and A. Yamamoto, "New method of precise measurement of positronium hyperfine splitting", arXiv:1004.5555
- [38] Y. Sasaki, A. Miyazaki, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, h. Saito, K. Tanaka, and A. Yamamoto, "Measurement of Positronium hyperfine splitting with quantum oscillation", Phys. Lett. B 697 121—126, (2011).

(会議抄録)

- [39] S. Asai, "The latest status of LHC and the EWSB physics", Int. J. Mod. Phys. A25 5196-5209 (2010).
- [40] A. Ishida, "Precise measurement of HFS of positronium using Zeeman effect", J. Phys. Conf. Ser. 225 012019 (2010).
- [41] A. Ishida, "Precise Measurement of Hyperfine Splitting of Positronium Using the Zeeman Effect", Materials Science Forum, 666 129—132, (2011).
- [42] A. Miyazaki, "New Experiment for the First Direct Measurement of Positronium Hyperfine Splitting with sub-THz Light", Materials Science Forum, 666 133—137, (2011).

(国内雑誌)

- [43] 浅井祥仁 "LHC 実験始まる", パリティー 2011 年 1 月号.
- [44] 難波俊雄、石田明、秋元銀河, "ポジトロニウム超微細構造の精密測定", 日本物理学会誌 65 810—813, (2010).
- [45] 石田明、宮崎彬, "Polish Seminar に参加して", 日本陽電子科学会会報第 2 卷第 2 号.

(学位論文)

- [46] 佐々木雄一 "ATLAS 検出器を用いた 1 lepton mode における超対称性粒子の探索", 修士論文 (2011 年 3 月)
- [47] 宮崎彬, "ポジトロニウム超微細構造の直接測定", 修士論文 (2010 年 3 月).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [48] S. Asai, "Latest Status of LHC", COSMI/CosPA 2010 September 2010.

一般講演

- [49] A. Ishida, "Precise Measurement of Positronium Hyperfine Splitting using Zeeman Effect", 39th Polish Seminar on Positron Annihilation (PSPA10), Poland, June 2010.
- [50] A. Miyazaki, "New Experiment for the First Direct Measurement of Positron Hyperfine Splitting with sub-THz Light", 39th Polish Seminar on Positron Annihilation (PSPA10), Poland, June 2010.
- [51] A. Miyazaki, "Positronium Hyperfine Splitting", International School of Subnuclear Physics 2010, Italy, August 2010.

(国内会議)

招待講演

- [52] 浅井祥仁 "LHC でのテラスル物理", 基研研究会「素粒子物理学の進展 2011」 2011 年 3 月

一般講演

- 第 47 回アイソトープ・放射線研究発表会:日本科学未来館:2010 年 7 月
- [53] 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測定".
- [54] 宮崎彬, "ポジトロニウム超微細構造の量子振動を用いた測定".
- [55] 石田明, "ポジトロニウム超微細構造の精密測定 (中間報告)".
- [56] 風間慎吾, "ポジトロニウムを用いた弱結合スカラーパーティクル X の探索".

日本物理学会秋季大会:九州工業大学:2010 年 9 月

- [57] 佐々木雄一, "ポジトロニウム超微細構造にたいするシユタルク効果の評価".
- [58] 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".
- [59] 山崎高幸, "サブテラヘルツ波を用いたポジトロニウムの超微細構造の測定 I (光学系)".
- [60] 宮崎彬, "サブテラヘルツ波を用いたポジトロニウムの超微細構造の測定 II (検出器系)".
- [61] 山村大樹, "LHC-ATLAS 検出器における光子 ID のパフォーマンスと diphoton トプロジーの研究"
- [62] 佐々木雄一, "ATLAS 検出器を用いた 1Lepton モードにおける超対称性粒子探索"
- [63] 山中隆志, "LHC-ATLAS 実験における第三世代粒子への崩壊を用いた超対称性粒子の探索"
- [64] 東裕也, "LHC-ATLAS 実験における長寿命荷電粒子の探索"
- [65] 風間慎吾, "LHC-ATLAS 実験を用いた mono-jet 事象の探索"
- [66] Khaw Kim Siang, "Search for SM Higgs decaying to two taus and NMSSM Higgs decaying to four taus with the ATLAS detector at 7 TeV Collision Energy"

- [67] 井上竜一,”LHC-ATLAS 実験を用いた MSSM $H/A \rightarrow \tau\tau$ の探索”

陽電子科学とその理工学への影響:京都大学原子炉研究所:2010 年 11 月

- [68] 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”.
- [69] 難波俊雄, “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”.
- [70] 石田明, “ポジトロニウム超微細構造の精密測定”, GCOE 「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」第 5 回 RA キャンプ, 静岡, 2011 年 2 月.
- [71] 石田明, “ポジトロニウムの超微細構造の精密測定”, 第 17 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, 2011 年 2 月.

日本物理学会:第 66 回年次大会:みなし発表

- [72] 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 I (概要と光学系)”.
- [73] 宮崎彬, “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 II (検出器系と結果)”.
- [74] 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”.
- [75] 大和田健太, “オルソポジトロニウム崩壊における gamma 線スペクトル測定”.
- [76] 後藤 嵩史,”LHC-ATLAS 実験における $WW \rightarrow lnuqq$ モードを用いたヒッグス粒子の探索”
- [77] 山中隆志,”LHC-ATLAS 実験におけるボトムクォークを含むマルチジェット事象を用いた超対称性粒子の探索”
- [78] 秋元銀河,”LHC-ATLAS 実験におけるタウ粒子への崩壊モードを用いた超対称性粒子の探索”
- [79] 片岡洋介,”LHC-ATLAS 実験におけるマルチジェット、消失横運動量を用いた超対称性粒子の探索”
- [80] 佐々木雄一,”LHC-ATLAS 実験における 1Lepton モードでの超対称性粒子探索”
- [81] 田中薫,”LHC-ATLAS 実験における dilepton モードを用いた超対称性粒子の探索”
- [82] 山口博史,”LHC-ATLAS 実験における ISR jet を用いた Universal Extra Dimension 事象の探索”
- [83] 風間慎吾,”LHC-ATLAS 実験におけるモノジェット事象の探索”

(セミナー)

- [84] A. Ishida, “Measurement of Hyperfine Splitting of Positronium (1. Indirect Measurement)”, T2K seminar, J-Parc, 2010 年 7 月.
- [85] T. Yamazaki, “Measurement of Hyperfine Splitting of Positronium (2. Direct Measurement)”, T2K seminar, J-Parc, 2010 年 7 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」、「分数量子ホール効果」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。一方、面白い物質構造から面白い物性物理を探る「物質設計」や、非平衡における新奇な物性を探ることを、もう一本の柱としている。

3.1.1 超伝導

鉄系超伝導体

2008年に発見された鉄系新超伝導体は、銅酸化物に対比される新しいカテゴリーの超伝導体であり、特に鉄という意外な元素という点が興味深い。青木のグループは、この理論の最初となるものの一つを提出して以来、さまざまな発展をさせている。最近の興味の焦点は、我々が提案した、今では $s\pm$ と呼ばれているペアリングが、どのような物質依存性をもつかである。黒木、臼井（電通大）、大成（名大）、有田（東大工）と青木は、第一原理計算からの5軌道模型を用い、フェルミ・ポケットの構造が結晶構造によって変化し、特に鉄の面から測ったニクトゲン(As, P等)の高さが複数のスピン揺らぎの競合を支配し、 $s\pm$ から、nodal s, dへのスイッ칭が起きるという現象を示した[15]。一方、永井（原研）、黒木、町田、青木は、ペアリングを決めるのに重要な不純物効果について、多軌道系超伝導体における不純物効果の一般論を議論した。[52] また、Pandey, 紺谷、平島（名大）、有田、青木は、鉄系超伝導物質においてスピン・軌道相互作用を考えると、大きなスピン・ホール効果が期待されることを指摘した。[53]

新有機超伝導体ピセン

カリウムをドープした固体ピセン $C_{22}H_{14}$ が $T_C = 7 - 20K$ において超伝導転移することが久保園（岡山大）によって発見され、初めての「芳香族超伝導体」として興味深い。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）、有田とともに、固体ピセンの電子状態を第一原理計算により初めて求めた(Fig.3.1.1)[56, 64]。固体ピセンの

伝導帯は、ピセン分子の LUMO と LUMO+1 から成る。ドープされる K のピセン層状結晶への入り方には複数の可能性が構造最適化から示唆され、ドーピングとともに分子配向が変化するだけでなく波動関数が分子から K 原子に流れ込み、フェルミ面の形状は次元性の異なる複数枚から成る。現在、この仕事を他の芳香族分子にも拡張している。

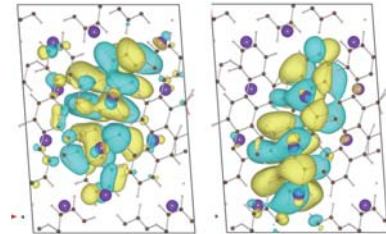


図 3.1.1: Wannier wavefunctions in the conduction band of K-doped aromatic (picene) solid.[56, 64]

銅酸化物高温超伝導体 — 再訪

このように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点で再訪するのは意義深い。銅酸化物のプロトタイプ La_2CuO_4 と同じ結晶構造をもつ $HgBa_2CuO_4$ では、フェルミ面のネスティングが悪いのに、実験的には T_C が 2 倍以上高い、という長年の謎があった。榎原、臼井、黒木（電通大）、有田と青木は、通常考えられている単一軌道模型を超える 2 軌道模型を構築することにより、Hg 系では 2 種の軌道が混じらず、この効果がフェルミ面形状効果を凌駕し、実験結果を説明するという結果を得て、Phys. Rev. Lett. に出版した。[1, 54]

一方、銅酸化物の中で最高の T_C をもつのは多層系である。西口と青木は、 T_C のピーク値をもつ 3 層系 ($HgBa_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+2}, n = 1, 2, 3$) に亘り、第一原理電子状態計算によりバンド構造を求め、多層系での高い T_C はバンド構造だけでは説明できないことを示した。[55, 63]

強相関系に対してフェルミ面形状やバンド分散を取り入れられる強力な方法として、高島（東北大理）、有田、黒木、青木は汎関数繰り込み群法に着目し、従来無視されていた自己エネルギーの松原周波数空間を取り入れ、相関関数や質量繰り込み因子を計算した[16]。

非銅酸化物における高温超伝導体設計

銅酸化物にアナロガスな高温超伝導体を銅以外で設計することは簡単ではないが、榎原、臼井、黒木、青木は、ペロブスカイト $LaAlO_3/LaNiO_3$ という超格子酸化物を考えることにより超伝導を発現させる可能性を提案した。[62]

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することを理論的に明らかにした[13]。

3.1.2 磁性

梯子光学格子上の冷却原子系の遍歴強磁性

金属強磁性（遍歴強磁性）は未だに固体物理の大きな問題である。近年、レーザー冷却されたフェルミ原子系において電子相関由来の遍歴強磁性を実現することが重要な課題となっているが、奥村（原研、現在理研）、山田、町田（原研）と青木は、two-leg ladder(Fig.3.1.2) 構造の光学格子上の冷却フェルミオン原子系で強磁性を実現することを考え、密度行列繰り込み群法を用いて、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、完全強磁性、部分偏極、非偏極が空間分離して出現することを見出した。[2]

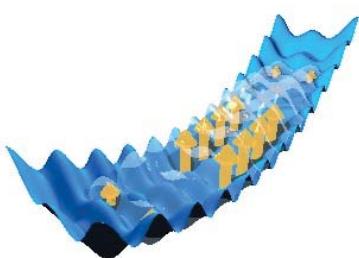


図 3.1.2: An optical ladder lattice for cold fermionic atoms.[2]

有機物における遍歴強磁性の物質設計

非磁性元素からなる物質で強磁性体が作れるかという問題はチャレンジといえる。有田、諏訪（日立基礎研）、黒木、青木は、新有機物（五員環 dimethylaminopyrrole のポリマー オリゴマー）において周期的アンダーソン模型的な磁性が発生することを予言した。[3]

3.1.3 Multiferroic 系

強磁性と強誘電性など、複数の秩序が共存する multiferroic 系に興味がもたれているが、見上、岡、青木

は、パリティーの異なる軌道から成る多軌道多体模型を考えると、uniform な強磁性と強誘電性が共存する可能性が Hund 結合により強まる相図や、multiferroic な場合の集団励起 (electromagnon) 分散を求めた。[34, 35, 57, 65] 見上はこの成果を修士論文にまとめた[71]。

3.1.4 トポロジカル系

グラフェン量子ホール効果とカイラル対称性

グラフェン（炭素原子一層の蜂の巣格子）は massless Dirac 粒子のバンド分散をもち、特異な量子ホール効果も実験的に観測され興味を集めている（昨年度ノーベル物理学賞）。グラフェン量子ホール効果は典型的なトポロジカル系であるが、特に、massless Dirac 粒子特有の $N = 0$ ランダウ準位は特異である。河原林（東邦大）、初貝（筑波大）、青木は、ripple をもつグラフェンでは、カイラル対称性[45]が保たれ、スケーリングの固定点のような異常な振る舞いが保たれることを見出した[4, 19, 60]。有川、初貝（筑波大）、青木は、グラフェン端状態のカイラル対称性の破れに対する安定性を議論した[58]。

格子模型における Dirac コーンの操作

Massless Dirac 粒子はアノマリー（コーン 1 個当たり、 e^2/h の $1/2$ 倍のホール伝導度を担う）を実現するが、通常の蜂の巣格子では、2 つのディラック・コーンが縮退して現れるために、半奇数は現れない。そこで渡辺、青木は初貝とともに、各コーンからの寄与が、 E_F の変化に対して半奇数系列であることを、Fig.3.1.3 のように 2 つのコーンの縮退が解ける格子模型を考案して、確認した。[6, 43, 44, 59] また、河原林、初貝、森本、青木は、傾いたディラック・コーン（Fig.3.1.3、或る種の有機物で実現）では通常のカイラル対称性は崩れるが、 $N = 0$ ランダウ準位の特異性は不思議にも残り、これは拡張されたカイラル対称性を新たに導入すれば説明されることを示した[5, 67]。

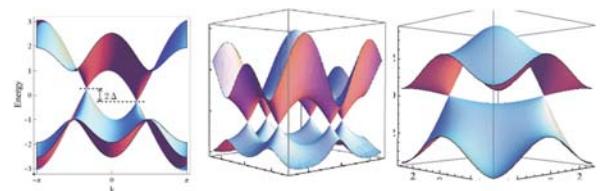


図 3.1.3: Various types of Dirac cones.

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、光学ホール伝導度 (ac Hall conductivity、関与する周波数帯は 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、光学ホール伝導度においてもホール・プラトーが意外にも robust に残り、アンダーソン局在の効果として理解されることを見出していた [20]。これは、近年の THz 分光の実験的技術の進展により、Faraday 回転角等によって測定されることが期待されたが、実際、池辺、森本、杵富、岡本、青木、島野は、量子ホール系の THz 帯における Faraday 回転角の測定を GaAs/AlGaAs を用いて行い、光学ホール伝導度のランダウ準位占有率が整数の近傍でのプラトー的構造を検出した。この結果は *Phys. Rev. Lett.* に出版された [7, 30]。

アンダーソン局在の性質はスケーリング解析をすることが必須となるが、森本、Avishai (Ben Gurion 大)、青木は、光学ホール伝導度の動的スケーリング解析を行い、動的スケーリングが成り立つことを見いたした。[8, 36, 37, 61]

グラフェンの多体状態、量子ドット

グラフェン量子ホール系で $N = 0$ Landau 準位の分裂を示唆する実験があり、多体効果の可能性に興味がもたれる。濱本、初貝（筑波大）、青木は、半分詰まった $N = 0$ Landau 準位の多体状態を厳密対角化法を用いて解析し、カイラル凝縮相やボンド秩序との関係について議論した。[66]

一方、電子を小さな領域に閉じ込める量子ドットでは様々な量子効果が発現し得るが、グラフェンにおける massless Dirac 粒子は所謂 Klein のパラドックスのために、普通の方法ではドットに閉じ込められない。Maksym, Roy (Leicester 大), Craciun, Russo (Exeter 大), 山本、樽茶（東大工）、青木は、磁場をかければこの問題を解決してドットができるることを理論的に示唆した [22]。

3.1.5 非平衡・非線形現象

強相関電子系の非線形伝導

電子間斥力によって電気伝導が凍結しているモット絶縁体に強い電場をかけた時の非線形電流は注目を集めている。絶縁破壊の threshold 的振舞いは量子トンネル効果（多体 Schwinger-Landau-Zener 機構）から説明できることが数値計算および解析的手法により明らかにされているが、非線形電流の時間発展は無限系では詳細には調べられていないかった。岡は Eckstein, Werner (ETH) とともに、非平衡動的平均場理論を強電場中のハバード・モデルに適用した。その結果、有限温度における電流には量子トンネル効果による寄与があり、これは多体 Schwinger-Landau-Zener 機構によって生成したキャリアが實際

に電流として測定されることを示している。この結果は *Phys. Rev. Lett.* に出版された [11]。

モット絶縁破壊とベー解の非エルミート拡張

厳密可解模型から、Landau-Zener 敷居電場がハバード・モデルにおいて熱力学極限で発散してしまう困難を探ることも興味深い。岡、青木は量子トンネル現象に対する Dykhne-Davis-Pechkas 理論をハバード模型に適用し、非エルミート化されたハバード模型が自然に出現することが分かり、厳密 (Bethe 仮説) 解を拡張することによって数値計算と整合する結果を得た。[9]

バイアス電圧下の超伝導転移

岡と青木は電極から印加されたバイアス電圧等によって非平衡状態にある強相関電子系の相転移現象を記述する手法として FLEX+Keldysh 法を開発し、これを電極と接合した 2 次元ハバード・モデルに適用し、d-波超伝導および反強磁性がバイアスにより制御できることを示した [10]。

強相関格子系における ac 電場による相互作用の斥力・引力転換と非平衡超伝導

フェルミオン間の相互作用を制御することは、(冷却原子系における Feshbach 共鳴を除いては) 普通は困難であるが、辻、岡、Werner、青木は、ac 電場を用いた非平衡状態では、斥力を引力にすら転換できる新奇な方法を提案した。すなわち、強い ac 外場中では、状態が Floquet 状態（光子を着た状態）になるためにバンド構造が反転し得るが、ac 外場を突然印加すると負の温度 (Fig.3.1.4) が実現し、この場合、粒子間相互作用は実効的に反転することを密度行列の議論から示唆し、斥力から引力への変化を実際に非平衡動的平均場理論により数値的に確認した。この結果は *Phys. Rev. Lett.* に出版予定である [12, 41, 42, 68]。

辻は、強い ac 外場中における Floquet 法と動的平均場 (DMFT) を組み合わせた枠組みを開発してきたが [21, 69]、以上結果も含め、博士論文にまとめた [70]。

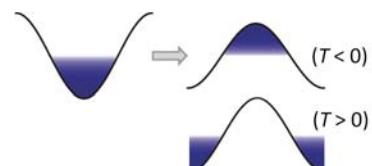


図 3.1.4: Positive and negative T situations in an inverted band in intense ac fields.[12]

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見出した[18, 26]。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、円偏光の非線形効果に伴って電子がディラック点の周回する際に獲得する非断熱ベリー位相(Aharonov-Anandan位相)によって発生するという意味で、トポロジカルな性質が非平衡で発現される。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[38]。

AdS/CFT を用いた QCD 模型における熱化現象

最近、ホログラフィック法(AdS/CFT 双対性)が注目を集めているが、これを、強相関電子系とよく似た特性を示すことが知られているQCDに適用することにより、閉じ込め・非閉じ込め相転移をまたぐダイナミッ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おいて粒子数を突然変化させた時の系の振る舞いを調べ、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。

't Hooft 法によるナノチューブのエキシトンの解析

炭素ナノチューブの光学特性を理解する上でエキシトンは重要であり、特に金属ナノチューブにおけるエキシトンは強い量子ゆらぎのために強結合効果が支配的となる。岡、青木は光円錐量子化に基づき1+1次元のQED模型のエキシトン励起を解析した[39]。その結果、第一バンド間遷移に対応するエキシトン励起が金属ナノチューブにおいては正の束縛エネルギーを持ち、波動関数は対称性の自発的破れに伴う特徴を示すことがわかった。

3.1.6 フォトニック平坦バンドの設計

フォトニック・バンドを実現する方法には様々あるが、遠藤、岡、青木は、金属導波管のnetworkが、“tight-binding photonic band”を系統的に実現する新しい方法であることを理論的に提案した[14, 26]。これにより、photonic bandを設計することができ、最近興味がもたれている、「重い光子」(光速ゼロの光)が、カゴメ格子のような平坦バンド格子で実現されることを予言した。

3.1.7 その他

青木と大栗(Caltech/IPMU)は、物性物理と素粒子物理の交流から新しい学際的な世界が拓けるという観点から、*Condensed Matter Physics Meets High Energy Physics*を、IPMU Focus Weekとして開催

し、その報告を行った[24]。総合報告として、青木は、物性物理と場の理論[47]、南部理論と超伝導[25]、超伝導体における集団励起[31]、多バンド超伝導[46]、鉄系超伝導[48]、強相関系の物理と光格子[49]、強磁場[50]、量子ホール効果[23]、グラフェン・ディラック電子[27, 28, 29, 32]等のテーマで、また岡は強い場の元での非平衡凝縮系物理[33, 40, 51]のテーマで講演、解説、執筆を行った。

<報文>

(原著論文)

- [1] Hirofumi Sakakibara, Hidetomo Usui, Kazuhiko Kuroki, Ryotaro Arita and Hideo Aoki: Two orbital model explains why the single-layer Hg cuprate have higher superconducting transition temperature than the La cuprate, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 057003 (2010).
- [2] 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).
- [3] Yuji Suwa, Ryotaro Arita, Kazuhiko Kuroki and Hideo Aoki: First-principles study of ferromagnetism for an organic polymer dimethylaminopyrrole—a realization of organic periodic Anderson model, *Phys. Rev. B* **82**, 235127 (2010).
- [4] Tohru Kawarabayashi, Takahiro Morimoto, Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Anomalous criticality in the quantum Hall transition at $n = 0$ Landau level of graphene with chiral-symmetric disorders, *Phys. Rev. B* **82**, 195426 (2010).
- [5] 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).
- [6] Haruki Watanabe, Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Half-integer contributions to the quantum Hall conductivity from single Dirac cones, *Phys. Rev. B* **82**, 241403(R) (2010).
- [7] Y. Ikebe, T. Morimoto, R. Masutomi, T. Okamoto, H. Aoki and R. Shimano: Optical Hall effect in the integer quantum Hall regime, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 256802 (2010).
- [8] Takahiro Morimoto, Yshai Avishai and Hideo Aoki: Dynamical scaling analysis of the optical Hall conductivity in the quantum Hall regime, *Phys. Rev. B* **82**, 081404(R) (2010).
- [9] T. Oka and H. Aoki: Dielectric breakdown in a Mott Insulator: many-body Schwinger-Landau-Zener mechanism studied with a generalized Bethe ansatz, *Phys. Rev. B* **81**, 033103 (2010).
- [10] T. Oka, H. Aoki: Nonequilibrium magnetic and superconducting phases in the two-dimensional Hubbard model coupled to electrodes, *Phys. Rev. B* **82**, 0645160 (2010).

- [11] M. Eckstein, T. Oka and P. Werner: Dielectric breakdown of Mott insulators in dynamical mean-field theory *Phys. Rev. Lett.* **105**, 146404 (2010).
 - [12] 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.*, to be published.
 - [13] Yukihiko 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).
 - [14] Shimpei Endo, Takashi Oka and Hideo Aoki: Realization of tight-binding photonic bands in metallocphotonic waveguide networks with application to a flat band in kagome lattice, *Phys. Rev. B* **81**, 113104 (2010).
- (国際会議録 (一般発表))
- [15] Kazuhiko Kuroki, Hidetomo Usui, Seiichiro Onari, Ryotaro Arita and Hideo Aoki: Pnictogen height as a switch between high T_c nodeless and low T_c nodal pairings in the iron based superconductors, *Physica C* **207**, S416 (2010).
 - [16] Hirokazu Takashima, Ryotaro Arita, Kazuhiko Kuroki and Hideo Aoki: Functional renormalization group beyond the static approximation and its application to the two-dimensional Hubbard model, *Physica C* **207**, S35 (2010).
 - [17] Takashi Oka and Hideo Aoki: Non-equilibrium superconductivity in a correlated electron system studied with the Keldysh+FLEX approach, *Physica C* **207**, S928 (2010).
 - [18] Takashi Oka, and Hideo Aoki: Photovoltaic Berry curvature in the honeycomb lattice, *J. Phys. Conf. Ser.* **200**, 062017 (2010).
 - [19] Tohru Kawarabayashi, Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Landau level broadening in graphene with long-range disorder — Robustness of the $n = 0$ level, *Physica E* **42**, 759 (2010).
 - [20] Takahiro Morimoto, Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Optical Hall conductivity in 2DEG and graphene QHE systems, *Physica E* **42**, 751 (2010).
 - [21] Naoto Tsuji, Takashi Oka, and Hideo Aoki: Nonequilibrium steady states in correlated electron systems — Photoinduced insulator-metal transition and optical response, *J. Phys.: Conf. Ser.* **200**, 012212 (2010).
 - [22] P. A. Maksym, M. Roy, M. F. Craciun, S. Russo, M. Yamamoto, S. Tarucha and H. Aoki: Proposal for a magnetic field induced graphene dot, *J. Phys.: Conf. Ser.* **245**, 012030 (2010).
- (著書)

- [23] Hideo Aoki: Integer quantum Hall effect (a chapter in *Comprehensive Semiconductor Science & Technology* ed by P. Bhattacharya, R. Fornari and H. Kamimura, Elsevier, 2011).

(国内雑誌)

- [24] 青木秀夫、大栗博司：物性物理学と素粒子物理学の対話 — ITPU フォーカス・ウィークの報告、日本物理学会誌 **65**, 638 (2010)。
- [25] 青木秀夫、初田哲男：超伝導への傾注 — 物性物理とハドロン物理から、数理科学 2010 年 9 月「南部陽一郎」特集号、p.14。
- [26] 岡 隆史、青木秀夫：グラフェンにおける光誘起ホール効果とカゴメ・フォトニック結晶における光の局在、光学 **39**, 445 (2010)。
- [27] 初貝安弘、青木秀夫：グラフェンの物理、固体物理 **45**, 457 (2010)。
- [28] 青木秀夫：ディラック電子、固体物理 **45**, 753 (2010)。
- [29] 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)。
- [30] 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)。

<学術発表>

(国際会議)

招待講演・総合報告

- [31] Hideo Aoki: Collective modes in multi-band superfluids and superconductors (*PLASMA2010*, Hirosaki, May 2010).
 - [32] Hideo Aoki: How can we manipulate graphene physics — chiral symmetry, topology and optics (*UK-Japan Graphene Workshop*, Lancaster, Feb. 2011).
 - [33] Takashi Oka: Strong field physics in condensed matter (*PIF2010*, arXiv:1102.2482).
- 一般発表 (会議録掲載以外)
- [34] Takahiro Mikami, Takashi Oka and Hideo Aoki: Hund's-coupling-induced multiferroicity in multi-band insulators (*SPQS2010*, Tokyo, Aug. 2010).
 - [35] Takahiro Mikami, Takashi Oka and Hideo Aoki: Ferroelectricity-ferromagnetism coexistence and electromagnons in multi-band electron systems (*APS March Meeting*, Dallas, Mar. 2010).
 - [36] Takahiro Morimoto, Y. Avishai, Hideo Aoki: Dynamical scaling analysis of the optical Hall conductivity in the graphene quantum Hall system with various types of disorder (*HMF19*, Fukuoka, Aug. 2010).
 - [37] Takahiro Morimoto, Yasuhiro Hatsugai, Hideo Aoki: Dynamical scaling analysis of the optical Hall conductivity in the quantum Hall regime (*APS March Meeting*, Dallas, Mar. 2011).

- [38] Takashi Oka, and Hideo Aoki: All optical measurement proposed for the photovoltaic Hall effect (*HMF19*, Fukuoka, Aug. 2010; arXiv:1007.5399).
- [39] Takashi Oka and Hideo Aoki: Possible confinement phase in carbon-nanotubes and the extended massive Schwinger model (*APS March Meeting*, Dallas, Mar. 2011).
- [40] Takashi Oka: Strong field physics in a strongly correlated system (*DMQS2011*, Tokyo, Feb. 2011).
- [41] Naoto Tsuji, Takashi Oka, Philipp Werner and Hideo Aoki: Ac-induced many-body interaction and superconductivity in correlated fermion systems (*SPQS 2010*, Tokyo, Aug. 2010).
- [42] Naoto Tsuji, Takashi Oka, Philipp Werner and Hideo Aoki: Correlated fermions driven by ac fields: transition from repulsive to attractive interaction (*Boulder School for Condensed Matter and Materials Physics*, Boulder, July 2010).
- [43] H. Watanabe, Y. Hatsugai and H. Aoki: Manipulation of the Dirac cones and the anomaly in the graphene related quantum Hall effect (*HMF19*, Fukuoka, Aug. 2010; arXiv:1009.1959).
- [44] Haruki Watanabe, Yasuhiro Hatsugai, and Hideo Aoki: Decomposition into half-integer quantum Hall numbers from Dirac cones in a graphene-related lattice model (*APS March Meeting*, Dallas, Mar. 2010).
- [45] Y. Hatsugai, T. Kawarabayashi, T. Morimoto and H. Aoki: Chiral symmetry in graphene (*Graphene Week*, Maryland, Apr. 2010).
- (Colloquia)
- [46] Hideo Aoki: How can we manipulate multiband superconductors — iron-based and aromatic compounds (ETH Zürich, July 2010).
- (国内会議)
- 招待講演
- [47] 青木秀夫: 物性物理と場の理論 (基研研究会「場の理論と超弦理論の最前線」、July 2010).
- [48] 青木秀夫: 鉄系超伝導 (基研研究会「熱場の量子論」、Aug. 2010).
- [49] 青木秀夫: 強相関系の物理と光格子 (量子情報処理プロジェクト夏期研修会、沖縄、Aug. 2010).
- [50] 青木秀夫: 量子ホール効果、超伝導 — 理論から見た強磁場 (「強磁場コラボラトリーアイデア」シンポジウム、東大、Nov. 2010).
- 一般発表
- [51] 岡 隆史: 電子系における非平衡現象 — 多体 Schwinger-Landau-Zener 機構・光誘起ホール効果 (基研研究会「非平衡系の物理 - 非平衡ゆらぎと集団挙動」、京都、Nov. 2010).
- [52] 永井佑紀、黒木和彦、町田昌彦、青木秀夫: 多軌道系超伝導体における不純物効果 (日本物理学会、大阪、Sept 2010)。
- [53] S. Pandey, H. Kontani, D. S. Hirashima, R. Arita and H. Aoki: Investigation of the role of spin-orbit coupling on the transport properties of iron pnictide materials (日本物理学会、大阪、Sept 2010)。
- [54] 楠原寛史、臼井秀知、黒木和彦、有田亮太郎、青木秀夫: 銅酸化物超伝導におけるフェルミ面への d_{z^2} 軌道混成の効果と結晶構造の関係 (日本物理学会、大阪、Sept 2010)。
- [55] 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 $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2+2n+\delta}$ の電子構造の研究 (日本物理学会、大阪、Sept 2010)。
- [56] 小杉太一、三宅 隆、石橋章司、有田亮太郎、青木秀夫: K ドープ・ピセン結晶の電子状態の第一原理計算 (日本物理学会、大阪、Sept 2010)。
- [57] 見上敬洋、岡 隆史、青木秀夫: 多軌道多体模型での磁性・強誘電性共存とその相図 (日本物理学会、大阪、Sept 2010)。
- [58] 有川晃弘、青木秀夫、初貝安弘: グラフェン端状態のカイラル対称性の破れに対する安定性 (日本物理学会、大阪、Sept 2010)。
- [59] 渡辺悠樹、初貝安弘、青木秀夫: グラフェン関連模型における半整数量子ホール効果への分解 (日本物理学会、大阪、Sept 2010)。
- [60] 河原林透、初貝安弘、青木秀夫: 不規則 2 層グラフェンのランダウ準位におけるカイラル対称性の効果 (日本物理学会、大阪、Sept 2010)。
- [61] 森本高裕、Y. Avishai、青木秀夫: 量子ホール系における光学ホール伝導度の動的スケーリング (日本物理学会、大阪、Sept 2010)。
- [62] 楠原寛史、臼井秀知、黒木和彦、青木秀夫: ペロブスカイト超格子酸化物 $\text{LaAlO}_3/\text{LaNiO}_3$ における結晶場チューニングによる超伝導発現の可能性 (日本物理学会、Mar 2011)。
- [63] 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電子構造と超伝導 (日本物理学会、Mar 2011)。
- [64] 小杉太一、三宅 隆、石橋章司、有田亮太郎、青木秀夫: 様々な濃度の K ドープピセンの第一原理的電子状態と構造最適化 (日本物理学会、Mar 2011)。
- [65] 見上敬洋、岡 隆史、青木秀夫: 多軌道模型における強誘電・強磁性共存とエレクトロマグノン励起の理論 (日本物理学会、Mar 2011)。
- [66] 濱本雄治、初貝安弘、青木秀夫: 磁場中グラフェンにおける多体問題の厳密対角化 (日本物理学会、Mar 2011)。
- [67] 河原林透、初貝安弘、森本高裕、青木秀夫: 傾いたディラックコーンの $n = 0$ ランダウ準位における異常性とカイラル対称 (日本物理学会、Mar 2011)。
- [68] 辻 直人、岡 隆史、Philipp Werner、青木秀夫: Ac 外場中でのフェルミ粒子系の時間発展と多体相互作用の制御 (物性研短期研究会「外部場の時間操作と実時間物理現象」、東京、June 2010)。

[69] 辻 直人、岡 隆史、青木秀夫: 電子系の非平衡定常状態における非平衡関係式 (日本物理学会、Mar 2011)。

(学位論文)

[70] Naoto Tsuji: Theoretical study of nonequilibrium correlated fermions driven by ac fields (博士論文, 2010 年 12 月)。

[71] Takahiro Mikami: Theoretical study of multiferroicity in multi-band electron systems (修士論文, 2011 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・臨界現象や、秩序形成に伴う非平衡現象 [1]、(2) 強く相互作用している量子系の秩序形態の特徴や時間的に変動する外場のもとでの量子ダイナミクス [2]、などについて研究を進めている。

平成22年度は、協力現象の統計力学に関しては、これまで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のもとでの新しいタイプの相転移・臨界現象に関して、動的臨界現象における特異性、長距離相互作用を持つ系での秩序形成のダイナミクス、短距離相互作用が共存する場合のクラスター構造さらに、電荷移動によってスピニの大きさが揺らぐ場合の磁気的相關の機構などについて研究を進めた。また、長距離相互作用系での秩序形態、秩序形成においてエントロピー効果のため複数個の秩序状態が混合して存在する混合相の機構、一次相転移の分類などについても研究を進めた。

量子統計力学に関しては、新奇量子協力現象の開拓、実時間量子ダイナミクスの機構解明・制御、散逸効果のもとでの応答関数の定式化や、熱伝導、輸送現象に関する一般理論構築、などに関して研究を進めた。また、 $S = 1$ のスピニ系での可解模型での境界条件に関する研究を進めた。

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 [1]。

長距離相互作用のもとでの協力現象の研究

電子的な相安定性をもつ系では、磁場や光、圧力、温度などのパラメーターによって複合的に系の状態を制御できるため機能材料と呼ばれ、注目されている。これらの系はこれまで双安定性を表すイジングモデルを用いたモデル化がなされてきたが、スピニクロスオーバー物質、あるいは電荷移動物質などそれぞれの双安定状態で格子構造が変化する物質では、格子点上での自由度間の相互作用が、格子自身の変形によって実効的な長距離力となる。これまでの相転移の研究は、主に固定した格子点上での自由度間の相互作用によるものが研究されてきたが、これらの系では実効的な長距離力による新奇な特徴が現れる [3, 4]。

本年度は、自由境界を持つ系での双安定状態間のスイッチの際に、どのような空間的配位を通して状態が変化するかについて調べ、短距離相互作用系でのミクロなスピノーダル現象との違いを明らかにした。また、平衡状態において長距離相互作用ではたとえ臨界点直上でも空間的な秩序クラスターが現れないが、通常の相關長が臨界点で発散する短距離相互作用が共存する場合、秩序の空間的相關長が臨界点でどのような振る舞いをするかについて詳しく調べた。図 3.2.5 に、それぞれの双安定状態での分子

の半径が 1 : 1.1 の場合の臨界点直上の配位の例を示す。[41, 45]。また、長距離相互作用でのドメイン壁の構造やその伝搬に関する研究も行った。

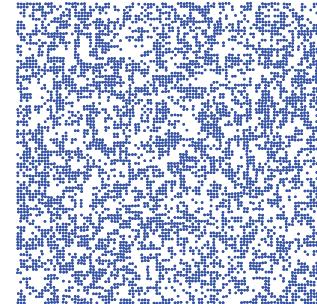


図 3.2.5: 長距離相互作用と短距離相互作用が共存する場合の、臨界温度でのスピニ構造（有限の相關長を持つ。）

長距離相互作用のもとでの相転移についても新しい特徴を明らかにした。特に、無限レンジモデルでは厳密に平均場近似が成り立ち、また単位スピニあたりの相互作用の強さが発散している系では平衡状態に関しては平均場近似が成り立つことはよく知られている。この性質に関し、秩序変数が保存しない系の場合には、長距離相互作用が働く系の自由エネルギーは平均場理論の自由エネルギーと厳密に一致することを見出した。これは、長距離相互作用系のマクロな性質を理解するためにまずは簡単な平均場模型を考えようという考えに沿った近年の多くの研究結果が、実際に広いクラスの長距離相互作用系で正当化されることを示すものである。それに対し、秩序変数（磁化）を固定した空間での熱力学性質は必ずしも平均場近似で扱えないことを明らかにし、その条件に関する厳密な性質を明らかにした。特に、この場合、自由エネルギーが実際に平均場理論からずれるパラメータ領域があることを明らかにし、長距離相互作用系にはそれ特有の非自明なゆらぎがあることを示した。このことは長距離相互作用する格子ガス模型で、一様な配位が不安定化することを示しており（図 3.2.6(a),(b)）、その物性について研究を進めている。[5, 31, 39]。

また、中空の球殻を成すコバルトの磁性を調べるために、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ニ秩序構造の解析も進めている [43]。

分子磁性体におけるの協力現象の研究

電荷移動相転移とよばれる、電子の移動に伴い各サイトのスピニの値が変わるある種の鉄混合原子価錯体について、スピニの値が電子状態に応じて変化する状況を想定した量子モデルを考案し、そこで現れる非単調なスピニ相関など新奇な特徴を明らかにした。また、このようなスピニの値が変わる系での量子モンテカルロ法を開発した。[21, 25, 33]

分子磁性に関するテーマの実験面の研究は、所が大越研との共同研究を行い密接な連携のもとで研究が進んでいる。所はブルシアンブルー類似体を用いて、磁気機能性：「光磁性」「強誘電強磁性」「磁場誘

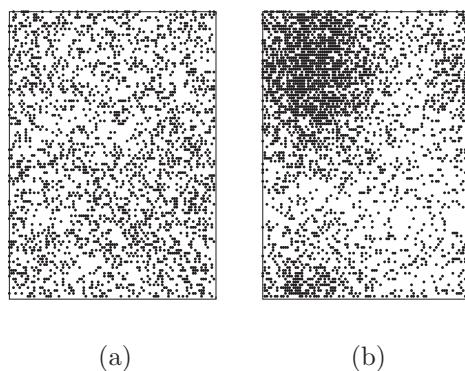


図 3.2.6: 長距離相互系で平均場近似の記述が成り立つ場合の均一な空間配位 (a) と、成り立たない場合に現れる不均一な空間配位 (b): 文献 [5] より

起第二高調波発生」「スピニオニクス（イオン伝導と強磁性の共存）」「湿度応答型磁性体」などについて研究を進めてきている。特に、本年度は、RbMnFe プリシアンブルー類似体における分光エリプソメトリーの結果から、温度誘起の相転移挙動、これまでに報告されていない新奇な酸化チタン（ラムダ型五酸化三チタン）を新しく合成し、その物質が、室温で可逆的に光誘起相転移（金属－半導体転移）を発見した。また、室温で強磁性を示す分子磁性体 VCr プリシアンブルー類似体において、イオン伝導と強磁性の共存を初めて観測、オクタシアノ CoNb 金属錯体において、湿度を変化させることにより、強磁性 \leftrightarrow 反強磁性の変化の観測した。さらに、CsMnFe プリシアンブルー類似体を放射光（x 線吸収）で測定し、温度誘起相転移においてクラスター的に転移が起こっていることなどを明らかにした。[6, 58, 59]

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ている。これまで、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を 6 状態クロックモデルで明らかにしているが、今年度は Zn 対称性とスピニ変数間の相互作用のエネルギー構造の観点を一般的に考察し、混合状態が独立した熱力学的な相として現れる際の一般的な機構を調べ、より多くの状態の混合相や、混合相間の逐次相転移を発見など、ある程度の範囲で混合相と相図をその相図を制御できることを明らかにした。[37, 43] また、透明状態をもつ Potts モデルなどの系では縮退度に応じて、一次相転移の性質に定性的な違いがある場合を考えられその性質を調べている。これらの系で、核生成、非平衡緩和過程などを調べることで一相転移に関してもユニークな形で分類することが出来ないか考えている。

3.2.2 量子統計力学の研究

量子系では、不確定性関係から古典系では見られない新奇な現象が見られる。また、その動的現象に

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いる。量子力学のコヒーレントな運動は、古典的で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 [2]。量子ダイナミックスの機構、制御に関する統一的な理論的基礎付けを進めるため、JST のクリエイティブプロジェクトとして「量子多体協力現象の解明と制御」を進めた [47]。

量子応答

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、非平衡系での定式化などを行ってきた [48, 49]。今年度は、電子スピン共鳴への相互作用効果の典型的な例として、交替的 Dzyaloshinsky-Moriya 相互作用を持つスピン鎖の高温の極限での吸収線形を調べた。また、スピントルクがいわゆるガウス的な緩和から長時間でどのようにずれているかなどを調べ、応答と緩和の関係を詳しく議論した [7]。また、最近、光と物質の相互作用という観点から興味が持たれている物質のエネルギー準位と共振器 (cavity) のモード結合に関する研究を進め、関連する実験結果と併せて発表した [8]。この成果は、他の関連するいくつかの実験結果とともに Quantum RAM につながる成果としてレビューされた。さらに、直接的な相互作用のないスピン、あるいは原子、の間に共振器を通した実効的相互作用が生じる現象での共鳴のあり方に関する研究を行い、吸収線形に関する研究を進めている（図 3.2.7）。

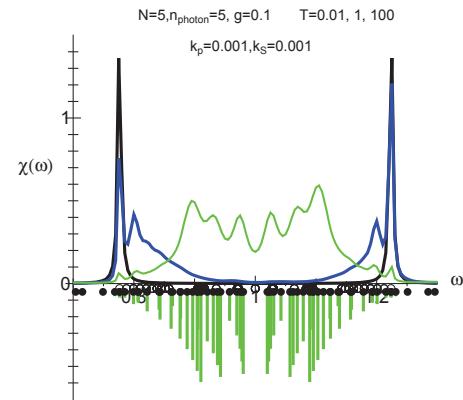


図 3.2.7: 共振器内の原子（スピン）系と共振器内の光子の結合による共鳴スペクトル。

量子系における散逸、緩和現象、操作

また、いわゆる量子コヒーレンスの証として注目される量子準位間のラビ振動の緩和機構に関する直接計算法による研究をすすめ、各原子が置かれた環境（磁場分布、磁気異方性）の効果によるデコヒーレンスと、磁気原子間の双極子相互作用によるデコ

ヒーレンスの特徴付けなどを明らかにし、対応する実験の解析を進めている[51]。

また、孤立した量子系において部分系がカノニカル分布に従う機構はこれまで多くの議論があるが、この問題に関しても大きな系の直接数値シミュレーションによって部分系のダイナミクスを調べ、相互作用の強さや全系のエネルギーなどへの依存性を明らかにした[9]。

遍歴電子系での磁性・非磁性相転移、量子相転移

格子上の遍歴電子系における磁性に関して、格子数と電子数の関係でいわゆるモット絶縁体状態・長岡強磁性の転移が知られている。この機構に関連した格子自由度による磁気的性質の制御法を考案し、それを実現するモデルを提案した。対角化の方法により、そのモデルでは電子の化学ポテンシャルを変化させることで系の全スピンが複雑な変化を示すことが明らかになり、さらに密度行列繰り込み群の方法でその量子相転移の様子を調べようとしている[50]。

また、单一イオン異方性を持つ一次元 $S=1$ bilinear-biquadratic modelにおいて、この模型があるパラメータ領域において非自明な対称性を持つことをを見出した。また、その対称性をもとにした議論によって、過去の数値計算の結果を解析的に説明した[57]。

量子粒子移送

量子粒子をポテンシャルの操作によって移送する際に現れる量子効果についても調べた。操作における擾乱（非断熱遷移）として、操作中の加速度運動によるもの以外に操作の開始時、終了時に発生する擾乱に関して動座標系での共鳴状態による理論的定式化について研究を進め、そのための計算手法等も明らかにした[56]。

また、量子操作における断熱遷移を利用した量子アニーリングに関して、横磁場イジングモデルにおいて横磁場の操作のもとでの秩序形態の動的性質に関する研究も進めた[10, 11]。

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。代数的ベーテ仮設法を用い、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、有効場理論を用いて得られる結果との整合性が確認できた。[22, 23, 26, 27, 28, 29]

量子系における個別イベント

量子力学における波動性と粒子性の二重性に関して、粒子描像でどのような条件があればいわゆる量子相間が実現できるかについて機構に関して研究を進めた[12, 13]。

輸送現象

輸送現象における最近の最も重要な問題は、カレントの揺らぎにおける普遍的な特徴を探ることである。我々は、実験的および理論的にカレントゆらぎの特徴を調べた。カレント分布のすべての情報を引き出すためのキュムラント生成関数の一般式を導出し、Derrida らが提唱する相加性原理が成立するか否かを研究した。また、来たるべき実験を見越して、熱伝導現象における AC コンダクタンスの理論も構築した。[14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 52, 53, 54, 55]。

<報文>

(原著論文)

- [1] S. Miyashita, Phase transition in spin systems with various types of fluctuations, Proceedings of the Japan Academy, Series B **86**, 643-666 (2010).
- [2] S. Miyashita, Quantum Dynamics under time-dependent external field, J. Compt. Theor. Nanosci. in press.
- [3] M. Nishino, C. Enachescu, S. Miyashita, K. Boukreddaden and F. Varret, Intrinsic effects of the boundary condition on switching processes in effective long-range interactions originating from local structural change, Phys. Rev.B **82**, 020409 (1-4) (2010).
- [4] C. Enachescu, M. Nishino, S. Miyashita, A. Hauser, A. Stancu and L. Stoleriu, Cluster evolution in spin crossover systems observed in the frame of a mechano-elastic model, Europhys. Lett. **91**, 27003 (1-6) (2010).
- [5] T. Mori, Analysis of the exactness of mean-field theory in long-range interacting systems, Phys. Rev. E **82**, 060103(1-4) (2010).
- [6] H. Tokyo: experimental works:
“Novel magnetic functionalities of Prussian blue analogs” H. Tokoro, and S. Ohkoshi Dalton Transactions, in press (2011). “Experimental access to elastic and thermodynamic properties of RbMnFe(CN)₆” K. Boukreddaden, E. D. Loutete-Dangui, E. Codjovi, M. Castro, J. A. Rodriguez-Velamazan, S. Ohkoshi, H. Tokoro, M. Koubaa, Y. Abid, F. Varret J. Appl. Phys., 109, 013520/1 (2011). “Synthesis of a metal oxide with a room temperature photo-reversible phase transition” S. Ohkoshi, Y. Tsunobuchi, T. Matsuda, K. Hashimoto, A. Namai, F. Hakoe, H. Tokoro Nature Chemistry, 2, 539 (2010). “High proton conductivity in Prussian blue analogs and the interference effect by magnetic ordering” S. Ohkoshi, K. Nakagawa, K. Tomono, K. Imoto, Y. Tsunobuchi, H. Tokoro J. Am. Chem. Soc., 132, 6620 (2010). “Humidity sensitive magnet composed of cyano-bridged Co-Nb bimetallic assembly” K. Imoto, D. Takahashi, Y. Tsunobuchi, M. Arai, W. Kosaka, H. Tokoro, S. Ohkoshi Eur. J. Inorg. Chem., 4079 (2010). “Observation of the fixed Fe-CN-Mn cluster in cesium manganese hexacyanoferrate” K. Ishiji, T. Matsuda, H. Tokoro, S. Ohkoshi, T. Iwazumi J. Phys. Soc. Jpn., 79, 074801 (2010). “Photo-induced phase switching dynamics in RbMn[Fe(CN)₆] probed by accumulation free mid-infrared spectroscopy” A. Asahara, M. Nakajima, R. Fukaya, H. Tokoro, S. Ohkoshi, T. Suemoto Phys. Status Solidi B, 248, 491-494 (2011). “Effect of lattice deformation on photoinduced phase transition process in RbMn[Fe(CN)₆]” R. Fukaya, M. Nakajima, H. Tokoro, S. Ohkoshi, T. Suemoto Phys. Status Solidi B, 248, 482-485 (2011). “Dynamics of photoinduced phase transitions in hexacyanoferrate studied by infrared and Raman spectroscopy” T. Suemoto, R. Fukaya, A. Asahara, M. Nakajima, H. Tokoro, S. Ohkoshi Phys. Status Solidi B, 248, 477-481 (2011).

- [7] S. El Shawish, O. Cepas and S. Miyashita, Electron spin resonance in $S=1/2$ antiferromagnets at high temperature, Phys. Rev. B **81**, 224421 (1-9) (2010).
- [8] I. Chiorescu, N. Groll, S. Bertaina, T. Mori and S. Miyashita, Magnetic strong coupling in a spin-photon system and transition to classical regime, Phys. Rev. B **82**, 024413 (1-7) (2010).
- [9] F. Jin, H. De Raedt, S. Yuan, M. I. Katsnelson, S. Miyashita and K. Michielsen, Approach to Equilibrium in Nano-scale Systems at Finite Temperature J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 124005(1-10) (2010).
- [10] S. Tanaka and S. Miyashita, Nonmonotonic dynamics in a frustrated Ising model with time-dependent transverse field, Phys. Rev. E **81**, 051138 (1-8) (2010).
- [11] S. Tanaka, M. Hirano and S. Miyashita, Quantum field induced orderings in fully frustrated Ising spin systems, Physica E **43**, 766 (2011).
- [12] H. Deradt, S. Zhao, S. Yuan, F. Jin, K. Michielsen and S. Miyashita, Event-by-event simulation of quantum phenomena, Physica E **42**, 298-302 (2010).
- [13] F. Jin, S. Yuan, H. De Raedt, K. Michielsen and S. Miyashita, Corpuscular Model of Two-Beam Interference and Double-Slit Experiments with Single Photons, J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 074401 (1-14) (2010).
- [14] Fluctuation Theorem and Microreversibility in a Quantum Coherent Conductor S. Nakamura, Y. Yamauchi, M. Hashisaka, K. Chida, K. Kobayashi, T. Ono, R. Leturcq, K. Ensslin, Keiji Saito, Y. Utsumi, A.C. Gossard, Phys. Rev. B, in press
- [15] Generating Function Formula of Heat Transfer in Harmonic Networks Keiji Saito and Abhishek Dhar Phys. Rev. E, in press
- [16] Linear response formula for finite frequency thermal conductance of open systems Abhishek Dhar, Onuttom Narayan, Anupam Kundu, and Keiji Saito Phys. Rev. E vol. 83 011101/1-4 (2011).
- [17] K. Saito and T. Nagao, Chaotic Transport in the Symmetry Crossover Regime with a Spin-Orbit Interaction, Phys. Rev. B **82**, 125322 (1-12) (2010).
- [18] A. Dhar, O. Narayan, A. Kundu, and K. Saito, Green-Kubo formula for finite frequency thermal conductance of open systems, preprint
- [19] K. Saito, G. Benenti and G. Casati, A microscopic mechanism for increasing thermoelectric efficiency Chemical Physics (2010), in press.
- [20] S. Nakamura, Y. Yamauchi, M. Hashisaka, K. Chida, K. Kobayashi, T. Ono, R. Leturcq, K. Ensslin, K. Saito, Y. Utsumi and A. C. Gossard, Nonequilibrium Fluctuation Relations in a Quantum Electrical Conductor Phys. Rev. Lett. **104**, 080602 (2010).
- (学位論文(修士))
- [21] T. Fujiwara, Ordering process in a quantum spin-system with electron transfer, (2011) Master thesis, The University of Tokyo.
- (会議抄録)
- [22] T. Deguchi, C. Matsui, Algebraic aspects of the correlation functions of the integrable higher-spin XXZ spin chains with arbitrary entries, the proceedings of Infinite Analysis 09 - New Trends in Quantum Integrable System.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [23] C. Matsui, Central charge of integrable alternating spin chains, CREST 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, Tokyo, 2010/04/06-09.
- [24] K. Hijii, Nonadiabatic transition under an asymmetrically periodic field, CREST 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, Tokyo, 2010/04/06-09.
- [25] T. Fujiwara, Growth of spin correlation owing to quantum charge fluctuation, CREST 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, Tokyo, 2010/04/06-09.
- [26] C. Matsui, Correlation functions of integrable spin chains with boundaries, Days on Diffraction, St. Petersburg, Russia, 2010/05/30 - 06/03.
- [27] C. Matsui, Correlation functions of integrable spin chains with boundaries, RAQIS10, Annecy, France, 2010/06/15 - 18.
- [28] C. Matsui, Correlation functions of integrable spin chains with boundaries, Finite-Size Technology in Low-Dimensional Quantum Systems (V), Benasque, Spain, 2010/06/27 - 07/17.
- [29] C. Matsui, Correlation functions of integrable higher spin chains with boundaries, 24th IUPAP International Conference on Statistical Physics, Cairns, Australia, 2010/07/19-23.
- [30] S. Miyashita, Phase transition and its dynamics in the spin-crossover type materials, 24th IUPAP International Conference on Statistical Physics, Cairns, Australia, 2010/07/19-23.
- [31] T. Mori, On Exactness of the Mean-Field Theory in Long-Range Interacting Systems, 24th IUPAP International Conference on Statistical Physics, Cairns, Australia, 2010/07/19-23.
- [32] S. Morita, Quantum-thermal annealing with cluster-flip Monte Carlo method, 24th IUPAP International Conference on Statistical Physics, Cairns, Australia, 2010/07/19-23.
- [33] T. Fujiwara, Growth of spin correlation owing to quantum charge fluctuation, 24th IUPAP International Conference on Statistical Physics, Cairns, Australia, 2010/07/19-23.

- [34] K. Hijii, Nonadiabatic transition between Floquet states, 24th IUPAP International Congerence on Statistical Physics, Cairns, Australia, 2010/07/19-23.
- [35] T. Fujiwara, Non-monotonic spin correlation as a function of temperature owing to quantum charge fluctuation, International Workshop on Statistical Physics of Quantum Systems (SPQS2010), Tokyo, 2010/08/02-04.
- [36] K. Hijii, Nonadiabatic transition in Floquet states under an asymmetrically periodic field, International Workshop on Statistical Physics of Quantum Systems (SPQS2010), Tokyo, 2010/08/02-04.
- [37] S. Kamatsuka, Mixture phase in generalized q -state model, International Workshop on Statistical Physics of Quantum Systems (SPQS2010), Tokyo, 2010/08/02-04.
- [38] C. Matsui, Correlation functions of integrable spin chains with boundaries, International Workshop on Statistical Physics of Quantum Systems (SPQS2010), Tokyo, 2010/08/02-04.
- [39] T. Mori, Analysis of Exactness of the Mean-Field Theory in Long-Range Interacting Systems, International Workshop on Statistical Physics of Quantum Systems (SPQS2010), Tokyo, 2010/08/02-04.
- [40] S. Morita, Conveyance of quantum particles by accelerated motion of a potential-well, International Workshop on Statistical Physics of Quantum Systems (SPQS2010), Tokyo, 2010/08/02-04.
- [41] T. Nakada, Ordering processes of spin-crossover materials in competition between long and short range interactions, International Workshop on Statistical Physics of Quantum Systems (SPQS2010), Tokyo, 2010/08/02-04.
- [42] C. Matsui, The ground state of the integrable spin- s XXZ spin chain with boundaries" The International Workshop on Dynamics and Manipulation of Quantum Systems(DMQS2010), Tokyo, 2011/02/14-16.
- [43] S. Kamatsuka, Magnetic order of the Heisenberg ferromagnetic model with dipole-dipole interactions on the sphere, The International Workshop on Statistical Physics of Quantum Systems (DMQS2010), Tokyo, 2011/02/14-16.
- [44] T. Fujiwara, Ordering process in a quantum spin system with electron transfer, The International Workshop on Statistical Physics of Quantum Systems (DMQS2010), Tokyo, 2011/02/14-16.
- [45] T. Nakada, Two-body interaction model for elastic interaction of lattice distortion, The International Workshop on Statistical Physics of Quantum Systems (DMQS2010), Tokyo, 2011/02/14-16.
- [46] T. Mori, Inhomogeneous States in Long-Range Interacting Systems, The International Workshop on Statistical Physics of Quantum Systems (DMQS2010), Tokyo, 2011/02/14-16.
- 招待講演
- [47] S. Miyashita, Manipulation of quantum dynamics and quantum simulation, CREST 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, Tokyo, 2010/04/06-09.
- [48] S. Miyashita, Study on the line shape of ESR for molecular magnets, 6th Interinational Workshop on Nanomagnetism and Superconductivity, Coma Rubga, Spain, 2010/06/30-7/1.
- [49] S. Miyahsita, Reduction of the system dynamics from the total system including the environment, Physics and Chemistry in Quantum Dissipative Systems, Kyoto, 2010/08/10.
- [50] S. Miyashita, Incomplete magnetic ordered ground state in frustrated and itinerant magnets, The Workshop on "Resonating Valence Bond Physics: Spin Liquids and Beyond, Budapest, Hungary, 2010/10/13-15.
- [51] S. Miyashita, Response spectrum of photon-mediated interacting systems, The International Workshop on Dynamics and Manipulation of Quantum Systems(DMQS2010), Tokyo, 2011/02/14-16.
- [52] K. Saito, "Heat Conduction in Three Dimensional Anharmonic Crystals" Heat Control and Thermoelectricity, Italy, 2010/11.
- [53] K. Saito, Heat Conduction in Three Dimensional Anharmonic Crystals, Transmission of Information and Energy in Nonlinear and Complex Systems, Singapore, 2010/07.
- [54] K.Saito, Quantum Fluctuation Relation in Mesoscopic Conductors, International Workshop on Statistical Physics of Quantum Systems Tokyo, 2010/08/02-04.
- [55] K. Saito, Additivity principle in high-dimensional harmonic lattices, The International Workshop on Dynamics and Manipulation of Quantum Systems(DMQS2010), Tokyo, 2011/02/14-16.
- [56] S. Morita, Convergence of Quantum Particles by an Acceleration Potential-Well, TheInternational Workshop on Dynamics and Manipulation of Quantum Systems (DMQS2010), Tokyo, 2011/02/14-16.
- [57] Keigo Hijii An additional SU(2) symmetry of the one-dimensional spin-1 BQ model with single ion anisotropy The International Workshop on Dynamics and Manipulation of Quantum Systems (DMQS2010) Tokyo, 2011/02/14-16.
- [58] H. Tokoro, S. Ohkoshi, "Light-induced phase collapse in a rubidium manganese hexacyanoferrate" International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, December 19, 2010, Hawaii (USA).
- [59] H. Tokoro, S. Ohkoshi, "Reversible Photomagnetic Effect in Rubidium Manganese Hexacyanoferrate"

- (Poster) H. Tokoro, S. Ohkoshi The 12th International Conference on Molecule-based Magnets, October 10, 2010, Beijing (China).
- (国内会議)
- 一般講演
- [60] 松井千尋, 境界付き可積分 XXZ 高次スピン鎖における相関関数, 日本物理学会 秋季大会, 大阪府立大学, 2010/09/23-26.
- [61] 鎌塚 俊, 宮下精二, 不完全秩序相をもつ一般化 Q 状態模型の数値的研究, 日本物理学会 秋季大会, 大阪府立大学, 2010/09/23-26.
- [62] 中田太郎, 宮下精二, 藤堂真治, 長距離相互作用と短距離相互作用の競合によるクラスター生成, 日本物理学会 秋季大会, 大阪府立大学, 2010/09/23-26.
- [63] 森 貴司, 中田太郎, 透明状態による相転移の性質の変化, 日本物理学会 秋季大会, 大阪府立大学, 2010/09/23-26.
- [64] 西野正理, 宮下精二, C. Enachescu, K. Boukheddaden, F. Varret, スピンクロスオーバー系の構造変化におけるダイナミクス, 日本物理学会 2010 秋季大会, 大阪府立大学, 2010/09/23.
- [65] 森田悟史, 宮下精二, 加速移動ポテンシャルによる粒子移送における量子力学的效果, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 大阪府立大, 2010/09/23-26.
- [66] 1 脳井敬吾, 宮下精二, Floquet 状態間の非断熱遷移, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 大阪府立大, 2010/09/23-26.
- [67] 松井千尋, 境界付き可積分 XXZ 高次スピン鎖の基底状態, 非線形数理若手の会, 九州大学西新プラザ, 2011/11/15-17.
- [68] S. Morita, Conveyance of quantum particle by accelerating potential-well, 最先端研究開発支援プログラム 量子情報処理プロジェクト全体会議 2010 热海, 2010/12/08-11.
- [69] K. Hijii and S. Miyashita, Nonadiabatic transitions between adiabatic Floquet states under swept magnetic field, 最先端研究開発支援プログラム 量子情報処理プロジェクト全体会議 2010 热海, 2010/12/08-11.
- [70] 藤原知也, 電子移動を伴う量子スピン系での秩序形成, 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5回公開シンポジウム, 甲南大学, 2/22-2/23.
- [71] 中田太郎, 局所自由度による格子変形のもとでの秩序形成, 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5回公開シンポジウム, 甲南大学, 2/22-2/23.
- [72] 鎌塚 俊, Z_q 対称性を持つモデルにおける混合相のゆらぎと応答, 日本物理学会 2011 年春季大会, 新潟大学, 2011/03/25-28. 中止.
- [73] 森田悟史, 宮下精二, 粒子移送問題における共鳴状態, 日本物理学会 2011 年春季大会, 新潟大学, 2011/03/25-28 中止.
- [74] 藤原知也, 電子の移動によるスピンゆらぎを伴う系での量子モンテカルロシミュレーション, 日本物理学会 2011 年春季大会, 新潟大学, 2011/03/25-28 中止.
- [75] 中田太郎, 格子変形による実効的長距離相互作用の二体相互作用でのモデル化と相転移, 日本物理学会 2011 年春季大会, 新潟大学, 2011/03/25-28 中止.
- [76] 森 貴司, 宮下精二, 長距離相互作用スピン系の不均一相への転移, 日本物理学会 2011 年春季大会, 新潟大学, 2011/03/25-28 中止.
- [77] 中野留里, 森 貴司, 羽田野直道, Tomio Petrosky, 開放量子系のリウビリアンの複素固有値問題と異種 2 粒子問題, 日本物理学会 2011 年春季大会,
- [78] Generating Function Formula of Heat Transfer in Harmonic Networks 日本物理学会 新潟大学 五十嵐キャンパス 3 月 25 日 (金)~28 日 (月)
- 招待講演
- [79] “集積型シアノ架橋型金属錯体における電荷移動に基づいた光誘起相転移現象” (招待講演) 所裕子、物性研短期研究会 : 外部場の時間操作と実時間物理現象 東京大学物性研究所, 2010 年 6 月 22, 23 日
- [80] “集積型シアノ架橋型金属錯体における光相転移現象” (招待講演) 所裕子、第 4 回東北大 G-COE 研究会、東北大、2010 年 12 月 5 日
- [81] “集積型シアノ架橋型金属錯体における電荷移動に基づいた光誘起相転移現象” (招待講演) 所裕子、物性研短期研究会 : 外部場の時間操作と実時間物理現象 東京大学物性研究所, 2010 年 6 月 22, 23 日
- [82] “集積型シアノ架橋型金属錯体における光相転移現象” (招待講演) 所裕子、第 4 回東北大 G-COE 研究会、東北大、2010 年 12 月 5 日
- 国際ワークショップ
- [83] International Workshop on Statistical Physics of Quantum Systems August 2-4, 2010, Tokyo <http://looper.t.u-tokyo.ac.jp/spqs2010/>
- [84] The Third International Workshop on Dynamics and Manipulation of Quantum Systems (DMQS2010) 14-17 Feb. 2011, Tokyo <http://spin.phys.s.u-tokyo.ac.jp/conference/DMQS2010/>

3.3 小形研究室

物性理論、凝縮系とくに量子現象が顕著に現れる多電子系の理論、すなわち強い相関のある電子系、高温超伝導の理論、モット金属-絶縁体転移、磁性、有機伝導体などの低次元伝導体、軌道・スピン・電荷の複合した物質、從来と異なる新しい超伝導現象、非線形励起(スピノン・ホロン)などに関する理論を研究している。とくに、場の理論的手法、厳密解、くりこみ群、変分法、計算機シミュレーションなどの手法を組み合わせて用いている。

3.3.1 高温超伝導の理論

高温超伝導体における実空間不均一性と2ギャップ

最近の高温超伝導体の研究において、運動量空間での2種類のギャップの存在が実験的に見出され、大きな謎として活発に議論されている。これは超伝導秩序変数以外に、何か「隠れた秩序変数」があるのではないかという意味において非常に興味が持たれている。一方、走査型トンネル分光(STS)の研究においては、実空間での大きな不均一性が見出されている。これらの高温超伝導体での2つの異常物性を微观的な観点から理解するために、実空間での乱れを持つ t - J モデルを調べた。単純に乱れを加えた場合、運動量空間でのギャップの振舞いはほとんど $d_{x^2-y^2}$ -波超伝導の場合と同じであることがわかった。しかし、短距離の反強磁性秩序変数を導入すると、実験で見られているような運動量空間での2ギャップの特徴が得られることがわかった[17, 28]。また、 t - J モデルの変分波動関数を徹底的に最適化することによる長距離クーパー対の効果によっても、擬ギャップに関する2ギャップ的振舞いが生じるということもわかっている。これらの考え方を組み合わせることによって、実空間不均一性と2ギャップの存在という2つの高温超伝導体での謎が解明されるのではないかと期待される。

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っている。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)反強磁性がスピニングレット形成温度に影響を与えること、(2)反強磁性相からのリエントラント転移が起きることを示している。[35]

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。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。この系は磁性を持たないために、反強磁性など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。まず、電子相関が強い領域で得られる絶縁体状態では、2つの粒子が同時に占有するサイト(doublon)と、ホールのサイト(holon)とが束縛状態を作る。波動関数の特徴を調べることにより、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。逆に、 ξ_{dh} が ξ_{dd} より長くなると、doublon-holon束縛状態の重なりが大きくなり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。[7, 14, 22, 33]

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発現のメカニズムおよび特徴のある磁性についての理論的研究を行っている。

鉄系超伝導における不純物効果の研究

鉄系超伝導体に代表されるような、多軌道超伝導体における不純物問題について、数値的な手法に基づく研究を行った[1, 19, 20, 31, 32, 34, 51]。まず鉄系超伝導体の5軌道模型に対するRPA近似によるギャップ関数の解析結果をもとに、超伝導状態の不純物問題を扱うのに適した有効模型を構築した。得られた有効模型を用い、Bogoliubov-de Gennes方程式を解くことにより、非磁性不純物近傍での超伝導秩序変数の空間依存性や、局所状態密度を求めた。その結果、(1)非磁性不純物近傍の局所状態密度を測定することによって、いわゆる s^{+-} 状態と s^{++} とを状態を区別することが可能であることを示した。つまり、超伝導ギャップ関数の位相の情報を引き出すプローブとなりうる。また(2)束縛状態の不純物ポテンシャルの強さへの依存性とその要因を詳細に調べ、実際に実験結果を解釈する際に有用となる情報を与えることができた。

この他、鉄系超伝導体に特有のフェルミ面の形状と、不純物散乱の波数依存性との兼ね合いによる効果をしらべるため、不純物の効果が長距離に及ぶ場合の計算も行い、局所状態密度に対する不純物の長距離性の効果を明らかにした。[20, 32, 47, 51]

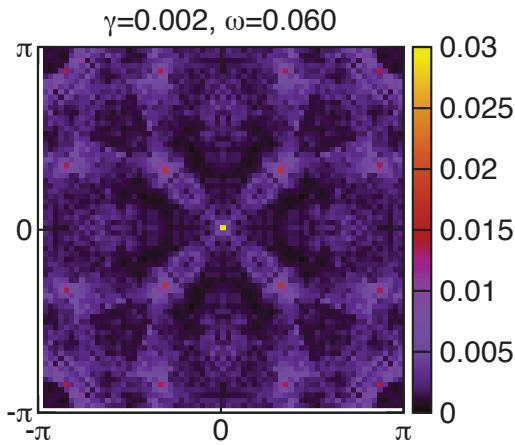


図 3.3.8: 不純物濃度 2 % のときのゼロ磁場での準粒子干渉パターン。

一般の多軌道超伝導体における不純物束縛状態

一般の多軌道超伝導体における不純物束縛状態の研究を行った。まず、 T 行列近似に基づく解析的な手法を用いて、不純物束縛状態の生成について調べた。その結果、不純物が球対称な点欠陥である場合、超伝導ギャップ関数の対称性を適切に考慮することにより、多軌道超伝導体の T 行列が本質的に単一バンドの場合と同程度まで単純化可能であることがわかった。さらに、単純なギャップ関数を仮定して計算を行い、不純物束縛状態の生成条件、粒子正孔非対称性の効果、多軌道系特有の性質等を明らかにした。これらの結果により、数値計算や実験の結果を直感的に理解することが容易になった。[19, 20, 34]

d 波超伝導体における準粒子干渉パターン

超伝導秩序変数の位相に敏感なプローブとして、準粒子干渉パターンの磁場依存性が注目を集めている。この準粒子干渉パターンについて、Bogoliubov-de Gennes 方程式に基づく方法を採用し計算を行った。具体的には、d 波超伝導が実現する相互作用のみを考慮し、不純物をばらまいた格子に一様な磁場をかけたモデルを用い、局所状態密度の実空間マップ（及びそのフーリエ変換後の波数表示）の不純物濃度、散乱強度依存性を調べた（図 3.3.8）。結果として、(1) 波数表示の干渉パターンが実験で得られているようなシャープなスポット状の構造を持つのは、不純物が低密度または弱散乱強度のときのみであること、(2) ギャップの最大値 Δ_0 より十分低いエネルギー領域での干渉パターンに対する磁場の効果は、不純物の濃度や散乱強度に大きく依存すること、(3) 一方 $0.5\Delta_0$ から $0.7\Delta_0$ 程度のエネルギー領域での干渉パターンは、比較的ユニバーサルであること、などがわかった。[41]

反強磁性状態における軌道自由度と静的 Jahn-Teller 効果

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、縮退する d_{xz} 軌道と d_{yz} 軌道間の交換相互作用と、Jahn-Teller 相互作用からなる有効モデルを構築し、平均場近似による秩序状態の理論解析を行った。その結果、orthorhombic なひずみと中性子の反強磁性の強度の相関が、軌道とスピンとの結合の結果として理解できることを示した[21, 42]。この結果は、鉄砒素系の反強磁性状態において、電子相間に加えて格子の自由度が重要な役割を果たしていることを示唆しているといえる。

超伝導状態における軌道自由度と結晶場エネルギー

また鉄の 5 軌道の tight-binding モデルを用いて、 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というメカニズムであると仮定し、平均場近似による超伝導状態の理論解析を行った。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。[6, 15, 23, 36, 43]

3.3.3 有機導体に関する理論

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

1 次元・鉄-フタロシアニン化合物の磁性とモデル構築

鉄-フタロシアニン化合物、 $\text{TPP}[\text{FePc}(\text{CN})_2]_2$ 、という物質は、3/4 フィリングのフタロシアニン (Pc) の分子軌道 (π 軌道) が一次元的につながり、同時にスピン $S = 1/2$ の鉄の局在スピンを有する系である。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、さまざま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が、Fe を Co に置き換えた $\text{TPP}[\text{CoPc}(\text{CN})_2]_2$ では負の磁気抵抗を示さない。これは、Fe の場合と異なり Co が $S = 0$ の状態となり、スピンを持たないためである。また Co 系に少量の Fe をドープした、 $\text{TPP}[\text{Fe}_x \text{Co}_{1-x} \text{Pc}(\text{CN})_2]_2$ ($x = 0.03$) では、負の磁気抵抗が観測されている。これらの結果は、 π 電子と局在スピン間の相互作用 (π -d 相互作用) が負の磁気抵抗の起源であることを示唆している。

最近の量子化学計算によって、 π - d 相互作用は強磁性的であると見積もられているが、実験的には π - d 相互作用が反強磁性的か強磁性的か明確に決まっていない。そこで、我々は、Pc の分子軌道と Fe の d 軌道を含んだクラスター モデルを構築し、このモデルを摂動計算と数値対角化を用いて解析を行い、 π - d 相互作用のメカニズムについて考察した。その結果、 d 軌道と Pc の分子軌道間の超交換相互作用と d 電子内・分子軌道内での直接交換相互作用(フント結合)が π - d 相互作用の主要なメカニズムであることを明らかにした。また、強磁性的な相互作用と反強磁性的な相互作用どちらも、現実的なパラメータ領域で現れることが摂動計算・数値対角化の計算から分った。[39, 44, 46, 52]

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ため、「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。等方的な三角格子スピン系の基底状態は、隣接したスピンが 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に異方性を導入し、それを試行波動関数として変分モンテカルロ法による基底状態の解析を行った。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pin液体状態が安定となることが示された[8, 48]。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。

非平衡状態での電荷秩序状態

θ -型有機導体という物質群は、伝導面が 2 次元異方的三角格子を組んだ系であり、多くの系において電荷秩序が見出されている。その 1 つである θ -(BEDT-TTF)₂X という物質群では、格子が三角格子的であるために最近接相互作用 V にフラストレーションがあり、ストライプ型の電荷秩序と 3 倍周期の電荷秩序がエネルギー的に拮抗していることが分かっている[18, 49]。この状況下で系に電流を流した場合、電荷

秩序の融解と思われる現象が実験的に見出されており、サイリスタ現象とともに非常に興味が持たれている。この現象を理解するために、Peierls 型の電子-格子相互作用項を含む電子の時間依存 Schrödinger 方程式と、緩和項を含む格子の古典運動方程式を実空間で連立させて解き、電荷秩序のダイナミクスと伝導特性の関係を明らかにすることを目指した。1 次元の系では電子-格子系固有の不安定性により収束する解を得ることができず、2 次元以上の系では計算サイト数の制約を受けたが、将来この問題に取り組む際に注意しなければならない重要な点が分かった。

3.3.4 超伝導体の理論

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 CeCoIn₅ 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まだ明らかにされていない。そこで本研究で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, 37]

3.3.5 ディラック電子系

最近見出されたある種の有機物質や、単層グラファイト(グラフェン)、さらに古くから調べられている物質である Bi(ビスマス)において、電子の低エネルギー状態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(図 3.3.9 参照)。こうした固体中のディラック電子は、これまでにない新しい伝導現象を生み出しうると予想され、新たな電子状態として非常に興味が持たれている[50]。実際我々はこれまで、この固体中ディラック電子を用いれば、エネルギー散逸が非常に小さい電流(微少散逸電流)を作ることが可能であることを見出した。

バンド間磁場効果による微少散逸電流

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ディラック電子系を取り上げ、そのバンド間電流を調べた。とくにビスマスのモデルを用いたディラック電子の磁場中交流伝導度(磁気光学応答)を調べ、バンド間とバンド内電流との分離を試みた。その結果、照射する光の振動数を調整すれば($\omega > 15\text{meV}$)、バンド間電流はバンド内電流からほぼ 100% 分離

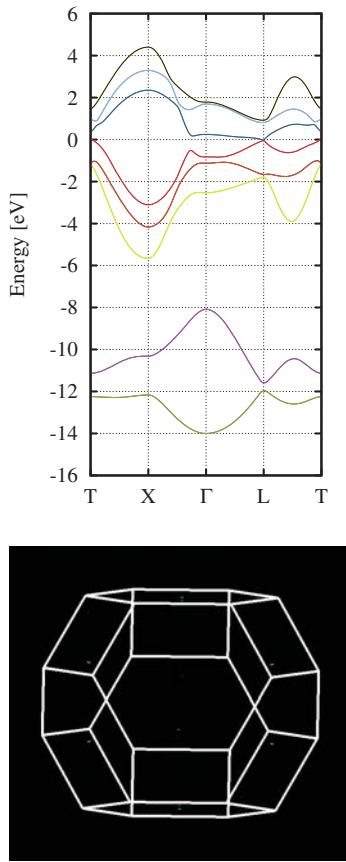


図 3.3.9: (上) 単体ビスマスのバンド構造。横軸の L 点と T 点の位置にディラック電子系が現れる。(下) ビスマスのブリルアンゾーンとフェルミ面。フェルミ面は非常に小さい。

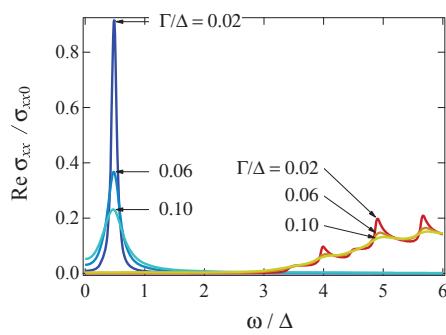


図 3.3.10: 固体中ディラック電子の磁場中光学伝導度。高エネルギー側がバンド間遷移に対応する。 Γ 依存性は不純物散乱強度の依存性を表す。

できることが明らかになった(図 3.3.10)。さらに、この分離されたバンド間電流の不純物散乱効果を調べたところ、バンド間電流は不純物散乱に依存せず、散逸が小さい電流であることが裏付けられた。さらに、このバンド間遷移は加える磁場と照射する光の振動数の制御により、数百倍も増幅することが可能であることも分かった。以上のことから、微少散逸電流は実験的に十分測定可能な電流であることが分かる。[45]

ディラック電子による完全スピン偏極電流

また、ビスマス中で実現しているディラック電子に対してその磁気光学応答を調べた。その結果、ディラック電子特有のスピン遷移を用いて、完全スピン偏極が実現することを見出した。絶縁体領域では円偏光の、量子極限領域では縦偏光の光を照射することにより、単一スピンのみが励起され、非磁性の物質にも関わらず強磁性状態を作ることができる。そこで流れる電流は、完全スピン偏極電流となることが示された。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。[53, 54, 55]

3.3.6 フラストレーションのある系での電子状態、スピン状態

フラストレーションを持つ Potts 模型の解析

KOs_2O_4 という β 型パイロクロア酸化物においては、結晶中に存在する大きなカゴの内部で、K イオンが「ガラガラ」と動いているような特異な「ラッティング」という現象が見られている。我々は、このラッティングの相転移を説明する目的で導入されたフラストレーションのある Potts 模型について、古典モンテカルロ・シミュレーションによる解析を行った。その結果、このモデルでは単純な強磁性状態とは異なる新奇な基底状態への 1 次相転移が生じることを見出した。得られた基底状態は、乱れた層と秩序層が交互に配列する「部分秩序」を持つ層状構造をとっていて、残留エントロピーが K 原子 1 個当たり約 $k_B \log 1.3$ 残るという状態であることがわかった。この基底状態は結晶の対称性を破っているので、 KOs_2O_4 の説明には不十分であるといえるが、自発的に部分秩序を持つという、これまでにあまり例のない、統計力学的に非常に興味深いモデルであることがわかった。[5, 12]

3.3.7 重い電子系に関する理論

伝導電子のスピン自由度を含む二準位近藤模型の固定点解析

非調和なイオン振動と伝導電子との相関効果は、磁場に鈍感な重い電子の起源として活発に議論されている。これらの相関効果を考慮した模型の一つとして、二準位近藤模型が提案されている。先行研究では、この模型の固定点として2チャンネル近藤模型の固定点だけが知られていた。我々は、摂動論的くりこみ群の方法によりこの模型を詳細に解析し、2チャンネル近藤模型とは異なるイジング型の固定点が存在することを明らかにした。^[2]

f^2 配置における近藤-芳田一重項と結晶場一重項の競合

f^2 配置の重い電子系では、結晶場が一重項基底状態を持つ場合であっても、 f 電子と伝導電子の混成が大きい場合には近藤-芳田一重項が基底状態として実現する。これらの一重項同士の競合による量子臨界点(QCP)近傍では特性温度 T_F^* が二つの一重項の特徴的エネルギーに比べて十分小さくなり、2チャンネル近藤模型と同様の非フェルミ液体状態が生じる。我々は、 f 電子の波動関数が正方対称の場合における一重項の競合による非フェルミ液体の磁場依存性について、数値くりこみ群を用いて調べた。その結果、QCP近傍において、競合により抑制された T_F^* は T_F^* よりも十分大きな外部磁場 H_z をかけても変化しないことが分かった。つまり、これらの一重項の競合による非フェルミ液体状態は、磁場に鈍感であることがわかった。^[3, 11, 24, 38]

local Fermi liquid から heavy Fermi liquidへのクロスオーバー

強相関電子系の典型例である重い電子系物質は、大きな電子の有効質量によって特徴付けられているが、これは周期的に配置された局在性の強い f 電子が伝導電子と混成すること、さらに f 電子間に働くクーロン斥力が強いことが起源となっている。この系は電気抵抗が低温で T^2 に比例するなど、典型的なフェルミ流体の振舞いを示すため、“heavy Fermi liquid”と称される。一方、元素置換(例： $\text{Ce} \rightarrow \text{La}$)によって f 電子数密度を減らしていくと、 f 電子が希薄な領域では1不純物問題でよく知られている“local Fermi liquid”的性質を示すことがわかっている。しかし、 f 電子数密度の変化に伴って系がどのようにlocal Fermi liquid から heavy Fermi liquidへと移行していくかの詳細は明らかになっていない。我々はこの問題を念頭に、 f 電子数密度を変化させた時の近藤格子模型の基底状態を変分モンテカルロ法によつて解析した。その結果、ある f 電子数密度を境に「伝導電子によるスクリーニング」から「 f 電子同士によるスクリーニング」へのクロスオーバーが起こることを見出した。これは隣接する近藤クラウドが互いに重なり合って f 電子間のコヒーレンスが成長し始めた結果起こるものであり、local Fermi liquid から heavy Fermi liquidへのクロスオーバーに対応すると期待される。^[4, 13]

よるスクリーニング」へのクロスオーバーが起こることを見出した。これは隣接する近藤クラウドが互いに重なり合って f 電子間のコヒーレンスが成長し始めた結果起こるものであり、local Fermi liquid から heavy Fermi liquidへのクロスオーバーに対応すると期待される。^[4, 13]

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Kariyado and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 083704 (2010). “Single Impurity Problem in Iron-Pnictide Superconductors”
- [2] H. Matsuura, S. Tanikawa, and K. Miyake: J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 074705 (2010). “Variety of Fixed Points of Two-Level Kondo Model with Spin Degrees of Freedom”
- [3] S. Nishiyama, H. Matsuura, and K. Miyake: J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 104711 (2010). “Magnetically Robust Non-Fermi Liquid Behavior in Heavy Fermion Systems with f^2 -Configuration: Competition between Crystalline-Electric-Field and Kondo-Yosida Singlets”
- [4] H. Watanabe and M. Ogata: Phys. Rev. B **81**, 113111 (2010). “Crossover from dilute-Kondo system to heavy-fermion system”
- [5] R. Igarashi and M. Ogata: submitted to Phys. Rev. B. “Partial order in a frustrated Potts model”
- [6] N. Arakawa and M. Ogata: to appear in J. Phys. Soc. Jpn.. “Orbital-Selective Superconductivity and the Effect of Lattice Distortion in Iron-Based Superconductors”
- [7] H. Yokoyama, T. Miyagawa, M. Ogata: submitted to J. Phys. Soc. Jpn.. “Effect of Doublon-Holon Binding on Mott transition—Variational Monte Carlo Study of Two-Dimensional Bose Hubbard Models”

(会議抄録)

- [8] Y. Hayashi and M. Ogata: Proceeding of the 8th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Ferromagnets (ISCOM2009) (Niseko, Japan, 9.12-17, 2007) Physica B **405**, S150 (2010). “Variational Monte Carlo Study of the Spin Liquid State with One-dimensionalization”
- [9] H. Yokoyama, M. Ogata, and K. Kobayashi: Proceeding of 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M²S 2009), (Tokyo, September 7-12, 2009). Physica C **470**, S149-150 (2010). “Close relation between antinodal Fermi-surface effect and superconductivity in cuprates”

- [10] T. Kariyado and M. Ogata: Proceeding of 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M²S 2009), (Tokyo, September 7-12, 2009). *Physica C* **470**, S334-335 (2010). “Nuclear magnetic relaxation rate in iron-pnictide superconductors”
- [11] S. Nishiyama, H. Matsuura, and K. Miyake: *J. Phys.: Conf. Ser.* **273**, 012047 (2010). “Magnetically Robust Non-Fermi Liquid Behavior in Heavy Fermion Systems with f²-Configuration: Competition between Crystalline-Electric-Field and Kondo-Yosida Singlets”
- [12] R. Igarashi and M. Ogata: Proceeding of The International Conference on Magnetism 2009 (ICM 2009), (Karlsruhe, Germany, July 26-31, 2009). *J. Phys.: Conf. Ser.* **200**, 022019 (2010). “Partial order of frustrated Potts model”
- [13] H. Watanabe and M. Ogata: Proceeding of ICM 2009. *J. Phys.: Conf. Ser.* **200**, 012221 (2010). “Ground State Properties of Randomly-Doped Kondo Lattice Model”
- [14] H. Yokoyama, T. Miyagawa, and M. Ogata: Proceeding of 23rd International Symposium on Superconductivity, to be published in *Physica C* (2011). “Mechanism of superfluid-insulator transition in two dimensional Bose Hubbard model”
- (学位論文)
- [15] 荒川直也：“Theoretical Study on Magnetism and Superconductivity in Multi-orbital Systems”(多軌道系の磁性と超伝導の理論研究) (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)
- [16] 金尾太郎：“二次元 Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov 超伝導における空間変調パターン”(東京大学大学院理学系研究科・修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [17] M. Ogata: International Conference Superstripes 2010 “Quantum Phenomena in Complex Matter” (Erice-Sicily, July 19-25, 2010). “Theory for Inhomogeneous Superconductors: Approach from the t-J Model”
- [18] M. Ogata: 11th German-Japanese Symposium in 2010 “New Quantum States and Phenomena in Condensed Matter” (Miyajima, Hiroshima, September 13-16, 2010) “Charge order and superconductivity in organic conductors”
- [19] T. Kariyado and M. Ogata: Emergent Quantum States in Complex Correlated Matter (Dresden, Germany, August 23-27, 2010). “Single Impurity Problem in Iron-Pnictide Superconductors”

- [20] T. Kariyado and M. Ogata: International Workshop on Novel Superconductors and Super Materials 2011 (Tokyo, March 6-8, 2011). “Impurity Induced Mid-Gap Bound States in Iron-Pnictide Superconductors”
- [21] N. Arakawa and M. Ogata: International Workshop on Novel Superconductors and Super Materials 2011, (Tokyo, March 6-8, 2011). “Theoretical analysis of the ordered states in iron-based compounds on the basis of a two-orbital model”
- [22] H. Yokoyama, T. Miyagawa, and M. Ogata: 23rd International Symposium on Superconductivity (Tsukuba, Ibaraki, November 1-3, 2010). “Mechanism of superfluid-insulator transition in two dimensional Bose Hubbard model”
- [23] N. Arakawa and M. Ogata: 23rd International Symposium on Superconductivity (Tsukuba, Ibaraki, November 1-3, 2010). “Orbital-selective superconductivity in Iron-based compounds”
- [24] S. Nishiyama, H. Matsuura, and K. Miyake: Strongly Correlated Electron Systems - SCES 2010 (Santa Fe, U.S.A. June 27-July 2, 2010). “Magnetically robust non-Fermi liquid behavior due to the competition between crystallineelectric-field singlet and Kondo-Yosida singlet in f²-based heavy fermion systems”
- [25] H. Yamaguchi, H. Matsuura, S. Watanabe, and K. Miyake: Strongly Correlated Electron Systems - SCES 2010 (Santa Fe, U.S.A. June 27- July 2, 2010). “Research on mechanism of magnetism in Vanadium-Benzene cluster”
- [26] H. Matsuura, K. Miyake, and H. Fukuyama: International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals (ICSM 2010) (Kyoto, Japan, July 4-9, 2010). “Mechanism of Room Temperature Ferromagnetism in V(TCNE)_x: Role of Hidden Flat Bands”
- 招待講演
- [27] M. Ogata and T. Kariyado: International Conference on Core Research and Engineering Science of Advanced Materials (Osaka, June 1-2, 2010). “Simple real-space picture of nodeless and nodal s-wave gap functions in Iron-Pnictide superconductors”
- [28] M. Ogata: CIMTEC 2010 — 12th International Conference on Modern Materials and Technologies, 5th Forum on New Materials (Montecatini Terme, Italy, June 13-18, 2010). “Theory for Inhomogeneous Superconductors: Approach from the t-J Model”
- [29] M. Ogata: IMR Workshop “Recent Progress on Spectroscopies and High-T_c Superconductors” (IMR, Sendai, August 9-11, 2010). “Order parameters and impurity effects in iron-pnictide superconductors”

- [30] M. Ogata and T. Kariyado: Opening Symposium of QS²C Theory Forum (RIKEN, Wako September 27-30, 2010). “Order parameters and impurity effects in iron-pnictide superconductors”
- [31] M. Ogata and T. Kariyado: Super-PIRE/Reimei/MWN Joint Kickoff Meeting (Knoxville, Tennessee, October 28-31, 2010). “Order parameters and impurity effects in iron-pnictide superconductors”
- [32] M. Ogata and T. Kariyado: 2011 APCTP Winter Workshop on Frontiers in Electronic Quantum Matter (Pohang, Korea, February 16-19, 2011). “Order parameters and impurity effects in iron-pnictide superconductors”
- (国内会議)
- 一般講演
- [33] 横山寿敏、宮川智章、小形正男：日本物理学会、大阪府立大学 2010, 9.23–9.26 (秋季大会) “ダブロン-ホロン相関によるモット転移機構の再考”
- [34] 莊宿俊風、小形正男：日本物理学会、大阪府立大学 2010, 9.23–9.26 (秋季大会) “多軌道超伝導体における不純物束縛状態の理論”
- [35] 五十嵐章大、小形正男：日本物理学会、大阪府立大学 2010, 9.23–9.26 (秋季大会) “多層銅酸化物超伝導体の t - J モデルによる平均場的解析”
- [36] 荒川直也、小形正男：日本物理学会、大阪府立大学 2010, 9.23–9.26 (秋季大会) “鉄系超伝導体における軌道選択的超伝導状態”
- [37] 金尾太郎、小形正男：日本物理学会、大阪府立大学 2010, 9.23–9.26 (秋季大会) “2 次元 FFLO 超伝導における BKT 転移”
- [38] 西山真哉、松浦弘泰、三宅和正：日本物理学会、大阪府立大学 2010, 9.23–9.26 (秋季大会) “ f^2 配置における近藤-芳田一重項と結晶場一重項の競合による磁場に鈍感な非フェルミ液体”
- [39] 松浦弘泰、小形正男、三宅和正、福山秀敏：日本物理学会、新潟大学 2011, 3.25–3.28(の予定だった) (年次大会) “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”
- [40] 横山寿敏、宮川智章、小形正男：日本物理学会、新潟大学 (年次大会) “ドープされたモット絶縁体としての d 波一重項波動関数と銅酸化物”
- [41] 莊宿俊風、小形正男：日本物理学会、新潟大学 (年次大会) “d 波超伝導体の準粒子干渉パターンに対する磁場効果の理論的解析”
- [42] 荒川直也、小形正男：日本物理学会、新潟大学 (年次大会) “鉄砒素系における秩序状態の 2 軌道モデルによる解析”
- [43] 荒川直也、小形正男：第 4 回 物性科学領域横断研究会 (東京、2010, 11.13–11.15) “鉄系超伝導体における軌道選択性と超伝導転移温度の関係”

- [44] 松浦弘泰、小形正男、三宅和正、福山秀敏：第 4 回東北大学 G-COE 研究会「金属錯体の固体物性科学最前線：錯体化学と固体物性物理と生物物性の連携新領域創成をめざしてー」(東北大学 2010, 12.3–12.5) “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] 伏屋雄紀、小形正男、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 4 回領域会議 (東大小柴ホール、2011, 1.5–1.7) “強磁場中ディラック電子系における動的応答”
- [46] 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 4 回領域会議 (東大小柴ホール、2011, 1.5–1.7) “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”
- [47] 莊宿俊風、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 5 回公開シンポジウム (甲南大学、2011, 2.22–2.23) “チェビシェフ多項式を用いた局所状態密度の計算と鉄系超伝導体の不純物問題への応用”
- 招待講演
- [48] 小形正男：量子スピン液体に関するミニ研究会 (埼玉、理研、2010, 5.28–5.29) “スピン液体の理論”
- [49] 小形正男：日本物理学会、大阪府立大学 2010, 9.23–9.26 (秋季大会) 領域 8, 領域 5, 領域 7, 領域 10 合同シンポジウム 「“やわらかい電荷秩序”の特異な誘電性・伝導性と外場制御」 “電荷秩序の理論”
- [50] 小形正男：第 3 回『AINSHUTAIN の物理』でリンクする研究・教育拠点研究会 (大阪市立大学、2010, 10.15–16) “固体中のディラック電子”
- [51] 莊宿俊風、小形正男：TRIP 超伝導ワークショップ「格子と軌道結合」(東京 2010, 11.28) “Order Parameters and Impurity Effects in Iron-Pnictide Superconductors”
- [52] 松浦弘泰：「電子相関物理理論の最前線に関する研究会」(兵庫県豊岡市城崎温泉、2011, 2.28–3.2) “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”
- (セミナー)
- [53] 伏屋雄紀、小形正男、福山秀敏：新潟大学、物性理論コロキウム (2010, 8) “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”
- [54] Y. Fuseya, M. Ogata and H. Fukuyama : EPCI Paris (France), seminar (2010, 9) “Quantum Transport Phenomena of Dirac Electrons in Bismuth”
- [55] 伏屋雄紀、小形正男、福山秀敏：名古屋大学、物性理論セミナー (2010, 11) “ビスマス中ディラック電子における新しい量子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、超高圧下など極限条件下の結晶構造探索と物性予測、固体表面の構造・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

トランスクオ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の最重要課題のひとつに、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一方で、DFTでは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クオリレイティッド(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 $H_{TC} = F^{-1}HF$ 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。このような優れた利点がある一方、従来、莫大な計算量が実用化への最大の障害とされてきたが、昨年度、計算の劇的な高速化に成功し、TC法の様々な方向への発展の可能性が広がった。

今年度、我々は(i)昨年度に高速化したコードを用いて、改めていくつかの簡単な固体について収束したバンドギャップなどの計算結果を(固体に関しては初めて)得た。これは従来は、計算量の観点から k 点等を十分大きくとることが困難だったものである。(ii)また、TC法を励起状態計算に拡張したTC+Configuration Interaction Singles(TCCIS)法を開発した。この方法論では、励起状態の多体波動関数として、複数の一電子励起配置の線形結合にジャストロウ因子を乗じた形を仮定する。(iii)さらに、これまで固体のTC法では固定していた、ジャストロ

ウ因子の新たな最適化手法を提案し、簡単なテスト計算を行った。これら(i)-(iii)はいずれも実用に向けて現在、理論・コードとともに開発を進めている。

第一原理非調和格子モデルによる熱伝導率計算

熱伝導率の高精度計算は、高効率熱電材料などの新規材料設計を行う上で非常に重要である。その目的のため、我々は、第一原理非調和格子モデルと分子動力学法を組み合わせた新たな計算手法の開発に取り組んできた。本手法では、比較的簡単な系で短時間の第一原理分子動力学計算を行い、その結果を参照系として非調和格子モデルを導出する。そして、導出した非調和格子モデルを用いて(非平衡)分子動力学計算を実行することで、大規模かつ長時間シミュレーションが可能となり、熱伝導率の高精度計算が達成される。本手法の汎用性は極めて高く、従来のボルツマン方程式に基づく手法では困難であった表面・界面や不純物の効果を、明示的に取り扱うことが可能である。

本年度は、非調和格子モデルを用いた非平衡分子動力学計算に取り組み、シリコンとダイヤモンドの熱伝導率計算に成功した。実験値と比較して妥当な値が、バルクの熱伝導率の計算結果として得られたほか、熱伝導率の非線形サイズ依存性が観測された3.4.11。これは、システムサイズ L とフォノンの平均自由行程 ℓ が同程度である準バリストイック領域に特徴的な振る舞いである。今後は、熱伝導率計算のさらなる高精度化を目指すとともに、極性半導体やイオン性結晶を取り扱えるように方法論の拡張を目指す。

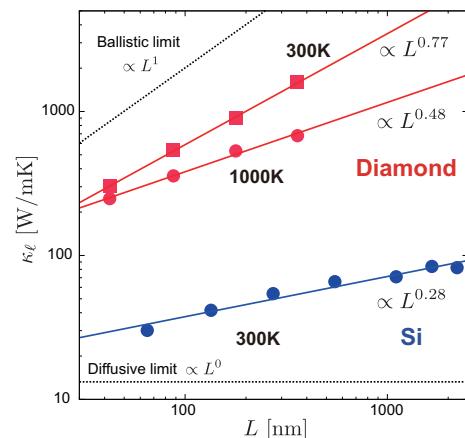


図 3.4.11: 熱伝導率のシステムサイズ(L)依存性。格子運動の非調和性と非線形性に相関があることが確認できる。

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の開発

生体分子のための電子状態計算手法であるFMO-LCMO法の拡張と応用を行った。FMO-LCMO法

は、FMO(Fragment Molecular Orbital)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の全系電子状態計算を行う手法である。タンパク質やDNAのようないわゆる生体分子は、系のサイズが大きくまた構造が複雑なため、第一原理によって計算することが非常に困難であった。FMO法は、タンパク質をフラグメントと呼ばれる部分系に分割することで、低コストでタンパク質全系の全エネルギーや電子密度を評価する手法であるが、これまで全系の波動関数および軌道エネルギーを計算することができなかった。

我々は FMO 法を利用することで全系のハミルトニアンを構成する手法を提案して FMO-LCMO と名付け、公開用汎用プログラムの開発を行ってきた。今年度は複数の主鎖が含まれる系の分割にプログラムを対応させたことで、DNA 二重らせん（図 3.4.12）への適用が可能になった。また FMO-LCMO 法ベースで各フラグメント毎のマリケン電荷を計算し、それと形式電荷との差を見ることで、フラグメンテーション（分割）の仕方の良し悪しの定量的評価を可能にした。

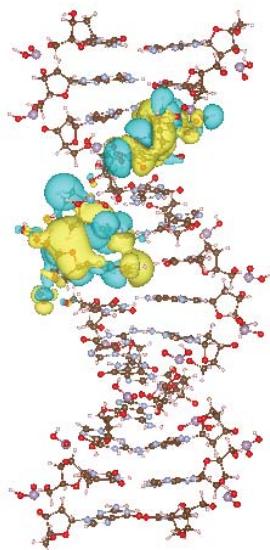


図 3.4.12: FMO-LCMO 法により計算された 12 組の塩基対から成る DNA の HOMO 軌道。従来法 (Hartree-Fock 法) で計算された HOMO 軌道の 97.4%を再現している。

3.4.2 第一原理電子状態計算の応用

非磁性材料界面における遍歴強磁性

磁性原子を用いずに強磁性を発現させる事およびそのメカニズムを明らかにする事は重要である。さらに、半導体バルク中のみならず、低次元系である界面においても磁性の発現されるかどうかは興味深い。実際、モデルハミルトニアンによる解析では純粋な2次元系での有限温度の強磁性は禁止される。また、窒化物半導体は既に実用となっている発光デバイスのみならず、スピントロニクス材料の候補としても期待されており、実際GdやCrをドープしたGaN等の希薄磁性半導体では室温強磁性が報告されている。そこで本研究では、格子整合性の高い窒化物半導体／ホウ素化合物界面に着目し、密度汎関数法による第一原理計算を行った。様々な界面原子構造を検討する事により最安定となる界面原子構造を同定し、AlN/MgB₂(0001)界面において強磁性的スピンド分極が安定となるという結果を得た。

スピニン分極は界面に局在しているという意味で2次元的であり、強磁性状態の起源は窒素原子の $2p_{//}$ 状態のスピニン分極によるものである事を明らかにした。等方的Heisenbergモデルでは2次元強磁性は実現しないが、現実の系では界面垂直方向に対して対称性がないため、強磁性状態は許容される。実際、上記スピニン分極 $2p_{//}$ 状態は界面垂直方向の非等方性により変形している。また、原子構造からは界面での化学結合は飽和している様に見えるため、このスピニン分極は電子状態を実際に計算しなければ予測する事は出来ない事が特徴である。AlN/MgB₂(0001)界面における窒素 $2p_{//}$ 状態の局所状態密度を計算しNiおよびFeの状態密度と比較した結果、図3.4.13に示す通りFermi準位近傍においてスピニン分極によりピーク位置がFermi準位からずれているという意味において類似している事が分かった。また、窒素 $2p_{//}$ 状態の局所状態密度はBloch状態となった後においても完全に2重縮退しており、AlN/MgB₂(0001)界面における界面強磁性はHund結合とFermi準位近傍の高い局所状態密度によるバンド強磁性であると考えられる。

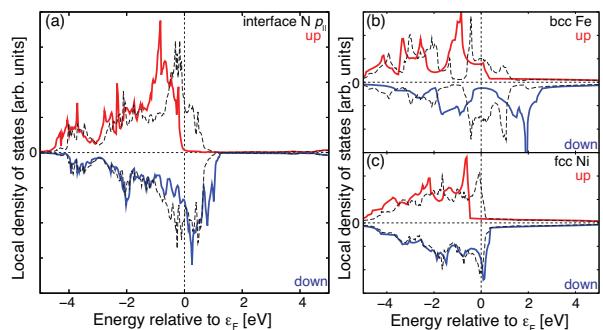


図 3.4.13: (a) AlN/MgB₂(0001) 界面における窒素 2p_{//} 状態、(b) bcc Fe、(c) fcc Ni の局所状態密度。実線は強磁性状態、破線は反強磁性状態である。

電子ドープによる BaTiO_3 の強誘電性消失に関する第一原理計算

ペロブスカイト型構造を持つ BaTiO_3 は室温で Tetragonal 相を有する典型的な強誘電体酸化物であるが、その強誘電性は様々な条件（欠陥・不純物、応力、微粒子化、など）によって強く影響を受ける事が知られている。特に自由電子が存在する条件下では自発分極の遮蔽などにより強誘電性は抑制されると考えられているが、実験的な電子ドープは必ずドナー・ドーパント（Oxygen vacancy, Nb^{5+} at Ti^{4+} site, etc.）による格子歪を伴っているために、純粋にキャリアのみの効果による強誘電性消失について定量的な議論は過去に行われていなかった。我々は第一原理計算を用いて電子ドープと元素置換による歪が BaTiO_3 の強誘電性消失に与える効果を個別に明らかにする事を試みた。計算は密度汎用関数法の枠内で局所密度近似（LDA）を用いて行った。

BaTiO_3 の Tetragonal 相の格子定数を最適化した結果、実験結果とよく一致する値 $c/a = 1.009$ (Exp. 1.011) が得られた。図 3.4.14 に Tetragonal 相 BaTiO_3 へのキャリアードープに伴う強誘電性歪みの消失過程を示す。この計算で導入された電子は一様なバックグラウンドチャージにより補償されているためにドーパント原子の影響は含まれていない。キャリアの導入にしたがって c/a 比率は低下し、キャリア導入量 $N_{\text{elec}} \simeq 0.10e/\text{unit cell}$ ($1.6 \times 10^{21} \text{ cm}^3$)において Tetragonal 相は完全に Cubic 相に相転移する事と、電子ドープにより体積は増加する事が示された。図 3.4.14 には $0.10 e/\text{unit cell}$ の電子キャリアをドープして Cubic 相に相転移を行った系と中性系との差分電荷密度が示されており、この図から導入した電子は BaTiO_3 のバンド構造を反映して $\text{Ti}-3d$ 軌道の上に分布し、 Ti イオンを選択的に還元する事が分かる。 ABO_3 の結晶構造においては tolerance factor の関係から B サイトイオン半径の増大により強誘電性が低下する事が良く知られており、今回の計算は選択的な Ti 値数の低下に伴った Ti イオン半径の増大が電子ドープによる強誘電性の消失の原因の一つである事を示唆している。

我々はさらにドナー元素として Ti^{4+} を置換する Nb^{5+} と、酸素欠陥 (V_{O}^{2+}) を露わに含む 3 次元スーパーセルモデル (40–270 原子) の計算を行い電子ドープの計算結果と比較した。その結果、Cubic 相への相転移が生じるキャリア導入量は、 Nb^{5+} では $0.05e/\text{unit cell}$, V_{O}^{2+} では $0.06e/\text{unit cell}$ の値になり、元素置換による格子歪により強誘電性の消失が加速される事が示された。

固液界面計算に向けたプログラムの高速化

固液界面は触媒・析出・電気化学反応の舞台として基礎的な系であり、燃料電池や湿式ナノスケール構造作成、電気二重層キャパシタなどに代表されるように、応用上も重要な位置を占めている系である。また近年重要な進展があり、界面に生じる電気二重層を利用した電界誘起ドーピングという新たな手法

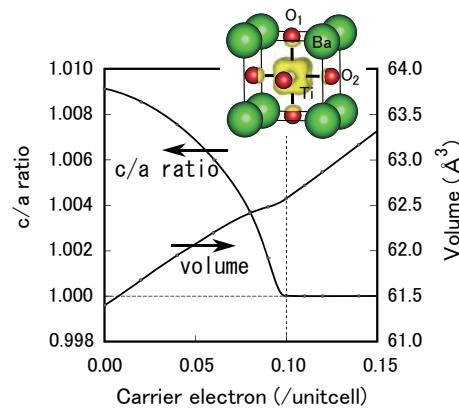


図 3.4.14: BaTiO_3 (Tetra 相) へのキャリアードープ量と c/a 比率、体積変化の関係。

によって、電界誘起超伝導転移を実現したという報告がなされている。その一方で、原子スケールでの現象理解は未だ不十分だといえる。

そこで電圧のかかった状態の固液界面を原子スケールで扱うために、有効遮蔽媒質法（ESM 法）を組み合わせた第一原理計算を試みた。固液界面を扱うには分子動力学による膨大なシミュレーションが必要であり、現行のプログラムでは、現実的な計算時間内にシステムの系統的なシミュレーションが困難である事がわかった。そこでスーパーコンピュータなどで性能を発揮するように MPI 及び OpenMP を用いて hybrid 並列化された第一原理計算コード xTAPP に ESM 法を実装し、ターゲットとしている固液界面の典型的なシステムサイズにかかる計算時間を大幅に短縮することに成功した。これにより現実的な時間で固液界面の計算が行えるようになった。

<受賞>

- [1] 岩崎誉志紀：最優秀賞，第 30 回エレクトロセラミックス研究討論会

<報文>

(原著論文)

- [2] Yoshiki Iwazaki, Toshimasa Suzuki, and Shinji Tsuneyuki, “Negatively charged hydrogen at oxygen-vacancy sites in BaTiO_3 : Density-functional calculation”, J. Appl. Phys. 108 (2010) 083705.
- [3] Y. Gohda and A. Oshiyama, “Stabilization Mechanism of Vacancies in Group-III Nitrides: Exchange Splitting and Electron Transfer”, J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 083705 (2010).
- [4] Y. Gohda and S. Tsuneyuki, “Two-dimensional intrinsic ferromagnetism at nitride-boride interfaces”, Phys. Rev. Lett. **106**, 047201 (2011).
- (会議抄録)
- [5] Y. Gohda and A. Oshiyama, “First-principles calculations on spin polarization of vacancies in nitride semiconductors”, AIP Conf. Proc., in press.

(国内雑誌)

- [6] 常行真司 「次世代ナノ情報機能・材料」, 計算工学 (特集「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」), Vol. 15, No.3, p.7 (2010).
- [7] 常行真司 「次世代ナノ複合材料グループ－次世代デバイスに向けたシミュレーション手法開発」, 計算工学 (特集「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」), Vol. 15, No.3, p.8 (2010).
- [8] 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」, セラミックス誌 (2011年6月号 特集 セラミックス計算材料設計の進展) 印刷中

(学位論文)

- [9] (修士論文) 越智正之 : "Efficient algorithm of the transcorrelated method for first-principles electronic structure calculation" (第一原理電子状態計算手法トランスクリレイティッド法の効率的アルゴリズム), 東京大学 (2011).

(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、印刷中).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [11] S. Tsuneyuki, S. Furuya, Y. Yoshimoto, 'Theoretical Study of a Strain-Induced Nanostructure at N/Cu(001) Surface', Tsinghua Week at Todai "The Frontier Science Workshop on Condensed Matter Physics and Nanoscience", The University of Tokyo, May 13, 2010.
- [12] M. Ochi, K. Sodeyama, R. Sakuma, and S. Tsuneyuki, "Transcorrelated method - an orbital optimization of Jastrow-Slater wave functions :- an efficient algorithm for this method", CECAM Workshop: "Quantum Monte Carlo meets Quantum Chemistry: new approaches for electron correlation", Lugano, Switzerland, Jun. 15-18, 2010.
- [13] S. Tsuneyuki, 'Atomistic Modeling of Materials Based on First-Principles Electronic Structure Calculation', Asian CMD Workshop in Indonesia, Institut Teknologi Bandung, July 22, 2010.
- [14] Y. Iwazaki, T. Suzuki, Y. Mizuno and S. Tsuneyuki: GGA+U calculations of oxygen vacancies in perovskite-type oxides, Fourth International conference on Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC-4), Yokohama, Japan, June 21, 2010
- [15] Y. Gohda and S. Tsuneyuki, "Interface atomic structures and electronic properties of group-III nitrides", Psi-k Conference 2010 (Berlin, Germany, Sep. 13, 2010).

- [16] Y. Ando, Y. Gohda, and S. Tsuneyuki: "First-Principles study of Schottky contact on SiON/SiC(0001)" Ψ_k -2010 Conference, Berlin Germany, Sep. 13, 2010.

- [17] M. Ochi, K. Sodeyama, R. Sakuma, and S. Tsuneyuki, "Excited states calculations with the transcorrelated+CIS (TCCIS) method for solids", Ψ_k -2010 Conference, Berlin, Germany, Sep. 12-16, 2010.

- [18] T. Tadano, Y. Gohda and S. Tsuneyuki: First-principles modeling of anharmonic lattice vibrations toward lattice thermal-conductivity calculations, Ψ_k -2010 Conference, Berlin, Germany, Sep. 14, 2010.

- [19] T. Tadano, Y. Gohda and S. Tsuneyuki: Lattice thermal conductivity with first-principles anharmonic lattice model, 2011 APS March Meeting, Dallas, TX, USA, Mar. 21, 2011.

- [20] Y. Gohda and S. Tsuneyuki, "Intrinsic ferromagnetism at AlN-MgB₂ interfaces", 2011 APS March Meeting, (Dallas, TX, USA, Mar. 22, 2011).

招待講演

- [21] S. Tsuneyuki, 'First-principles modeling of the electronic structure of proteins', COE Start-up International Workshop "Organic Semiconductors towards the next", Chiba University, Nov. 11, 2010.

(国内会議)

一般講演

- [22] 越智正之, 袖山慶太郎, 佐久間怜, 常行真司:「Transcorrelated+CIS (TCCIS) 法による光吸収スペクトルの第一原理計算」, 特定領域研究「光一分子強結合反応場の創成」および新学術領域研究「半導体における動的相関電子系の光科学」合同シンポジウム, 日本科学未来館 (東京), 2010年5月 27-28日.

- [23] 小堀知輝, 袖山慶太郎, 常行真司, 館山佳尚:「FMO 法に基づく三体項を導入した電子状態計算手法の開発」, 分子科学討論会, 大阪, 2010年9月 14-15日

- [24] 常行真司「第一原理分子動力学法による構造サンプリングと非平衡ダイナミクス」, 科研費新学術領域研究「コンピュータイ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」キックオフ・ミーティング (東京大学), 2010年9月 17日.

- [25] 常行真司「相関波動関数を用いた固体の電子状態計算」, 日本物理学会 2010年秋季大会シンポジウム「精密電子状態計算の現状と展望」, 大阪府立大学, 2010年9月 23日.

- [26] 只野 央将, 合田 義弘, 常行 真司:「第一原理非調和格子モデルによる格子熱伝導率計算」, 日本物理学会 2010年秋季大会, 大阪府立大学 (堺市), 2010年9月 26日.

- [27] 岩崎誉志紀、常行真司:「ペロブスカイト酸化物中ににおける水素複合欠陥の第一原理計算」, 第8回水素量子アモニクス研究会, 松山市 (愛媛), 2010年10月 27日

- [28] 岩崎 誉志紀、鈴木 利昌、水野 洋一、常行 真司：「ペロブスカイト型酸化物中におけるドナー欠陥/不純物の第一原理計算」，第30回エレクトロセラミックス研究討論会，東京理科大学・森戸記念館（東京），2010年10月29日。
- [29] 小堀 知輝、袖山 慶太郎、常行 真司、館山 佳尚：「FMO-LCMO法による生体系分子の電子状態解析」，計算物質科学の課題と展望，柏，2011年1月5-7日
- [30] 常行 真司 「次世代スーパーコンピュータ戦略プログラム（分野2 新物質・エネルギー創成）」，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5回公開シンポジウム，甲南大学（神戸市），2011年2月22日。
- [31] 小堀 知輝、袖山 慶太郎、常行 真司、館山 佳尚：「FMO-LCMO法による生体系分子の電子状態解析」，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5回公開シンポジウム，甲南大学（神戸市），2011年2月22-23日。
- [32] 合田 義弘、常行 真司：「窒化物／ホウ化物界面のスピノ物性の第一原理計算」，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5回公開シンポジウム，甲南大学（神戸市），2011年2月22-23日。
- [33] 安藤 康伸、合田 義弘、常行 真司：“水／金属界面における電気二重層の第一原理計算”，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5回公開シンポジウム，甲南大学（神戸市），2011年2月22-23日。
- [34] 只野 央将、合田 義弘、常行 真司：「第一原理非調和格子モデルの構築と格子熱伝導率計算への応用」，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5回公開シンポジウム，甲南大学（神戸市），2011年2月22-23日。
- [35] 越智正之、袖山 慶太郎、佐久間 恵、常行 真司：「トランスクオリレイティッド法の固体の電子状態計算における諸性質：計算量、収束性、並列性」，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5回公開シンポジウム，甲南大学（神戸市），2011年2月22-23日。
- [36] 岩崎 誉志紀、鈴木 利昌、水野 洋一、常行 真司：「ドナー元素ドープによる BaTiO₃ の強誘電性消失に関する第一原理計算」，日本セラミックス協会2011年年会，静岡市（静岡），2011年3月16日
- [37] 安藤 康伸、合田 義弘、常行 真司：“固液界面の電気二重層に関する第一原理計算” 日本物理学会年次大会，新潟大学（新潟），2011年3月28日。
- [38] 合田 義弘、常行 真司：「第一原理計算による窒化物／ホウ化物界面のスピノ物性」 日本物理学会第66回年次大会 新潟大学（新潟市）2011年3月28日
- [39] 只野 央将、合田 義弘、常行 真司：「第一原理に基づく非調和格子モデルの開発と熱伝導率計算への応用」，日本物理学会第66回年次大会，新潟大学（新潟市），2011年3月28日。
- [40] 越智正之、常行 真司：「トランスクオリレイティッド法による固体の第一原理計算：擬分散最小化に基づくジャストロウ因子の最適化」，日本物理学会第66回年次大会，新潟大学（新潟），2011年3月25-28日。
- 招待講演
- [41] 常行 真司「次世代スーパコンと環境エネルギー材料研究」，理研・第20回理事長ファンデークショップ（浜名湖ロイヤルホテル），2010年5月29日。
- [42] 常行 真司「次世代スーパコン計画と計算物質科学の挑戦」，東北大学金属材料研究所研究会（東北大学），2010年7月26日。
- [43] 常行 真司「次世代スーパコン戦略機関と第一原理電子状態計算の挑戦の課題」，CMD ワークショップ（大阪大学），2010年9月10日。
- [44] 常行 真司「計算物質科学の振興と発展に向けて」，計算物質科学シンポジウム，東京大学，2010年9月30日。
- [45] 常行 真司「『京』は計算物質科学をどう変えるか？」，次世代スーパーコンピューティング・シンポジウムおよび第1回戦略プログラム5分野合同ワークショップ（ニチイ学館神戸ポートアイランドセンター），2011年1月17日。
- [46] 常行 真司「計算物質科学イニシアティブ（CMSI）について」，計算分子科学拠点第1回研究会（岡崎コンファレンスセンター），2011年2月5日。
- [47] 常行 真司「FMO-LCMO法：フラグメント分子軌道を用いたタンパク質の全系電子状態計算」，計算分子科学拠点第1回研究会（岡崎コンファレンスセンター），2011年2月5日。
- [48] 常行 真司（基調講演），「新物質・エネルギー創成」次世代スーパコン産官学連携シンポジウム，2011年2月7日。
(セミナー)
- [49] Yoshiki Iwazaki : 「Theoretical Study of Defect induced Electronic and Structural Properties in Perovskite-type Oxides」，NIMS-CMSセミナー，物質・材料研究機構（つくば市），2011年2月3日
- [50] Y. Gohda, “Itinerant two-dimensional ferromagnetism at nitride-boride interfaces”, Open seminar of the Nano-system group, AIST, Tsukuba, Japan, Feb. 18, 2011.

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、スピンドル依存伝導、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オトン・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年余りにわたり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”的起源についても、超伝導機構解明に匹敵する研究が行われてきたが、解明に至っていない。我々は、電子状態の有力な研究手段であるARPESを用いてこれらの問題を調べている。さらに、近年発見された鉄化合物高温超伝導はより複雑な電子構造を持つが、これらについても超伝導機構の解明を目指してARPES実験をおこなっている。

多層型銅酸化物超伝導体の大きな超伝導ギャップと高い T_c

銅酸化物高温超伝導体の超伝導臨界温度 (T_c) は隣接する CuO_2 面の数に大きく依存し、3層で最大値をとる。我々は、3層系超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ 最適ホールドープ試料のARPE測定を行い、3層の内側 CuO_2 面と外側 CuO_2 面のフェルミ面と超伝導ギャップを分離して観測することに成功した。外側 CuO_2 面は過剰ドープで通常の超伝導ギャップを、内側 CuO_2 面は不足ドープのため所謂“2ギャップ”的振る舞いを示した。いずれも、高い T_c に対応してギャップは大きく、特に内側 CuO_2 面のギャップの大きさはこれまで観測してきたもののうちでも最大級であった。過剰ドープ面と不足ドープ面のそれぞれ

は最適ドープに程遠く、高い T_c が望めないにもかかわらず、両者間の何らかの相互作用により高い T_c が実現していると考えられる [6]。

ホールドープ、電子ドープの両方が可能な銅酸化物高温超伝導体

銅酸化物の高温超伝導は、反強磁性絶縁体にホールまたは電子をキャリアーとしてドープすることによって実現するが、ホールドープ型超伝導体と電子ドープ型超伝導体は異なる物質系であったため、ホール・ドープ状態から電子ドープ状態に移る際の電子の化学ポテンシャルの飛びなど、基本的な性質を測定できなかった。最近、ホールも電子もドープできる銅酸化物 $\text{Y}_{1-z}\text{La}_z(\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x)_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ が合成され、我々はこの物質の内殻準位の光電子分光測定から、化学ポテンシャルの飛びを初めて直接観測した。有限の飛びの存在は動的平均場理論 (DMFT) の予想と異なる。飛びの大きさは、これまでギャップの大きさとされてきた光学ギャップの約半分で、バンドギャップが間接型であることが示された [7]。

鉄化合物高温超伝導体における3次元的なフェルミ面

鉄化合物高温超伝導体の電子構造は、その層状結晶構造から、初期の研究では2次元的なものと仮定され、2次元電子構造に基づいた理論的研究が多く行われて来た。我々は様々な光エネルギーを用いて光電子分光を行い、バンド構造・フェルミ面を3次元運動量空間内で調べ、3次元性の強いバンド分散・フェルミ面を見出した。特に、電子数を変えずに反強磁性相から超伝導相をカバーでき、超伝導ギャップにノードが存在することが見つかっている $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ について、電子フェルミ面とホールフェルミ面のネスティングが3次元性のために悪化することを見出し、これが超伝導ギャップにノードが現れる原因のひとつであることを提唱した [15]。

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、半導体に遷移金属原子をドープした希薄磁性半導体、100%スピントリニクスの作る極薄膜・界面は、従来のエレクトロニクスにスピントリニクスの自由度を導入した“スピントロニクス”的な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、通常の磁気測定では得られない元素選択的磁性・局所的磁性をXMCDを用いて調べている。

磁気トンネル接合 $\text{Co}_2\text{MnGe}/\text{MgO}$ 界面の元素選択磁性

強磁性金属の間に絶縁体を挟んだ磁気トンネル結合素子は、その巨大な磁気抵抗効果を利用した磁気記録の読み取りヘッドなどへの応用が始まっている。強磁性金属にハーフメタルを用れば、磁気抵抗比を限りなく向上させることができるはずだが、実際は有限にとどまっている。その理由を解明するために、ハーフメタル Co_2MnGe と MgO 界面の Co, Mn 原子の磁気モーメントを XMCD により調べた。 MgO と接することによって Co, Mn は酸化されないが、 Co が過剰な場合、 Co のモーメントが増加することを見出し、逆にフェルミ準位付近のスピン分極は低下していることが示唆された。[12]。

室温強磁性体 $\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$ 薄膜の内部と表面の磁性

室温強磁性体 $\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$ (ルチル型結晶構造) の強磁性の起源を調べるために、 Co 内殻吸収の XMCD 測定を行った。これまでに表面敏感な電子収量測定により得られていた Co の磁気モーメントが磁化測定より一桁小さいのに比べ、バルク敏感な蛍光収量測定により得られた磁気モーメントの大きさは磁化測定の値とほぼ一致した。このことは、厚さ数 nm の表面層で磁化が消えていることを示している。磁化が消える原因として、表面におけるキャリアー濃度の減少が考えられた [16]

<受賞>

- [1] 吉田鉄平：第 5 回日本物理学会若手奨励賞（2010 年 11 月）。
- [2] 西一郎：理学系研究奨励賞（2011 年 3 月）。
- [3] 鈴木博人：理学部学修奨励賞（2011 年 3 月）。

<新聞紹介記事>

- [4] 「高温超電導体を解析-電力効率化に期待：広島大 大学院助教らチーム」中国新聞，11 月 22 日

<報文>

(原著論文)

- [5] K. Yoshimatsu, T. Okabe, H. Kumigashira, S. Okamoto, S. Aizaki, A. Fujimori, and M. Oshima: Dimensional-crossover-driven metal-insulator transition in SrVO_3 ultrathin films, Phys. Rev. Lett. **104**, 147601–1–4 (2010).
- [6] S. Ideta, K. Takashima, M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, H. Anzai, T. Fujita, Y. Nakashima, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Ono, M. Kubota, D. H. Lu, Z.-X. Shen, K. M. Kojima, and S. Uchida: Enhanced superconducting gaps in the tri-layer high-temperature $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ cuprate superconductor, Phys. Rev. Lett. **104** 227001–1–4, (2010); arXiv:0905.1223.

- [7] M. Ikeda, M. Takizawa, T. Yoshida, A. Fujimori, K. Segawa, and Y. Ando: Chemical potential jump between the hole-doped and electron-doped sides of ambipolar high- T_c cuprate superconductors, Phys. Rev. B **82**, 020503(R)–1–4 (2010); arXiv:1001.0102.
- [8] T. Yoshida, M. Hashimoto, T. Takizawa, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, and H. Eisaki: Mass renormalization in the band width-controlled Mott-Hubbard systems SrVO_3 and CaVO_3 studied by angle-resolved photoemission spectroscopy, Phys. Rev. B **82**, 085119–1–5 (2010); arXiv:1003.2269.
- [9] T. Kataoka, Y. Yamazaki, Y. Sakamoto, A. Fujimori, A. Tanaka, S. K. Mandal, T. K. Nath, D. Karmakar, and I. Dasgupta: Surface- and bulk-sensitive x-ray absorption study of the valence states of Mn and Co ions in $\text{Zn}_{1-2x}\text{Mn}_x\text{Co}_x\text{O}$ nanoparticles, Appl. Phys. Lett. **96**, 252502–1–7 (2010).
- [10] N.L. Saini, B. Joseph, A. Iadecola, T. Mizokawa, A. Fujimori, and T. Ito: Photoemission study of $\text{La}_{8-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_8\text{O}_{20}$: Impact of the charge and spin density waves on the electronic structure, J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 114718 (2010).
- [11] J. Okamoto, D.J. Huang, K. S. Chao, S.W. Huang, C.-H. Hsu, A. Fujimori, A. Masuno, T. Terashima, M. Takano, and C.T. Chen: Quasi-two-dimensional d -spin and p -hole ordering in a three-dimensional Fe perovskite $\text{La}_{1/3}\text{Sr}_{2/3}\text{FeO}_3$, Phys. Rev. B **82**, 132402–1–4 (2010).
- [12] D. Asakura, T. Koide, S. Yamamoto, K. Tsuchiya, T. Shioya, K. Amemiya, V.R. Singh, T. Kataoka, Y. Yamazaki, Y. Sakamoto, A. Fujimori, T. Taira, and M. Yamamoto: Magnetic states of Mn and Co atoms at $\text{Co}_2\text{MnGe}/\text{MgO}$ interfaces seen via soft x-ray magnetic circular dichroism study, Phys. Rev. B **82**, 184419–1–8 (2010).
- [13] H. Anzai, A. Ino, T. Kamo, T. Fujita, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, A. Fujimori, Z.-X. Shen, M. Ishikado, and S. Uchida: Energy-dependent enhancement of the electron-coupling spectrum of the underdoped $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ superconductor, Phys. Rev. Lett. **105**, 227002–1–4 (2010).
- [14] R.-H. He, X.J. Zhou, M. Hashimoto, T. Yoshida, K. Tanaka, S.-K. Mo, T. Sasagawa, N. Mannella, W. Meivasana, H. Yao, E. Berg, M. Fujita, T. Adachi, S. Komiya, S. Uchida, Y. Ando, F. Zhou, Z.X. Zhao, A. Fujimori, Y. Koike, K. Yamada, S.A. Kivelson, Z. Hussain and Z.-X. Shen: Doping dependence of the (π, π) shadow band in La-based cuprates studied by angle-resolved photoemission spectroscopy, New J. Phys. **13**, 013031–1–14 (2011); arXiv:0911.2245.
- [15] T. Yoshida, I. Nishi, S. Ideta, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, S. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima, Y. Matsuda, H. Ikeda, and R. Arita:

- Two-dimensional and three-dimensional Fermi surfaces of superconducting $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ and their nesting properties revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 117001-1-4 (2011); arXiv:1008.2080.
- [16] V.R. Singh, Y. Sakamoto, T. Kataoka, M. Kobayashi, Y. Yamazaki, A. Fujimori, F.-H. Chang, D.-J. Huang, H.-J. Lin, C.T. Chen, H. Toyosaki, T. Fukumura, and M. Kawasaki: Bulk and surface magnetization of Co atoms in rutile $\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$ thin films revealed by x-ray magnetic circular dichroism, *J. Phys. Condens. Mat.* **23**, 176001-1-5 (2011); arXiv:1103.6092.
- [17] Y. Yamazaki, T. Kataoka, V.R. Singh, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, K. Ishikawa, K. Zhang, and S. Kuroda: Effect of co-doping of donor and acceptor impurities in the ferromagnetic semiconductor $\text{Zn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Te}$ studied by soft x-ray magnetic circular dichroism, *J. Phys. Condens. Mat.* **23**, 176002-1-4 (2011); arXiv:1103.4917.
- (会議抄録)
- [18] S. Ideta, K. Takashima, M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, H. Anzai, T. Fujita, Y. Nakashima, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Ono, M. Kubota, D. H. Lu, Z.-X. Shen, K.M. Kojima, and S. Uchida: Angle-resolved photoemission study of the tri-layer high- T_c superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$: Effects of inter-layer hopping, *Proceedings of 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S-IX)*; *Physica C* **470**, S14-S16 (2010).
- (総説, 解説, その他)
- [19] 出田真一郎: 角度分解光電子分光による $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{TM}_x)_2\text{As}_2$ ($\text{TM} = \text{Ni}, \text{Cu}$) のフェルミ面観測 (年会・合同シンポジウム学生発表賞審査結果), 放射光学会誌 **24**, 95 (2011).
- (学位論文)
- [20] 山崎陽: X-ray magnetic circular dichroism study of the diluted magnetic semiconductor $\text{Zn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Te}$ (修士論文).
- [21] 西一郎: Angle-resolved photoemission study of the iron-based superconductors PrFeAsO_{1-y} and $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x},\text{P}_x)_2$ (修士論文).
- [22] 植村涉: Electron-doped high-temperature superconductors $\text{Y}_{1-z}\text{La}_z(\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x)_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ and $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ studied by photoemission spectroscopy (修士論文).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [23] A. Fujimori: Photoemission spectroscopy of electronically reconstructed and epitaxially strained oxide thin films, *Inter-phase: Novel Electronic States at Interfaces in Oxides* (Lorentz Centeer, Leiden, April 26-29, 2010).
- [24] A. Fujimori: Fermiology and core-level spectroscopy of strained and electronically reconstructed oxide thin films, *9th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2010)* (Fudan University, Shanghai, May 23-28, 2010).
- [25] A. Fujimori: Photoemission spectroscopy and the electronic structure of diluted magnetic semiconductors, *International Conference on Core Research and Engineering Science of Advanced Materials* (Osaka University, May 30-June 4, 2010).
- [26] A. Fujimori: XMCD characterization of high- T_C diluted magnetic semiconductors, *ibid.*
- [27] A. Fujimori: Photoemission spectroscopy of perovskite-type oxides under epitaxial strain, *12th International Ceramics Congress (CIMTEC 2010)* (Montecatini Terme, Italy, June 6-11, 2010)
- [28] A. Fujimori: Fermiology and core-level spectroscopy of oxide thin films under epitaxial strain, *2010 Villa Conference on Complex Oxide Heterostructures (VCCOH-2010)* (Santorini, Greece, June 14-18, 2010).
- [29] A. Fujimori: Fermiology and core-level spectroscopy of strained and electronically reconstructed oxide thin films, *2nd APCTP-IACS Joint Conference, International Conference on Physics of Novel Oxide Materials* (APCTP, Pohang, July 15-17, 2010).
- [30] A. Fujimori: Fermiology of Fe pnictide superconductors by ARPES, *International Conference on Quantum Phenomena in Complex Matter (Superstripes 2010)* (Erice, Italy, July 20-24, 2010).
- [31] A. Fujimori: Three-dimensional electronic structure of Fe pnictides, *Recent Progress on Spectroscopies and High- T_c Superconductors* (Tohoku University, August 9-11, 2010).
- [32] A. Fujimori: Heterostructures of transition metal oxides, *5th Windsor Summer School "Quantum Phenomena in Low-Dimensional Materials and Nanostructures"* (Windsor, August 9-21, 2010).
- [33] A. Fujimori: Local magnetic information in ferromagnetic thin films from x-ray magnetic circular dichroism, *International Conference on Magnetic Materials (ICMM-2010)* (Saha Institute for Nuclear Physics, Kolkata, October 25-29, 2010).
- [34] 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, *4th Indo-Japan Seminar on Electronic Structure of Novel Magnetic and Superconducting Materials* (Tokyo University, February 1-2, 2011).

- [35] A. Fujimori: Three-dimensional electronic structure of Fe pnictides, *11th Korea-Japan-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron System: 8th Workshop for A3 Foresight Program* (Jeju Island, Korea, February 10-12, 2011).
- [36] T. Yoshida: Three-dimensional Fermi surfaces and superconducting gap of iron pnictide superconductor, 第15回広島放射光国際シンポジウム（広島大学, 2011年3月3-4日）.
- [37] A. Fujimori: Three-dimensional electronic structure of Fe pnictide superconductors, *International Meeting on High-Accuracy, Hierarchical and Many-Body Schemes for Materials Simulations* (東大物工, 2011年3月10-11日) .
- [38] A. Fujimori: Three-dimensional electronic structure and superconductivity in Fe pnictides, *Study of Matter at Extreme Conditions (SMEC2011)* (Miami, March 27-April 2, 2011).
Three-dimensional Fermi surfaces and their nesting properties in the iron pnictide superconductor BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ stripes
- 一般講演
- [39] N. Kamakura, T. Okane, Y. Takeda, S. Fujimori, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, A. Fujita, S. Fujieda, and K. Fukamichi: Electronic structure of La(Fe_{0.88}Sio_{0.12})₁₃, *2010 MRS Spring Meeting* (San Francisco, April 6-8, 2010).
- [40] T. Yoshida, I. Nishi, A. Fujimori, M. Yi, R. Moor, D.-H. Lu, Z.-X. Shen, K. Kiho, P. M. Shirage, H. Kito, C.-H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, and H. Harima: Quasi-particle band dispersion and Fermi surfaces of the iron pnictides superconductor KFe₂As₂, *9th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2010)* (Shanghai, May 23-25, 2010).
- [41] S. Ideta, T. Yoshida, M. Hashimoto, A. Fujimori, H. Anzai, T. Fujita, Y. Nakashima, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Ono, M. Kubota, D. H. Lu, Z.-X. Shen, K. Takashima, K. M. Kojima, and S. Uchida: Relationship between the Fermi arc length, energy gap, and superconducting transition temperature in the high- T_c cuprate superconductors observed by ARPES, *ibid*.
- [42] I. Nishi, W. Malaeb, T. Yoshida, A. Fujimori, Y. Kotani, M. Kubota, K. Ono, M. Yi, D. H. Lu, R. Moore, Z.-X. Shen, M. Ishikado, A. Iyo, K. Kihou, H. Kito, H. Eisaki, S. Shamoto, and R. Arita: Angle-resolved photoemission study of PrFeAsO_{1-y}, *ibid*.
- [43] V. K. Verma, V. R. Singh, K. Ishigami, T. Kataoka, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.-J. Huang, C.T. Chen, S. Jana, S. Ray, Niladri, S. Karan, S. Jana, and N. Pradhan: Room temperature ferromagnetism in dilute magnetic semiconductor Mn doped ZnS nanoparticles, *International Conference on Core Research and Engineering Science of Advanced Materials* (Osaka University, May 30-June 4, 2010).
- [44] K. Yoshimatsu, H. Kimigashira, A. Fujimori, and M. Oshima: *In situ* angle-resolved photoemission study on SrRuO₃ thin films, *37th International conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics (VUVX-37)* (Vancouver, July 11-16, 2010).
- [45] K. Yoshimatsu, E. Sakai, H. Kimigashira, A. Fujimori, and M. Oshima: Fermi surface of SrRuO₃ thin films studied by soft x-ray angle-resolved photoemission spectroscopy, *17-th International Workshop on Oxide Electronics (WOE-17)* (Awaji, September 19-22, 2010).
- [46] J. Okabayashi, S. Toyoda, K. Ono, M. Oshima, and A. Fujimori: Temperature-dependent electronic structure of Ga_{1-x}Mn_xAs studied by photoemission spectroscopy, *6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VI)* (University of Tokyo, August 1-4, 2010).
- [47] S. 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 studied by core-level photoelectron spectroscopy, *International Conference on Heavy Electrons 2010 (ICHE2010)* (Tokyo Metropolitan University, September 17-20, 2010)
- [48] Y. Takeda, T. Okane, T. Ohkochi, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, A. Ochiai, E. Yamamoto, and Y. Haga: Electronic structure of uranium monochalcogenides UXC ($X = S, Se, Te$) as seen via soft x-ray photoemission spectroscopy, *ibid*.
- [49] T. Okane, T. Ohkochi, A. Yasui, I. Kawasaki, S.-i. Fujimori, Y. Takeda, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, Y. Matsumoto, N. Kimura, T. Komatsubara, and H. Aoki; Resonant angle-resolved photoemission study of substitutional solid solutions of CeRu₂Si₂, *ibid*.
- [50] V.K. Verma, V.R. Singh, K. Ishigami, G. Shiba, A. Fujimori, T. Koide, T. Chakraborty, and S. Ray; X-ray absorption spectroscopy and x-ray magnetic circular dichroism study of Fe-doped BaTiO₃, *International Conference on Magnetic Materials (ICMM-2010)* (Saha Institute for Nuclear Physics, October 25-29, 2010).
- [51] S. Ideta, T. Yoshida, 4, I. Nishi, A. Fujimori, H. Kotani, M. Arita, K. Ono, Y. Nakashima, M. Matsumoto, T. Sasagawa, and R. Arita: Three dimensional Fermi surfaces of iron-based superconductor Ba(Fe_{1-x}Ni_x)₂As₂ observed by ARPES, *JSPS A3 Foresight Program Autumn School for Young Scientists* (Kyoto, November 7-11, 2010).
- [52] I. Nishi, M. Ishikado, 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 $\text{PrFeAsO}_{0.7}$: Pnictogen height dependence of the electronic structure, *ibid.*
- [53] K. Ishigami, K. Yoshimatsu, M. Takizawa, H. Kumigashira, M. Oshima, T. Yoshida, and A. Fujimori: Soft x-ray photoemission study of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ thin films, *ibid.*
- [54] Y. Yamazaki, T. Kataoka, V.R. Singh, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, K. Ishikawa, K. Zhang, and S. Kuroda: Soft x-ray magnetic circular dichroism study of the diluted magnetic semiconductor $\text{Zn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Te}$, *ibid.*
- [55] W. Uemura, S. Ideta, I. Nishi, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Segawa, and Y. Ando: Angle-resolved photoemission spectroscopy study of hole-doped and electron-doped cuprate $\text{Y}_{1-z}\text{La}_z(\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x)_2\text{Cu}_3\text{O}_y$, *ibid.*
- [56] V.R. Singh, T. Kataoka, Y. Yamazaki, V.K. Verma, G. Shibata, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.-J. Huang, C.T. Chen, Y. Yamada, T. Fukumura and, M. Kawasaki: Carrier-induced ferromagnetism of cobalt-doped anatase TiO_2 thin films studied by soft x-ray magnetic circular dichroism, *4th Indo-Japan Seminar on Electronic Structure of Novel Magnetic and Superconducting Materials* (Tokyo University, February 1-2, 2011).
- [57] A. Fujimori: Three-dimensional electronic structure and superconductivity in Fe pnictides, *ibid.*
- [58] V.R. Singh, K. Ishigami, Y. Yamazaki, V.K. Verma, A. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, Y. Nakamura, M. Azuma, and Y. Shimakawa: X-ray absorption spectroscopy and x-ray magnetic circular dichroism investigations of Co-doped BiFeO_3 films, *ibid.*
- [59] V.K. Verma, V.R. Singh, K. Ishigami, Y. Yamazaki, G. Shibata, T. Kadono, A. Fujimori, T. Koide, S. Chattopadhyay, and T.K. Nath: Study of valence state and magnetic property of Fe in Fe-doped ZnO thin films, *ibid.*
- [60] S. Ideta, T. Yoshida, I. Nishi, A. Fujimori, M. Nakajima, H. Kotani, M. Kubota, K. Ono, Y. Nakashima, M. Matsuo, T. Sasagawa, K. Kihou, Y. Tomioka, C.H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Ito, S. Uchida, R. Arita: Electronic structure of the electron-doped iron-based superconductors $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{TM}_x)_2\text{As}_2$ ($\text{TM} = \text{Ni}, \text{Cu}$) observed by angle-resolved photoemission spectroscopy, *ibid.*
- [61] K. Yoshimatsu, M. Takizawa, H. Kumigashira, M. Oshima, T. Yoshida, and A. Fujimori: Soft x-ray photoemission study of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ thin films, *ibid.*
- [62] W. Uemura, S. Ideta, I. Nishi, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Segawa, and Y. Ando: Angle-resolved photoemission spectroscopy study of hole-doped and electron-doped cuprate $\text{Y}_{1-z}\text{La}_z(\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x)_2\text{Cu}_3\text{O}_y$, *ibid.*
- [63] I. Nishi, S. Ideta, T. Yoshida, A. Fujimori, S. Kasahara, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, M. Nakajima, S. Uchida, Y. Tomioka, T. Ito, K. Kihou, C. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, M. Kubota, K. Ono, H. Ikeda, and R. Arita: Composition dependence of Fermi surfaces in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, *ibid.*
- [64] G. Shibata, V.R. Singh, V.K. Verma, K. Ishigami, A. Fujimori, T. Koide, K. Yoshimatsu, E. Sakai, H. Kumigashira, and M. Oshima: Thickness dependence of the magnetic properties of $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ thin films studied by soft x-ray magnetic circular dichroism, *ibid.*
- [65] Y. Yamazaki, T. Kataoka, V.R. Singh, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, K. Ishikawa, K. Zhang, S. Kuroda: Soft x-ray magnetic circular dichroism study of the diluted magnetic semiconductor $\text{Zn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Te}$, *ibid.*
- [66] T. Yoshida, I. Nishi, S. Ideta, A. Fujimori, 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: Observation of the three-dimensional Fermi surfaces and the superconducting gaps in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, *11th Korea-Japan-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron System: 8th Workshop for A3 Foresight Program* (Jeju Island, Korea, February 10-12, 2011).
- [67] S. Ideta, T. Yoshida, I. Nishi, A. Fujimori, H. Kotani, M. Kubota, K. Ono, 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: Electronic structure of the iron-based superconductor $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{TM}_x)_2\text{As}_2$ ($\text{TM} = \text{Ni}, \text{Cu}$) observed by ARPES, *ibid.*
- [68] I. Nishi, S. Ideta, T. Yoshida, A. Fujimori, S. Kasahara, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, M. Nakajima, S. Uchida, Y. Tomioka, T. Ito, K. Kihou, C. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, M. Kubota, K. Ono, H. Ikeda, and R. Arita: Doping dependence of Fermi surfaces in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, *ibid.*
- [69] S. Ideta, T. Yoshida, T. Shimojima, W. Malaeb, M. Nakajima, A. Fujimori, 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: Out-of-plane momentum dependence of the superconducting gap in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ observed by angle-resolved photoemission spectroscopy, 第15回広島放射光国際シンポジウム(広島大学, 2011年3月3-4日).

- [70] T. Yoshida, I. Nishi, S. Ideta, A. Fujimori, M. Nakajima, S. Uchida, M. Kubota, K. Ono, S. Kasahara, T. Terashima, H. Ikeda, T. Shibauchi, Y. Matsuda, Y. Tomioka, T. Ito, K. Kihou, C. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, and R. Arita: Three-dimensional Fermi surfaces and superconducting gap of $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, *International Workshop on Novel Superconductors and Super Materials 2011 (NS220011)* (Miraikan, March 6-8, 2011).
- [71] S. Ideta, T. Yoshida, I. Nishi, M. Nakajima, S. Uchida, A. Fujimori, H. Kotani, M. Kubota, K. Ono, Y. Nakashima, M. Matsuo, T. Sasagawa, K. Kihou, Y. Tomioka, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Ito, and R. Arita: Electronic structure of the electron-doped $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{TM}_x)_2\text{As}_2$ ($\text{TM} = \text{Ni}, \text{Cu}$) observed by angle-resolved photoemission spectroscopy, *ibid.*
- [72] I. Nishi, S. Ideta, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Nakajima, S. Uchida, R. Arita, S. Kasahara, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, H. Ikeda, Y. Tomioka, T. Ito, K. Kihou, C. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, M. Kubota, and K. Ono: Composition dependence of Fermi surfaces in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, *ibid.*
- [73] Y. Takeda, T. Okane, T. Ohkochi, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, A. Ochiai, E. Yamamoto, and Y. Haga: Electronic structure of uranium monochalcogenides UX_C as seen via soft x-ray photoemission spectroscopy, *6-th Workshop on Speciation, Techniques, and Facilities for Radioactive Materials at Synchrotron Light Sources and Other Quantum Beam Sources (Actinide XAS 2011)* (Harima, March 2-4, 2011).
- (国内会議)
- 招待講演
- [74] 吉田鉄平: Correlated electronic structure of cuprate and iron-pnictide superconductors observed by ARPES, *Seminar for New Aspects of High- T_c Superconductivity from Cuprates to Fe-Based Superconductors* (小柴ホール, 2010年7月4日)
- [75] 吉田鉄平: KEK-PF BL-28 と他施設との比較 (ARPESを中心) ,ISSP ワークショップ「東京大学アウトステーション (SPring-8 BL-07LSU) での物性研究の新展開」(物性研, 3月8日)
- 一般講演
- [76] 吉田鉄平: $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の超伝導ギャップ, フェルミ面, TRIP 領域会議「物性」分科会 (JST, 2010年6月5日)
- [77] 竹田幸治, 岡根哲夫, 藤森淳, 斎藤祐児, 山上浩志, 大矢忍, ファムナムハイ, 田中雅明: 軟X線磁気二色性を用いた $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ の熱処理によるスピノン電子状態変化の研究, 2010年度スピノン流の創出と制御研究会 (京都大学化学研究所, 2010年6月23-25日)
- [78] V.R. Singh, V.K. Verma, K. Ishigami, D. Asakura, A. Fujimori, T. Koide, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.-J. Huang, C.T. Chen, T. Ishikawa, and M. Yamamoto: X-ray absorption spectroscopy and x-ray magnetic circular dichroism of epitaxial Co_2MnSi thin films with various Mn compositions facing an MgO barrier, 同上.
- [79] V.K. Verma, V.R. Singh, K. Ishigami, G. Shibata, A. Fujimori, T. Koide, T. Chakraborty and S. Ray: X-ray absorption spectroscopy and x-ray magnetic circular dichroism study of Fe-doped BaTiO_3 , 同上.
- [80] 吉田鉄平, 西一郎, 出田真一郎, 藤森淳, 笠原成, 寺嶋孝仁, 芝内孝禎, 松田祐司, 久保田正人, 小野寛太, 池田浩章, 有田亮太郎: $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ におけるフェルミ面の3次元構造, 日本物理学会秋季大会 (大阪府立大学, 2010年9月23-26日).
- [81] 出田真一郎, 吉田鉄平, 西一郎, 藤森淳, 久保田正人, 小野寛太, 小谷佳範, D.H. Lu, Z.-X. Shen, 有田亮太郎, 中島裕司, 笹川崇男: 角度分解光電子分光による $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ のフェルミ面と超伝導ギャップの観測, 同上.
- [82] 芝田悟朗, 石上啓介, V.R. Singh, V.K. Verma, 藤森淳, 小出常晴, 吉松公平, 組頭広志, 尾嶋正治: $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 薄膜の軟X線磁気円二色性の膜厚依存性, 同上.
- [83] V.R. Singh, K. Ishigami, Y. Yamazaki, V.K. Verma, A. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, Y. Nakamura, M. Azuma, and Y. Shimakawa: X-ray absorption spectroscopy and x-ray magnetic circular dichroism investigations of Co-doped BiFeO_3 films, 同上.
- [84] 吉松公平, 坂井延寿, 組頭広志, 藤森淳, 尾嶋正治: SrRuO_3 薄膜の軟X線角度分解光電子分光, 同上.
- [85] 鎌倉望, 岡根哲夫, 竹田幸治, 藤森伸一, 斎藤祐児, 山上浩志, 藤森淳, 藤田麻哉, 藤枝俊, 深道和明: $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$ の電子状態, 同上.
- [86] 藤森淳: 光電子スペクトルにおける電子相関効果の問題点—Cu酸化物、V酸化物、Fe砒素化物、新学術領域研究「コンピュータイクスによる物質デザイン」A03高田班・今田班合同研究会 (東大, 2010年11月16-17日)
- [87] S. Ideta, T. Yoshida, I. Nishi, A. Fujimori, H. Kotani, M. Kubota, K. Ono, Y. Nakashima, M. Matsuo, T. Sasagawa, and R. Arita: Electronic structure of iron-based superconductor $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{TM}_x)_2\text{As}_2$ ($\text{TM} = \text{Ni}, \text{Cu}$) observed by ARPES, 物構研シンポジウム'10—量子ビーム科学の展望— (つくば, 12月7-8日)
- [88] K. Yoshimatsu, E. Sakai, H. Kimigashira, A. Fujimori, and M. Oshima: Soft x-ray angle-resolved photoemission study on SrRuO_3 thin films, 同上.
- [89] Y. Yamazaki, T. Kataoka, V. R. Singh, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, K. Ishikawa, K. Zhang, and S. Kuroda: Effects of co-doping of donor and acceptor impurities in the ferromagnetic semiconductor $\text{Zn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Te}$

- studied by soft x-ray magnetic circular dichroism, 第15回半導体スピニ工学の基礎と応用 (PASPSS-15) (筑波大学, 2010年12月20-21日)
- [90] 藤森淳, 小出常晴, 竹田幸治: XMCDによる高スピニ偏極材料のキャラクタリゼーション, 2010年度スピニ流の創出と制御成果報告会 (東京大学, 2011年1月6-7日).
- [91] V.K. Verma, V.R. Singh, K. Ishigami, G. Shibata, A. Fujimori, T. Koide, S. Chattopadhyay, and T.K. Nath: X-ray absorption spectroscopy and x-ray magnetic circular dichroism study of Fe doped and Fe, Al co-doped ZnO thin films, 同上.
- [92] V.R. Singh, T. Kataoka, Y. Yamazaki, V. K. Verma, G. Shibata, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.-J. Huang, C.T. Chen, Y. Yamada, T. Fukumura, and M. Kawasaki: Carrier-induced ferromagnetism of cobalt-doped anatase TiO₂ thin films studied by soft x-ray magnetic circular dichroism, 同上.
- [93] 吉田鉄平, 西一郎, 出田真一郎, 藤森淳, 笠原成, 寺嶋孝仁, 芝内孝徳, 松田祐司, 久保田正人, 小野寛太, 池田浩章, 有田亮太郎: BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ の3次元フェルミ面の観測, 第24回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム (つくば, 2011年1月7-10日).
- [94] 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, 有田亮太郎, 中島裕司, 松尾明寛, 笹川崇男: 角度分解光電子分光による Ba(Fe_{1-x}Ni_x)₂As₂ のフェルミ面観測, 同上.
- [95] 芝田悟朗, 石上啓介, V.R. Singh, V.K. Verma, 藤森淳, 小出常晴, 吉松公平, 組頭広志, 尾嶋正治: La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃ 薄膜の軟X線磁気円二色性の膜厚依存性, 同上.
- [96] 吉松公平, 坂井延寿, 組頭広志, 藤森淳, 尾嶋正治: SrRuO₃ 薄膜の *in situ* 角度分解光電子分光, 同上.
- [97] 出田真一郎, 吉田鉄平, 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, 内田慎一: 角度分解光電子分光による Ba(Fe_{1-x}Cu_x)₂As₂ の電子構造観測, 日本物理学会第66回年次大会 (新潟大学, 2011年3月25-28日)
- [98] 西一郎, 出田真一郎, 吉田鉄平, 藤森淳, 笠原成, 寺嶋孝仁, 芝内孝徳, 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, 久保田正人, 小野寛太, 池田浩章, 有田亮太郎: BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ のバンド構造とフェルミ面の組成依存性, 同上.
- [99] 植村涉, 出田真一郎, 西一郎, 吉田鉄平, 藤森淳, 久保田正人, 小野寛太, 濑川耕司, 安藤陽: 両極ドープ系 Y_{1-z}La_z(Ba_{1-x}La_x)₂Cu₃O_y の角度分解光電子分光, 同上.
- [100] 吉田鉄平, 西一郎, 出田真一郎, 藤森淳, 笠原成, 寺嶋孝仁, 芝内孝徳, 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, 久保田正人, 小野寛太, 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観測, 同上.
- [101] V.K. Verma, V.R. Singh, K. Ishigami, Y. Yamazaki, G. Shibata, T. Kadono, A. Fujimori, T. Koide, S. Chattopadhyay, and T. K. Nath: X-ray absorption spectroscopy and x-ray magnetic circular dichroism study of Fe doped ZnO thin films, 同上.
- [102] 芝田悟朗, 門野利治, V.R. Singh, V.K. Verma, 石上啓介, 藤森淳, 小出常晴, 吉松公平, 坂井延寿, 組頭広志, 尾嶋正治: La_{0.6}Sr_{0.4}MnO₃ 薄膜の軟X線磁気円二色性・線二色性の膜厚依存性, 同上.
- [103] 竹田幸治, 岡根哲夫, 藤森淳, 斎藤祐児, 山上浩志, 大矢忍, ファムナムハイ, 田中雅明: 軟X線磁気円二色性による希薄磁性半導体 Ga_{1-x}Mn_xAs の熱処理前後におけるスピニ電子状態変化の研究, 同上.
- [104] 藤森伸一, 川崎郁斗, 保井晃, 竹田幸治, 岡根哲夫, 斎藤祐児, 山上浩志, 藤森淳, 菅井孝志, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 大貫博睦: 角度分解光電子分光による URhGe, UCoGe の電子状態, 同上.
- セミナー他
- [105] A. Fujimori: X-ray magnetic circular dichroism studies of spintronics and multiferroic oxides (Indian Institute of Science, Bangalore, November 1, 2010).
- [106] A. Fujimori: Two- versus three-dimensional Fermi surfaces of Fe pnictide superconductors (Tata Institute for Fundamental Research, Mumbai, November 2, 2010).
- [107] A. Fujimori: Probing novel electronic phases at oxide interfaces (Tata Institute for Fundamental Research Colloquium, Mumbai, November 3, 2010).
- [108] 藤森淳: 銅系, 鉄系高温超伝導体の電子構造研究 (京都大学工学系研究科, 2011年2月24日).

4.2 内田研究室

研究室およびその活動の概要。

4.2.1 2010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つく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・フォノン自由度役割、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がわから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。

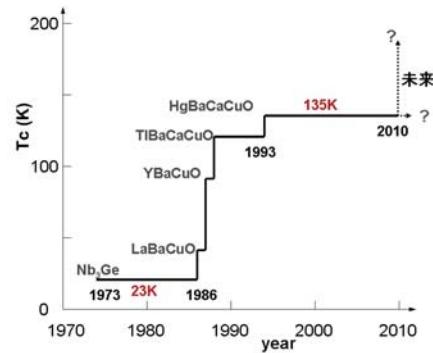


図 4.2.1: 超伝導体 T_c の上昇の歴史 (1973 年以降)

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。

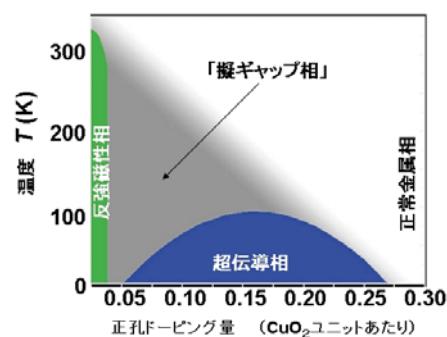


図 4.2.2: 高温超伝導体の電子相図

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、低ドープ域の、 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、スピング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と考えられる。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。

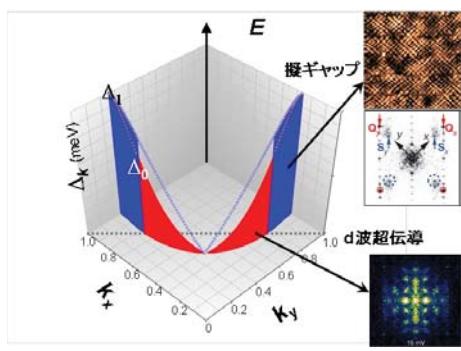


図 4.2.3: 超伝導相と擬ギャップ相の運動量空間における共存状態と擬ギャップ相の空間構造

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つてきた。(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れを示している。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見えるのである。 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 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えると考えられる。

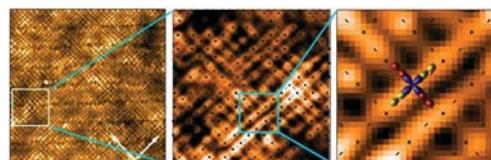


図 4.2.4: 「擬ギャップ相」励起がつくる空間電子密度変調パターン。明るい部分ほど密度が高い。空間分解能を上げていくと、黒くマークした銅原子に挟まれた左右、上下の位置で密度が異なっている。そこには酸素原子があり、酸素原子が電子的に非等価になっていることがわかる。

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つてきた。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つた。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拡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、銅酸化物と共に通点をもつ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。従つて、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である。但し、鉄の層は、分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ぬ。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。

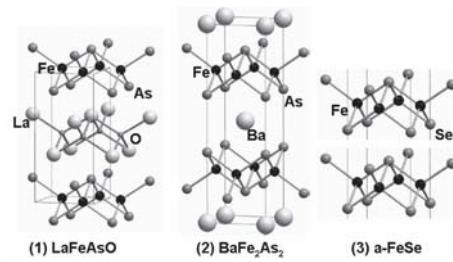


図 4.2.5: Fe系化合物の結晶構造

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ー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

キャリアーを散乱する物は、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ー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。

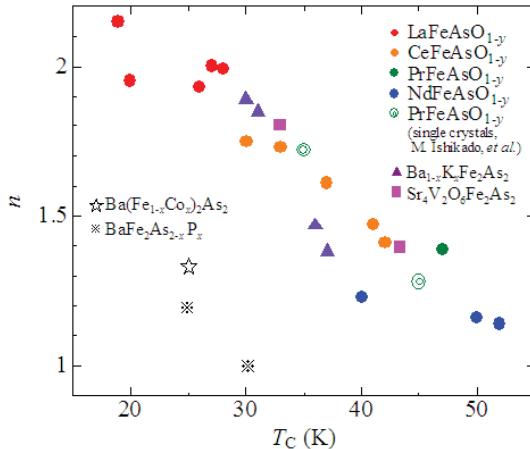


図 4.2.6: 様々な鉄系物質の電気抵抗率の温度依存性のベキ n と T_c の相関

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ーとボソンとの結合が強く、キャリアー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イングにより開く 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 0.1eV 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間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 3d 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

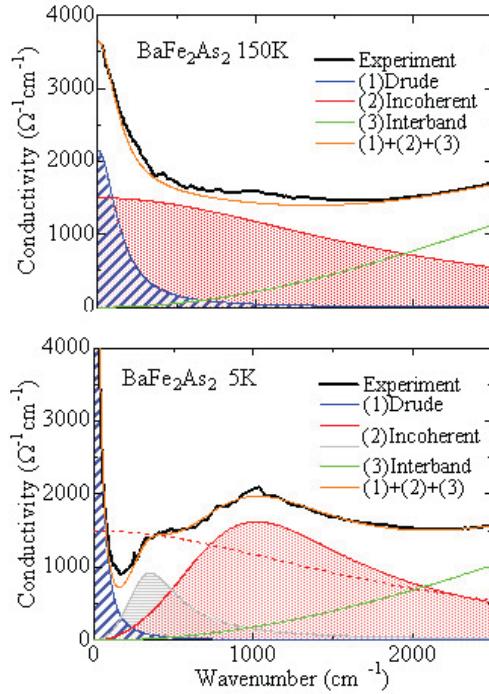


図 4.2.7: BaFe₂As₂ の光学伝導度スペクトルとその成分分解、磁気構造相転移温度 $T_s=140$ K でスペクトルは劇的に変化する。

ている。ドープ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 30K から 135K 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。

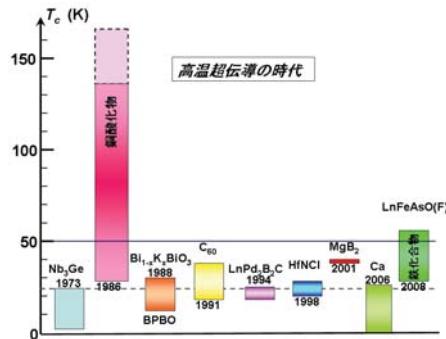


図 4.2.8: 1986 年以降に発見された高温超伝導体

 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、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi2212)を挙げると、 CuO_2 面の電子状態と T_c と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 Sr^{2+} のイオン半径が小さいために、Srサイトに Bi^{3+} 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($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$)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] Strong carrier-scattering in iron-pnictide superconductors LnFeAsO_{1-y} ($\text{Ln}=\text{La}$ and Nd) "obtained from charge transport experiments", S. Ishida, M. Nakajima, Y. Tomioka, T. Ito, K. Miyazawa, H. Kito, C. H. Lee, M. Ishikado, S. Shamoto, A. Iyo, H. Eisaki, K. M. Kojima, and S. Uchida, Phys. Rev. B 81, 094515 (2010).
- [2] Evolution of the optical spectrum with doping in $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ ", M. Nakajima, S. Ishida, K. Kihou, Y. Tomioka, T. Ito, Y. Yoshida, C. H. Lee, H. Kito, A. Iyo, H. Eisaki, K. M. Kojima, and S. Uchida, Phys. Rev. B 81, 104528 (2010).
- [3] "Doping-Dependent Nodal Fermi Velocity of the High-Temperature Superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Revealed Using High-Resolution Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy ", I. M. Vishik, W. S. Lee, F. Schmitt, B. Moritz, T. Sasagawa, S. Uchida, K. Fujita, S. Ishida, C. Zhang, T. P. Devereaux, and Z. X. Shen, Phys. Rev. Lett. 104, 207002 (2010).
- [4] Enhanced Superconducting Gaps in the Trilayer High-Temperature $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ Cuprate Superconductor", S. Ideta, K. Takashima, M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, H. Anzai, T. Fujita, Y. Nakashima, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Ono, M. Kubota, D. H. Lu, Z.-X. Shen, K. M. Kojima, and S. Uchida Phys. Rev. Lett. 104, 227001 (2010).
- [5] Intra-unit-cell electronic nematicity of the high- T_c copper-oxide pseudogap states", M. J. Lawder, K. Fujita, Jinhwan Lee, A.R. Schmidt, Y. Kohsaka, Chung Koo Kim, H. Eisaki, S. Uchida, J. C. Davis, J. P. Sethna, and Eun-Ah Kim, Nature 466, 347-351 (2010).
- [6] Experimental Observation of the Crystallization of a Paired Holon State", A. Rusydi, W. Ku, B. Schulz, R. Rauer, I. Mahns, D. Qi, X. Gao, A. T. S. Wee, P. Abbamonte, H. Eisaki, Y. Fujimaki, S. Uchida, and M. Rübhausen, Phys. Rev. Lett. 105, 026402 (2010).
- [7] "Energy-Dependent Enhancement of the Electron-Coupling Spectrum of the Under-doped $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Superconductor", H. Anzai, A. Ino, T. Kamo, T. Fujita, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, A. Fujimori, Z.-X. Shen, M. Ishikado, and S. Uchida, Phys. Rev. Lett. 105, 227002 (2010).
- [8] Quasiparticle dynamics in overdoped $\text{Bi}_{1.4}\text{Pb}_{0.7}\text{Sr}_{1.9}\text{Ca}\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$: Coexistence of superconducting gap and pseudogap below T_c ", Saritha K. Nair, X. Zou, Elbert E. M. Chia, J.-X. Zhu, C. Ponagopoulos, S. Ishida, and S. Uchida, Phys. Rev. B 82, 212503 (2010).
- [9] Angle-resolved photoemission study of the trilayer high- T_c superconductor", S. Ideta, K. Takashima, M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, H. Anzai, T. Fujita, Y. Nakashima, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Ono, M. Kubota, D. H. Lu, Z.-X. Shen, K. M. Kojima, and S. Uchida, Physica C 470(Suppl) 14-16 (2010).
- [10] Interlayer Josephson coupling in Hg-based multi-layered cuprates", Y. Hirata, K.M. Kojima, S. Uchida, M. Ishikado, A. Iyo, H. Eisaki, and S. Tajima, Physica C 470(Suppl) 44-46 (2010).
- [11] Crystal growth and characterization of T^* cuprate superconductor $\text{Nd}_{1.6-y}\text{Sr}_{0.4}\text{Ce}_y\text{CuO}_4$ ", T. Kakeshita, S. Adachi, and S. Uchida, Physica C 470(Suppl) 115-117 (2010).
- [12] Oxygen isotope effect in optimally doped $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$ studied by low-energy ARPES", H. Iwasawa, J.F. Douglas, K. Sato, T. Masui, Y. Yoshida, Z. Sun, H. Eisaki, H. Bando, A. Ino, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, S. Tajima, S. Uchida, T. Saitoh, D. S. Dessau, and Y. Aiura, Physica C 470(Suppl) 134-136 (2010).
- [13] Characteristic charge transport in oxygen-deficient-controlled LnFeAsO_{1-y} ($\text{Ln}=\text{La}$ and Nd)", S. Ishida, M. Nakajima, Y. Tomioka, T. Ito, K. Miyazawa, H. Kito, C. H. Lee, M. Ishikado, S.

- Shamoto, A Iyo, H. Eisaki, K. M. Kojima, and S. Uchida, *Physica C470(Suppl)* 324-325 (2010).
- [14] Optical reponse of Fe As-based compounds”, M. Nakajima, S. Ishida, K. Kihou, Y. Tomioka, T. Ito, C. H. Lee, H. Kito, A. Iyo, H. Eisaki, K. M. Kojima, and S. Uchida, *Physica C470(Suppl)* 326-327 (2010).
- [15] Spin-Density Wave near the Vortex Cores in the High-Temperature Superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$ ”, A. M. Mounce, S. Oh, S. Mukhopadhyay, W. P. Halperin, A. P. Reyes, P. L. Kuhns, K. Fujita, M. Ishikado, and S. Uchida, *Phys. Rev. Lett.* 106, 057003(2011).
(学位論文)
- [16] 平田靖透：多層の高温超伝導体の面間ジョセフソン結合（博士論文）
- [17] 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)
招待講義
- [18] S. Uchida, Charge transport in cuprates and iron-pnictides (The Korean Physical Society-Pioneering Symposium on Novel Superconducting Phenomena”, Daejeon, Korea, April 22, 2010).
- [19] S. Uchida, Summary Talk: Experimental Progress Reported at SNS 2010 (The 9th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors, Shanghai, China, May 28, 2010).
- [20] S. Uchida, Disorder and Superconductivity (A Seminar on New Aspects of High-Tc Superconductivity from Cuprates to Fe-Based Superconductors, Tokyo, Japan, July 03, 2010).
- [21] S. Uchida, Nematicity in cuprates and Fe-arsenides (The ICC-IMR International Workshop on Recent Progress in Spectroscopies and High-Tc Superconductors, Sendai, Japan, August 09, 2010).
- [22] S. Uchida, Anisotropic Optical Response of the Parent Compounds of Iron Pnictide (Super-PIRE-Reimei-MWN Joint Kickoff Meeting, Knoxville, USA, October 28, 2010).
- [23] S. Uchida, Electronic Anisotropy in Cuprates and Fe-Arsenides (The 9th Asia Pacific Workshop on Materials Physics, Hanoi, Vietnam, December 14, 2010).
- [24] S. Uchida, Role of In-Plane and Out-of-Plane Oxygen Atoms in High-Tc Cuprates (The 11th Korea-Japan-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron System/ The 8th Workshop for A3 Forecast Program, Jeju, Korea, February 11, 2011).
(国内会議)
一般講演
- [25] 中島正道, 梁田, 石田茂之, 木方邦宏, 富岡泰秀, 伊藤利充, 李哲虎, 鬼頭聖, 伊豫彰, 永崎洋, 掛下照久、内田慎一： BaFe_2As_2 における光学スペクトルの面内異方性日本物理学会 2010 年秋季大会, (九州大学, 2010 年 9 月 23 日) .
- [26] 梁田, 木方邦宏, 石田茂之, 中島正道, 富岡泰秀, 伊藤利充, 鬼頭聖, 伊豫彰, 李哲虎, 永崎洋, 内田慎一： BaFe_2As_2 単結晶の異方的物性日本物理学会 2010 年秋季大会, (九州大学, 2010 年 9 月 23 日) .
- [27] 石田茂之, 梁田, 中島正道, 木方邦宏, 富岡泰秀, 伊藤利充, 鬼頭聖, 伊豫彰, 李哲虎, 永崎洋, 掛下照久、内田慎一： AEFe_2As_2 (AE アルカリ土類金属元素) 単結晶の異方的物性 日本物理学会 2010 年秋季大会, (九州大学, 2010 年 9 月 23 日) .
- [28] 掛下照久, 金谷尚亮, 内田慎一: ストライプ相 $\text{La}_{2-x}\text{BaxCuO}_4$ (x -1/8) の電荷ダイナミクス日本物理学会 2010 年秋季大会, (九州大学, 2010 年 9 月 23 日) .
- [29] 西一郎, 出田真一郎, 吉田鉄平, 藤森淳, 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, 久保田正人, 小野寛太, 池田浩章, 有田亮太郎, : $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ のバンド構造とフェルミ面の組成依存性日本物理学会第 66 回年次大会 (新潟大学, 2011 年 3 月 26 日) .
- [30] 吉田鉄平, 西一郎, 出田真一郎, 藤森淳, 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, 久保田正人, 小野寛太, 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観測日本物理学会第 66 回年次大会 (新潟大学, 2011 年 3 月 26 日) .
- [31] 出田真一郎, 吉田鉄平, 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, 内田慎一: 角度分解光電子分光による $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Cu}_x)_2\text{As}_2$ の電子構造観測日本物理学会第 66 回年次大会 (新潟大学, 2011 年 3 月 26 日) .
- [32] 園部竜也, 下志万貴博, 坂野昌人, 大川万里生, ワリック・ドマラエブ, 富樫格, 渡部俊太郎, 辛埴, 中島正道, 石田茂之, 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 の電子状態の研究日本物理学会第 66 回年次大会 (新潟大学, 2011 年 3 月 26 日) .
- [33] 中島正道, 石田茂之, 梁田, 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□日本物理学会第 66 回年次大会 (新潟大学, 2011 年 3 月 26 日) .
- [34] 内田慎一, 石田茂之, 中島正道: 鉄系高温超伝導体の光学スペクトルと電気抵抗率、研究会 - 鉄系高温超伝導体研究の最前線 (上野 (東京)、2009 年 11 月 28 日)

4.3 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として上田洋一と山田学が新しくメンバーに加わった。3月には、植竹智哉、最首祐樹、坂本裕介が修士課程を修了して企業や官公庁に就職し、研究員であった保原麗も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、スピンドル・スピンドル流を明らかにし、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、スピンドル状態、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

トポロジカル表面状態の輸送特性

後述するように、トポロジカル絶縁体 Bi_2Te_3 に微量の Pb をドープすることによって真に絶縁体であるトポロジカル超薄膜 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Te}_3$ を作成できたので、その輸送特性を大気に曝すことなく in situ で測定した。このような in situ 電気伝導測定はこれまでに例がなく、他の測定例では常に大気暴露による表面電子状態の変化が問題となっている。Pb を混ぜない場合はやはり電気伝導が主にバルクキャリアによって担われていることが分かった。Pb の濃度を増やしていくと電気伝導度は減少し、バルクがフェルミ準位よりも上に行った $x = 0.14$ で電気伝導はほぼ一定になり、電子状態の変化と対応付けることによって表面状態のみの伝導度を導出することに成功した。測定された値は $0.5 \times (e^2/h)$ であり、理論が予言する单一ディラックコーンの電気伝導度とも良い一致を示し、確かに表面状態のみを測定できていることが裏付けられた。今後は電気伝導度の温度依存性および表面に不純物を吸着させた場合の振る舞いを調べる予定である。

Bi 超薄膜における電流誘起スピンドル偏極の検出

$\text{Bi}(111)$ の表面状態は大きなラシュバパラメータを持ち、ラシュバ分裂している事が実験的にも報告されている。このようなラシュバ分裂した系に電流を流すと電流と表面の両方に垂直な方向にスピンドル偏極することが理論的に予言されており、電流誘起スピンドル偏極と呼ばれている。しかし、電流誘起スピ

ン偏極は電気的に検出された報告はまだない。磁性体を電気伝導測定の探針として用いた場合、探針の磁化と試料中のスピンドルの向きとが平行か反平行化で測定される電位が変わり、相反定理が破れる。本研究で、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相反定理が破れることを確かめた。探針の配置に対する相反定理の破れの振る舞いは電流誘起スピンドル偏極によるものと矛盾せず、電流誘起スピンドル偏極を電気伝導測定から初めて実験的に検出する事に成功したと言える。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ある予定である。

強磁性共鳴による Bi のスピンドルホール効果測定

電荷の流れを伴わないスピンドルの流れ、いわゆる“純スピンドル”は低消費電力デバイス開発に向けて大きな注目を集めている。Rashba 効果によってスピンドル分裂したバンド構造を持つ表面状態は大きなスピンドル角（電流と生成されるスピンドル流との比）を示すことが理論的には期待されているが、実験的検証は皆無である。また表面状態以前にスピンドル軌道相互作用が大きい Bi に関しては、バルクのスピンドル角を同定した例はこれまでに知られていない。そこで本研究では超高真空中で作成した高品質 Bi 超薄膜を大気中でデバイス加工し、磁性体の強磁性共鳴を用いてスピンドルホール効果を測定した。Bi のスピンドル角は 1

温度可変型 4 探針 STM 装置による Si(111)-4 × 1-In 表面の電気伝導測定

擬 1 次元的表面は、その次元性から朝永-ラッティンジャー液体やパイエルス転移など興味深い物理現象の舞台となる。特に、Si(111)-4 × 1-In 表面構造は、In 原子の原子鎖が異方的に形成され、擬 1 次元金属的な電子状態をもつ表面として盛んに研究が行われている。この表面は、100 K 程度の低温において 8×2 -In 相への構造相転移と電荷密度波 (CDW) の形成を伴うパイエルス転移を起こし、金属-絶縁体転移を起こすことが知られている。

本研究室で開発を進めてきた温度可変型 4 探針 STM 装置での正方 4 探針測定法により、4 × 1-In 表面の電気伝導度の温度依存性を In 鎮に平行方向と垂直方向とをそれぞれ独立に測定することに成功した。その結果、In 鎮に垂直方向の電気伝導度は、下地 Si 基板の空間電荷層の電導度が支配的であり、平行方向は In 鎮自体の伝導度と下地の空間電荷層の伝導度の足し合わせたものとして測定されることが分かった。In 鎮の伝導度は測定された平行方向の伝導度から垂直方向の伝導度を差し引くことによって得られる。これにより、In 鎮の電気伝導度は約 110 Kにおいて電導度に金属-絶縁体転移による急激な減少が見られた。また、RHEED パターンの温度依存性からも 110 K 付近において 4 × 1 から 8 × 2 への転移が確認され、電気伝導度測定の結果と矛盾しない

結果が得られた。さらに、電導度測定から得られた転移後のバンドギャップの大きさは、光電子分光測定による結果とほぼ一致するものとなった。

4.3.2 表面ナノ構造

トポロジカル絶縁体 Bi_2Te_3 超薄膜への Pb ドープによるフェルミ準位制御

スピン軌道相互作用が強い物質において、バルクの方はバンドギャップが開いて絶縁体であるが、エッジ（表面）に金属的なディラックコーンが形成されるトポロジカル絶縁相が発現することがあり、昨今理論的に話題になっている。しかし実験的には単結晶バルクを用いると十分低温においても電気伝導度に起源が不明のバルク金属成分が残っているために、表面状態のみの特性を評価することに成功した例はない。我々は一貫してトポロジカル絶縁体を超薄膜にして表面のバルクに対する比を大きくしようと試みている。本年は 3 nm 厚の Bi_2Te_3 超薄膜を超高真空中で作成し、その電子状態を角度分解光電子分光法で調べた。Pb をドープしない膜はやはり Te 欠損により n 型にドープされていたが、Pb をドープすると確かにバルクバンドがフェルミ準位より上に動き、半導体になる。同時に分散の形が変化して孤立したディラック点を持つ理想的なディラックコーンが形成されることが明らかになった。（ロシアトムスク大学、スペインバスク大学との共同研究）

$\text{Si}(110)2 \times 5\text{-Au}$ 表面の原子構造解析及び欠陥密度の評価

$\text{Si}(110)2 \times 5\text{-Au}$ は理想的な擬 1 次元金属電子状態をもつことが報告されている。 $\text{Si}(111)4 \times 1\text{-In}$ 、 $\text{Si}(553)\text{-Au}$ 、 $\text{Si}(557)\text{-Au}$ など、過去に研究がなされてきた他の Si 結晶表面上の擬 1 次元金属系とは異なり、 $\text{Si}(110)2 \times 5\text{-Au}$ は原子鎖間の相関が弱く低温においてもペイエ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朝永-ラッティン ジャー液体の実現が期待できるられる。しかしこの系に関する研究報告は光電子分光や簡単な STM 観察のみであり、電気伝導測定はおろか原子構造の確定すらなされていない。そこで本研究では低温型 STM 装置を用いて、この系の表面モルフォロジーの原子分解能 STM 観察を行った。その結果、作成条件の制御からだけでは不可避な点欠陥が形成されることがわかった。今後は低温型独立駆動 4 探針 STM 装置を用いて $\text{Si}(110)-2 \times 5\text{-Au}$ の表面電気伝導度の異方性、温度依存性を測定し、その輸送機構を明らかにすることを目指す。

Co 薄膜の磁気異方性と表面構造

近年、学術的な興味のみならず産業応用面でもナノ物理学への期待が高まっており、特に（光）磁気ディスクに代表される低次元系磁気記録媒体の磁化特性評価が急務となっている。前年度に改良された磁気光学 Kerr 効果 (SMOKE) 測定装置はその目的に適うものである。本装置によって、異なる表面構造上に成長させた Co 超薄膜の磁気異方性が、Co の膜厚や試料作製温度、測定温度によって明確に異なることが明らかになった。本年度は、より詳細に条件を変えて SMOKE 測定を進め、得られた磁化特性と STM 観察による実空間の構造解析、RHEED (反射高速電子回折) による逆空間構造解析を結びつけて説明することを試みた。その結果として、 $\text{Si}(111)-7 \times 7$ 表面、 $\text{Ag}(111)$ 表面、 $\text{Si}(111)-\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Ag}$ 表面を基板にそれぞれ成長させた 2 原子層厚の Co 薄膜の磁気異方性と形状の異方度がコンシスティントに対応していること、ある膜厚を超えると Co が結晶性の変化を示し、保磁力の急激な増加をもたらすことなどが分かった（図 4.3.9 参照）。

4.3.3 新しい装置・手法の開発

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るが、その装置での最低到達温度は 10 K 程度である。また、最低到達温度が 1.8 K 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、新たにソープショットポンプ方式の冷却系を持ち、1 K 以下の極低温を保って超高真空中で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「サブケルビン・マイクロ 4 端子プローブ装置」の開発に着手した。本年度は（1）試料準備室、転換処理室、観測ヘッド、冷却系、排気系などの一連の真空・低温装置の設計・製作（2）測定値のばらつきの軽減を目指した測定回路の設計・製作（3）測定用ソフトウェアの作成を行い、4He を用いた冷却テストによってサンプル付近で最低到達温度 0.8 K を達成した。また、最高到達磁場 7 T も確認した。今後は（4）プローブのサンプルへの自動アプローチ機構を作成し、プローブの破壊や測定値のばらつきをさらに軽減させ、モノレイヤー超伝導の電気伝導や臨界磁場、近藤効果などの測定を行う予定である。

極低温 4 探針 STM 実証機の開発

4 K 以下の極低温での動作と、装置稼働率の向上、さらには集束イオンビーム (FIB) による加工、原子間力顕微鏡 (AFM) との複合による更なる先端的な応用計測手法の確立、また、長年の夢である遅延グリーン関数の実空間マッピングとモノレイヤー超

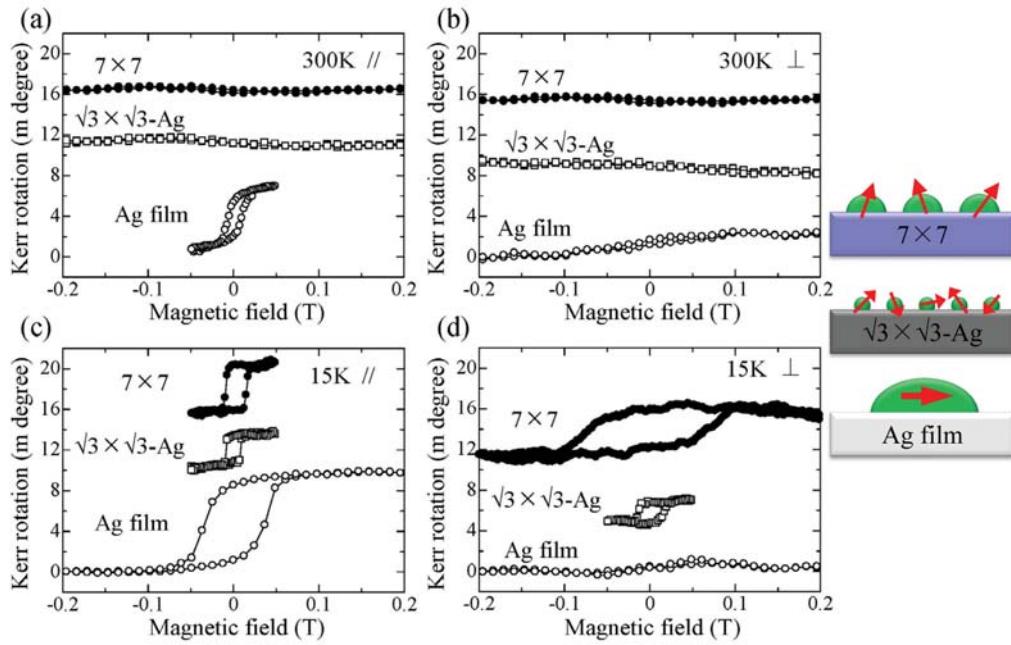


図 4.3.9: 3種類の基板表面上に成長させた2原子層厚のCo超薄膜の磁化ヒステリシス特性。基板はSi(111)- 7×7 表面、Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag表面、およびAg(111)表面である。(a)(c) 表面平行方向の磁化、(b)(d) 表面垂直方向の磁化。(a)(b) 300 K, (c)(d) 15 Kでの測定。模式図は3つの基板上でのCo薄膜のモルフォロジーと磁化を表している。

伝導の検出を狙い、極低温型4探針STM実証機の開発を□ユニソクと共同で行っている。本年度には、集束イオンビーム装置との結合が実現し、微細加工された表面・薄膜系の輸送特性の測定に着手した。また、2探針による同時トンネル分光測定が実現し、遅延グリーン関数の実測に一步近づいた。

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われました。記して感謝いたします。

- ・日本学術振興会 科研費 基盤研究A「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ドローブの開発とそれによる表面ラショバ系のスピントン流の研究」(代表 平原徹)
- ・科学技術振興機構先端計測分析技術・機器開発事業 プロトタイプ実証・実用化プログラム「マルチプローブ顕微鏡プローバーシステム」(代表 長村俊彦)

また、長谷川は今年度開催された下記の3つの国際会議のCo-chairmanを務めた。

- ・The 9th Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces, 2010年9月27-29日(Vladivostok, Russia).
- ・SSSJ-A3 Foresight Joint Symposium on Nanomaterials and Nanostructures, 2010年7月5-7日(東京大).

・Symposium on Surface and Nano Science 2011 (SSNS'11), 2011年1月19-22日(零石)。

<受賞>

- [1] 平原徹:(社)日本表面科学会 第20回(平成22年度) 奨励賞「ビスマス量子薄膜における表面状態による電気伝導」
- [2] 長谷川修司:(社)日本表面科学会 第15回(平成22年度) 学会賞「表面電気伝導と表面構造・電子状態との相関の研究」

<報文>

(原著論文)

- [3] S. Yamazaki, Y. Hosomura, I. Matsuda, R. Hobara, T. Eguchi, Y. Hasegawa, and S. Hasegawa: *Metallic Transport in a Monatomic Layer of In on a Silicon Surface*, Physical Review Letters **106**, 116802 (Mar, 2011).
- [4] N. Miyata, R. Hobara, H. Narita, T. Hirahara, S. Hasegawa, and I. Matsuda: *Development of surface magneto-transport measurement with micro-four-point probe method and the measurement of Bi nanofilm on Si(111)*, Japanese Journal of Applied Physics **50**, 036602 (Mar, 2011).
- [5] I. Matsuda, K. Kubo, F. Nakamura, T. Hirahara, S. Yamazaki, W. H. Choi, H. W. Yeom,

- H. Narita, Y. Fukaya, M. Hashimoto, A. Kawasuso, S. Hasegawa, and K. Kobayashi: *Electron compound nature in a surface atomic layer of two-dimensional triangle lattice*, Physical Review B **82**, 165330 (Nov, 2010).
- [6] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Takeichi, H. Miyazaki, S. Kimura, I. Matsuda, A. Kakizaki, and S. Hasegawa: *Anomalous transport in an n-type topological insulator ultrathin Bi_2Se_3 film*, Physical Review B **82**, 155309 (Oct. 2010) (selected as Editors' Suggestions).
- [7] H. Morikawa, K. S. Kim, Y. Kitaoka, T. Hirahara, S. Hasegawa and H. W. Yeom: *Conductance transition and interwire ordering of Pb nanowires on Si(557)*, Physical Review B **82**, 045423 (Jul, 2010).
- [8] A. Nishide, Y. Takeichi, T. Okuda, A. A. Taskin, T. Hirahara, K. Nakatsuji, F. Komori, A. Kakizaki, Y. Ando, and I. Matsuda: *Spin-polarized surface bands of a three-dimensional topological insulator studied by high-resolution spin- and angle-resolved photoemission spectroscopy*, New Journal of Physics **12**, 065011 (Jun, 2010).
- [9] Y. Niinuma, Y. Saisyu, T. Hirahara, R. Hobara, S. Hasegawa, H. Mizuno, and T. Nagamura: *Development of an UHV-SMOKE system using permanent magnets*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **8**, 298(Jun, 2010).
- [10] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, and S. Hasegawa: *A topological metal at the surface of an ultrathin $Bi_{1-x}Sb_x$ alloy film*, Physical Review B **81**, 165422 (Apr, 2010)(selected as Editors' Suggestions).
- [11] Y. Sakamoto, T. Hirahara, H. Miyazaki, S. Kimura, and S. Hasegawa: *Spectroscopic evidence of a topological quantum phase transition in ultrathin Bi_2Se_3 films*, Physical Review B **81**, 165432 (Apr, 2010).
- [12] K. He, Y. Takeichi, M. Ogawa, T. Okuda, P. Moras, D. Topwal, A. Harasawa, T. Hirahara, C. Carbone, A. Kakizaki, and I. Matsuda: *Direct spectroscopic evidence of spin-dependent hybridization between Rashba-split surface states and quantum-well states*, Physical Review Letters **104**, 156805 (Apr, 2010).
- [13] 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, in press.
- (総説)
- (国内雑誌)
- [14] 武市泰男、何珂、奥田太一、平原徹、柿崎明人、松田巖：ラシュバ分裂した表面状態との混成により誘起された金属量子井戸状態のスピンドル分裂，表面科学 **31**, 493 (Sep, 2010).
- [15] 村上修一、平原徹、松田巖：トポロジカル絶縁体の物理，日本物理学会誌 **65**, 840 (Nov, 2010).
- [16] 平原徹：トポロジカル絶縁体超薄膜の電子構造，分子研レターズ **63**, 34 (Feb, 2011).
- (プロシーディングス)
- [17] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, and S. Hasegawa: *A topological metal at the surface of an ultrathin $Bi_{1-x}Sb_x$ alloy film*, Proceedings of The Ninth Russian-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces, Eds. A. A. Saranin and S. Hasegawa, Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, pp. 232-236 (Jan, 2011).
- (著書)
- [18] 物理チャレンジ・オリンピック日本委員会編 (長谷川修司分担執筆)：オリンピック問題で学ぶ世界水準の物理入門 (丸善, Apr, 2010).
- (その他)
- [19] 長谷川修司、興治文子：2010年度公開講座「超伝導からみる科学技術の最先端」報告，大学の物理教育 **17**(1), 40 (Mar, 2011).
- (学位論文)
- [20] 植竹智哉：温度可変型4探針STMによる擬1次元金属表面の電気伝導測定 (修士論文).
- [21] 最首祐樹：磁気光学Kerr効果法によるコバルト超薄膜の磁気異方性測定とSTM観察 (修士論文) .
- [22] 坂本裕介：トポロジカル絶縁体超薄膜の電子状態および輸送特性 (修士論文) .
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [23] S. Hasegawa, T. Tono, Y. Sakamoto, and T. Hirahara: *Spin transport at surfaces with strong spin-orbit coupling*, RIEC International Symposium and The 9th Japan-Korea Symposium on Surface Nanostructures, 2010年11月16日 (宮城).
- [24] S. Hasegawa: *Nano Transport with Four-Tip Scanning Tunneling Microscope*, National Conference on Nano, Surface and Graphene Sciences and Technologies 2010, 2010年9月11日 (南京大, 中国) .
- [25] S. Hasegawa: *Electronic and Spin Transport at Surfaces and nanostructures*, 18th International Vacuum Congress, 2010年8月24日 (北京, 中国) .
- [26] S. Hasegawa: *Spin-Split Surface States due to Rashba Effect and Topological Insulators*, Spin-Polarized Scanning Tunneling Microscopy 3 Conference , 2010年8月20日 (ソウル国立大, 韓国) .

- [27] S. Hasegawa: *Surface States of Rashba Spin-Split Type and Topological Insulators*, The Workshop 2010 on "Electronic, transport, and optical properties of low-dimensional systems" (WS10-ETOLDS), 2010 年 6 月 1 日 (Valencia, Spain) .
- [28] T. Hirahara and S. Hasegawa: *Surface states of Rashba-spin-split type and topological insulators*, Korean Physical Society meeting, 2010 年 4 月 21 日 (Daejon, 韓国).
- [29] T. Hirahara: *Ultrathin films of topological insulators*, JSPS A3 Foresight Program Autumn School for Young Scientist, 2010 年 11 月 10 日 (京都)
- 一般講演
- [30] T. Hirahara, Y. Sakamoto, S. Hasegawa: *Ultrathin films of topological insulators*, Symposium on Surface and Nano Science 2011 (SSNS '11), 2011 年 1 月 19 日 (雫石).
- [31] T. Tono, T. Hirahara, and S. Hasegawa, *Detection of the spin Hall effect in ultrathin bismuth films*, The 18th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, 2010 年 12 月 9 日 (伊豆).
- [32] S. Hasegawa, T. Hirahara, Y. Sakamoto: *Topological surface states of Bi alloys on Si surfaces*, The 9th Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces, 2010 年 9 月 29 日 (Vladivostok, Russia).
- [33] T. Tono, T. Hirahara, and S. Hasegawa, *Detection of the spin Hall effect in ultrathin bismuth films*, The 9th Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces, 2010 年 9 月 27 日 (Vladivostok, Russia).
- International vacuum congress (IVC-18), 2010 年 7 月 23-27 日 (北京)
- [34] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, S. Hasegawa: *A topological metal at the surface of an ultrathin BiSb alloy film*.
- [35] Y. Sakamoto, T. Hirahara, H. Miyazaki, Y. Takeichi, T. Komorida, S. Kimura, A. Kakizaki, S. Hasegawa: *Electronic structure of a topological insulator Bi_2Se_2 ultrathin films on a Si surface*.
- [36] Y. Saisyu, T. Hirahara, Y. Niinuma, R. Hobara, S. Hasegawa : *SMOKE measurements of magnetic thin films*.
- [37] T. Uetake, N. Nagamura, R. Hobara , T. Hirahara , S. Hasegawa, and T. Nagamura: *Transport properties of Ag quantum films formed on Si(111)4×1-In measured by low-temperature four-tip STM*.
- [38] T. Tono, T. Hirahara, S. Hasegawa : *In situ detection of the spin Hall effect in ultrathin bismuth films*.
- SSSJ-A3 Foresight Joint Symposium on Nanomaterials and Nanostructures, 2010 年 7 月 5-7 日 (東京大)
- [39] T. Hirahara: *The physics of topological insulators studied using ultrathin films*.
- [40] Y. Sakamoto, T. Hirahara, H. Miyazaki, Y. Takeichi, T. Komorida, S. Kimura, A. Kakizaki, S. Hasegawa: *Electronic structure of a topological insulator Bi_2Se_2 ultrathin films on a Si surface*.
- [41] T. Uetake, N. Nagamura, R. Hobara , T. Hirahara , S. Hasegawa, and T. Nagamura: *Transport properties of Ag quantum films formed on Si(111)4×1-In measured by low-temperature four-tip STM*.
- [42] Y. Saisyu, T. Hirahara, Y. Niinuma, R. Hobara, S. Hasegawa : *SMOKE measurements of magnetic thin films*.
- [43] F. Nakamura, K. Kobayashi, S. Hasegawa, A. Ichimiya, and I. Matsuda: *Energy and phase-shift analyses of $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ phase of Si surface with pseudopotential approach*.
- [44] T. Tono, T. Hirahara, S. Hasegawa: *In situ detection of the spin Hall effect in ultrathin bismuth films*.
- [45] R. Hobara, N. Nagamura, T. Takeshi, U. Tomoya, U. Yoichi, T. Hirahara, S. Hasegawa, and T. Nagamura: *Development of Ultra-Low Temperature Four tip STM in combination with FIB*.
- (国内会議)
- 招待講演
- [46] 平原徹: ビスマス量子薄膜における表面状態による電気伝導、第 30 回表面科学学術講演会奨励賞受賞記念講演、2010 年 11 月 5 日 (大阪大学) .
- [47] 坂本裕介、平原徹、宮崎秀俊、木村真一、長谷川修司: Bi_2Se_3 超薄膜における量子トポロジカル相転移、平成 22 年度表面科学会放射光表面科学部会シンポジウム、2010 年 12 月 10 日 (東京工業大学) .
- 一般講演
- [48] 東野剛之, 坂本裕介, 平原徹, 長谷川修司: Bi 表面上でのスピノ偏極電流の検出, 平成 22 年度東北大学電気通信研究所プロジェクト研究会 2010 年 11 月 17 日 (仙台) .
- [49] 東野剛之, 平原徹, 長谷川修司: ビスマス超薄膜におけるスピノホール効果の測定、物性科学領域横断研究会、2010 年 11 月 13 日 (東京) .
- [50] 平原徹、坂本裕介、長谷川修司: Bi_2Se_3 超薄膜における異常輸送、東京大学低温センター成果報告会、2011 年 3 月 3 日 (東京大学) .
- [51] 東野剛之、平原徹, 坂本祐介、長谷川修司: ビスマス表面上のスピノ偏極電流の検出, 平成 22 年度東北大電気通信研究所プロジェクト研究会, 2010 年 11 月 17 日 (仙台) .
- [52] 永村 直佳, 保原 麗, 植竹 智哉, 平原 徹, 長谷川 修司, 松田 巍, 小林 功佳: 低温型独立駆動 4 探針 STM による $\text{Si}(111)4 \times 1\text{-In}$ 上 Ag 薄膜の輸送特性研究、表

面科学学術講演会、(社)日本表面科学会、2010年11月5日(大阪大).

- 日本物理学会 2010 秋季大会, 2010 年 9 月 23-26 日 (大阪府立大学)

- [53] 坂本裕介、平原徹、武市泰男、宮崎秀俊、松田巖、木村真一、柿崎明人、長谷川修司:シリコン表面上のトポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 超薄膜のスピン分解 ARPES.
- [54] 中村史一、小林功佳、長谷川修司、一宮彪彦、松田巖: Si 表面 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 相の擬ポテンシャルモデルによるエネルギーの安定性と位相シフトの考察.
- [55] 東野剛之、平原徹、長谷川修司: ビスマス超薄膜におけるスピンホール効果の *in situ* 測定.
- [56] 並木雅俊、有山正孝、北原和夫、二宮正夫、長谷川修司、原田勲、大島孝吉、味野道信: 第 41 回国際物理オリンピック日本代表訓練研修: 実験問題.
- [57] 杉山忠男、江尻有郷、毛塚博史、光岡薰、向田昌志、長谷川修司、興治文子、中屋敷勉、真梶克彦、鈴木亨、田中忠芳、山田達之輔、野添嵩、田中良樹、谷崎佑弥、並木雅俊、浅井吉蔵、北原和夫、原田勲: 第 41 回国際物理オリンピック・クロアチア大会報告.

(セミナー)

- [58] T. Hirahara: *Ultrathin films of topological insulators*, Materials Science Division Seminar, Argonne National Laboratory, 2010 年 10 月 11 日 (米国).
- [59] S. Hasegawa: *Investigation of Surface Conductivity of Silicon-Based Nanomaterials*, Institute of Automation and Control Processes, Russian Academy of Science, 2010 年 7 月 23 日 (Vladivostok, Russia).
- [60] 平原徹: ビスマスおよびビスマス系化合物超薄膜における電荷・スピン伝導、東京大学物性研究所放射光セミナー、2010 年 11 月 26 日 (物性研) .
- [61] 長谷川修司: 表面物理学の最前線—トポロジカル絶縁体は本当か—、東京大学理学部物理学教室コロキウム、2010 年 4 月 16 日 (本郷) .

(講義等)

- [62] 長谷川修司: 表面の特性基礎、第 49 回表面科学基礎講座、(社)日本表面科学会、2010 年 7 月 15 日 (東京大).
- [63] 長谷川修司: 表面科学とナノサイエンス・ナノテクノロジー、山梨大学工学部電気電子システム工学科 特別講義、2010 年 11 月 11-12 日 (山梨大).
- [64] 長谷川修司: 兵庫県立大学理学部集中講義「表面科学」2010 年 8 月 30 日-9 月 1 日 (兵庫県立大) .
- [65] 長谷川修司、平原徹、山田学(TA): 物理学実験 I (3 年生) 電子回折、2009 年度冬学期 (本郷) .
- [66] 長谷川修司: 理科教育 (教育学部) 2010 年度夏学期 (本郷) .
- [67] 長谷川修司、溝川貴: 物理実験学 (学部 2 年生講義) 2010 年度冬学期 (駒場) .

4.4 福山研究室

液体や固体など凝縮系物質の温度を絶対零度に向けて下げてゆく過程で、それまで知られていなかった新現象を探索してその性質を調べるのが低温物理学の手法である。当研究室では、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、特に空間次元を2次元に閉じ込めたときの低温量子現象に着目して研究している。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、新しい2次元電子系として注目を集める炭素の単原子層シートのグラフェン、グラフェン表面を他原子で修飾して得られる新物質群などである。

これらの凝縮系試料を独自に開発した3台のユニークな冷凍機を使ってマイクロケルビンに至る超低温度域まで冷却し、比熱、核磁気共鳴(NMR)、電子輸送特性、走査トンネル顕微/分光法(STM/STS)、低速電子線回折(LEED)などさまざまな実験手法を使って調べている。1台目の冷凍機は銅核スピンの断熱消磁冷凍機で、ヘリウム単原子層膜試料を50 μKまで冷却して比熱やNMR測定を行っている。この装置は、長期間安定して超低温度を保つことのできる信頼性の高い高性能冷凍機である。2台目は³He-⁴He希釈冷凍機で30 mKまで固体試料を冷却し、10⁻⁸ Pa以下の超高真空中で高磁場を印加してSTM/STS観測できる超低温走査トンネル顕微鏡(ULT-STM)である。この装置は、超低温・高磁場・超高真空という多重の極限環境下で原子分解能と高いエネルギー分解能をもつ一方で、短時間に試料や探針を交換でき、超高真空中でさまざまな表面処理ができる汎用性も併せもつ。今年度は、超伝導マグネットを交換して最大発生磁場を6 Tから13 Tへ増強するチューンアップを行った。3台目は、液体ヘリウムなどの液体寒剤を補充することなく12 mKの温度を持続可能な無冷媒希釈冷凍機で、過去数年間の立ち上げ期を経て、今年度から本格的な冷却実験に入った。また、低温真空槽が省けるという無冷媒希釈冷凍機の特質を活かして、初めてミリケルビン温度域でLEED測定ができる超低温LEED装置の設計を進めた。

4.4.1 2次元フェルミ粒子系の強相関効果

グラファイト表面に物理吸着した単原子層³Heは、強く相互作用する2次元フェルミ粒子系のモデル物質である。この系の特徴は、³He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。我々は、ボース粒子で核スピンをもたない⁴Heを第1層目に吸着させることで、実際のグラファイト基板がもつ吸着ポテンシャルの局所的な乱れをできるだけ小さくし、第2層目以上に吸着した2次元³Heの多彩な量子物性を100 μKから数Kに至る広い温度範囲で研究してきた。中でも絶対零度での量子相転移は特に興味深い。

2次元³Heの自己凝集現象

低密度極限では、3層目や4層目では3次元系同様に気液相転移(一次転移)が観測されるのに対し、基板の大きな吸着ポテンシャルのために強く2次元空間に束縛される2層目では、少なくとも0.5 nm⁻²以上では気液相転移が観測されないことを昨年度までに報告してきた。ところが今年度、さらに低密度域を比熱測定してみたところ、2層目も0.5 nm⁻²以下で気体-液体の共存状態を示す振る舞いが観測され、2~4層目ではいずれもほぼ同じ密度の液滴に凝集することが判明した。このことは、2層目³Heの比熱を80 mK以下の低温で測定した図4.4.10を見ると明らかである。すなわち、縮退領域で比熱は温度に比例して変化し(図4.4.10(a))、その比例係数(γ)が0.5 nm⁻²以下では密度に比例しており、それ以上では急に変化しなくなる(図4.4.10(b))。しかも、0.5 nm⁻²における比例係数と既知の表面積から計算される準粒子有効質量は裸の³He質量にほぼ一致する(図4.4.10(b)中破線)。これらの測定結果は、純粋な2次元の³He気体は絶対零度では不安定であり、液化することを意味している。

これは第一原理計算の結果とは矛盾しており、レナード・ジョーンズ型のHe-He2体ポテンシャルの修正か、多体力の考慮など、何らかの理論の再検討が必要になってきた。また、フェルミオン系に対する第一原理計算の信頼性の問題も残っている。いずれにしても、原子内で最も大きな量子効果をもつ³Heを揺らぎの大きな低空間に閉じ込めた2次元³Heは、基底状態で量子気体状態が安定な唯一の物質と従来考えられてきたが、これも自発的に液化し(自己凝縮)、その液体は予想外に低密度であることが分かった意義は大きい。ちなみに冷却アルカリ原子気体の真の基底状態は固体である。一方、物質中のサブシステムである電子系は、逆にクーロン斥力のために液滴になることが難しい。今後は、気液相転移に伴う比熱やNMRの有限温度での異常を観測して、実験的な検証を進めたい。

気液共存の密度領域で、図4.4.10の熱容量の温度変化をもう少し詳しく調べてみると、最低次項(T 項)の係数 γ と高次項(T^2 項)の係数の比が一定でないことが分かる。これは一見、2相共存モデル(一次相転移)と矛盾するようであるが、グラファイト吸着基板の単結晶子サイズが小さいために液滴のメソスコピック効果(サイズ効果)が効いていると考えると解釈できる。実際、液滴ができる始める低密度ではそのサイズはフェルミ波長より短いと考えられ、長波長のスピニングラフが抑制されると考えると、実験結果を半定量的に説明する。今後、基板の単結晶子サイズを変えた実験を行うことで、この仮説を検証したい。

4/7 整合相と秩序-無秩序転移

2次元液体³Heの面密度をしだいに増してゆくと、ある密度で局在相が現れる。1層目が³He、⁴He、HD分子いずれの場合もその密度の4/7の密度で局在することから、局在相は1層目に対する整合相(4/7相)

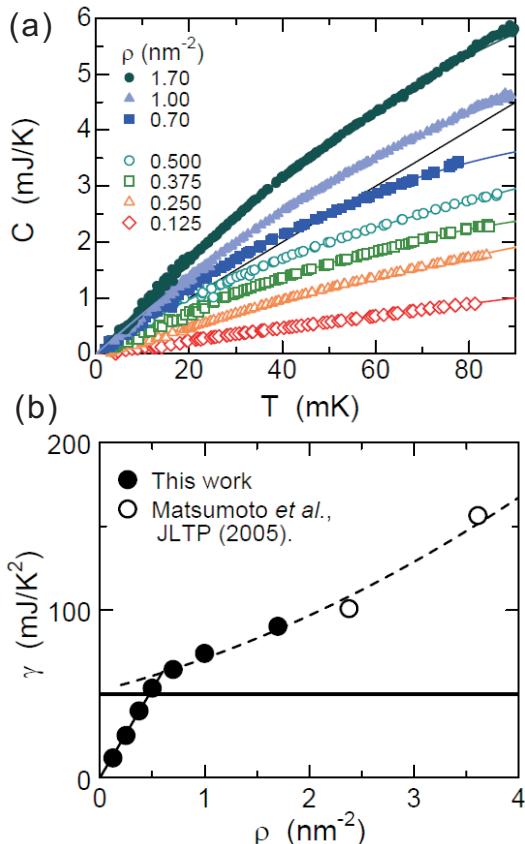


図 4.4.10: (a) グラファイト表面に吸着した 2 層目の 2 次元 ${}^3\text{He}$ の熱容量測定の結果。(b) 比熱係数 (γ) の密度依存性。破線は 2 次元理想フェルミ気体に対する値。

で三角格子構造をもつと信じられている。 $4/7$ 相の核スピン ($S = 1/2$) の磁気基底状態は強くフラストレートしたギャップレススピン液体状態であることがほぼ確実である。我々は以前行った熱容量測定の結果から、 $4/7$ 相からわずかに低い密度領域では、零点空格子点 (ZPV) 相が実現していることを提案し、それを支持する複数の理論が発表されている。ZPV 相とは単一相にもかかわらず絶対零度でも結晶の周期性と流动性を併せもつ新しい量子相で、これが事実とすると、ボソン系の ${}^4\text{He}$ では超流動固体が実現する可能性がある。また、我々は、より高密度域には斥力相互作用のために量子局在した不整合固相が存在し、その磁性がフラストレートした強磁性であることも昨年度までの測定から突き止めていた。 $4/7$ 相からこの高密度不整合相へは一次の量子相転移で移行するが、ここにドメイン壁からなる新たな量子相が出現する可能性も十分ある。

このように $4/7$ 相およびその周辺密度の 2 次元 He は、非常に興味深い新奇な量子相、量子現象の宝庫であるが、 $4/7$ 相そのものの構造については未だに謎が多い。そもそも本当に「局在」相であるのか、という疑問も完全には払拭されていない。過去の比熱測定では、 ${}^3\text{He}$ と ${}^4\text{He}$ に対してそれぞれ $T \approx 1\text{ K}$ 、 1.5 K に異常が観測されており、秩序-無秩序転移に相当すると考えられている。しかし、これらの異常は、恐らくは基板の単結晶子のモザイク構造からくる有限サイズ効果のために、ユニバーサリティクラスを決定する程シャープではない。さらに、激しい零点振動からくる大きなデバイ・ワーラー因子と基板の散乱ピークとの干渉などのため、中性子散乱実験でのプラグピーカーの観測も成功していない。

こうした状況を踏まえ、我々はここ数年来、これまで標準的に用いられてきたグラファイト基板 (グラフオイル) より単結晶子サイズが 10 倍大きい (しかし、比表面積は $1/10$ しかない) ZYX グラファイト基板を使った精密熱容量測定系を設計開発し、これを無冷媒希釈冷凍機に搭載する準備をしてきた。今年度はそれらの準備を終えて本格的な冷却実験を開始し、まずは $0.5 < T < 5.2\text{ K}$ の温度範囲で試料を含まない空セルの熱容量 (アデンダ) を測定した。また、 $T = 76\text{ K}$ で N_2 、 $T = 4\text{ K}$ で ${}^4\text{He}$ を吸着子とした等温吸着圧力を測定し、試料セル内に納めた ZYX グラファイトが清浄表面を保っていることを確認した。実測したアデンダは設計時の予想とほぼ同程度であり、今後、 $4/7$ 相試料を作成してその比熱異常を実測し、これが秩序-無秩序転移に伴うものであるかどうかに決着をつけたい。

4.4.2 超低温 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に、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。図 4.4.11 に設計をほぼ終えた超低温 LEED の全体像を示す。設計上のポイントは以下の通りである。(i) 電子錠フィラメントからの熱輻射を抑えるために偏向電子錠を使用する。(ii) 入射電子線による脱離や発熱を防ぐため、これを $f\text{A}$ 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。

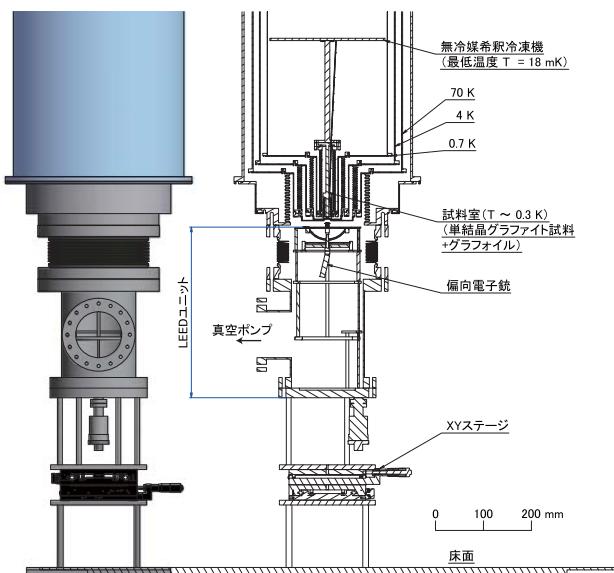


図 4.4.11: 超低温 LEED の全体図。

4.4.3 グラフェン/グラファイトの電子物性

炭素の单原子層シートであるグラフェンはフェルミ・エネルギー (E_F) で線形に交わる特異な分散関係を持ち、その準粒子は質量ゼロのディラック・フェルミオンとして振舞うことが知られている。このユニークな電子状態のため、後方散乱が抑制された特異な輸送現象や半整数の量子ホール効果を示すなど、グラフェンは非常に興味深い 2 次元電子/正孔系である。それだけでなく、大きな電界効果と高い移動度をもつので、次世代のデバイス材料としても期待されている。従来の半導体ヘテロ構造に作られる 2 次元電子系と異なり、表面が直接露出していて化学的

にも安定なので、原子レベルで清浄な表面を得やすく、表面走査プロープ実験に向いている。

我々は单層から数層のグラフェン、グラフェンが多層積層したグラファイトの表面に対して走査プロープ法や伝導度測定を使って以下の研究を行っている。

グラフェンを介したジョセフソン接合ネットワーク

グラフェン表面にスズ (Sn) を微量蒸着すると、数百 nm 程度の大きさの「島」と数十 nm 程度の幅の「溝」からなる島構造を作ることが知られている。このような構造では、 $T_c \sim 4 \text{ K}$ 以下で個々の Sn 島が超伝導転移したあと、さらに低温になると溝部分のグラフェンに超伝導秩序変数の浸み出しが起こり、近接効果で多数の Sn 島がジョセフソン接合したネットワークが形成されることが期待される。このジョセフソン接合ネットワークは、グラフェンの構造を反映した理想的な 2 次元系と考えられるので、Kosterlitz-Thouless(KT) 型の超伝導転移を研究する上で格好の実験系である。

KT 転移は、ある有限温度 (T_{KT}) 以下で秩序変数のトポジカル励起である渦と反渦が対束縛することで位相が揃い準長距離秩序が生じる 2 次元系特有の特異な相転移現象である。この現象は超流動 ^4He 薄膜で初めて観測され、その後、超伝導 2 次元ネットワークでも伝導度測定から確認されている。KT 理論の特徴は、 $T_{\text{KT}} < T < T_{c0}$ (ここで T_{c0} は平均場近似で期待される転移温度) の温度域で、秩序変数の振幅が有限であるのに対し、位相は揃っていない中間温度域が発生することである。しかし、この中間温度域の存在や渦対束縛を直接的に示す実験的証拠はまだない。我々は、こうした証拠を得るべくグラフェンをベースとした超伝導系の STS 測定を目指している。この系は、電界効果で超伝導性(例えは転移温度)を大きく制御できる可能性もあり、その点でも興味深い。また、グラフェン内では、非常に長い超伝導位相緩和長も期待できる。今年度はまず、この系の試料作成法を確立し、次に伝導度特性を 0.6 K までの低温、 9 T までの磁場中で測定して、KT 転移の確認とその磁場効果について研究した。

試料の单層あるいは数層グラフェンは、母物質である单結晶グラファイトを SiO_2 基板上に劈開する Micro-mechanical Cleavage(MC) 法で作成した。次に、Ti を下地とした Au の微小電極をフォトリソグラフィー法で作成し、最後に Sn をさまざまな条件下で真空蒸着した。図 4.4.12(a) 插入図は、3 層グラフェン上に平均膜厚 30 nm で Sn を蒸着した試料の走査電子顕微鏡(SEM) 像である。この場合、直径 $300 \sim 500 \text{ nm}$ の Sn 島がおよそ 20 nm の間隔を隔てて表面を一様に覆っている。この試料の電気抵抗の温度依存性には、図 4.4.12(a) の主図に示したように、特徴的な 2 段階転移が観測された。高温側 $T_1 \sim 3.9 \text{ K}$ は個々の Sn 島の超伝導転移であり、それより低温の緩やかな温度変化はグラフェンを介したジョセフソン接合ネットワーク系の KT 転移によるものである。実際、 $2.5 < T < 3.4 \text{ K}$ で電気抵抗は $\exp(-1/\sqrt{T})$ に比例しており、これは KT 理論の熱解離した量子渦の運動

動で説明できる。ただし、この試料では最低温度でも抵抗は完全にゼロにはならない。これは、Sn 島のサイズ ($0.5 \mu\text{m}$) に比べて電圧端子間距離 ($3 \mu\text{m}$) が十分大きくなっている、有限サイズ効果が原因と考えられる。今後、島構造のサイズや電圧端子間距離を変えた測定も必要である。

次に、この試料のグラフェン面に垂直に磁場を印加したときの電気抵抗の温度依存性を図 4.4.12(b) に示す。挿入図から明らかのように、 $B_c = 77 \text{ mT}$ を境に抵抗の温度依存性の符号が反転している。すなわち、 $B < B_c$ では抵抗は温度降下とともに減少するが、 $B > B_c$ では逆に増加して絶縁体的な振る舞いを示している。さらに、 $B < B_c$ では、抵抗の対数が温度の逆数に比例する熱活性型の温度依存性が観測された。これらの振舞いは、この系でこれまで知られていないかった磁場誘起型の超伝導-絶縁体転移が存在することを強く示唆している。

本研究の伝導度測定には、低温センターの共同利用装置: PPMS(Physical Property Measurement System) を用いた。また SEM 測定には、工学系研究科総合研究機構超高压電子顕微鏡室所有のものを使用した。

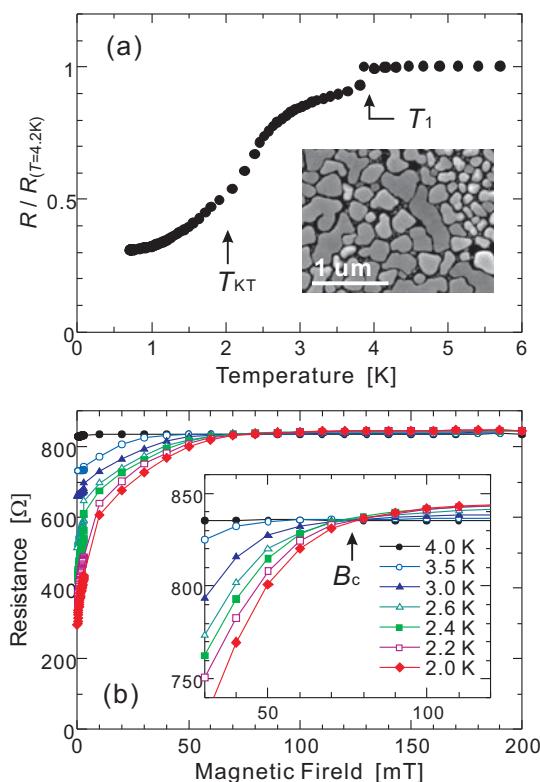


図 4.4.12: (a) 3 層グラフェン上に平均膜厚 30 nm の Sn を蒸着した試料の電気抵抗の温度依存性とその電子顕微鏡像。(b) 各温度における抵抗の磁場依存性と超伝導-絶縁体転移 (B_c) 近傍の拡大図。

グラフェンにおけるエネルギーギャップの形成と制御

次世代エレクトロニクス材料の最有力候補と目されているグラフェンであるが、eV オーダーのエネルギーギャップをもたないことは応用上の弱点とされ、世界中でギャップの形成と制御の方法が研究されている。我々は原子・分子を表面吸着したときの対称性の低下によるエネルギーギャップ形成の可能性に注目し、その実証実験を行っている。今年度は、第一段階として、グラファイト基板上に Xe 原子の $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 整合相を吸着したときの状態密度変化を STS 測定した。その結果、 E_F を中心に $\sim 1 \text{ eV}$ 程度のギャップが生じることを確認した。これは、以前の我々による予備的な測定結果を再現するものであり、来年度はさらに詳細な測定を行うと共に、グラフェン試料での STS 測定を試みる。また、輸送特性の変化からもギャップ形成を確認してゆきたい。

4.4.4 超伝導超薄膜の伝導特性

一般に層状超伝導体を薄膜化してゆくと、超伝導転移の性質が 2 次元系で実現する KT 型に移行することが期待される。劈開によって超薄膜化した試料の平坦表面では、走査プローブ法を使った局所分光測定によって KT 転移を詳細に研究できる可能性がある。さらに高温超伝導体の場合には、バルクの超伝導転移の機構として、2 次元超伝導面 (CuO_2 面) 間のジョセフソン接合も議論されているので、超薄膜化はその検証の意味でも興味深い。昨年度は、Y を 8 % ドープした銅酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ (Bi2212) 単結晶を劈開グラフェン作成と同様の MC 法で超薄膜化し、電気伝導度の温度依存性と IV 特性を測定した。作成した 7 つの試料のうち 5 つで KT 転移に特徴的な測定結果が得られ、残りの 2 つは $T = 4 \text{ K}$ まで超伝導転移を示さなかった。

今年度は、これらの伝導特性と膜厚の関係を明らかにするために、光学顕微鏡像の色成分と原子間力顕微鏡 (AFM) で測定した膜厚との定量的な関係を調べた。図 4.4.13 に SiO_2 基盤上に作成した Bi2212 超薄膜の AFM 像(a) とその断面のプロファイル (b) を示す。MC 法では原子レベルで均一な層数をもつ超薄膜試料が作成できていることが分かる。図 4.4.13(c) は光学顕微鏡写真であるが、劈開試料は膜厚によって多様な色を示している。多くの試料を観測した結果、AFM で決定した膜厚と光学像の色成分 (輝度、RGB) の間に一意の対応関係を得ることができた。これによって、今後はより簡便な光学像から膜厚を精度良く推定することができるようになった。その結果、伝導測定で超伝導転移が観測される試料の厚さは約 30 ユニットセル (45 nm) 以上であることが分かった。しかし、これはイオンビーム掘削法で超薄膜化した試料について、他グループが報告した結果 (超伝導転移の最低膜厚は $3 \sim 5$ ユニットセル) とは大きく異なっている。この相違を理解するためも、統計精度を上げるべく、さらに多くの試料について測定する必要がある。

なお、この研究で用いた超伝導単結晶試料は物理学教室・内田研究室から提供いただいた。

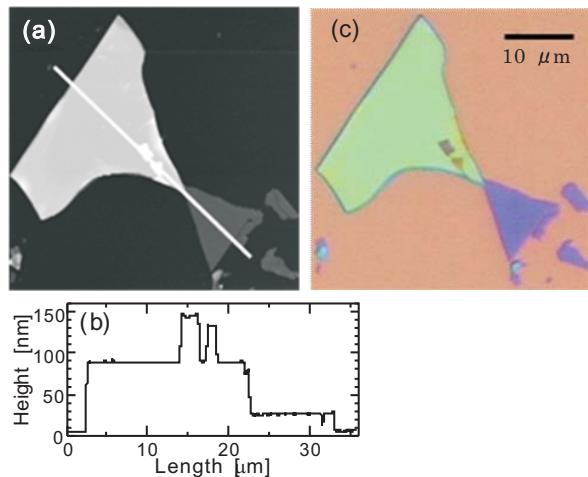


図 4.4.13: (a)Bi2221 超薄膜試料の AFM 像。(b)(a) 中の白線に沿った断面プロファイル。(c) 光学顕微鏡像。

4.4.5 その他

松井(朋)は日本学術振興会の平成 21 年度優秀若手研究者海外派遣事業の助成を得て、4 ~ 6 月の 3ヶ月間、米国 National Institute of Standards and Technology / Center for Nanoscale Science and Technology に滞在し、我々の超低温 STM に続いて開発されたより大型の装置を使って、SiC 基板 C 面に成長した多層グラフェンの研究を行った。この試料では各層が互いに回転して成長するため、層間の相互作用が弱く、最表面で单層グラフェンと同等の電子状態を観測することができる。超低温・高磁場下ではグラフェンのスピニと谷の縮退が解ける様子が観測され、磁場とともにランダウ準位が E_F を横切るときに、さらに二つに分裂する様子が観測された。

<報文>

(学位論文)

- [1] 松尾 貞茂 : 超伝導体で修飾した薄膜グラファイトの研究 (修士論文) .
- [2] 松井 幸太 : 2 次元吸着膜構造解析のための超低温低速電子線回折装置の開発 (修士論文) .

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [3] Y. Shibayama, H. Fukuyama, and K. Shirahama : Observation of non-classical rotational inertia in two-dimensional ^4He solid on graphite surface, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2010), (Grenoble, France, August 1-7, 2010).

招待講演

- [4] H. Fukuyama : STS imaging of quasi-two-dimensional electronic wave-functions at graphite surfaces with defects in magnetic fields, 東大における精華大ワーク”The Frontier Science Workshop on Condensed Matter Physics and Nanoscience”, (The University of Tokyo, Japan, May 13, 2010).
- [5] T. Matsui, K. Tagami, M. Tsukada, and H. Fukuyama : STS Observation of Dirac Fermion Topologically appeared on Graphite, SSSJ-A3 Foresight Joint Symposium on Nanomaterials and Nanostructures, (The University of Tokyo, Japan, July 5-7, 2010).
- [6] H. Fukuyama : Strong correlations and frustrated magnetism in two dimensional helium three, 11th German-Japanese Symposium, ”New Quantum States and Phenomena in Condensed Matter”, (Hiroshima, Japan, September 13-16, 2010).
- [7] T. Matsui, K. Tagami, M. Tsukada, and H. Fukuyama : STS Observations of Topological Dirac Fermion on Graphite Surfaces, 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2010), (The University of Tokyo, Japan, September 22-24, 2010).

(国内会議)

一般講演

- [8] 松井 幸太、中村 祥子、松井 朋裕、福山 寛 : 極低温 LEED によるグラファイト上 2 次元ヘリウムの構造解析実験 I、日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学、2010 年 9 月) .
- [9] 成瀬 公暁、佐藤 大輔、松井 朋裕、福山 寛 : 2 次元ヘリウム 3 における自己凝縮相の研究 II、日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学、2010 年 9 月) .
- [10] 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 相の融解現象の観測、日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学、2010 年 9 月) .
- [11] 佐藤 大輔、成瀬 公暁、松井 朋裕、福山 寛 : 2 次元ヘリウム 3 の基底状態は液体か? 気体か?、第 4 回物性科学領域横断研究会 - 凝縮系科学の最前線 - (東京大学武田ホール、2010 年 11 月 13-15 日) .
- [12] 松尾 貞茂、折池 雄太、松井 朋裕、福山 寛 : 超伝導体で修飾された多層グラフェンの伝導測定、平成 22 年度 低温センター研究交流会 (東京大学弥生講堂 アネックス、2011 年 3 月 3 日) .
- [13] 松尾 貞茂、折池 雄太、松井 朋裕、福山 寛 : 超伝導で修飾された薄膜グラファイトの伝導測定、日本物理学会 第 66 回年次大会 (新潟大学、2011 年 3 月) .
- [14] 武井 英人、松井 朋裕、石田 茂之、内田 慎一、福山 寛 : $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ 超薄膜の超伝導転移 II、日本物理学会 第 66 回年次大会 (新潟大学、2011 年 3 月) .

[15] 柴山 義行、福山 寛、白浜 圭也：グラファイト表面の2次元⁴He 固体相における超流動的振る舞いの速度依存性、日本物理学会 第66回年次大会（新潟大学、2011年3月）。

[16] 佐藤 大輔、成瀬 公暁、松井 朋裕、福山 寛：2次元ヘリウム3における自己凝縮相の研究 III、日本物理学会 第66回年次大会（新潟大学、2011年3月）。

招待講演

[17] 福山 寛：液体ヘリウム3の超流動転移における非平衡現象、理研シンポジウム「量子凝縮系の非線形・非平衡現象」（理研(和光)基幹研究所、2011年1月4-5日）。

(セミナー)

[18] 福山 寛：物質工学特論；走査トンネル分光法でみる2次元電子系、青山学院大学理工学専攻機能物質創成コース集中講義（2010年10月16日）。

[19] 松井 朋裕：グラフェンの物性、熊本大学大学院自然科学研究科プロジェクトゼミナール（2011年3月18日）。

4.5 岡本研究室

本研究室では、半導体2次元系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半導体2次元系に新しい自由度を持たせた研究を行っている。本年度は、新展開に向けた技術開発や装置作製を中心として研究を行った。

4.5.1 剥離表面に形成された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つていたが、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を超真空中で剥離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剥離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組み込み

これまで、剥離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により、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。

本年度は、耕富を中心として、走査型トンネル顕微鏡（STM）を組み込んだ実験システムを構築した。金属蒸着機構、剥離機構、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。

剥離技術の開発

表面2次元電子系の電気伝導測定を行うためには、試料全体にわたり平坦な剥離面が得られる必要があるが、剥離プロセスの成功確率は必ずしも高くない。特に、極低温での剥離成功率は、室温の場合よりも著しく下がる。本年度、田邊を中心として、剥離手法の大幅な改善が行われた。平坦な剥離面を得るた



図 4.5.14: 半導体試料の剥離、金属原子の蒸着、走査型トンネル顕微鏡（最下部）を用いた剥離表面の観察、側面電極を用いたマクロな4端子測定、を *in situ* で行うためのセットアップ。断熱真空のためのステンレス管を取り付けた後、内径52 mmの超伝導磁石（液体ヘリウム温度）に挿入される。

めには、半導体試料にあらかじめきっかけとなる小さな傷を入れておく必要があるが、これまで手作業で傷入れを行っていた。田邊らは、ダイヤモンドスクライバーにかかる荷重を制御した自作の傷入れ装置を用いて、良質なクラックが作られるための条件出しを InAs, InSb, GaAs に対して行った。最適荷重は、InSb に対して最も小さく、GaAs に大して最も大きかった。また、剥離時の力の方向に対しても、最適化を行った。

4.5.2 金属超薄膜の超伝導

InAs および InSb の剥離表面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て、GaAs 絶縁基板の剥離表面上に形成された金属超薄膜を調べる試みが関原を中心として行われた。Bi 薄膜に対する実験では、超伝導の臨界膜厚として 0.42 nm が得られた。基板の種類が異なる Bi 薄膜に対する先行研究で得られた値よりも小さい。このことから、GaAs

劈開表面上では乱れの少ない良質な金属薄膜が得られることが期待される。また、電流・電圧特性における幕の温度依存性において、Kosterlitz-Thouless 転移における universal jump を示唆する振る舞いが見られた。このほか、垂直磁場および平行磁場の印加やわずかな磁性体の蒸着に対して超伝導状態が破壊される様子が調べられた。

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）密度をパラメーターとして金属・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ー 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に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ました。

近年、我々のグループでは、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。100 GHz のマイクロ波を照射した時の共鳴吸収線幅 ΔB は、2次元電子系の温度の低下とともに狭くなった。 ΔB よりサイクロトロン緩和時間 $\tau_{\text{CR}} = B / (\omega \Delta B)$ が得られるが、 τ_{CR} の温度依存性は、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、散乱時間が金属的温度依存性をもつことを示唆する。100 GHz における特徴的長さ $l_\omega = v_F / \omega$ は平均自由行程よりも十分に小さく、また、フォトンのエネルギー $\hbar\omega = 4.8 \text{ K}$ は金属的振る舞いが観測される典型的な温度よりも高い。現時点では、このような非常に異なる状況下において散乱時間の金属的温度依存性が同じように現われる理由について全く分かっていないが、我々の実験結

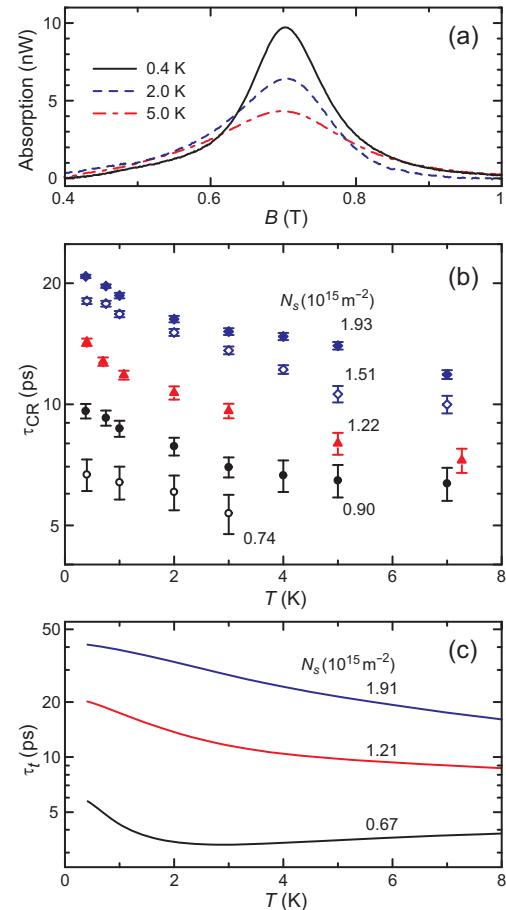


図 4.5.15: (a) 100 GHz のマイクロ波を電子密度 $N_s = 1.51 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ の Si/SiGe ヘテロ接合中の 2 次元電子系に照射したときのサイクロトロン共鳴吸収。試料温度の低下とともに吸収線幅が狭くなる。(b) 電子密度 $N_s = 1.93, 1.51, 1.22, 0.90, 0.74 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ (from top to bottom) における τ_{CR} の温度依存性。(c) 電子密度 $N_s = 1.91, 1.21, 0.67 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ (from top to bottom) における τ_t の温度依存性。(R. Matsutomi *et al.*, Phys. Rev. Lett. (accepted for publication) より)

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、安田が中心となり、0.1 ~ 10 GHz 領域での電気伝導測定系を構築した。試料

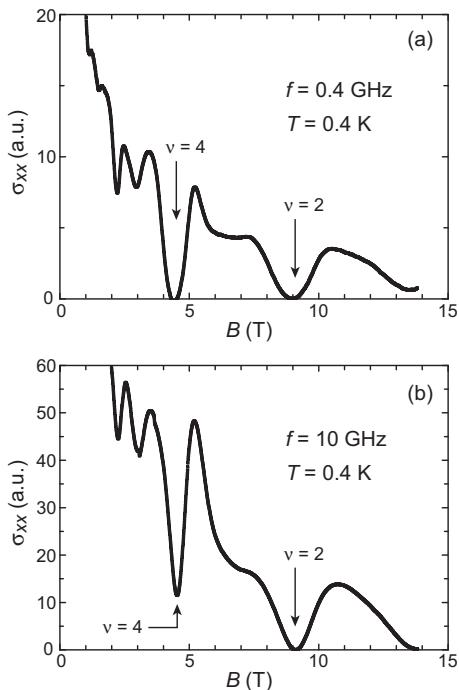


図 4.5.16: Si/SiGe 2 次元電子系の対角伝導率 σ_{xx} 。
(a) 0.4 GHz においてランダウ準位充填率 $\nu = 2$ と $\nu = 4$ で対角伝導率が消失しているのに対して、(b) 10 GHz においては $\nu = 4$ における極小値がゼロまで落ちていない。

は、Si/SiGe ヘテロ接合を持つウェハの表面にコブレーナ導波路をパターニングしたものである。表面直下 ($0.1 \mu\text{m}$) 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。

本年度は、測定系の動作テストを兼ねて整数量子ホール系の測定を行った。 $0.1 \leq f \leq 10 \text{ GHz}$ において、量子ホール効果による対角伝導率の振動を観測することができた。周波数が高くなるにつれて、高次の（低磁場の）量子ホール状態に相当する磁場における対角伝導率が有限の値をもつようになり、徐々に大きくなつた。サイクロトロン周波数は、測定周波数よりも2桁程度高く、準位間遷移が関与しているとは考えにくい。一方で、 $\nu = \text{整数}$ で量子ホール状態が壊れていることから、局在状態に関連しているとも思えない。今後、より詳細な測定を行い、原因を明らかにしていきたい。

<報文>

(原著論文)

- [1] Y. Ikebe, T. Morimoto, R. Masutomi, T. Okamoto, H. Aoki, and R. Shimano: Optical Hall Effect in the Integer Quantum Hall Regime, Physical Review Letters **104**, 256802 (2010).

- [2] T. Okamoto, T. Mochizuki, M. Minowa, K. Komatsu, and R. Masutomi: Magnetotransport in adsorbate-induced two-dimensional electron systems on cleaved InAs surfaces, Journal of Applied Physics (Special topic: plenary and invited papers from the 30th International Conference on the Physics of Semiconductors; Seoul; Koria; 2010, in press).
- [3] 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 (accepted for publication).

(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, Proceedings of the 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (July 25-30, 2010, Seoul, Korea), AIP Conference Proceedings (in press).

(学位論文)

- [5] 関原貴之：「GaAs 剥離表面に形成した金属超薄膜の超伝導」(修士論文)
- [6] 田邊裕貴：「化合物半導体結晶の剥離技術の開発と InSb 表面二次元電子系の電気伝導測定」(修士論文)
- [7] 安田一平：「シリコン 2 次元電子系に対する高周波電気伝導測定」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [8] Y. Ikebe, T. Morimoto, R. Masutomi, T. Okamoto, H. Aoki, and R. Shimano: Terahertz Hall conductivity measurements in a GaAs/AlGaAs quantum Hall system, The 9th International Conference on Superlattices, Nanostructures and Nanodevices (Beijing, China), July 18-23, 2010.
- [9] 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, The 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (Seoul, Korea), July 25-30, 2010.
- [10] R. Masutomi, K. Sasaki, I. Yasuda, A. Sekine, K. Sawano, Y. Shiraki, and T. Okamoto: Cyclotron resonance in the two-dimensional metallic phase of Si quantum wells, The Horiba-19th International Conference on “The Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology” (Fukuoka, Japan), August 1-6, 2010.

- [11] K. Sasaki, R. Masutomi, K. Toyama, K. Sawano, Y. Shiraki, and T. Okamoto: Pseudospin phase transitions during Landau level crossing in a Si quantum well, The Horiba-19th International Conference on “The Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology” (Fukuoka, Japan), August 1-6, 2010.

招待講演

- [12] T. Okamoto: Magnetotransport in adsorbate-induced two-dimensional electron systems on cleaved InAs surfaces, The 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (Seoul, Korea), July 25-30, 2010.

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、量子凝縮相の探求に取り組んでいる。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を駆使し、基底状態、光励起状態における電子相関、多電子系の相転移ダイナミクスを研究している。本年度は、以下の研究を進めた。

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、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ソルタイン凝縮 (BEC) を起こすことが期待されてきた。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（この現象は慣例的に励起子モットト転移と呼ばれている）。この電子正孔プラズマは低温極限では、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へと移行することが理論的に示されている。これら量子凝縮相の発現するためには、光励起された電子正孔対が長い寿命を持つことが必要である。その一つの候補として、長い励起子寿命を持つ間接遷移型半導体であるSiを対象に取り上げている。特に、BCS状態発現をギャップ形成から捉るために、ギャップエネルギーに相当するテラヘルツ周波数帯の分光手法の開発を進めている。今年度は、励起子BEC及び電子正孔BCS状態の発現にとって阻害要因となる電子正孔液滴の形成を抑制するために、圧力印加によるバンド縮重度の低減を目指した。圧力アンビルセルを作り、1軸性圧力下での光ポンプテラヘルツ分光システムを開発した。圧力印加によるバンド縮重度の低減を反映して、電子正孔液滴の転移温度が低下したことを発光測定により確認し、同条件下での光ポンプテラヘルツプローブ分光測定を進めた。さらに、励起子の縮重度を低減しBECの転移温度を上昇させるために、磁場によるスピンドル縮重度の解消を目指した。発光測定の結果、低温強磁場下で自由励起子発光強度が大きく減少することを見出し、スピンドル暗励起子状態への蓄積効果を示唆する結果を得た。この「見えない」励起子を観測するために、磁場下光ポンプテラヘルツ分光測定系を開発し、励起子内部遷移(1s-2p遷移)による可視化を行った。低温下で先鋭化する励起子微細構造を分光するために、磁場下テラヘルツ分光の広帯域化、高周波数分解能化を進め、中心周波数3THzで50GHzの周波数分解能を達成した。この結果、励起子ゼーマン分裂と反磁性シフトを明瞭に観測することが可能になり、磁場下での励起子微細構造について詳細な知見を得ることができた。発光測定との対比から、磁場印加下で、

縮退の解けたスピンドル暗励起子が蓄積していることがわかった。

4.6.2 分子性導体

分子性導体では、温度、圧力、あるいは磁場に応じて、電荷密度波、スピンドル暗励起子やモットト絶縁体、超伝導などの多彩な電子相が発現する。電子間相互作用と多様な分子配置の自由度の帰結として現れ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波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、我々は分子性導体のテラヘルツ分光を進めてきた。今年度は特に、擬二次元系のテラヘルツ分光とテラヘルツ波誘起相転移の研究を進めた。中でも、低温で電荷秩序相が発現し、かつ巨大な非線形伝導を示す $\theta-(BEDT-TTF)_2CsZn(SCN)_4$ を対象に、透過型の線形テラヘルツ分光により電荷秩序ギャップ形成の直接観測を行った。テラヘルツ帯の透過率は電荷秩序の形成とともに20K以下で急激に増加することを見出し、これを2倍周期電荷秩序の発達に伴うギャップの形成によるものと解釈した。さらにこの低温電荷秩序相において、高強度のテラヘルツ波ポンプ（後述）を照射し、電荷秩序相を光融解させることに成功した。観測されたスペクトル変化は、テラヘルツ波照射による温度上昇では説明できず、非平衡な電荷秩序の融解状態が生じているものと解釈した。

4.6.3 光学ホール効果

ホール効果は、直流や低周波数の電気伝導で測定するのが一般的である。光領域でのホール効果に対応する現象は、磁気光学ファラデー効果や磁気光学カーラー効果である。しかし、光領域の磁気光学効果と直流領域のホール効果は、その微視的な起源が異なることが多い、両者は必ずしも対応しない。そこで我々は、輸送現象と光学応答の中間周波数領域であるテラヘルツ周波数帯の磁気光学効果を測定する手法を開発し、遍歴電子強磁性体の異常ホール効果、半導体二次元電子系の量子ホール効果を光学的に調べてきた。

光で見る量子ホール効果

量子ホール系を特徴づけるエネルギーは、ランダウ準位間エネルギー（サクロトロン周波数）であるが、典型的にはそれはテラヘルツ周波数帯にある。ランダウ準位間遷移が生じるようなテラヘルツ（光）周波数で、電子局在を起源とする量子ホール効果の影響が現れるか否かは不明であったが、最近 Morimoto らは厳密対角化の計算により光領域でも量子ホール効果が現れることを理論的に示していた[T. Morimoto et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 116803, (2009)]。そこで、開発を行った高感度のテラヘルツ偏光分光法により、二次元電子系のファラデー効果（入射直線偏光の偏光面が回転する現象）を計測し、交流（光学）ホール伝導度の磁場依存性を詳細に調べた。その結果、テラヘルツ（光）領域でも、光学ホール伝導度が磁場を増加したときにプラトー的な振る舞いを示すことを見出した。この結果を論文としてまとめるとともに、プレスリリースを行った。

光で見る異常ホール効果

強磁性体では外部磁場がなくても磁化によってホール効果が生じることが古くから知られている（異常ホール効果,AHE）。AHE はスピン軌道相互作用に由来するものであるが、その起源として、不純物散乱による外因的なものと、電流演算子のバンド間遷移の行列要素に起因する内因的な機構が古くから提唱されてきた。近年、後者の内因的な AHE はトポロジカルな観点から定式化がなされ、特にフェルミ面近傍にバンド交差点がある場合にはベリー位相に由来する仮想磁束によって波数空間で磁気单極子が形成されることが示された。実験では、大きなスピン軌道相互作用を有する遍歴強磁性体 SrRuO_3 や $\text{CuCr}_2\text{Se}_{4-x}\text{Br}_x$ において見られる直流の AHE について、内因的な機構による解釈がなされてきた。この内因的な機構が支配的となる場合、磁気光学から得られる光学ホール伝導度にバンド間遷移に対応するエネルギーで共鳴構造が現れることが予測されていた。そこで、 SrRuO_3 を対象に取り上げ、テラヘルツ帯のファラデー効果測定を行った。その結果、光学ホール伝導度スペクトルが、低温でテラヘルツ帯に幅広なピーク構造を示すを見出した。このテラヘルツ帯のホール伝導度の共鳴増大について、ベリー位相に基づくホール効果の理論により解析を行い、内因的な機構に由来する異常ホール効果の描像により説明できることを示した。

4.6.4 マルチフェロイックス物質の動的電気磁気相関

強誘電と（反）強磁性が同時に発現する系、いわゆるマルチフェロイックス物質は、電場による磁化の制御や磁場による分極の制御を可能にする系として関心を集めている。我々は、このマルチフェロイックス系における動的な磁気電気相関をテラヘルツ分光に

より調べてきた。特に、希土類マンガン酸化物で現れるエレクトロマグノン（光の電場成分で励起される磁気励起）のテラヘルツ分光法による観測を進め、その起源解明を行ってきた。実験により明らかにしたエレクトロマグノンの偏光選択則や温度依存性から、磁気励起が電気双極子を持つ原因として、Mn-O-Mn ボンド上の酸素陰イオンが光電場と結合して変位し、ボンド角の変化により Mn スピン間の最近接強磁性相互作用が動的に変調され、スピン揺らぎ、即ちマグノン励起と結合していることが明らかになった。この交換歪に起因するエレクトロマグノンの発現機構は、隣接 Mn イオン間のスピン対称積 $s_i \cdot s_j$ (i,j は隣接サイトの指標) として表される。一方、Mn スピンが螺旋構造を有するときに、スピン軌道相互作用を起源とするスピン反対称積 $s_i \times s_j$ によってエレクトロマグノンが誘起されることが理論的に予言されていた。これは螺旋スピン面全体の揺らぎに対応するものであり、その実験的検証が望まれていたが、磁場下テラヘルツ分光によって、 EuYMnO_3 においてこのスピン反対称積 $s_i \times s_j$ に由来するエレクトロマグノンを観測することに成功した。この特異な素励起、エレクトロマグノンの共鳴において電気磁気効果テンソル α に由来する動的な電気磁気効果が増大し、巨大な方向二色性を発現することが明らかとなつた。現在、マグノン共鳴において顕在化するこの動的な電気磁気相関がもたらす新しい電磁気現象の解明を進めている。

4.6.5 高強度テラヘルツ波光源の開発

固体電子系において、強い光電場による電子のバンド構造の動的な変調や相転移現象、非摂動論領域における光と物質の相互作用を調べるための光源として、高強度のテラヘルツ波光源の開発を進めてきた。振動電場中での電子の平均運動エネルギーに相当するポンデロモーティブエネルギー $U_p = e^2 E^2 / 4m_e \omega^2$ は一定電場振幅では光の波長が長い程（周波数が低いほど）大きくなる。テラヘルツ帯では可視光領域に比べてこの値が大きくなり、固体電子系における強光電場効果を調べるために適していると考えられる。そこで、非線形光学結晶 LiNbO_3 を用いた光整流法によって、高強度のテラヘルツ波パルスの発生を行った。パルス面傾斜による位相整合条件の最適化、テラヘルツパルス発生後の集光光学系の最適化を進めた結果、繰り返しパルス強度 1 mJ、パルス幅 90 fs の再生増幅レーザーシステムを用いて、電場尖塔値 0.9 MV/cm の高強度テラヘルツパルスを発生させることに成功した。この電場強度は、自由電子に対するポンデロモーティブエネルギーに換算すると $U_p \sim 9 \text{ eV}$ に相当し、多くの物質系で電磁場との相互作用を摂動として扱えない領域に達していると考えられる。この高強度テラヘルツ電磁波パルス光源を用いて、カーボンナノチューブと強い光電場との相互作用の研究を行った。カーボンナノチューブはカイラリティによって金属ナノチューブと半導体ナノチューブに分類される。金属ナノチューブ中の電子はグラフェンに由来してエネルギーと波数の分散関係が線形になることが知られている（ディラックコーンと呼ばれる）。

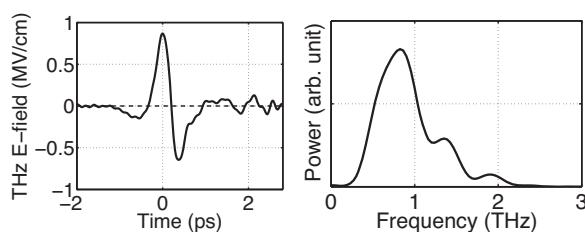


図 4.6.17: 開発した高強度 THz 波パルスの時間波形 (左) とスペクトル (右)。電場尖塔値は 0.9MV/cm に達している。

この有効質量ゼロの電子系に強い光を照射した際に生じる非線形光学応答の考察を進めた。一方、半導体ナノチューブでは、1次元性を反映して励起子の束縛エネルギーが 0.3eV 程度まで大きくなり、室温でも励起子が安定に存在する。この1次元励起子に対する高強度テラヘルツ電磁場の影響を実験により調べた。まず電場振幅が比較的小さい (< 200kV/cm) 領域で、テラヘルツ電場による励起子 1S 状態の動的シタルク効果の観測に成功した。カーボンナノチューブの励起子の吸収は近赤外の通信波長帯にあるため、この結果は室温動作の超高速電気光学素子への応用としても興味深い。電場強度が強くなり 400kV/cm を越えると、テラヘルツパルスの光子エネルギーは 4 meV 程度なのに、ギャップエネルギー約 1eV のナノチューブに対してバンド間遷移が生じることを見出した。チューブ直径依存性や強度依存性を詳細に調べた結果、この機構は高次の多光子遷移によるものではなく、強いテラヘルツ電場により残留電荷が加速されて生じる衝突イオン化によるものであることがわかった。このように、誘電破壊を起こすことなく物質中に極めて強い電場を印加することが可能となり、現在、様々な物質系を対象に、素励起（マグノン、フォノン、励起子）、準粒子励起を介したテラヘルツ非線形応答、非線形伝導、相転移現象の研究を進めている。

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Suzuki and R. Shimano: Cooling dynamics of photoexcited carriers in Si studied using optical pump and terahertz probe spectroscopy ,Phys. Rev. B **83**, 085207 (2011).
- [2] R. Shimano, T. Suzuki: Exciton Mott transition in Si studied by terahertz spectroscopy, Physica Status Solidi (c) **8**, p. 1153-1156 (2011).
- [3] S. Watanabe, N. Minami, and R. Shimano, Intense terahertz pulse induced exciton generation in carbon nanotubes, Optics Express **19**, 1528 (2011).
- [4] J. Fujioka, Y. Ida, Y. Takahashi, N. Kida, R. Shimano, and Y. Tokura: Optical investigation of the collective dynamics of charge-orbital density waves

in layered manganites, Phys. Rev. B **82**, 140409(R) (2010). (Editor's suggestion)

- [5] S. Seki, N. Kida, S. Kumakura, R. Shimano, and Y. Tokura: Electromagnons in the spin collinear state of a triangular lattice antiferromagnet, Phys. Rev. Lett. **105**, 097207 (2010).
- [6] T. Ogawa, S. Watanabe, N. Minami, and R. Shimano: Room temperature terahertz electro-optic modulation by excitons in carbon nanotubes, Appl. Phys. Lett. **97**, 041111 (2010). (selected for the August 2010 issue of Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology, Volume 22, Issue 6 (2010), and Virtual Journal of Ultrafast Science, Volume 9, Issue 8 (2010).)
- [7] Y. Ikebe, T. Morimoto, R. Masutomi, T. Okamoto, H. Aoki, and R. Shimano: Optical Hall effect in the integer quantum Hall regime, Phys. Rev. Lett. **104**, 256802 (2010).
- [8] S. Watanabe, R. Kondo, S. Kagoshima, and R. Shimano Ultrafast photo-induced insulator-to-metal transition in the spin density wave system of (TMTSF)₂PF₆, Physica B **405**, S360-S362 (2010).

(学位論文)

- [9] 池邊洋平：「テラヘルツ偏光分光法による量子ホール効果及び異常ホール効果の研究」(博士論文)
- [10] 坪田翔悟：「擬二次元有機導体 θ 型 ET 塩の電荷秩序相における低エネルギー光応答」(修士論文)
- [11] 柳 済允：「テラヘルツ分光法による Si の磁場下励起子微細構造の研究」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [12] T. Suzuki, R. Shimano: Formation dynamics of excitons in Si, The International Workshop on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors (NOEKS), Paderborn/Germany, Aug.17, 2010.
- [13] R. Shimano, T. Suzuki: Exciton Mott transition in Si studied by terahertz spectroscopy, Poster, 2010 8/16-19 The International Workshop on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors (NOEKS), Paderborn/Germany, Aug.17, 2010.
- [14] Ryo Shimano, T. Ogawa, S. Watanabe: Intense Terahertz Field-Induced Electroabsorption in Carbon Nanotubes, IRMMW-THz, Rome Italy, Sept.7, 2010.
- [15] Y. Ikebe, T. Morimoto, R. Masutomi, T. Okamoto, H. Aoki, R. Shimano: Terahertz Hall conductivity measurements in a GaAs/AlGaAs quantum Hall system, International Conference on Superlattices, Nanostructures and Nanodevices(ICSNN-2010), Beijing, China, July21, 2010.

招待講演

- [16] Ryo Shimano, Intense THz light and matter interaction in low dimensional electron systems, The 3rd International Symposium on Interdisciplinary Materials Science (ISIMS-2011) , Tsukuba, Japan, March 10, 2011.

(国内会議)

一般講演

2011 日本物理学会年次大会 (2011 年 3 月 25-28 日新潟大学を予定、東日本大震災のため中止。学会方針により一般講演は web 上での資料公開により成立。)

- [17] 柳済允, 鈴木剛, 池辺洋平, 島野亮: テラヘルツ分光法による磁場下 Si 励起子の微細構造の観測
[18] 鈴木剛, 島野亮: バルク GaAs における励起子モット転移
[19] 坪田翔悟, 渡邊紳一, 谷口弘三, 島野亮: θ -(BEDT-TTF)₂CsZn(SCN)₄ の電荷秩序相におけるテラヘルツポンプテラヘルツプローブ分光

2010 日本物理学会秋季大会 (2010 年 9 月 23-26 日、大阪府立大学)

- [20] 鈴木剛, 島野亮: 高密度光励起下における GaAs 励起子のテラヘルツ分光
[21] 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における励起子の衝突イオン化生成
[22] 貴田徳明, I. Kezsmarki, 村川寛, S. Bordacs, 小野瀬佳文, 島野亮, 十倉好紀: 磁性強誘電体 Ba₂CoGe₂O₇ におけるエレクトロマグノンと巨大な光学的電気磁気効果の観測
[23] 関真一郎, 貴田徳明, 熊倉真一, 島野亮, 十倉好紀: 三角格子上の常誘電・共線磁気相におけるエレクトロマグノンの観測
[24] 渡邊紳一, 島野 亮: カーボンナノチューブにおけるテラヘルツ非線形光学効果, H22 第一回テラヘルツ電磁波技術研究会、H22 第一回テラヘルツ応用システム研究会 共催研究討論会「テラヘルツ分光計測とイメージング」, 2010 年 8 月 5 日, 福井県三国観光ホテル

- [25] 島野 亮, 坪田翔悟, 渡邊紳一, 谷口弘三: θ -(BEDT-TTF)₂CsZn(SCN)₄ の電荷秩序相における光学ギャップの観測とテラヘルツ波誘起相変化, 新学術領域研究「分子自由度が拓く新物質科学」第 4 回領域会議 2011 年 1 月 6 日、東京大学

- [26] 鈴木剛、ユジエウン、柴垣和弘、島野 亮: Si における低温・高密度励起子の生成法の研究新学術領域研究「半導体における動的相関電子系の光科学」第 4 回シンポジウム, 2011 年 1 月 6 日, 京都大学

- [27] 島野 亮: テラヘルツ時間領域分光法で探る Si の光励起ダイナミクス, 新学術領域研究「半導体における動的相関電子系の光科学」合同シンポジウム, 2010 年 5 月 27 日, 日本科学未来館

招待講演

- [28] 島野 亮: Intense terahertz pulse induced phenomena in low dimensional electron systems: carbon nanotubes and organic conductors, 分子研研究会, 大強度テラヘルツ光の発生と利用研究, 2011 年 1 月 14 日, 分子科学研究所

- [29] 島野 亮: テラヘルツ時間領域分光法の新展開: 半導体から強相関電子系まで (チュートリアル講演), H22 第一回テラヘルツ電磁波技術研究会、H22 第一回テラヘルツ応用システム研究会 共催研究討論会「テラヘルツ分光計測とイメージング」, 2010 年 8 月 6 日, 福井県三国観光ホテル

(セミナー)

- [30] 島野 亮, Terahertz spectroscopy in solids; from semiconductor to strongly correlated electron system, 理研エクストリームフォトニクスセミナー, 2010 年 11 月 25 日, 理化学研究所

- [31] 島野 亮, テラヘルツ分光の基礎と物性科学への応用, 先端光量子科学アライアンスセミナー, 2010 年 12 月 22 日, 東京大学

(その他)

- [32] 日刊工業新聞「光領域でも量子ホール効果」 2010.6.24

- [33] Nature asia-pacific, NPG Asia Materials, research highlight, "Condensed-matter physics: Electrons in a new light", 2010.9.6.

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つた物理系であり、具体的な研究テーマは多岐にわたつてゐる。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ゐる。現在我々が行つてゐる中心的課題は、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合せることで、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つた。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して見出すか。まさに「第2の地球は存在するか」という問い合わせ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リング統計、ミッシングバリオンの起源と観測的検証、ロシター効果による主星と系外惑星の自転・公転軸のずれの検出、地球型惑星系の反射光を用いた表面分布の再構築とバイオマーカーの検出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

銀河団の密度・温度揺らぎの解析モデルとスニヤーエフ・ゼルドビッチ効果

従来用いられてきた銀河団のガス分布に関する解析モデルは、銀河団内ガスの密度・温度の平均的な動径分布は考慮しているものの、その平均値の周りに必然的に存在する揺らぎの効果は無視されている。我々は過去数年間、その揺らぎに対する半経験的解析モデルを構築してきた。今回は、そのモデルを銀河団のスニヤーエフ・ゼルドビッチ効果に適用した。X線衛星チャンドラと、電波干渉計の銀河団観測データを組み合わせた解析の結果から推定される宇宙の膨張率、ハッブル定数、の値は、現在信じられている値に比べて15パーセント程度系統的に小さくなることを示した。これは、まさに我々のモデルが予想する系統誤差の大きさと一致する。これは、銀河団内ガスの揺らぎの存在が銀河団を用いた宇宙論パラメータの推定にどのような影響を与えるかを具体的に示し、検証した初めての例である。[1]

バリオン音響振動の2次元モデル

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「宇宙標準ものさし」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うまく利用することで、バリオン音響振動の精密測定から密度ゆらぎの成長率を決めることもでき、宇宙論的スケールでの重力理論の検証にも非常に強力な手段になる。しかしながら、赤方偏移ゆがみの影響で、銀河のクラスタリングは見かけ上、非等方になり、バリオン音響振動は2次元面上で特徴づけなければならない。昨年度より、我々は重力進化の摂動論にとづき、バリオン音響振動の精密な2次元モデルを構築、N体シミュレーションによる検証を経て、2次元モデルに基づく理論テンプレートから宇宙論的情報を引き出すための方法論を開発してきた。本年度は、その方法論を現存する銀河カタログ SDSS DR7 に応用し、宇宙論的距離とゆらぎの成長率のロバストな推定について考察を進めるとともに、N体シミュレーションのハローカタログを用いて、銀河バイアスの影響

についても調べ、さまざまな観点から2次元モデルの有効性を検証した。[3, 31, 48, 49, 52, 81, 74]

バリオン音響振動の多重極展開

赤方偏移ゆがみの影響を受けたバリオン音響振動は非等方になり、一般に2次元面上で特徴づけられるが、非等方性の度合いとしては多重極展開の低次モーメントのみでほぼ記述できる事がわかっている。本研究では、将来観測を踏まえて、低次モーメントにどれだけ宇宙論的情報が含まれるのか、どの次数までの多重極モーメントを観測から求める必要があるのかを、フィッシャー解析にもとづき調べた。その結果、ダークエネルギーの制限と重力理論の検証を同時にう上で、 $\ell = 4$ の多重極モーメントまで求めれば、2次元面上の情報とほぼ等価な宇宙論的情報を引き出せることがわかった。[47, 50]

宇宙の大規模フィラメント構造の定量化と隠れたバリオン探査

我々の住む宇宙には、銀河団、フィラメント、ボイドといった豊かな構造が広がっており、これは宇宙の大規模構造として知られている。こういった構造を定量化し、観測により得られた銀河の分布と、及び、理論やシミュレーションによって予言される物質の分布を比較することで、宇宙の初期条件や進化の過程に関する様々な情報が得られるはずである。従来用いられてきた銀河の2点相関関数等の統計量ではなく、スケルトンと呼ばれる、より直接的に銀河団、フィラメント、ボイドといった個々の構造物を取り扱う数学的な方法論の開発を進めてきた。2点相関関数だけでは表現しきれない豊かな宇宙の構造を定量的に扱うことができれば、従来とは統計的に独立な情報を引き出すことができ、さらに天文学的な応用も期待できる。離散データに対するスケルトンを用いたフィラメント抽出法を完成させ、N体シミュレーションとSDSS銀河サーベイの実データに適用可能であることを示した[6, 7]。またこの応用として、銀河大規模構造データとX線衛星「すばる」を用いて発見した新しい銀河群の大規模構造中での場所を、完成させたコードをもちいて解析し、フィラメントの交差点に対応していることを見いだした[8]。さらに、SDSS銀河分布にこのコードを適用して同定したフィラメントの交差点3点を、2011年度のすばる衛星で観測提案し、計190ksecの観測時間が採択された。

有質量ニュートリノの重力非線形進化への影響

ニュートリノが有限の質量をもつことは素粒子標準模型の限界を示す最初の実験的な証拠であり、ニュートリノがどの程度の質量を持つかという問い合わせることは重要な問題である。非常に興味深いのは、ニュートリノ振動実験で測定できるのは質量固有値

の自乗差のみであるのに対して、宇宙論的観測からは重力を通してニュートリノ質量の絶対値の総和を制限できることである。さらに重要な事実は、ベータ崩壊から得られる電子ニュートリノ質量の制限と振動実験で得られた結果を組み合わせる事によって得られる制限よりも、宇宙論的観測から得られている $\sum m_\nu < 0.2 - 1.0 \text{eV}$ (95% C.L.) という制限の方が厳しいということである。

宇宙論的観測からニュートリノの質量を制限できる一つの理由として、有質量ニュートリノは宇宙の構造形成の成長を均すという効果がある。ニュートリノは大きな速度分散をもつので、ある特徴的なスケール以下ではニュートリノの密度ゆらぎは存在できず、重力を弱めるからである。

将来の大規模構造観測を念頭に置くと、重力による非線形進化の影響が無視できないが、ニュートリノの影響を考慮した取扱いはなされていなかった。そこで我々は、摂動論的手法により非線形銀河バイアスの効果も考慮することによって、現存する銀河パワースペクトルのデータである Sloan Digital Sky Survey (SDSS) の Data-Release 7 (DR7) における銀河カタログのデータに我々の確立した手法を適用して、ニュートリノ質量に関するロバストな制限を得る試みを行った。WMAP5と組み合わせることによって、 $\sum m_\nu < 0.81 \text{eV}$ (95% C.L.) という WMAP5 のみに比べて約2倍厳しい制限を得た[9, 32, 33, 34, 35, 76, 77]。この制限は有質量ニュートリノの効果を正確に取り扱った上で得られた初めての制限である。

標準音源として重力波を用いた宇宙膨張の測定

BBOやDECIGOなど将来的に計画されている重力波干渉実験では、 10^6 個もの中性子星連星系からの重力波を高精度で検出することができると言えられている。この中性子星連星系からの重力波は理論的によく理解されており、その振幅から光度距離を精度よく決定することができる。可視光観測での追観測により赤方偏移が決定できれば、重力波により赤方偏移と光度距離の関係を詳しく調べることによって宇宙論的な情報を抜き出す事ができるのである。

我々は、この光度距離分布の非等方性、具体的には単極子と双極子成分を組み合わせることによって、ハップルパラメータを赤方偏移の関数として決定しうることを示した[10]。例えば3年間のDECIGO観測を仮定すると、 $z = 1$ までのハップルパラメータを1.5-8%程度の精度で決定できることを示した。重力波の標準音源による方法は、Ia型超新星による標準光源による方法と比較して、高赤方偏移まで観測できること、観測できる数が多いので統計誤差がおさえられることができることが主な利点である。

CMBレンジングと銀河の弱重力レンズを用いたダークエネルギー・ニュートリノ質量への制限

Ia型超新星、CMB、宇宙大規模構造の観測によって標準宇宙モデルが確立してきたが、このモデルに

はいくつかの課題が残されている。そのうちの一つは、物理的起源の不明なダークエネルギーが宇宙のエネルギー密度の 70% 以上を占めていることである。また、素粒子実験からニュートリノ質量はゼロでないことが分かっているが、標準宇宙論ではゼロとして扱われている。ダークエネルギー や ニュートリノ質量は宇宙の構造形成に影響を与えるため、密度揺らぎの情報をもつ観測を用い、これらの課題にアプローチできる。

本研究では、その方法として特に銀河の弱重力レンズと CMB レンジングに着目し、次世代サーベイにおけるこれらの測定・検証可能性について見積もりを行った。特に次世代の CMB 観測として Planck、ACTPol、次世代の銀河の測光サーベイとして HSC を想定した。その結果、これらのサーベイから得られる弱重力レンズ効果を利用することで、DETF で見積もられている Stage-III クラスの他の観測と同程度の制限を得られることが分かった。さらに、決定精度が銀河の弱重力レンズのサーベイ時間、トモグラフィーにおける赤方偏移ビンの個数にどのように依存するか調べ、ダークエネルギー・ニュートリノ質量を制限する上で最良のサーベイ・デザインについて示唆を与えた。

本研究より、ダークエネルギー・ニュートリノ質量の制限において、重力の非線形進化を正しく扱うことで、弱重力レンズサーベイは極めて有効な手段であるということが分かった [11, 54]。

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 [36, 37, 38, 55, 56]。

CMB の弱重力レンズマップ再構築：勾配・カール成分の分離法

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 観測において曲がり角を再構築できると考えられている。

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、相対論的な重力の高次摂動でも曲がり角にカール成分が生じるため、カール成分を無視した再構築の方法では曲がり角がバイアスされる可能性がある。

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 を想定した場合にこの手法で予想されるノイズを見積もり、勾配成分と同程度のノイズでカール成分を再構築できることを示した。[57, 82]。

SDSS 銀河の数密度分布関数

銀河分布のクラスタリングは、非線形重力進化によってガウス的な初期条件でも、高密度側にテールがのびた特徴的な非ガウス分布になることが知られている。本研究では、スローンデジタルスカイサーベイ (Sloan Digital Sky Survey, SDSS) の銀河カタログを用いて、色・明るさ・形態に応じて分類した銀河の数密度分布関数のふるまいを調べた。N 体シミュレーションからダークマターのクラスタリング、赤方偏移ゆがみの影響を求め、それを下に、SDSS 銀河分布とダークマターのクラスタリングの違いを比較、非線形バイアスを用いてその違いを定量化した。その結果、銀河の数密度分布関数は大域的に対数正規分布でよく近似されるが、低密度側では非線形バイアス、特に 2 次の非線形性によって対数正規分布からずれることがわかった。この 2 次の非線形バイアスは、銀河 3 点相関関数から見積もられた非線形バイアスとほぼ一致し、その定性的なふるまいは、銀

河の色・明るさ・形態による違いも含めてハロー モデルでよく説明できる。[27, 43]

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。今年度は観測領域が 2 割増えた SDSS DR7 を用いて、この結論をより精密に検証し、DR4 と同様の系統誤差が存在することを示した [64]。

5.1.2 系外惑星

トランジット惑星系のロシター効果

ロシター効果とは、恒星の前面を惑星が通過して食を起こす（トランジット）太陽系外惑星系で食が起こる最中に星のスペクトルの吸収線に特有の変化が起こる現象である。ロシター効果を観測する事により惑星の軌道傾斜角 (λ) を測定する事ができ、これを理論的に予言される λ の統計的分布と比較する事で惑星形成理論に対する検証・制限を与える事で可能となる。昨年度はいくつかのトランジット系 (TrES-4, XO-4, HAT-P-11) に対してすばる望遠鏡を用いてロシター効果を観測し、惑星の軌道傾斜角 λ を測定した。特に惑星系 HAT-P-11 に対して行った観測では、海王星サイズの惑星に対して初めてロシター効果を検出する事に成功し、さらに結果として惑星の軌道公転軸と中心星の自転軸は大きくずれている事が分かった。

一方、昨年度はロシター効果の理論的なモデル化に積極的に取り組んだ。これまで観測された視線速度の変動からロシター効果をモデル化する際には、トランジット中に予想される星の模擬スペクトルを用いたシミュレーションを行う必要があり、シミュレーションには非常に多くの時間と手間がかかるという問題があった。我々の研究では、トランジット中の吸収線の形状を精密にモデル化する事によってロシター効果による視線速度変動を解析的に計算し、実際の観測データの解析にかかる時間を大幅に短縮す

る事に成功した。またロシター効果を解析的に書く事が出来るようになった事によって星の微分（差動）回転を取り入れるなど、更なる精密なモデル化が可能となった。本研究ではロシター効果を微分回転まで含めて記述し、将来の観測によって微分回転が観測可能であるかも含めて検討した [12]。

反射光による地球外系外惑星の表層環境の探査

現在、目覚ましい速度で次々に系外惑星が発見されており、地球質量程度の惑星、さらにはハビタブルゾーン（水が惑星表面に液体として存在できる軌道の範囲）内の惑星の存在も今後数年で明らかになってきた。そこに生命の存在を探ることが、今後の大きな目標である。系外惑星の環境の詳細を観測的に知るための鍵として、系外惑星からくる反射光が注目されている。海や土壤、雪などの表面はそれぞれに固有の反射特性を示すが、特に植物の反射特性にはレッドエッジと呼ばれる著しい特徴があり、生命的の存在を示す指標ともなりうる。これらをふまえて、私達は、反射光の多バンド測光観測から逆問題的に惑星表面を再構築する方法を開拓している。私たちはまず、実際の地球観測衛星のデータをもとに 10pc 彼方から見た雲の無い地球を模擬観測し、その結果をモデルでフィットすることで、海や陸、さらには植物の割合や分布が推定できることを示した [16]。また、EPOXI によって実際に観測された反射光の時系列を解析し、既知の物質の反射スペクトルをテンプレートとすれば、雲のある実際の場合でも地表面のおおまかな経度方向の分布が再構築できることが分かった。また、海、雲などの存在を推定するために必要な精度を見積もった [63, 68, 69]。

自転・公転を利用した系外惑星の 2 次元 Mapping

観測される系外惑星の反射光は表面の各部分からの寄与の総和であるが、反射光に寄与する惑星表面上の領域は、系外惑星一主星一観測者の位置関係によって変わる。このことと、惑星が自転しながら主星の周りを公転するという動きを考えると、その 2 成分の動きから系外惑星の 2 次元的な非一様性が再構築できる可能性がある。私たちはこのことを初めて指摘し、雲がない地球を 10pc 彼方から観測するとしたときのシミュレーションからそれが可能であることを示した。また、同時に赤道傾斜角も推定できることを示した。[42, 61, 62]

<報文>

(原著論文)

- [1] Erik Reese, Hajime Kawahara, Tetsu Kitayama, Naomi Ota, Shin Sasaki & Yasushi Suto: “Impact of Chandra calibration uncertainties on galaxy cluster temperatures: application to the Hubble constant”, The Astrophysical Journal, **721** (2010) 653

- [2] Ryuichi Takahashi, Naoki Yoshida, Masahiro Takada, Tahahiko Matsubara, Naoshi Sugiyama, Issha Kayo, Takahiro Nishimichi, Shun Saito & Atsushi Taruya: "Non-Gaussian Error Contribution to Likelihood Analysis of the Matter Power Spectrum", *The Astrophysical Journal*, **726** (2011) id.7
- [3] Atsushi Taruya, Takahiro Nishimichi & Shun Saito: "Baryon acoustic oscillations in 2D: Modeling redshift-space power spectrum from perturbation theory", *Physical Review D*, **82** (2010) id. 063522
- [4] Takahiro Nishimichi, Atsushi Taruya, Kazuya Koyama & Cristiano Sabiu: "Scale dependence of halo bispectrum from non-Gaussian initial conditions in cosmological N-body simulations", *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **07** (2010) 002
- [5] Atsushi Nishizawa, Atsushi Taruya & Seiji Kawamura: "Cosmological test of gravity with polarizations of stochastic gravitational waves around 0.1-1 Hz", *Physical Review D*, **81** (2010) id. 104043
- [6] Thierry Soubie, 2010, MNRAS accepted
- [7] Thierry Soubie, Christophe Pichon & Hajime Kawahara, 2010, MNRAS accepted
- [8] Hajime Kawahara, Hiroshi Yoshitake, Takahiro Nishimichi & Thierry Soubie: "Suzaku Observation of a New Merging Group of Galaxies at a Filamentary Junction", *ApJ*, **727** (2011) L38
- [9] Shun Saito, Masahiro Takada & Atsushi Taruya: "Neutrino mass constraint with the Sloan Digital Sky Survey power spectrum of luminous red galaxies and perturbation theory" *Phys.Rev. D* **83**, 043529 (2011).
- [10] Atsushi Nishizawa, Atsushi Taruya & Shun Saito: "Tracing the redshift evolution of Hubble parameter with gravitational-wave standard sirens", accepted for publication in *Physical Review D* (2011).
- [11] Toshiya Namikawa, Shun Saito and Atsushi Taruya "Probing dark energy and neutrino mass from upcoming lensing experiments of CMB and galaxies" *JCAP* **12** (2010) 027
- [12] Teruyuki Hirano, Norio Narita, Avi Shporer, Bun'ei Sato, Wako Aoki, and Motohide Tamura: "A Possible Tilted Orbit of the Super-Neptune HAT-P-11b", *Publication of Astronomical Society of Japan*, **63** (2011) in press (arXiv:1009.5677)
- [13] Norio Narita, Teruyuki Hirano, Roberto Sanchis-Ojeda, Joshua N. Winn, Matthew J. Holman, Bun'ei Sato, Wako Aoki, and Motohide Tamura: "The Rossiter-McLaughlin Effect of the Transiting Exoplanet XO-4b", *Publication of Astronomical Society of Japan*, **62** (2010) L61
- [14] Norio Narita, Bun'ei Sato, Teruyuki Hirano, Joshua N. Winn, Wako Aoki, and Motohide Tamura: "Spin-Orbit Alignment of the TrES-4 Transiting Planetary System and Possible Additional Radial Velocity Variation", *Publication of Astronomical Society of Japan*, **62** (2010) 653
- [15] Akihiko Fukui, Norio Narita, Paul J. Tristram, Takahiro Sumi, Fumio Abe, Yoshitaka Itow, Denis J. Sullivan, Ian A. Bond, Teruyuki Hirano, Motohide Tamura, David P. Bennett, Kei Furusawa, Fumiya Hayashi, John B. Hearnshaw, Shun Hosaka, Koki Kamiya, Shuhei Kobara, Aarno Korpela, Pam M. Kilmartin, Wei Lin, Cho Hong Ling, Shota Makita, Kimiaki Masuda, Yutaka Matsubara, Noriyuki Miyake, Yasushi Muraki, Maiko Nagaya, Kenta Nishimoto, Kouji Ohnishi, Kengo Omori, Yvette Perrott, Nicholas Rattenbury, Toshiharu Saito, Ljiljana Skuljan, Daisuke Suzuki, Winston L. Sweatman, Kohei Wada: "Measurements of Transit Timing Variations for WASP-5b", *Publication of Astronomical Society of Japan*, **63** (2011) 287
- [16] Yuka Fujii, Hajime Kawahara, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Satoru Fukuda, Teruyuki Nakajima, & Edwin L. Turner: "Colors of a Second Earth: Estimating the Fractional Areas of Ocean, Land, and Vegetation of Earth-like Exoplanets", *The Astrophysical Journal*, **715** (2010) 866
- [17] Hajime Kawahara & Yuka Fujii: "Global Mapping of Earth-like Exoplanets From Scattered Light Curves", *The Astrophysical Journal*, **720** (2010) 1333
- (会議抄録)
- [18] T.Ohashi, Y.Ishisaki, Y.Ezoe, S.Sasaki, H.Kawahara, K.Mitsuda, N.Yamasaki, Y.Takei, M.Ishida, Y.Tawara, I.Sakurai, A.Furuzawa, Y.Suto, K.Yoshikawa, N.Kawai, R.Fujimoto, T.G.Tsuru, K.Matsushita, and T.Kitayama: "DIOS: the diffuse intergalactic oxygen surveyor: status and prospects", SPIE, 7732(2010)77321S
- [19] Yasushi Suto: "Unknowns and unknown unknowns: from dark sky to dark matter and dark energy", SPIE, 7733(2010)773302
- (国内雑誌)
- [20] 須藤 靖: "四月になれば駒場は", 東京大学出版会 UP **450**(2010)38
- [21] 須藤 靖: "ポスドク問題:大学の論理、企業の論理", 日本物理学会誌 **65** (2010)272
- [22] 須藤 靖: "フレッシュマンのためのブックガイド", 日経サイエンス (2010) 5月号, p115
- [23] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その十一: 幸せ相対論", 東京大学出版会 UP **452**(2010)26
- [24] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その十二: 大学教師をめぐる3つの誤解", 東京大学出版会 UP **455**(2010)26
- [25] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その十三: ローの精神", 東京大学出版会 UP **457**(2010)33

- [26] 須藤 靖:“注文の多い雑文 その十四: 三日月とクロワッサン”, 東京大学出版会 UP **460**(2011)24
(学位論文)
- [27] Kensuke Fukunaga: “Precise measurement of number-count distribution function of SDSS galaxies” (修士論文)
(著書)
- [28] 須藤 靖: “人生一般二相対論”, 東京大学出版会 (2010 年 4 月刊行)
- [29] 須藤 靖: “もうひとつの一般相対論入門”, 日本評論社 (2010 年 7 月刊行)
- [30] 岡村定矩 編 吉田直紀・須藤 靖・田村元秀著: 数学セミナー 別冊 “宇宙はどこまでわかったか?”, 日本評論社 (2010 年 10 月刊行、第二章執筆)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [31] Atsushi Taruya: “Baryon acoustic oscillations in 2D: Modeling redshift-space power spectrum from perturbation theory”; COSMO/CoSPA2010 (Tokyo, 9/26-10/1, 2010)
- [32] Shun Saito, Masahiro Takada & Atsushi Taruya: “Neutrino Mass Constraint from SDSS DR7 power spectrum with perturbation theory”; SDSS-III collaboration meeting (APC, France, September 2010).
- [33] Shun Saito: “Beyond 1D-BAOs through galaxy surveys”; COSMO/CoSPA2010 (Tokyo, 9/26-10/1, 2010)
- [34] Shun Saito: “Fruitful information beyond 1D BAOs through galaxy surveys”; Cosmology in Northern California (LBNL, U.S., November 2010).
- [35] Shun Saito: “2D BAO constraints based on perturbation theory”; Cosmology on the Beach (Puerto Vallarta, Mexico, January 2011).
- [36] Toshiya Namikawa, Tomohiro Okamura & Atsushi Taruya: “Probing primordial non-gaussianity from magnification-lensing and magnification-ISW cross-correlations”; (Kochi, Japan, 8/29-9/1, 2010)
- [37] Toshiya Namikawa, Tomohiro Okamura & Atsushi Taruya: “Magnification effect on galaxy-CMB lensing cross-correlation”; COSMO/CoSPA2010 (Tokyo, 9/26-10/1, 2010)
- [38] Toshiya Namikawa, Tomohiro Okamura and Atsushi Taruya: “Impact of magnification effect on the detection of primordial non-Gaussianity from imaging survey of galaxies” DENET 2011 Subaru HSC Workshop (ASIAA, Taowa, March 2011)

- [39] Teruyuki Hirano: “The Rossiter-McLaughlin Effect for Transiting Exoplanetary Systems: New Theory and Observation”; 2010 Sagan Exoplanet Summer Workshop (California Institute of Technology, July 2010)
- [40] Teruyuki Hirano: “New Analysis Routine for the Rossiter-McLaughlin Effect”; Detection and dynamics of transiting exoplanets (France, August 2010)
- [41] Teruyuki Hirano: “New Methods for Analyzing the Rossiter-McLaughlin Effect in Transiting Exoplanetary Systems”; The Astrophysics of Planetary Systems: Formation, Structure, and Dynamical Evolution (Torino, October 2010)
- [42] Yuka Fujii, Hajime Kawahara, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Satoru Fukuda, Teruyuki Nakajima and Edwin L. Turner: “Investigating Surfaces of Earth-like Exoplanets via Scattered Light”; 2010 Sagan Exoplanet Summer Workshop (California Institute of Technology, July 2010)
- [43] Kensuke Fukunaga: “Density Probability Distribution Function of SDSS”; COSMO/CoSPA2010 (Tokyo, 9/2-10/1, 2010)
- 招待講演
- [44] Yasushi Suto: “Unknowns and unknown unknowns: from dark sky to dark matter and dark energy”; invited plenary talk at SPIE meeting, (San Diego, June 2010)
- [45] Yasushi Suto: “DENET and Sumire collaboration”; DENET-Taiwan HSC collaboration meeting 2011 (ASIAA, Taipei, March 2011)
- [46] Yasushi Suto: “HSC: Subaru collaboration with Taiwan and Princeton”; Subaru User’s Meeting, (NAOJ, January 2010)
- [47] Atsushi Taruya: “Modeling and forecasting BAO from multipole expansion”; The observational pursuit of dark energy after Astro2010, (Pasadena, 10/7-8, 2010)
- [48] Atsushi Taruya: “Baryon acoustic oscillations in 2D”; The 11th Asian Pacific Physics Conference (Shanghai, September 2010)
- [49] Atsushi Taruya: “Baryon acoustic oscillations in 2D”; The 11th Asian Pacific Physics Conference (Shanghai, September, 2010)
- [50] Atsushi Taruya: “Modeling baryon acoustic oscillations: prospects and impact on cosmology”; PFS Science workshop (Mitaka, 12/9-10, 2010)
- [51] Shun Saito: “Redshift-space distortion/ Neutrino Masses-Perturbation Theory & Lesson from DR7-focusing on ‘nonlinear power spectrum’ on BAO scale”; BigBOSS collaboration meeting (LBNL, U.S.A., February 2011).
- (国内会議)

一般講演

- [52] 樽家 篤史: “非等方バリオン音響振動：赤方偏移ゆがみの精密理論モデル”；物理学会(九州工業大学, 9/14, 2010)
- [53] 樽家 篤史: “Signature of primordial vector modes on large-scale structure”; RESCEU/DENET サマースクール(高知, 8/29-9/1, 2010)
- [54] 並河 俊弥、斎藤 俊、樽家 篤史、市來 淨與: “高角度分解能 CMB 観測と弱重力レンズサーベイを想定した宇宙論パラメータの決定精度”; CMB ワークショッピング(国立天文台, 6/7-6/9, 2010)
- [55] 並河 俊弥、岡村 雅晋、樽家 篤史: “CMB レンジングと銀河個数密度の相関量における増光効果の影響”; 日本天文学会 2010 年秋季年会(金沢大学, 9/22-9/24, 2010)
- [56] 並河 俊弥: “銀河の測光サーベイを用いた原始非ガウス性の探求：増光効果の影響”; RA キャンブ(伊豆松の坊, 2/17-2/19, 2011)
- [57] 並河 俊弥、樽家 篤史: “CMB の弱重力レンズマップの再構築：勾配・カール成分の分離法”; 日本天文学会 2011 年春季年会(筑波大学, 3/16-3/19, 2011)
- [58] 平野 照幸: 「すばる HDS を用いたトランジット惑星系のロシター効果の観測」；日本における高分散分光の到達点と将来(岡山市, 5/12, 2010)
- [59] 平野 照幸, 成田 憲保, 佐藤 文衛, 須藤 靖, 高橋 安大, Joshua N. Winn: 「傾いた惑星軌道は当たり前?: ロシター効果の観測と理論の現状」；日本天文学会 2011 年春季年会(筑波大学, 3/16-3/19, 2011)
- [60] 平野 照幸, 須藤 靖, 樽家 篤史, Joshua N. Winn, 成田 憲保, 佐藤 文衛: 「トランジット惑星系のロシター効果を用いた星の差動回転の検出可能性」；日本天文学会 2011 年春季年会(筑波大学, 3/16-3/19, 2011)
- [61] 藤井 友香、河原 創、須藤 靖、樽家 篤史、福田 悟、中島 映至、Edwin L. Turner: “Toward remote sensing of Earth-like exoplanets”; RESCEU/DENET Summer School(高知, 8/29-9/1, 2010)
- [62] 河原 創、藤井 友香: 「地球型系外惑星の世界地図：反射光トモグラフィーによる惑星表面マッピング」；日本天文学会 2010 年秋季年会(金沢大学, 9/22-9/24, 2010)
- [63] 藤井 友香、河原 創、須藤 靖、樽家 篤史、福田 悟、中島 映至、Edwin L. Turner: 「地球の多バンド測光観測からの表層環境の再構築」；天文学会 2011 年春季年会(筑波大学, 3/16-3/19, 2011)
- [64] 柏木 俊哉、須藤 靖、樽家 篤史、矢幡 和浩: 「SDSS 銀河カタログを用いた SFD 減光マップの検証」；日本天文学会 2011 年春季年会(筑波大学, 3/16-3/19, 2011)

招待講演

- [65] 須藤 靖: “天体宇宙物理分野”; 日本学術会議シンポジウム 学術の大型施設計画・大規模研究計画(マスター・プラン)に関する物理系シンポジウム(日本学術会議講堂, 1/31, 2011)

[66] 須藤 靖: “惑星いろいろ、地球も色々～第二の地球の色から表面地図を推測する～”, GCOE「地球から地球たちへ」駒場シンポジウム 科学方法論の開拓(東京, 1/22, 2011)

[67] 平野 照幸: “Latest Discoveries on Tilted Planetary Orbits Based on the Measurements of the Rossiter-McLaughlin Effect”; 第 7 回太陽系外惑星大研究会(国立天文台三鷹, 3/9-3/11, 2011)

[68] 藤井 友香、河原 創、須藤 靖、樽家 篤史、福田 悟、中島 映至、Edwin L. Turner: 「地球型惑星の反射光の解析と植物の検出」；ワークショップ「ハビタブルゾーンネット」(東京工業大学, 12/28, 2010)

[69] 藤井 友香、河原 創、須藤 靖、樽家 篤史、福田 悟、中島 映至、Edwin L. Turner: “Scattered light as a probe of the surface environment of Earth-like exoplanets”; 第 7 回太陽系外惑星大研究会(国立天文台三鷹, 3/9-3/11, 2011)

(セミナー)

[70] Yasushi Suto: “Colors of a second earth: towards exoplanetary remote-sensing”; JPL colloquium(Pasadena, USA, June 24, 2010)

[71] Yasushi Suto: “Impact of Chandra calibration uncertainties on cluster temperatures: application to H_0 from the Sunyaev-Zel'dovich effect” Caltech astrophysics theory group seminar, Pasadena USA(June 25, 2010)

[72] Atsushi Taruya: “Signature of primordial vector modes on large-scale structure”; LBNL seminar(Berkeley, 10/13, 2010)

[73] Atsushi Taruya: “Halo bispectrum from non-Gaussian initial conditions”; (Shanghai observatory, 11/15, 2010)

[74] Atsushi Taruya: “Modeling baryon acoustic oscillations in 2D”; Cosmo-oenology seminar (Institut d’Astrophysique de Paris, 2/9, 2011)

[75] Atsushi Taruya: “Cosmology from standard sirens”; Cosmo Journal club (Institut de Physique Théorique, 3/9, 2011)

[76] Shun Saito: “Toward unlocking the full potential of BAO information through galaxy surveys”; INPA Journal Club(LBNL, U.S.A., November 2010).

[77] Shun Saito: “Modeling of galaxy power spectrum in redshift space based on perturbation theory”; Cosmology Seminar (University of California, Davis, U.S.A., February 2011).

[78] 須藤 靖: “夜空のムコウの世界を探る”, “宇宙の組成と宇宙の未来”, “宇宙における必然と偶然”, “太陽系外惑星とバイオマーカー” 第 27 回北軽井沢駿台天文講座(2010 年 8 月 6 日～9 日)

[79] 須藤 靖: “向陽の空ノムコウの世界”, 土佐中学高等学校 90 周年記念講演会(2010 年 11 月 18 日)

[80] 須藤 靖: “惑星色々、宇宙もいろいろ～宇宙の色と第二の地球の色～”, 名古屋大学 素粒子宇宙起源研究機構 KMI セミナー(2010 年 2 月 8 日)

- [81] 樽家 篤史: “銀河パワースペクトルから探る精密宇宙論と課題”; 理論物理学コロキウム (立教大学, 4/27, 2010)
- [82] 並河 俊弥: “CMB の弱重力レンズの再構築: 勾配・カール成分の分離法”; 宇宙論セミナー (東北大, 2/24, 2011)
(講演)
- [83] 樽家 篤史: “宇宙のものさし、バリオン音響振動”; ビッグバン宇宙国際研究センタークリスマス講演会 (東京大学, 12/22, 2010)

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う情報処理が可能となるため、古典情報処理の限界を超えるブレークスルーの候補として注目を集めている。

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テ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、という問い合わせに対して、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添田彬仁氏、中田芳史氏、杉山太香典氏、修士課程大学院生である、金城慶之氏、仲山将順氏、若桑江友里および日本学術振興会外国人研究員のJenny Hide博士のメンバーで、分散型量子計算、量子プロトコル、エンタングルメント理論、量子トモグラフィ、量子力学基礎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 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。ネットワークを介して、ユーザーとは別の場所にある資源を用いて秘匿性の高い量子計算を行うクラウド型量子計算システムや、ネットワークとしてエンタングルメントを用いる量子テレクローニングなども、分散型量子情報処理の一つと考えることができる。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。分散型量子計算に関連して、今年度は次のような研究を行った。

分散型量子情報処理におけるエラーモデルの解析

量子情報処理の実現に向けて、必要とされる資源を最小化するのは重要な課題であるが、そのためには量子情報処理を実装する際に起きるエラーを特定する必要がある。そこで、高い拡張性を持つと期待されるアーキテクチャーである分散型量子情報処理における実用的なエラーモデルの構築を目指すための研究を行なった。分散型量子情報処理では、量子情報を保持するための量子系と、これらの間の情報のやり取りを媒介するための物理系から構成され、情報保持用の物理系と情報媒介用の物理系の間に生じる相互作用を調整して情報処理を進める。理想的な状況下では、情報媒介用の物理系は完全に特定の状態に初期化することができるが、実際には、系の状態を制御する精度によって不確定性が生じる。

そこで、情報媒介用の物理系の初期状態の制御精度が分散型量子計算に与える影響を解析するために、情報媒介系の初期状態が完全に未知な場合と完全に既知な場合について、エラー訂正が可能となるような情報保持用と情報媒介用の物理系間での相互作用の性質が満たすべき条件を導出した。その結果、情報媒介系の初期状態が完全に未知な場合については、物理系間の相互作用がイジング型なければならないこと、そして、情報媒介系の初期状態が完全に既知な場合については、イジング型以外のハイゼンベルグ型などの相互作用であってもエラー訂正が可能な場合があることが示された。また、それぞれの場合についてエラー訂正可能な相互作用の満たすべき性質が、正のKraus-Cirac係数の個数で決まることが導かれた。この成果は、正のKraus-Cirac係数による相互作用の数学的分類に操作論的な意味を与えるものである。[担当：添田、村尾]

制御ユニタリ演算のLOCC 実装

分散型量子情報処理においては、異なるノード間で2量子ビット制御ユニタリ演算を行なう必要がある。そこで、このような2量子ビット制御ユニタリ演算を、エンタングルメント資源と局所操作及び古典通信（LOCC）のみを用いて確実に実装するために必要な量子ビット系の最小エンタングルメント資源量を解析し、ユニタリ演算のエンタングルメント生成力に関わらず1ebitのエンタングルメント資源が必要であることを証明した。この結果により、十分性が証明されて以来過去10年間にわたり未解決問題であった、2量子ビット制御ユニタリ操作のLOCC実装に対する1ebit資源の必要十分性が証明されたことになる。またこの結果は、一般的な2量子ビット制御ユニタリ操作のLOCC実装においては、エンタングルメント生成力で与えられる既知状態に対する操作での最小エンタングルメント資源量と、今回のような未知状態（量子情報）に対する操作で必要となる最小エンタングルメント資源量には差が生じることを示唆するため、分散型量計算に必要なエンタングルメント資源は、入力情報を決定するタイミングに異存することが示された。[担当：添田、Turner、村尾]

バタフライ通信路における制御ユニタリ演算

通信容量や通信方向に制限があるような（量子）ネットワークで接続されたノード間で分散型量子計算を効率良く行なうための方法を求めるために、バタフライ通信路と呼ばれる通信ボトルネックを含むネットワークにおいて、ネットワークを構成する通信路を1量子ビットの量子通信または2古典ビットの古典通信のいずれかに用いるとした場合に、それぞれ別ノードで与えられる2量子ビットの入力量子情報に対して任意の制御ユニタリ演算を実装し、これらとも別ノードにある2量子ビットに出力する方法を示した。また、追加の量子資源を用いない場合には、このようなバタフライ通信路を用いて制御ユニタリ演算以外の演算を確実に実装することができないことを証明した。この研究は、これまで多者間通信という観点からのみ解析されてきたネットワーク符号化に対して、多者間での分散型量子計算というまったく新しい観点からネットワーク符号化を捉え、量子計算ネットワーク符号化という新しい分野を切り拓くものである。[担当：添田、金城、Turner、村尾]

ユニタリ操作の制御化

量子計算アルゴリズムにおいては、与えられたユニタリ操作をユニタリ化した制御ユニタリ演算を用いて計算を行なう場合が多く、分散型量子情報計算においても重要な構成要素となっている。本研究では、ユニタリ操作を実行することはできるが、そのユニタリ操作を特定することはできないような状況で、制御ユニタリ演算を構成する機構を考察した。その結果、未知量子状態（量子情報）に対しては、未知なユニタリ操作を施す能力を持った装置（ブラックボックス）が一つ与えられているときに、この装置によって提供されているユニタリ操作を完全に制御化するような普遍的な機構は存在しないことを証明した。

次に、入力情報やユニタリ操作の秘匿性の条件を緩和し、入力状態がある程度限定されている場合と、与えられたユニタリ操作に対してある程度知識を有する場合についての考察を行い、ユニタリ操作の制御化が可能な例を発見した。以前、量子光学の実験グループが、光子を量子ビットとした線形光学系で未知ユニタリ操作の制御化を実現したとの報告があり、我々の結果と矛盾するかのようにみえたが、この実験系で暗に成り立っている条件を明らかにすることにより、これらは、量子情報に対して完全なブラックボックスの制御化を行なっているわけではなく、我々の求めたユニタリ操作が可能な例の範疇にあることが判明した。[担当：添田、村尾]

ユニタリ変換の機能性保存ランダム化

プログラム難読化の量子版として、ユニタリ変換の機能性保存ランダム化という新しい概念を導入し、その計算量複雑性を機能性保存ランダム化における記録の計算量的な判別不可能性によって評価した。その

結果、ユニタリ変換のどのような量子ゲート列表現に対しても、平均的には、計算量的機能性保存ランダム化によって Non-deterministic quantum polynomial-time (NQP) 完全の最悪インスタンスに変換することができる事を示した。この応用として、半公開的に量子秘匿計算を行なうことのできる権限付き量子計算を提案した。この権限付き量子計算の安全性は、機能性保存ランダム化をされた量子ゲート表現から計算を実行するための鍵を偽造できないという量子計算量複雑性 (NQP-hard) に基づいている。この研究は、ソニーシステム技術研究所の田中雄氏との共同研究である。[担当：村尾]

5.2.2 エンタングルメント理論

ハミルトニアン動力学によるランダム状態生成

ランダム状態とは、ヒルベルト空間からユニタリ不変な測度の意味でランダムに選出した純粋状態の集合である。ランダム状態は、そのランダム性からヒルベルト空間の全ての状態が持つ普遍的な性質を調べるために用いられ、たとえば、量子統計力学の基礎付けに関連して、ランダム状態の部分トレースを議論することで等重率の原理を導出する、ランダム状態を量子情報秘匿などの量子プロトコルの資源として利用する、など数多くの応用例が知られている。一方で、ランダム状態は、いくつかのエンタングルメント測度において極端に巨大なエンタングルメントを示し、ランダム状態の生成には系の大きさに対して指数時間がかかるために、ランダム状態を得ることは容易ではないことも知られている。

本研究では、ランダム状態をハミルトニアン動力学で生成する方法をエンタングルメントの観点から考察し、一次元半古典スピinn模型において、種々の多体相互作用が混在する場合に、平均してランダム状態と同程度のエンタングルメント生成が可能になることを示した。また、結合定数に揺らぎが存在する場合もエンタングルメント生成力が向上することも判明した。これら結果から、一次元スピinn鎖においてランダム状態が実現されるためには、多体相互作用の摂動や結合定数の揺らぎなど、何らかのランダム性が必須であるという示唆を得た。[担当：中田、Turner、村尾]

並進対称ランダム状態のエンタングルメント

一般的なランダム状態は、その定義からヒルベルト空間の普遍的な性質を持つと期待されるが、しかし、通常物理学で対象となる一次元スピinn模型の基底状態は巨大なエンタングルメントを持たないことが数値計算より示唆されている。この、一見すると相反するように見える事象にはヒルベルト空間の対称性が関与していると考えられる。本研究では、特に並進対称性がエンタングルメントに与える影響を解析するために、並進対称性を持つ系におけるランダム状態の記述法を確立した。この記述法を用いる

ことで、今後、並進対称性を持つ系でのランダム状態のエンタングルメント特性が明らかになることが期待される。[担当：中田、Turner、村尾]

非平衡定常状態のエンタングルメント

熱力学は物理の様々な分野で重要であるが、その応用範囲は平衡状態に限られており、量子多体系の非平衡状態に対する熱力学理論は、現段階では完成していない。しかし、時間依存性のない非平衡定常状態に対しては、先行研究によって熱力学的な理解が進みつつある。特に、平衡状態のハミルトニアンに加えてエネルギー流を表す作用が加わっているような一次元系の場合は、エネルギー密度演算子と熱流量演算子の間の関係を用いて、連続の方程式からエネルギー一定常流演算子を定義することができる。すると、非平衡定常状態は、通常のハミルトニアンにエネルギー一定常流演算子の補正を加えた、有効ハミルトニアンのカノニカル分布として表すことができるようになる。そこで、非平衡定常状態のエンタングルメント witness として、エネルギー一定常流演算子の期待値を用いて、多体系の非平衡定常状態におけるエンタングルメントの性質を解析した。[担当：Hide]

非平衡動力学系のエンタングルメント生成

状態集合全体のうち、エンタングルしていない状態の占めるヒルベルト空間における容積（空間の割合）は、次元が大きくなるにつれて指数関数的に少なくなることが知られている。そこで、ヒルベルト空間における各種のエンタングル状態集合の占める容量と、多体系において非平衡動力学によって変化する状態の軌跡が占める容量を比較することで、一般的な多体系の非平衡動力学におけるエンタングルメント生成可能性を評価することを試みた。[担当：Hide、Turner、村尾]

周期的変動磁場中のスピニ鎖のエンタングルメント

周期的変動磁場中の下で、スピニ間の相互作用も周期的に変動するような一次元スピニ鎖のハミルトニアンに対して、エンタングルメント witness として内部エネルギーに基づいた演算子を導入して解析を行ない、周期的変動磁場の影響でエンタングルメントが強くなる場合があることを確かめた。また、このような系の基底状態のエンタングルメントの性質を Mayer-Warrach エンタングルメント測度を用いて解析している。[担当：Hide、中田、村尾]

5.2.3 量子トモグラフィ

量子情報科学の分野において、ショアの素因数分解アルゴリズムや量子テレポーテーション等、量子性

を積極的に活用した情報処理（量子情報処理）用のアルゴリズムがこれまで提案されており、既に光子系や量子ドットなど様々な物理系でその動作確認がなされている。この動作確認には、そのアルゴリズムに必要とされる量子状態が正しく用意されていること、量子状態の操作が正しくなされていることの実験的な証明が必要となる。この実験による量子情報処理の妥当性証明に使用される手法のひとつに量子トモグラフィがある。量子トモグラフィとは、用意した量子状態や量子操作を実験データから推定する手法の総称であり、上記のように量子情報処理実験において重要な役割を担っている。

トモグラフィ推定精度の評価

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な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 2-design

トモグラフィのデータから演算子を再構成するには、問題にしている系に関する情報完全な演算子の集合が必要である。対称情報完全正定値演算子測度(SICPOVMs)と呼ばれる特別な状態の情報完全集合があることが知られているが、その中でも、2-designと呼ばれる演算子の集合は、有限次元系の量子トモグラフィにおいて最適な測定を与える場合が多いため、非常に有効である。この2-designのもつ数学的な構造は、連続変数系(無限次元系)においては、ガウシアン状態に対応する。しかしながら我々は、ガウシアン状態によって連続変数系の2-designを構成することはできないことを示した。これは、最適な測定ではあるが、2-designではないような、新しいクラスの測定を見つける可能性をひらく重要な結果である。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]

多粒子系における識別不可能性の判別

量子光学において多光子に対する測定として標準的に行なわれている同時計数測定は、3個以上の粒子からなる系に対しては、識別不可能性の効率的な判定方法にはならないため、この方法でトモグラフィを簡略化することはできないことを示した。これは、通常の Hong-Ou-Mandel 型の実験によって判定が可能となる2粒子系の場合には成立しない。このことは、多光子デバイスを用いた実験においては、光子数測定のような、より複雑な測定が必要となることを意味するものである。この研究は、英国 Imperial College, London の Terry Rudolph 博士との共同研究である。
[担当: 杉山、Turner]

5.2.4 量子力学基礎論

環境系の記憶効果と量子系の熱平衡化の関係

注目する物理系が環境と相互作用する際に、環境系における相互作用ハミルトニアンの時間相関が存在することが注目する物理系の時間発展に与える影響を、環境の記憶効果と呼ぶ。一般に平衡統計力学から期待されるようなカノニカル分布への系の状態の収束は、記憶効果のある場合には阻害されることが知られている。このことから、環境系の記憶効果は小さければ小さいほど、それと相互作用する系のカノニカル分布化を促進するように思われている。そこで、我々は、記憶効果が存在しない環境が、系のハミルトニアンのカノニカル分布に収束させる効果があるかどうかを解析した。その結果、記憶効果の無い場合には、ハミルトニアンに依らずに系のカノニカル分布化を引き起こすような環境は、存在しないということが数学的に示された。また、相互作用によって系のハミルトニアンがずれる場合でも、そのずれ方が連続かつ単射であれば同じ結論となることを示した。
[担当: 仲山、Turner、村尾]

2者間の非局所性蒸留可能性の解析

量子力学の情報論的原理の候補として有力である情報因果律が、量子力学で記述可能な非局所相関の範囲を必要十分に規定していることを証明することを目標として、2者間2入力2出力の系の非局所相関について考察した。まず、超光速度通信不可能性を満たす確率分布が8次元実ベクトルによって幾何学的に記述できることを発見し、それによって入出力の読み替え、対称化の操作、読み替えの下での確率分布の等価性、相互変換可能性がベクトルの変換規則によって統一的に記述できることを示した。次に、非局所性の弱い状態の多数のコピーから局所古典操作のみによって非局所性のより強い状態をつくる非局所性蒸留について考察した。等方性と呼ばれる確率分布の性質が蒸留可能な非局所性の大きさにどのように関係しているかを、個別のプロトコルに依存しない形で解析した。
[担当: 若桑、Turner、村尾]

<報文>

(原著論文)

- [1] M. Aulbach, D. Markham and M. Murao, *The maximally entangled symmetric state in terms of the geometric measure*, New J. Phys. **12**, 073025 (2010)
- [2] A. Soeda and M. Murao, *Delocalization power of global unitary operations on quantum information* , New J. Phys. **12**, 093013 (2010)
- [3] T. Sugiyama, P. S. Turner, and M. Murao, *Error probability analysis in quantum tomography: A tool for evaluating experiments*, Phys. Rev A **83**, 012105 (2011)
- [4] M. Mhalla, M. Murao, S. Perdrix, M. Someya and P. S. Turner, *Which graph states are useful for quantum information processing?*, arXiv: 1006.2616 (2010)
- [5] A. Soeda, P. S. Turner and M. Murao, *Entanglement cost of implementing controlled-unitary operations*, arXiv:1008.1129 (2010)
- [6] A. Soeda, Y. Kinjo, P.S. Turner and M. Murao, *Quantum Computation over the Butterfly Network*, arXiv:1010.4350 (2010)
- [7] A. Soeda and M. Murao, *Comparing globalness of bipartite unitary operations acting on quantum information: delocalization power, entanglement cost, and entangling power*, arXiv:1010.4599 (2010)
- [8] J. Hide, *A steady state entanglement witness*, arXiv:1102.0220 (2010)

(会議抄録)

- [9] A. Soeda and M. Murao, “Classification of delocalization power of global unitary operations in terms of LOCC one-piece relocalization”, EPTCS 26, 117 (2010)

- [10] M. Aulbach, D. Markham and M. Murao, *Geometric entanglement of symmetric states and the Majorana representation*, in Lecture Notes in Computer Science (LNCS) 6519, 141 (2010)
- [11] P. S. Turner, T. Sugiyama, T. Rudolph, *Testing for multipartite indistinguishability*, Proceedings of the 10th International Conference on Quantum Communication, Measurement & Computing, (2010)
- (学位論文)
- [12] 添田彬仁, *Characterizing globalness of unitary operations for quantum information processing*, 博士論文
- [13] 伸山将順, 量子回路モデルによる量子系の熱平衡化の解析, 修士論文
- [14] 金城慶之, *Distributed Quantum Computation over the Butterfly Network*, 修士論文
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [15] A. Soeda, P. S. Turner, and M. Murao, *Requirements on classical communication and entanglement resource in distributed quantum computation*, 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, Tokyo (Japan), April 2010
- [16] M. Aulbach, D. Markham, M. Murao, *Symmetric state entanglement and the Majorana representation*, TQC 2010, Leeds (UK), April, 2010
- [17] M. Murao and A. Soeda, *Delocalization Power of Global Unitary Operations on Quantum Information*, Developments in Computational Models 2010, Edinburgh (United Kingdom), July 2010
- [18] A. Soeda, P. S. Turner, and M. Murao, *Analysis of two-way LOCC in entanglement assisted implementation of controlled-unitary operations*, Asian Conference on Quantum Information Science 2010, Tokyo (Japan), August 2010
- [19] M. Aulbach, D. Markham, M. Murao, *Symmetric state entanglement and the Majorana representation*, Asian Conference on Quantum Information Science 2010, Tokyo (Japan), August 2010
- [20] Y. Tanaka, M. Murao, *Functionality-Preserving Randomization for Unitary Operations and Its Computational Complexity*, Asian Conference on Quantum Information Science 2010, Tokyo (Japan), August 2010
- [21] A. Soeda, P. S. Turner, and M. Murao, *Minimal entanglement cost of implementing a distributed controlled-unitary operation*, The 2nd International Conference on Quantum Information and Technology, Tokyo (Japan), October 2010
- [22] A. Soeda and M. Murao, *On the feasibility of adding a control to an oracle*, The 14th Workshop on Quantum Information Processing, Sentosa (Singapore), January 2011
- [23] M. Mhalla, M. Murao, S. Perdrix, M. Someya and P. S. Turner, *Structural characterization of graph states for quantum information processing*, 14th Quantum Information Processing, Sentosa, Singapore, January 2011
- [24] M. Aulbach, D. Markham, M. Murao, *Visual characterization of symmetric state entanglement*, 14th Quantum Information Processing, Sentosa, Singapore, January 2011
- [25] Y. Kinyo, M. Murao, A. Soeda and P. S. Turner, *Quantum Computation over the Butterfly Network*, 14th Quantum Information Processing, Sentosa, Singapore, January 2011
- [26] Y. Nakata, P. S. Turner and M. Murao, *How effectively can Hamiltonian with multi-body interactions generate random states?*, 14th Quantum Information Processing, Sentosa, Singapore, January 2011
- [27] Y. Nakata, P. S. Turner and M. Murao, *The Third International Workshop on Dynamics and Manipulation of Quantum System*, 14th Quantum Information Processing, Tokyo, February 2011
- [28] T. Sugiyama, P. S. Turner, M. Murao, *Comparing the performance of quantum tomographic apparatuses by large deviation analysis*, 10th Asian Conference on Quantum Information Science, Tokyo (Japan), August 2010
- [29] T. Sugiyama, P. S. Turner, M. Murao, *Evaluation of estimation errors in quantum tomography*, 2nd JFLI workshop, Paris (France), October 2010
- [30] T. Sugiyama, P. S. Turner, M. Murao, *Large deviation analysis in quantum tomography*, The Second International Conference on Quantum Information and Technology, Tokyo (Japan), October 2010
- [31] S. Nakayama, P. S. Turner, M. Murao, *Quantum circuit model of dissipative qubit dynamics leading canonical distribution*, Dynamics and Manipulation of Quantum Systems, Tokyo (Japan), February 2011
- [32] P. S. Turner, T. Sugiyama and T. Rudolph *Testing for multipartite indistinguishability*, 10th International Conference on Quantum Communication, Measurement & Computing, University of Queensland, Brisbane, (Australia), 19 July 2010
- [33] P. S. Turner, T. Sugiyama and T. Rudolph, *Testing for multipartite indistinguishability*, International Conference on Quantum Information and Technology, National Institute of Informatics, Tokyo, (Japan), 22 October 2010
- (国内会議)
- 一般講演

- [34] 添田彬仁, Peter S. Turner, 村尾美緒, *Necessary amount of entanglement for LOCC implementation of global unitary operations*, 第4回 RA 自主研究会, Niigata (Japan), June 2010
- [35] 添田彬仁, 村尾美緒, *Entanglement consumption in distributed quantum information processing: lower bound for controlled-unitary operations*, 第9回量子情報関東 StudentChapter, Tokyo (Japan), June 2010
- [36] 中田芳史, Peter S. Turner, 村尾美緒, 多体相互作用ハミルトニアン動力学による状態のランダムサンプリング可能性ナノ量子情報エレクトロニクスの進展, Tokyo (Japan), December 2010
- [37] 中田芳史, Peter S. Turner, 村尾美緒, 多体相互作用ハミルトニアン動力学による状態のランダムサンプリング可能性日本物理学会, Niigata (Japan), March 2011
- [38] 杉山太香典, Peter S. Turner, 村尾美緒, 量子トモグラフィにおける測定システムの性能評価 - 数理統計的視点から, 第4回 RA 自主研究会, Niigata (Japan), June 2010
- [39] 杉山太香典, Peter S. Turner, 村尾美緒, 量子トモグラフィにおける測定器系の性能評価 一大偏差的視点から, 第10回量子情報関東 StudentChapter, Ibaraki (Japan), September 2010
- [40] 杉山太香典, Peter S. Turner, 村尾美緒, 統計的量子推定問題における推定誤差確率の漸近的解析, 日本物理学会2010年秋季大会, Osaka (Japan), September 2010
- [41] 杉山太香典, Peter S. Turner, 村尾美緒, 統計的推定誤差確率を用いた、量子トモグラフィにおける測定器系の性能評価, 公開シンポジウム ナノ量子情報エレクトロニクスの進展, Tokyo (Japan), December 2010
- [42] 杉山太香典, Peter S. Turner, 村尾美緒, 量子測定への *deFinetti* 定理の拡張とベイズ推定, 日本物理学会第66回年次大会, Niigata (Japan), March 2011
- [43] 仲山将順, Peter S. Turner, 村尾美緒, 量子回路モデルによる量子系の熱平衡化の研究, 基礎物理セミナー合宿 -冷却原子と量子情報とその仲間たち-, Tokyo (Japan), December 2010
- [44] 仲山将順, Peter S. Turner, 村尾美緒, 量子回路モデルによる量子系の熱平衡化の研究, ナノ量子情報エレクトロニクスの進展, Tokyo (Japan), December 2010
- [45] Shojun Nakayama, Peter S. Turner, Mio Murao, *Quantum circuit model of dissipative qubit dynamics leading canonical distribution*, 量子情報科学 Winter School 2011, Sendai (Japan), February 2011
- [46] Shojun Nakayama, Peter S. Turner, Mio Murao, *Quantum circuit model of dissipative qubit dynamics leading canonical distribution*, 第12回関東量子情報 Student chapter, Sendai (Japan), February 2011
- [47] 仲山将順, 量子系の古典化と量子相関, 草津冬のワークショップ -物理と情報の非平衡振る舞-, Gunma (Japan), February 2011
- [48] Mio Murao, *Trial and error, finding a path to quantum physics*, Women in Science Symposium, Tokyo (Japan), March 2011
(セミナー)
- [49] 村尾美緒, 権限付き量子計算, 近畿大学量子コンピュータ研究センター, 22 June, 2010

5.3 上田研究室

当研究室では冷却原子期待の理論および量子情報の研究をおこなっている。前者では、ボース・アインシュタイン凝縮体やフェルミ超流動に関する研究をおこなっている。後者では、量子情報と測定、および情報処理に対する熱力学的制約を研究する情報熱力学ともいべき分野の開拓を行っている。

5.3.1 冷却原子気体

磁場中におけるスピン1および2 BEC のボゴリュボフ理論と Lee-Huang-Yang 補正

実験において重要な2次ゼーマン効果が存在する状況下でスピンが1と2のボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)におけるボゴリュボフ理論を展開した。また、基底状態のエネルギー、圧力、音速、および量子 depletion に対する Lee-Huang-Yang 補正を求めた。我々は、これらの系で実現可能なすべての相について上記の物理量を調べ、各々の相の量子揺らぎや2次ゼーマン効果に対する安定性を議論した。更に、自発的に破れる対称性の数と南部-ゴールドストーンモードの数の関係を調べ、スピンが2のBECのネマティック相において南部-ゴールドストーンモードには属しないギャップレスな線形な分散関係を持つモードを見出した。この研究は Physical Review A誌に掲載された [8]。

スピノール BEC における擬南部-ゴールドストーンモード

擬南部-ゴールドストーンモード(QNG)は高エネルギー物理学において重要な役割を果たしてきたが実験的にはいまだ観測されていない。我々は、それがスピン2のボース・アインシュタイン凝縮体において実現可能であることを指摘した。QNGモードは基底状態の対称性がハミルトニアンの対称性よりも高い場合に生じ、それが表れると通常の真空多様体は拡大される。その結果、通常の真空多様体においては安定なトポロジカル欠陥は不安定性が生じ、QNGモードを放出して崩壊する。しかしながら、量子揺らぎの効果によってQNGモードは質量を獲得し、トポロジカル励起が安定化される。この研究は Physical Review Letter 誌に掲載された [13]。

強磁性 BEC における磁区構造形成ダイナミクス

強磁性相互作用するスピノール BEC において細かい磁区構造が形成される様子が 2008 年に UC バークレーのグループにより観測された。この磁区構造の起源を解明するために、双極子-双極子相互作用をとりいれた平均場理論を用いて励起スペクトルとスピンの非線形ダイナミクスを調べた。その結果、定

性的には実験と同様に細かい磁区構造ができるものの、磁区構造の空間スケールは3倍、構造の現れる時間スケールは10倍実験で観測されたものより大きく、平均場理論では定量的に実験を説明できないことが分かった。通常、平均場理論で用いる Gross-Pitaevskii(GP) 方程式は絶対零度でのダイナミクスを記述するものであるが、長時間のダイナミクスを調べて時間平均をとることでエネルギー一定の下での熱平衡状態の情報を得ることができる。本研究の結果は、実験で観測された磁区構造は非常に長寿命の非平衡状態で、かつ、熱原子との直接的な相互作用、または平均場で取り入れられない量子多体効果が必要である可能性を示唆している。この研究は Physical Review A 誌に掲載された [10]。

強磁性ダイポール BEC の流体方程式

一般にスピン F のスピノール BEC の複素 $2F+1$ 成分の秩序変数で記述され、スピンが大きくなるほど方程式は複雑になるが、強磁性 BEC の場合は、スピンの方位と凝縮体全体の位相という3つの変数で記述することができる(流体近似)。そこで、強磁性 BEC に対する GP 方程式を、双極子-双極子相互作用までとりいれて流体近似を用いて書き下し、スピンに対する運動方程式を導出した。さらに、前述の系に対して流体方程式を用いて安定性解析を行ない、ボゴリュボフ励起と一致する結果を得た。この研究は Physical Review A 誌に掲載された [11]。

冷却 ^6Li 気体における Efimov-原子分子共鳴の観測

Efimov 状態とは、2粒子間の相互作用が強い場合に存在する普遍的な3体束縛状態である。本研究では、レーザー冷却された ^6Li 原子3成分混合系で原子-分子ロスの磁場依存性の測定を行ない、602 G と 685 G の2点の磁場でロスの共鳴的な増大を観測した。この原子-分子散乱の共鳴的な増大は、分子の束縛エネルギーと Efimov 状態の束縛エネルギーが縮退するときに起こるものであり、ピークが2点で観測されたことは基底状態と励起状態の2つの Efimov 状態が存在することの実験的証拠である。また、観測された共鳴磁場の位置が従来の理論予測とは定量的にずれていることを見出した。このずれは2体の散乱長に有限距離の効果の補正を入れるだけでは説明できず、Efimov の理論では定数とされている3体パラメータが定数ではないことを示唆している。我々は実験結果を説明するために、3体パラメータが単調に変化すると仮定した有効モデルを構築した。この研究は Physical Review Letters 誌 105巻に掲載された [9]。

5.3.2 情報熱力学

Szilard エンジンの実験的実現

「マクスウェルのデーモン」の代表的なモデルとして1929年に提案された「Szilard エンジン」においては、フィードバック制御によって(第二法則と矛盾はせずに)情報を仕事・自由エネルギーに変換することができる。しかしこのような Szilard エンジンは、従来は理論的に考えられていただけであった。本研究において、中央大学・宗行研究室と東京大学・佐野研究室との共同研究により、サブミクロンスケールのコロイド粒子に対するフィードバック制御を行うことで、第二法則が課す限界よりも多くの自由エネルギーを系に獲得させる実験に、世界で初めて成功した。また、この実験により、我々が以前理論的に導いた一般化 Jarzynski 等式が成立することが検証された。この結果は Nature Physics から出版され [12]、News and Views にハイライトされるとともに、新聞等の多数の一般報道で取り上げられた。

量子 Szilard エンジンの理論的解析

また我々は、従来の古典 Szilard エンジンを、多粒子からなる量子系へ拡張して解析した。その結果として、多粒子量子 Szilard エンジンから取り出せる仕事量の一般的な公式を導出することに成功した。その公式から、単一粒子の場合の量子効果(とくにバリアの挿入に要する仕事量)が明らかになった。さらに、多粒子の場合について、低温で同種粒子性の効果が表れることが明らかになった。たとえば二粒子の場合について考えると、絶対零度近傍では、ボゾンの場合の方がフェルミオンの場合よりも多くの仕事を取り出せる。高温極限では、ボゾンの場合もフェルミオンの場合も、ともに区別可能な古典粒子の場合の結果に一致することも示された。この結果は Physical Review Letters から出版され、Editor's Suggestion に選ばれるとともに、Physics の Viewpoint でハイライトされた [15]。

<受賞>

- [1] Simone De Liberato : Prix Jeune Chercheur Daniel Guinier (La Société Française de Physique、2010 年 7 月)
- [2] 沙川貴大 : 若手奨励賞 (日本物理学会、2010 年 11 月)
- [3] 沙川貴大 : 理学系研究科研究奨励賞 (博士課程)(東京大学、2011 年 3 月)
- [4] 遠藤晋平 : 理学系研究科研究奨励賞 (修士課程)(東京大学、2011 年 3 月)
- [5] Masahito Ueda : Outstanding Referee Award (American Physical Society、2011 年 3 月)

<報文>

(原著論文)

- [6] T. Sagawa and M. Ueda: Sagawa and Ueda Reply, Phys Rev. Lett. **104**, 198904-1-1(2010).
- [7] M. Tezuka and M. Ueda: Ground states and dynamics of population-imbalanced Fermi condensates in one dimension, New Journal of Physics **12**, 055029-1-21 (2010). (Part of Focus on Dynamics and Thermalization in Isolated Quantum Many-Body Systems.)
- [8] S. Uchino, M. Kobayashi, and M. Ueda: Bogoliubov theory and Lee-Huang-Yang corrections in spin-1 and spin-2 Bose-Einstein condensates in the presence of the quadratic Zeeman effect, Phys Rev. A **81**, 063632-1-29 (2010).
- [9] S. Nakajima, M. Horikoshi, T. Mukaiyama, P. Naidon, and M. Ueda: Nonuniversal Efimov Atom-Dimer Resonances in a Three-Component Mixture of ${}^6\text{Li}$, Phys Rev. Lett. **105**, 023201-1-4 (2010).
- [10] Y. Kawaguchi, H. Saito, K. Kudo, and M. Ueda: Spontaneous Magnetic Ordering in a Ferromagnetic Spinor Dipolar Bose-Einstein Condensate, Phys Rev. A **82**, 043627-1-17 (2010).
- [11] K. Kudo and Y. Kawaguchi: Hydrodynamic equation of a spinor dipolar Bose-Einstein condensate, Phys Rev. A **82**, 053614-1-9 (2010).
- [12] S. Toyabe, T. Sagawa, M. Ueda, E. Muneyuki, and M. Sano: Experimental demonstration of information-to-energy conversion and validation of the generalized Jarzynski equality, Nature Physics **6**, 988-992 (2010). (Highlighted by NEWS and VIEWS, and Nature News.)
- [13] S. Uchino, M. Kobayashi, M. Nitta, and M. Ueda: Quasi-Nambu-Goldstone modes in Bose-Einstein condensates, Phys Rev. Lett. **105**, 230406-1-4 (2010).
- [14] P. Zhang, Pascal Naidon, and Masahito Ueda: Scattering amplitude of ultracold atoms near the p-wave magnetic Feshbach resonance, Phys Rev. A **82**, 062712-1-11 (2010).
- [15] S. W. Kim, T. Sagawa, S. De Liberato, and M. Ueda: Quantum Szilard Engine, Phys Rev. Lett. **106**, 070401-1-4 (2011). [Selected as an Editor's suggestion and highlighted in Viewpoint of Physics **4**, 13 (2011).]
- (著書)
- [16] Masahito Ueda : Fundamentals and New Frontiers of Bose-Einstein Condensation, World Scientific Pub. Co., 2008 年 7 月
- [17] 斎藤弘樹、川口由紀、上田正仁 : 磁気双極子相互作用するボース・アインシュタイン凝縮体、固体物理 vol.46(1), pp.21-28 (2011 年 1 月号)
- [18] 川口由紀 : 内部自由度をもったボース・アインシュタイン凝縮体、物性研究 vol.95(6), pp.543-582 (2011 年 3 月号)
- (学位論文)

- [19] Takahiro Sagawa: Thermodynamics of Information Processing in Small Systems (博士論文).
- [20] Shuta Nakajima: Few-body physics in ultracold ^6Li gases with tunable interactions (博士論文).
- [21] Shinpei Endo : Many-body effects of BEC-BCS crossover in an ultracold Fermi gas (修士論文).
- [22] Nguyen Thanh Phuc : Phase Diagram of a Three-Dimensional Spin-1 Ferromagnetic Condensate under a Quadratic Zeeman Effect (修士論文).
- [23] 山口秀輝 : 分子モーターの非平衡統計力学的研究 (修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [24] M. Ueda: Topological Excitations in Ultracold Atomic Gases, The International Workshop: Ultracold Fermi Gas: Superfluidity and Strong-Correlation (USS), May 14, 2010, Tokyo, Japan.
- [25] M. Ueda: Information thermodynamics, APCTP-KIAS Joint Workshop on Quantum Entanglement and Dynamics in Correlated Many-Body Systems, May 21, 2010, Pohang, Korea.
- [26] M. Ueda: Information thermodynamics, The Second International Conference Nonlinear Waves; Theory and Application, Jun. 26, 2010, Beijing, China (Symposium Talk).
- [27] M. Ueda: Topological Excitations in Bose-Einstein condensates, The Second International Conference Nonlinear Waves; Theory and Application, Jun. 27, 2010, Beijing, China (Symposium Talk).
- [28] Y. Kawaguchi and M. Ueda: Symmetry classification of the ground states of a spin-3 spinor Bose-Einstein condensate, 19th International Laser Physics Workshop, Jul. 6, 2010, Foz do Iguazu, Brazil.
- [29] Y. Kawaguchi, H. Saito and M. Ueda: Spin Dynamics in Spinor Dipolar BECs, SIAM Conference on Nonlinear Waves and Coherent Structures (NW10)Minisymposium, Aug. 16, 2010, Philadelphia, USA.
- [30] M. Ueda: Topological excitations in Bose-Einstein condensates, 22nd International Conference on Atomic Physics, Jul. 26, 2010, Cairns, Australia.
- [31] M. Ueda: Topological excitations in Bose-Einstein condensates, Nordita program on quantum solids liquids and gases, Aug. 18, 2010, Stockholm, Sweden.
- [32] M. Ueda: Information thermodynamics, International Symposium on Quantum Thermodynamics, Sep. 17, 2010, Stuttgart, Germany.
- [33] M. Ueda: Topological excitations in Bose-Einstein condensates, International Symposium on Cold Atoms and Condensed Matter, Oct. 5, 2010, Vedbaek, Denmark.

- [34] M. Ueda: Symmetry breaking and topological excitations in ultracold atomic gases, UC Berkeley physics department colloquium talk, Oct. 25, 2010, Berkeley, CA, USA.
- [35] T. Sagawa: Generalized Jarzynski Equality under Nonequilibrium Feedback Control, STATPHYS-KOLKATA VII, Nov.26, 2010, Kolkata, India.
- [36] M. Ueda: Maxwell's demon, the second law, and the minimum energy cost for measurement and erasure of information, Maxplank Institute seminar, Nov. 29, 2010, Munich, Germany.
- [37] M. Ueda: Maxwell's demon, the second law, and the minimum energy cost for measurement and erasure of information, International Symposium on Quantum Dynamics of Ultracold Atoms and Quantum Technologies (ISQDUAQT), Dec 8, 2010, Guangzhou, China.
- [38] M. Ueda: Topological excitations in Bose-Einstein condensates, The 2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacificchem), Dec. 16, 2010, Honolulu, Hawaii, USA.
- [39] T. Sagawa: Quantum Szilard Engine, 2nd Nagoya Winter Workshop on Quantum Information, Measurement, and Foundations, Feb. 16, 2011, Nagoya, Japan.
- [40] Y. Watanabe, T. Sagawa and M. Ueda: Uncertainty Relation Revisited from Quantum Estimation Theor, 2nd Nagoya Winter Workshop on Quantum Information, Measurement, and Foundations, Feb. 16, 2011, Nagoya, Japan.

一般講演

- [41] S. Nakajima, M. Horikoshi, T. Mukaiyama, P. Naidon, and M. Ueda: Atom-Dimer Scattering in an Ultracold Three-Component Mixture of ^6Li , 41st Annual Meeting of the APS Division of Atomic molecular and optical Physics (DAMOP2010), May 28, 2010, Houston, USA.
- [42] T. Sagawa and M. Ueda: Generalized Jarzynski Equality under Non-equilibrium Feedback, 3rd International Workshop on Transmission of Information and Eergy in Nonlinear and Comlex Systems (TIENCS), Jul. 8, 2010, Singapore.
- [43] T. Sagawa and M. Ueda: Nonequilibrium Thermodynamics of Information Processing, StatPhysHK: Compexity, Computation, Information, Jul. 14, 2010, Hong Kong.
- [44] N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, and M. Ueda: Phase Diagram of Three-Dimensional Spin-1 Ferromagnetic Condensates at Finite Temperatures, International Conference on Frustrated Spin Systems—Cold Atoms and Nanomaterials (STATPHYS24), Jul. 15, 2010, Hanoi, Vietnam.
- [45] Y. Watanabe, T. Sagawa, M. Ueda: Optimal Measurement on Noisy Quantum Systems, 10th International Conference on Quantum Communication,

- Measurement and Computation (QCMC), Jul. 20, 2010, Brisbane, Australia.
- [46] T. Sagawa and M. Ueda: Nonequilibrium Thermodynamics of Information Processing, STAT-PHYS24: International Conference on Statistical Physics of the International Union for Pure and Applied Physics (IUPAP), Jul. 23, 2010, Cairns, Australia.
- [47] S. Nakajima, M. Horikoshi, T. Mukaiyama, P. Naidon, and M. Ueda: Non-universal Efimov Atom-Dimer Resonances in a Three-Component Mixture of ^6Li , 22nd International Conference on Atomic Physics (ICAP2010), Jul. 27, 2010, Cairns, Australia.
- [48] S. Kobayashi, M. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda: Classification of Topological excitation with Influence of vortices, 22nd International Conference on Atomic Physics (ICAP2010), Jul. 27, 2010, Cairns, Australia.
- [49] Y. Watanabe: Optimal measurement and maximum fisher information on noisy quantum, Information Geometry and its Applications III, Aug. 2, 2010, Leipzig, Germany.
- [50] Y. Kawaguchi, H. Saito, K. Kudo, and M. Ueda: Spin Dynamics in Spinor Dipolar Bose-Einstein Condensates, International Workshop on Statistical Physics of Quantum Systems, Aug. 3, 2010, Tokyo, Japan.
- [51] S. Kobayashi, M. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda: Classification of Topological excitation with Influence of vortices, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2010), Aug. 5, 2010, Grenoble, France.
- [52] Y. Watanabe: Optimal Measurement on Noisy Quantum Systems, Workshop on Quantum Computation, Oct. 26, 2010, Stockholm, Sweden.
- [53] Y. Kawaguchi: Quantum Ferrofluid: Bose-Einstein Condensate of Tiny Magnets, 7th Japanese-German Frontiers of Science Symposium, Nov. 12, 2010, Potsdam, Germany.
- [54] S. Endo and M. Ueda: Approximate three-body collision theory in two component Fermi gas, ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultracold atoms and molecules, Jan. 24, 2011, Tokyo, Japan.
- [55] S. Kobayashi, M. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda: Abe homotopy classification of topological excitation under influence of vortex, ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultracold atoms and molecules, Jan. 24, 2011, Tokyo, Japan.
- [56] S. Nakajima, M. Horikoshi, T. Mukaiyama, P. Naidon, and M. Ueda: Efimov physics in ultracold ^6Li atoms with tunable interactions, ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultracold atoms and molecules, Jan. 24, 2011, Tokyo, Japan.
- [57] N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, and M. Ueda: Phase Diagram of a Three-Dimensional Spin-1 Ferromagnetic Condensates under a Quadratic Zeeman Effect, ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultracold atoms and molecules, Jan. 24, 2011, Tokyo, Japan.
- [58] M. Takahashi, T. Mizushima, and K. Machida: Vortex State in Finite-Range Interaction via Weakly Interacting Rydberg Atoms, ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultracold atoms and molecules, Jan. 24, 2011, Tokyo, Japan.
- [59] Y. Kawaguchi: Spontaneous Magnetic Ordering in a Ferromagnetic Spinor Dipolar Bose-Einstein Condensate, ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultracold atoms and molecules, Jan. 24, 2011, Tokyo, Japan.
- [60] Y. Watanabe: Uncertainty Relation Revisited from Quantum Estimation Theory, ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultracold atoms and molecules, Jan. 24, 2011, Tokyo, Japan.
- (国内会議)
- 招待講演
- [61] 川口由紀:スピノル BEC におけるトポロジカル励起、理研シンポジウム、2010 年 7 月 23 日、理化学研究所、埼玉県。
- 一般講演
- [62] 山口秀輝、上田正仁:分子モーターの自律的内部状態制御、日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 9 月 24 日、大阪府立大学、大阪府。
- [63] 遠藤晋平、上田正仁:BEC-BCS クロスオーバーの FLEX 近似による解析、日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 9 月 24 日、大阪府立大学、大阪府。
- [64] P. Naidon, M. Ueda: Efimov Physics in lithium 6、日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 9 月 24 日、大阪府立大学、大阪府。
- [65] 内野瞬、小林未知数、上田正仁:スピノール BEC における Bogoliubov 理論及び Lee-Huang-Yang 補正(II)、日本物理学会 第 65 回年次大会、2010 年 9 月 25 日、大阪府立大学、大阪府。
- [66] Nguyen Thanh Phuc, 川口由紀、上田正仁:有限温度における三次元のスピン 1 強磁性 BEC の相図、日本物理学会 第 65 回年次大会、2010 年 9 月 25 日、大阪府立大学、大阪府。
- [67] 内野瞬、小林未知数、新田宗士、上田正仁:スピン 2 ネマティック凝縮体における擬-南部-ゴールドストーンモード、日本物理学会 第 66 回年次大会、2011 年 3 月。
- [68] 遠藤晋平、Pascal Naidon、上田正仁:Efimov 状態と異なる 3 体束縛状態、日本物理学会 第 66 回年次大会、2011 年 3 月。

- [69] 小林伸吾、川口由紀、小林未知数、上田正仁：スピノル BEC の相転移におけるトポロジカル励起の選択則、日本物理学会 第 66 回年次大会、2011 年 3 月。
- [70] 作道直幸、川上則雄、上田正仁：BCS-BEC クロスオーバーにおける超流動転移点のフガシティーの解析、日本物理学会 第 66 回年次大会、2011 年 3 月。
- [71] 渡辺優、沙川貴大、上田正仁：量子推定理論を用いた不確定性関係の導出、日本物理学会 第 66 回年次大会、2011 年 3 月。
- [72] 池田達彦、渡辺優、上田正仁：長時間平均とミクロカノニカル平均が等しいのは何故か、日本物理学会 第 66 回年次大会、2011 年 3 月。
- [73] 倉持結、上田正仁：光格子中の原子の位置の連続測定理論、日本物理学会 第 66 回年次大会、2011 年 3 月。
- [74] 中島秀太、堀越宗一、向山敬、Pascal Naidon、上田正仁：冷却 ^6Li 原子 3 成分混合系における Efimov 状態の束縛エネルギー測定、日本物理学会 第 66 回年次大会、2011 年 3 月。
- (セミナー)
- [75] 沙川貴大：微小非平衡系における情報熱力学、駒場物性セミナー、2010 年 4 月 16 日、東京大学 駒場キャンパス。
- [76] 沙川貴大：Information Thermodynamics、第 9 回量子情報関東 (Student Chapter)、2010 年 6 月 10 日、東京大学 本郷キャンパス。
- [77] 遠藤晋平：冷却 Fermi 気体の BEC-BCS クロスオーバーにおける密度揺らぎとスピン揺らぎの効果、物性若手夏の学校、2010 年 8 月 9 日、ホテルたつき、愛知県。
- [78] 倉持結：Normal typicality に関する von Neumann の定理について、物性若手夏の学校、2010 年 8 月 9 日、ホテルたつき、愛知県。
- [79] 沙川貴大、鳥谷部祥一、宗行英朗、佐野雅己、上田正仁：Maxwell のデーモンを作つてみよう、物性若手夏の学校、2010 年 8 月 10 日、ホテルたつき、愛知県。
- [80] 渡辺優、沙川貴大、上田正仁：ノイズ環境下における最適な量子測定、FIRST 量子情報サマースクール、2010 年 8 月 22 日、ホテルサンライズ知念、沖縄県。
- [81] 沙川貴大：情報処理の熱力学と Jarzynski 等式、中央大学 第 2 回物理学科談話会、2010 年 9 月 28 日、中央大学、東京都。
- [82] P. Naidon, M. Ueda : Efimov Physics in lithium 6, Colloquia in Laboratoire de Physique Theorique et Modeles Statistiques, Oct. 25, 2010, Orsay, France.
- [83] P. Naidon, M. Ueda : Efimov Physics in lithium 6, Colloquia in Laboratoire Aime Cotton, Oct. 28, 2010, Orsay, France.
- [84] P. Naidon, M. Ueda : Efimov Physics in lithium 6, Colloquia in Institut de Physique de Rennes, Nov. 3, 2010, Rennes, France.
- [85] 作道直幸、川上則雄、上田正仁：キュムラント展開を用いた量子気体の大分配関数の解析、RIMS 共同利用基研研究会「量子科学における双対性とスケール」、2010 年 11 月 5 日、京都大学 基礎物理学研究所、京都府。
- [86] P. Naidon, M. Ueda : Efimov Physics in lithium 6, Colloquia in Laboratoire Kastler-Brossel, Ecole Normale Supérieure, Nov. 5, 2010, Paris, France.
- [87] 渡辺優、沙川貴大、上田正仁：量子推定における不確定性関係、基研研究会「量子解析における双対性とスケール」、2010 年 11 月 6 日、京都大学、京都府。
- [88] 沙川貴大：Principles and Applications of Information Thermodynamics、基研研究会「量子解析における双対性とスケール」、2010 年 11 月 6 日、京都大学、京都府。
- [89] P. Naidon, M. Ueda : Efimov Physics in lithium 6, Colloquia in Instituto Superior Técnico, Nov. 9, 2010, Lisbon, Portugal.
- [90] 沙川貴大：情報処理の熱力学と Jarzynski 等式、基研研究会「非平衡系の物理：非平衡ゆらぎと集団挙動」、2010 年 11 月 18 日、京都大学、京都府。
- [91] 渡辺優、沙川貴大、上田正仁：量子推定理論における測定誤差の不確定性関係、FIRST 全体会議、2010 年 12 月 10 日、熱海ニューフジヤホテル、静岡県。
- [92] 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 BCS-BEC クロスオーバーの解析、応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会「冷却原子系で探究する新しい物理と極限的技術」、2010 年 12 月 17 日、上智大学軽井沢セミナーハウス、長野県。
- [93] S. Kobayashi, M. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda: Abe homotopy classification of topological excitation under influence of vortices、新学術領域 第 1 回領域会議「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」、2010 年 12 月 19 日、京都大学 百周年時計台記念館、京都府。
- [94] M. Takahashi, T. Mizushima, and K. Machida : Modulated Vortices appearing in Bose-Einstein Condensates with Finite-Range Interactions、新学術領域 第 1 回領域会議「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」、2010 年 12 月 19 日、京都大学 百周年時計台記念館、京都府。
- [95] 渡辺優、沙川貴大、上田正仁：Uncertainty Relation on Quantum Estimation Theory、量子情報科学ウィンタースクール、2011 年 2 月 23 日、東北大学 川渡共同セミナーセンター、宮城県。
- [96] 渡辺優、沙川貴大、上田正仁：量子推定理論による測定誤差についての不確定性関係の定式化、第 12 回量子情報関東 (Student Chapter)、2011 年 2 月 27 日、東北大学 電気通信研究所、宮城県。
- [97] 作道直幸、川上則雄、上田正仁：二成分冷却フェルミ気体の超流動転移点の決定、第 12 回量子情報関東 (Student Chapter)、2011 年 2 月 27 日、東北大学 電気通信研究所、宮城県。
- [98] 渡辺優、沙川貴大、上田正仁：量子推定理論を用いた不確定性関係の定式化、量子統計推測若手ミーティング、2011 年 2 月 28 日、東北大学、宮城県。
- [99] 小林伸吾：Abe ホモトピー群による vortex の影響の分類、大阪市立大学 坪田研究室セミナー、2011 年 3 月 1 日、大阪市立大学、大阪府。

- [100] 渡辺優、沙川貴大、上田正仁 : Uncertainty Relation Revisited from Quantum Estimation Theory、KEK 理論セミナー、2011 年 3 月 4 日、高エネルギー加速器研究所、茨城県。
- [101] 沙川貴大 : From Maxwell's Demon To Information Thermodynamics、草津冬のワークショップ「物理と情報の非平衡揺らぎ」、2011 年 3 月 10 日、群馬大学草津セミナーハウス、群馬県。

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

○ 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5年目に入ったが、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。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、山田らを中心に、HXDの軌道上較正をさらに進めた。京都大学で学位を取得した内山秀樹が、今年度より学振PDとして研究室に加わり、HXDとXISの連携が強化された。

2011年3月11に発生した東日本大震災の後、JAXA宇宙科学研究所の相模原キャンパスは、たびたび計画停電に見舞われたため、「すざく」の運用にも多少の制約が発生した。

○ 国際宇宙ステーション搭載 MAXI

全天X線監視装置MAXI(Monitor of All-sky X-ray Image)は2009年7月16日、スペースシャトルにより打ち上げられ、国際宇宙ステーション日本実験モジュール「きぼう」の曝露部に搭載された。MAXIは現在、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。狭い視野を深く見る「すざく」に対し、MAXIは全天を浅く見わたす装置で、両機は良い相補性をもつ。牧島は2010年3月で、理研・宇宙放射線研究室の兼務主任を定年退職し、今年度からは理研・基幹研究所・宇宙観測実験連携研究グループのグループディレクター、およびそこに所属するMAXIチームのチームリーダーを、非常勤で兼務する。東大としての牧島・中澤研究室は、MAXIに直接には参加していないが、MAXIと「すざく」との連携を支援している[18, 71, 85]。

東日本大震災のさい、JAXAつくばキャンパスでは電源系や建屋にかなりの地震被害が発生し、MAXIとの通信も1週間ほど失われたが、幸いこの間、MAXIは自律制御により動作し、障害は発生しなかった。またこの間の観測データはアメリカNASAで受信・保存されていたため、のちに再生復活することができ、全天監視データに実質的な欠損は生じなかつた。

6.1.2 質量降着するブラックホール

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~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[12, 29, 28, 46]。

○ 恒星質量ブラックホール

「はくちょう座X-1」(Cyg X-1)は、1970年代半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、山田らは昨年に続き、「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。この間、Cyg X-1は「Low/Hard状態」にあり、BHの近傍(シュワルツシルドの~100倍以内)では降着物質は幾何学的に厚く光学的に薄いコロナを形成し、イオンは自由落下温度(~100 MeV)に近く、電子はコンプトン冷却により~100 keVの温度をもつと考えられる。

図6.1.1は鳥井らが導いた、X線ランダム変動のパワースペクトルで、 $1/f$ ノイズに似た形を示し、質量降着率が高まるにつれ、折れ曲がりが高周波へ移動することが、従来の観測に比べて格段に明らかになった。これは、変動の源であるコンプトンコロナが徐々に縮小し、やがて幾何学的に薄く光学的に厚い標準降着円盤に遷移することを示唆する重要な結果である[48, 54, 70]。

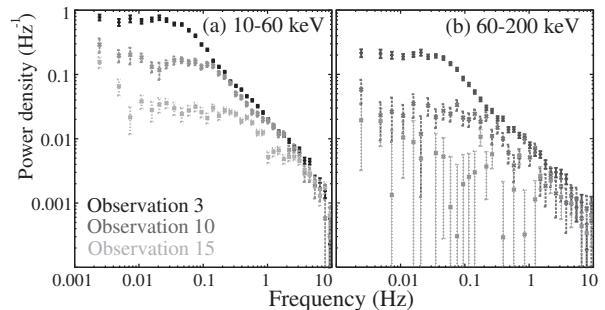


図 6.1.1: Power-density spectra of the 10–60 keV (panel a) and 60–200 keV (panel b) X-ray signals from Cyg X-1, measured on 3 occasions with the Hard X-ray Detector onboard *Suzaku*. The mass accretion rate increases from Observation 3, through 10, to 15 [48, 54].

Low/Hard状態のBHBでは、円盤からの軟X線光子がコロナで熱的コンプトン散乱され、強い硬X線を形成すると考えられる。山田は博士論文で、図6.1.1のような変動に伴う広帯域スペクトルの変化を研究し、図6.1.2の結果を得た[33, 31, 69]。すなわち:

1. コロナの乱流などでX線強度が~1秒で激しく変化する際も、<2 keVでは変動振幅が激減する。これは、安定な円盤からの軟X線放射が直接に見えていることを意味する。
2. 質量降着率が変わり、X線強度が長時間(>数週間)で変動する際は、3 keV以下で特に変動振幅が大きくなる。これはコロナが非一様で、 γ パラメータの小さい成分(soft Compton)が卓越してくることを示す。

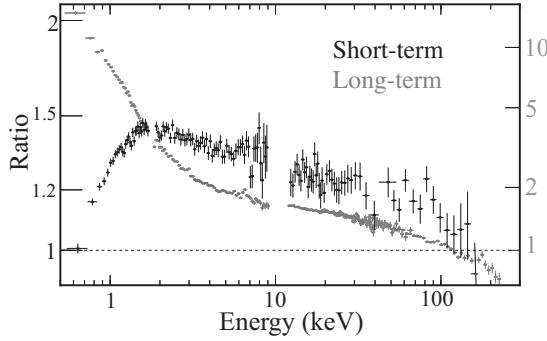


図 6.1.2: Amplitudes of spectral changes of Cyg X-1, measured with *Suzaku*. Black data points are spectral ratios when the source flickers on a time scale of 1 sec, while gray points are ratios between two observations (separated by a few years) with different mass accretion rates [33].

3. これらは牧島、山田らが導いた、Low/Hard 状態の統一描像 (2008) を、全面的に強化する結果で、「すざく」の快挙の一つである。

○ 巨大ブラックホールと活動銀河核

銀河の中心にある巨大 BH にガスが降着すると、活動銀河核 (AGN) となる。AGN と BHB とは類似性が強く、シュワルツシルド半径で規格化するなら、ほぼ同じ物理現象が起きると長年にわたり論じられてきた。しかし現実には、AGN のスペクトル連続成分は単一のべき関数でモデル化され、図 6.1.2 に見られるような、コンプトンコロナの非一様性などは、考慮されて来なかった。そこで野田らは昨年に続き、「すざく」で得たセイファート銀河 MCG-6-30-15 のデータを解析した結果、スペクトルの 20–40 keV 附近に、連続成分とは独立した変動成分があること、それは光学的厚みの大きい熱的コンプトン放射と考えられること、またこの成分の存在を考えると、「鉄の K_{α} 線が異常に幅広く、この AGN は極端 Kerr BH である」とする、一部の外国研究者の主張は根拠を失うことを示した [14, 47, 53]。

野田らはまた、「すざく」AO5 で観測した吸収の少ないセイファート銀河 Mkn 509 のデータ解析に着手した結果、図 6.1.3 に示すように、変動に伴うスペクトルの比は明らかに下に凸であり、Cyg X-1 と同様コロナの非一様性の効果が効いている証拠を得た。これらは AGN の研究に、大きな突破口を開くと期待される。

6.1.3 さまざまな磁場強度の中性子星

○ 磁場の弱い中性子星

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 の場合に似ており、質量降着率がエディントン限界の数%以上の場合は High/Soft 状態、そ

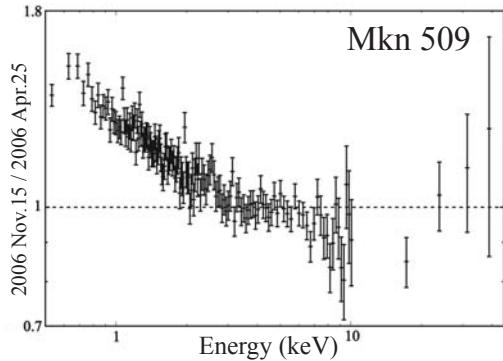


図 6.1.3: Ratios between two *Suzaku* spectra of the Seyfert galaxy Mkn 509, obtained on different occasions. Like in the long-term behavior of Cyg X-1 in Fig.6.1.2, the ratios are concave, suggesting the presence of multiple Comptonization components with different y -parameters.

れ以下では Low/Hard 状態が実現すると考えられているが、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。さらに NS の質量が BH に比べて $\sim 1/10$ であることから、LMXB のエディントン限界光度も BHB の場合の $\sim 1/10$ であり、よってその Low/Hard 状態はかなり暗く、かつ放射が硬 X 線域にわたるため、観測が難しかった。

LMXB の Low/Hard 状態を研究するには、ときおり X 線で明るくなるトランジェント LMXB が適している。桜井らは、そうした天体 Aquila X-1 の「すざく」公開データを解析した結果、図 6.1.4 のように、2 つの状態の違いを捉えることに成功し、High/Soft スペクトルは 1980 年代から知られていたように、標準降着円盤からの多温度黒体放射と、NS 表面（赤道付近の帯状部分）からの黒体放射との和であることを示した。さらに Low/Hard 状態では、円盤は NS 半径の約 2 倍の距離で高温 (30–50 keV) コロナへと遷移し、それが NS 表面にほぼ球対称に衝突して作る黒体放射がコロナで強くコンプトン化される結果、エネルギー ~ 100 keV まで続く強い硬 X 線が作られることが、初めて明らかにされた [50, 73, 105]。

○ 降着型 X 線パルサー

前項で述べた弱磁場 NS に対し、 $\sim 10^{12}$ G の磁場をもつ NS も多数、存在する。牧島はこうした NS の強い磁場が、中性子の核磁気モーメント整列による強磁性の発現である可能性を論じている [39, 126]。このような NS が連星をなし相手の星からガスを獲得すると、降着型パルサーとなり、それらの X 線スペクトル中に現れる電子サイクロトロン共鳴吸収線は、NS の磁場計測の切り札となる。

MAXI の打ち上げ直後に、図 6.1.5 に示すように、再帰型 Be トランジェント天体 GX304-1 が 28 年ぶりに X 線で明るくなったことが検出された。牧島らは理研 MAXI チームなどと協力し、2010 年 8 月 13 日に「すざく」による緊急観測を実施した。その結果スペクトルの ~ 54 keV に、電子サイクロトロン吸収線を発見し、磁場を 4.7×10^{12} G と決定するこ

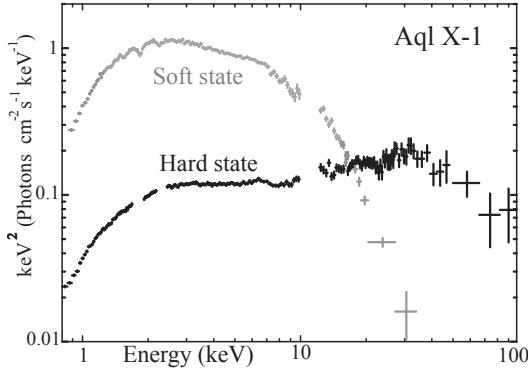


図 6.1.4: *Suzaku* spectra (in the νF_ν form) of the recurrent transient Aquila X-1, obtained in the High/Soft state (gray; 2007 September 28) and the Low/Hard state (black; 2007 October 30).

とに成功した [18]。これは過去にこの手法で直接測定された NS 磁場のうち、最強の部類である。

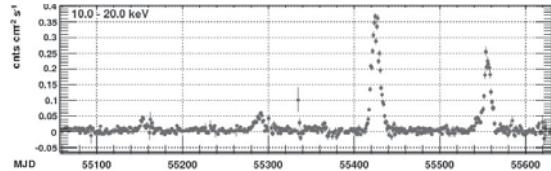


図 6.1.5: A 10–20 keV light curve of the recurrent transient X-ray pulsar GX304–1, obtained with MAXI over a period of 2009 August 14 through 2011 March 11. Flares synchronized with the 130-day orbital period are observed [18].

◦ SFXT 天体

近年、SFXT (Supergiant Fast X-ray Transient) と呼ばれる一群の硬X線天体が注目を集めている。これらは名前の通り、超巨星を主星にもつ強磁場NS連星で、通常そのX線光度は低いが、数十分から数時間の間に強度が2~3桁も増加するなど激しい変動を示す。数百秒から数千秒と、ひじょうに長いパルス周期をもつものも多い。変動の生成機構としては、主星からの星風の濃い部分にNSが突入したとき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「磁気的しおどし」説がある。

笛野らは SFXT のフレア機構を探るため、「すざく」で観測された数例の SFXT のうち、強度の高い IGR 16195–4945 の公開データを解析し、図 6.1.6 に示すように、約 2 時間にわたる強いフレアを検出した。フレア時にはスペクトルの吸収は有意に増加せず、静穏時に見えていた中性の蛍光鉄輝線も（等価幅で言って）弱くなり、かつ広がる気配が得られた [49, 72, 106]。これは非一様星風説の予言とは矛盾する一方で、NS が $\sim 10^{13}$ G の磁場をもつと考えると、スペクトルの変化や、遅い自転、激しい変動などは、「磁気的しおどし」説で統一的に説明できそうである。すなわち SFXT は磁場強度でいうと、前

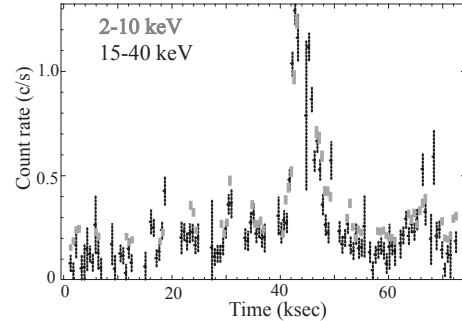


図 6.1.6: Soft and hard X-ray light curves of the SFXT, IGR J16195–4945, observed with the *Suzaku* XIS and HXD, respectively [49, 72].

項で述べたX線パルサーと次項で述べるマグネターの中間的な天体かもしれない [41, 82]。

◦ マグネターハード

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、 $10^{14\text{--}15}$ 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。西岡、牧島らはスタンフォード大の榎戸輝揚、理研の中川友進らと協力し、「すざく」第4期公募観測(2009年度)に採択されたキープロジェクト「マグネターハード」の後半部分(合計 210 ksec)を遂行し、SGR 0501+4516 と 1RXJ 1708–40 の 2 天体、および関連天体である X 線パルサー GX 1+4 を観測するとともに [39, 41, 74, 82, 122, 126]、これまでの成果を一連の論文として公表した [2, 5, 8, 17]。2010 年 3 月 27 日には、新たに発生したマグネター SGR 1833–0832 を「すざく」で緊密観測し、そのデータを解析した西岡らは、黒体放射的な軟X線成分に加え、マグネターの特徴である、硬い硬X線成分の気配を検出した [75]。

図 6.1.7 は、こうして得られた代表的なマグネターの νF_ν スペクトルを、2 keV で規格化して示したものである。どれも軟成分と硬成分の 2 成分から成る特徴的なスペクトルを示すこと、老齢な天体ほどハード成分の強度が下がるが、その傾きは硬くなること、などが見て取れる。このハード成分は、シンクロトロン過程など通常の非熱的放射では説明できないほど硬い。そこで我々は山形大の柴田晋平らと協力し、奇妙なハード成分は電子陽電子対消滅線などのガンマ線光子が、強い磁場の中で「二光子分裂」を繰り返し、低エネルギー側に落ちて来た結果だとする可能性を追求している [5, 39, 41, 82, 126]。この仮説によれば、老齢なマグネターほど磁場が弱く、二光子分裂がわりに高いエネルギーで止まってしまうため、より硬いスペクトルになると説明できる。

6.1.4 星間空間における高エネルギー現象

◦ マグネターに付随する超新星残骸の観測

中性子星やブラックホールは、大質量星が重力崩壊型するさい生成されると考えられ、マグネターも

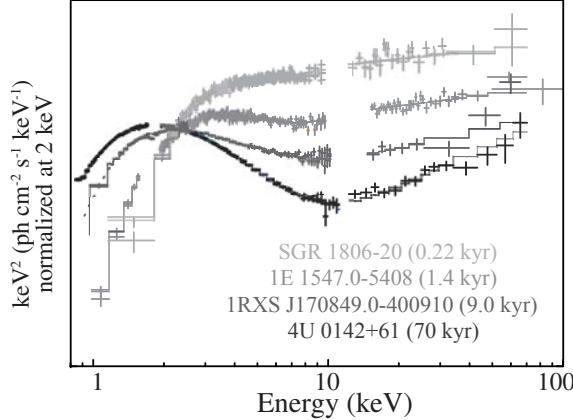


図 6.1.7: Wide-band νF_ν spectra of representative magnetars, observed with *Suzaku* [5, 39, 41]. The spectral properties are seen to depend strongly on the characteristic age which is indicated in the parentheses.

例外ではない。実際、20例ほどのマグネターのうち数例は、超新星残骸(SNR)の中に存在する。これらSNRの診断を通じ、マグネターがどのような超新星爆発で生成されたか、探求できると期待される。

そこで我々はビッグバンセンターの平賀と協力し、CTB109と呼ばれるSNRに注目した。このSNRは図6.1.8(左)に示す奇妙な半月状の形をもち、中心にマグネター1E2259+586を擁する。「すぐく」Key Projectの一貫としてこのマグネターを観測した際、CTB109も部分的にXISの視野に入った。中野らがそのデータを解析した結果、図6.1.8(右)のように、スペクトルは温度0.26 keV(星間物質)と温度0.57 keV(イジェクタ)のプラズマ放射の和で再現でき、高温成分の重元素組成は太陽組成の1~3倍程度で、 $15 M_\odot$ の星の重力崩壊から期待される値とほぼ一致した[52, 76, 82, 107]。セドフの相似則を適用して推定した爆発エネルギーは、 $(1.5 - 7) \times 10^{51} \text{ erg s}^{-1}$ となった。こうした結果を見る限り、CTB109は平均的な重力崩壊型SNRと、目立った違いは無い。

この研究の過程で、マグネターとSNRとの年齢の不一致も浮上して来た。パルス周期とその延び率から決まる1E2259+586の特性年齢が、約7万年であるのに対し(図6.1.7)、CTB109の年齢は他のSNRと同様、1~2万年を超えない。そこで我々は、マグネターの磁場は時間とともに減衰する結果、形式的に求めた特性年齢は過大評価になるとを考えている。

○ 広がった銀河面X線放射の起源とスペクトル分解

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、Si、S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、温度として少くとも $\sim 1 \text{ keV}$ と $\sim 7 \text{ keV}$ の2温度が必要で、さらに硬X線領域まで、非熱的とも見えるスペクトルで延びることも知られていた。この現象の起源は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、さまざまな解釈が提案され、論争が続いていた。近年ロシ

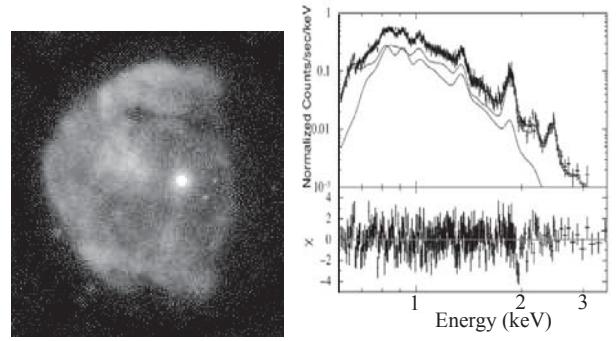


図 6.1.8: (left) A soft X-ray image of the SNR CTB109, obtained with *ROSAT* (from *Skyview* Web site). The magnetar 1E2259+586 is seen at its center. The scale is about $40'$ across. (right) An X-ray spectrum of a part of CTB109 obtained with the *Suzaku* XIS, fitted with a two-temperature plasma emission model [52].

アグループにより、GRXEの表面輝度が恒星の分布と酷似することが指摘され、「暗い点源」説が有力となりつつあった。さらに *Chandra*衛星による銀河中心付近の深い観測で、GRXEの8割が暗い点源に分解され、その多くは、白色わい星連星であろうと考えられた。

湯浅は「すぐく」を用い、この問題に二段階で挑戦した[34]。まず彼は近傍の白色わい星(WD)連星のうち、中程度の磁場強度($\sim 10^6 \text{ G}$)をもつ激変星20個ほどを、自らの提案などにより「すぐく」で観測し、その3~50 keVのスペクトルを、WD磁極の降着円筒からの多温度プラズマ放射として、定量的に再現することに成功した[13]。図6.1.9(上)はその一例である。この激変星放射モデルはWDの質量をパラメータとしており、20個の平均質量は $\sim 0.88 M_\odot$ と得られた。次いで湯浅は、「すぐく」で5年間に大量($\sim 10^6$ 秒)に集積された銀河中心付近のXISおよびHXDのデータを慎重に解析した結果、図6.1.9(下)に示すように、上で求めた激変星の放射モデルと、より低温($\sim 1.5 \text{ keV}$)のプラズマ放射(おそらく星のコロナ)を加えることにより、銀河面X線放射の広帯域スペクトルみごとに再現することに成功した[34, 92]。放射を説明するに必要なWD連星の数も妥当であり、これで銀河面X線放射の硬X線部分は、おもにWD連星からの放射の総和であることが確定し、長年の謎に終止符が打たれた。この功績により湯浅は、研究科奨励賞(博士の部)を受賞した[1]。

○ 銀河中心付近の研究

内山らは京都大学と協力し、銀河中心近くにある未同定TeVガンマ線天体のうち、最も暗いもの一つであるHESS J1741-302を、「すぐく」で探査した。その結果、その近傍でX線天体 *Suzaku* J174035.6-301416を発見し、撮像分光や時間変動の解析により、これがHESS天体と無関係な、強磁場激変星であることを突き止めた[15, 68]。これは、前項で述べたGRXEを構成する多数の激変星のうち、とくに明るいものが個別に検出されたものと考えられる。HESS J1741-302からのX線放射に対しては、厳しい上限値をつけ、

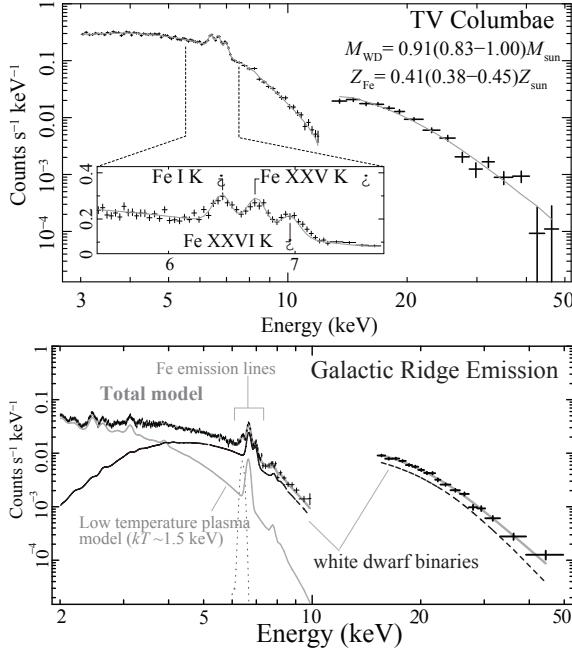


図 6.1.9: (Top) Broad-band X-ray spectra of the intermediate polar TV Columbae measured with *Suzaku*, shown without removing the instrumental responses. They are fitted with a white-dwarf emission model of which the best-fit parameters are given in the figure [13]. (Bottom) Broad-band spectra of the Galactic Ridge X-ray Emission measured with *Suzaku*, fitted with the white-dwarf emission model and a low-temperature plasma component [34]. The systematic model deficit in > 10 keV is due to contributions from the Cosmic X-ray Background.

これがガンマ線以外での対応天体をもたない、「暗黒加速源」であると結論づけた。このガンマ線源はおそらく古い超新星残骸で、加速された陽子による π^0 崩壊ガンマ線が出る一方で、電子はすでに放射冷却されたものと考えられる。

内山らはまた「すざく」による銀河中心領域の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、広がった熱的X線の表面輝度や、そこにある高電離鉄輝線の強度の、空間分布を測定した[121]。近赤外観測にもとづく恒星の質量分布と比較した結果、単位恒星質量あたりの高電離鉄輝線の強度が、銀河面に比べて中心領域では、4-19倍も大きいことを明らかにした。よって上に述べたGRXEとは異なり、銀河中心領域では、真にディフューズな熱的X線が広がっている可能性が示唆される。

6.1.5 銀河団および銀河群の研究 [3, 4, 10, 16, 55, 88]

- 非熱的硬X線と超高温成分

「すざく」がAbell 3667銀河団から検出した超高温(> 20 keV)の高温プラズマ成分は、銀河団同士の正面衝突の瞬間を示す証拠と考えられる。中島、中澤らは、「すざく」による銀河団からの超高温成分の探査を続けている。みなみのさんかく座銀河団、かみのけ座銀河団、Abell 2319銀河団など、近傍の高温の銀河団の「すざく」データを系統的に解析したところ、Abell 3667以外からは、20 keVを超える超高温成分は有意に検出されなかった。このことから、超高温成分の出現は衝突後の短い時間に限られること、そしてAbell 3667はまさにその段階にあると解釈される。この銀河団は最も明るい巨大電波源を持っており、両者には深い関係があると考えられる[40, 104]。

「すざく」によるAbell 3667の観測結果のもう一つ重要な点は、その北西方向の広がった巨大電波源での磁場の値である。シンクロトロン電波のフラックスと、逆コンプレトンX線の上限値の比較から、この領域での磁場の値は $2 \mu\text{G}$ 以上と求まった。よって磁場と高エネルギー電子のもつ圧力は、ガスの熱的圧力の10~20%以上に達しており、銀河団のガス分布に与える磁場の影響が無視できないことがわかる。中澤は、首都大学の赤松弘規らと協力して、この領域の希薄なガスの温度分布を調べており、衝突に伴う衝撃波加熱が生じている証拠を捉えた[65]。本内容にもとづき、中澤はフランス・ニースにおいて招待講演を行なった[40]。将来は、分光能力と広帯域の観測感度に優れるASTRO-H衛星を用いることで、衝突、非熱的圧力、そして銀河団中のエネルギー解放のメカニズムの理解が進むと期待される。

- 銀河団の質量分布

質量分布は、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-Fenker-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、牧島は、全重力質量が中心銀河と全銀河団という、階層構造をもつという主張を固めてきた。じっさい中国・上海交通大学の顧力意らと協力してAbell 1795銀河団の公開データを解析したところ、プラズマ温度構造のモデル化の方法によらず、中心から積分した全重力質量は図6.1.10のように、明らかな階層構造をもつことが明らかになった[91]。中心銀河に付随する質量成分は、おそらく星などのバリオンが寄与する結果と思われる。

- 磁気流体的な描像

牧島らは10年来の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[119]。上海交通大学の顧力意らと協力し、「すざく」、*XMM-Newton*、および*Chandra*衛星で観測した、Abell 1795銀河団のデータを総合解析した結果、この銀河団の中心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を立証できた[91]。これは昨年度、高橋勲によって得られたケンタウルス座銀河団の結果とひじょうに良く一致しており、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」

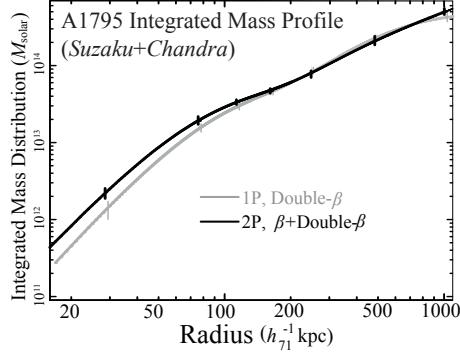


図 6.1.10: A spherically integrated profile of the total gravitating mass in the Abell 1795 cluster of galaxies. Effects of different modelings of the plasma temperature are indicated by black and gray curves [91].

の描像を支持する。さらに Abell 1795 では、低温成分の多い領域で、重元素アバナ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発見された [91]。

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、Abell 1795 と対照的に、プラズマは 4-5 keV で等温であり、元素組成もほぼ一定であることを確認した [67, 90]。

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、銀河は抵抗を受けて中心に落下し、プラズマは加熱されると考えられる。この落下の証拠を探るため昨年度に引き続き、ビッグバンの稻田直久、理研の小波さおり、宇宙研の川原田円らと協力し、近傍から遠方までの銀河団に対し、可視光で決めた銀河団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。サンプルはまだ少ないものの、遠方では近傍に比べ、銀河がよりプラズマの中に広く分布する徴候が得られつつある [66, 89]。

6.1.6 ASTRO-H衛星計画

- *ASTRO-H*衛星とその搭載装置 [24]

*ASTRO-H*衛星は、HIIA ロケットによる 2014 年の打ち上げを目指して開発が進められている。次世代の宇宙 X 線衛星で、長さ 14 m、重さ 2.5 t と日本最大の科学衛星である。この衛星は、X 線マイクロカロリーメータを搭載し、6 keV の X 線に対して、4-7 eV という世界最高精度の分光能力により、コンパクト天体の重力ドップラー効果なども測定できる。また 5-80 keV で集光できる硬 X 線望遠鏡 (HXT) が 2 台と、その焦点面には 1 分角の撮像分光を行う硬 X 線イメージャ (HXI) を搭載し、厚いガスに隠された天体や、広がった加速源などを、高感度で撮像分光できる。HXT は名古屋大学が中心となって開発しており、多層膜スーパーミラーにより硬 X 線を集光撮像する。さらに広視野の X 線 CCD カメラ 1 台と、60-600 keV で最高感度の観測を行う軟ガンマ線検出

器 (SGD) 2 台が搭載される。これらの装置の協力により、*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が期待される。本研究室では、JAXA ほか国内の大学研究機関に加え、スタンフォード大およびフランス CEA と共同し、HXI と SGD の開発を進めている。

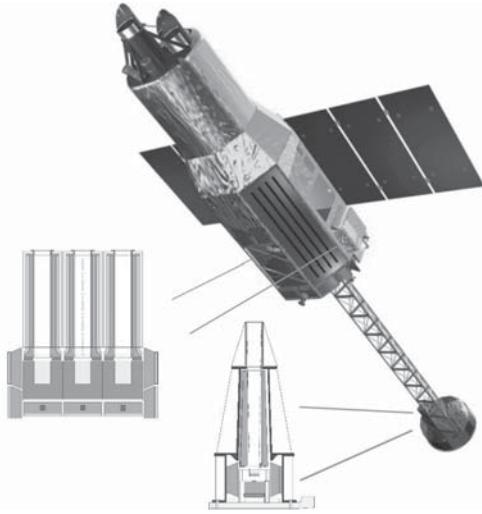


図 6.1.11: Drawing of the *ASTRO-H* satellite, to be launched in 2014. The overall length is 14 m, and the weight is 2.5 t. Also plotted are cross sectional views of the HXI (right: 40 cm tall) and SGD (left: 50 cm tall). Two identical units of each instrument are mounted.

- HXI 装置と SGD 装置 [11, 22, 25, 60, 77, 86, 87, 99, 109, 111]

HXT の焦点面に置かれる 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、かつエネルギー分解能 1.5 keV の精度で分光する。 HXI は図 6.1.11 に示すように、井戸型に組み上げた 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、これまでの検出器より 2 衍近く高い感度を実現すると期待される。

SGD は図 6.1.11 のように、 3×2 台の「コンプトンカメラ」と、それらをとり囲む 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、その内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極限まで除去し、「すぐ」 HXD より感度を一桁上げる。

- 2010 年度の全体計画の進捗

2014 年の打ち上げへ向けて、HXI および SGD の装置開発を精力的に進めている。2010 年度は、試作品を製作し、その性能を実証すること、解析や要素

部の評価によって衛星搭載品を設計し、検証することを進めて来た。2011年の半ばには Critical Design Review (CDR) が予定され、ここで衛星搭載品の最終設計を決める。

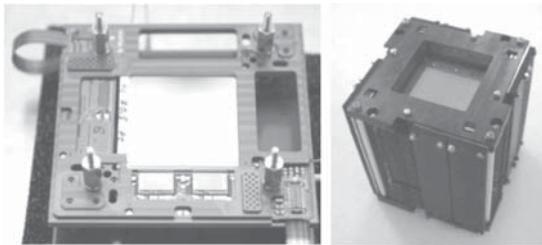


図 6.1.12: (left) A bread-board model for an HXI CdTe imager. (right) A mechanical model for an SGD Si-CdTe Compton Camera.

◦ BGO 結晶シンチレータの支持構造の開発 [36, 78]

中島、中野、中澤らは、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た。HXI や SGD では、内部の主検出器が大きく、「すぐ」HXD で用いられたように結晶を接着して支持する技法では、ユニットサイズが 10 kg を越えてしまい、取り扱いが困難となる。そこで、CFRP とネジを使った全く新しい概念の固定方法を開発し、 BaSO_4 粉の反射材塗料を経由して接着固定することで、比較的小型の BGO ユニットを、コンパクトかつ高密度に実装する方法を開発している。2010 年度はこの接着部の強度を高め、予想される振動レベルに対する安全率を確保する開発を行った。塗料の溶剤を変更することで、強度を 2 倍以上に強化することに成功した。この開発を受けて、三菱重工とともに BGO ユニットの製造方法の確立を図ると同時に、HXI および SGD の全体構造（ハウジング構造他）の構造検討を進めている [36]。シンチレーション光の読み出しにあたっても、軽く小さく省電力な Avalanche Photo Diode (APD) を全面的に採用した。

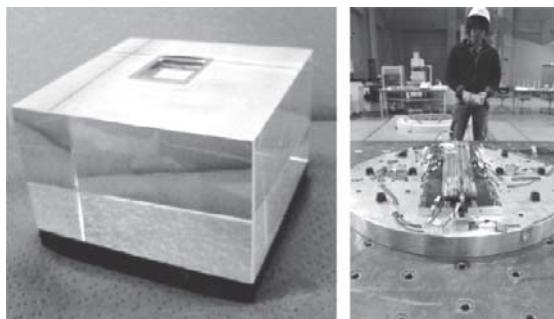


図 6.1.13: (left) A mechanical model for a BGO crystal to be used in the active shields for the HIX. (right) Vibration tests of a BGO crystal for the SGD, performed at ISAS/JAXA on 2010 January 13-14.

◦ 結晶シンチレータの集光効率の研究 [37, 113]

西岡、笹野らは、HXI や SGD の極めてタイトな構造上の制約の中で、BGO アクティブシールドで検出できるガンマ線の最低エネルギーを改善する研究を進めてきた。BGO 結晶は屈折率が 2.15 と極めて高く、シンチレーション光をいかに小面積の APD へ導くか、また反射材などの構造で失う光量をいかに減らすかが大きな課題である。さまざまな形状を持つ数 kg 規模の BGO シンチレータを、APD などのコンパクトな半導体光学素子で読むというアイディアは、HXI や SGD が最初である。10 種類を越える形状の BGO 結晶の光量を系統的に測定することで、光量と結晶形状との関係について経験的な式を得た（投稿準備中 [37]）。この経験式を、BGO や APD の温度依存性と組み合わせ、さらに反射材などの儀装を考慮することで、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。

◦ HXI および SGD の熱設計 [38, 79, 110]

HXI や SGD は、主検出部には Si や CdTe、シールド部には APD など、多くの半導体素子を使用し、それらはいずれも -20°C 前後で最適性能を得られるため、検出器の放射冷却が必要である。ところが SGD の半導体コンプトンカメラは、12 cm 立方の狭い空間に 1 万 3000 もの読み出しチャンネルを含み、6 W もの発熱があり、対流が働くかない真空中でこれを有效地に逃がす必要がある。加えて HXI も SGD も、衛星構体の外に搭載せざるをえず、そのため日光や地球赤外線を、直接に浴びることになる。したがって両装置とも、慎重な熱設計が極めて重要である。

野田らは、名古屋大の田島教授らと協力し、熱伝導素子としてのグラファイトシートや銅製の柱を注意深く配置することで、コンプトンカメラ内の温度勾配を 5°C 以内にできることを計算と実験によって示した [38]。HXI と SGD の全体の支持構造体（ハウジング）は、強度、重量、熱膨張率などを考慮して CFRP で製作されるが、アルミなどと比較して、熱伝導率が低い。太陽の直射などの影響を考えると、熱的に環境が非常に厳しいことから、ここでも注意深い熱設計を続けている。

◦ HXI における反同時計数の実証 [35, 115, 58]

鳥井、内山らを中心として、APD で読み出される複数の BGO シールド結晶に囲まれた環境において、半導体検出器をどのように反同時計数すればバックグラウンドを最も効率よく低減できるか、実証的な研究を進めた。この結果、反同時計数のゲートを設定するさい、APD の信号処理における波形整形時間の長さ ($\sim 2 - 3 \mu\text{s}$)、半導体検出器そのもののトリガー検知時間 ($\sim 0.6 \mu\text{s}$)、スペクトル処理用の波形整形時間 ($3 \sim 5 \mu\text{s}$)、という 3 種類のタイミングを考慮すべきことがわかった。さらに検出レートが高い時には、反同時計数に独特の不感時間が発生することが確認された [35]。これらの知見は、衛星搭載品の開発に反映される。

◦ スペースワイヤ (SpaceWire) 通信技術の開発 [42, 80, 44, 45]

SpaceWire は、次世代の衛星搭載用の標準的なシリアル通信規格であり、可変な通信速度をもち、ロ

ジックがコンパクトで、リモートノードのバスに直接アクセスする機能 (RMAP 機能) が実装されるなどの特徴があり、次世代の衛星内通信の標準規格の一つとなっている。ASTRO-Hではこの SpaceWire に基づく情報処理系が採用され、ハードウェアによるデータ処理、CPUによるデータ処理とともに、これを前提にした新しいシステムを開発している。湯浅、桜井らは、この開発を中心となって進めている。2010 年度は、CPU による処理の OS 部の開発が進められてきた。これを受け、科学的データの処理のソースコードの検討や開発を進めている。

<受賞>

- [1] 湯浅孝行、理学系研究科研究奨励賞、東京大学、2011 年 2 月

<報文>

(原著論文)

- [2] Enoto, T., Rea, N., Nakagawa, Y. E., Makishima, K., Sakamoto, T., Esposito, P., Götz, D., Hurley, K., Israel, G. L., Kokubun, M., Mereghetti, S., Murakami, H., Nakazawa, K., Stellar, L., Tiengo, A., Turolla, R., Yamada, S., Yamaoka, H., Yoshida, A. & Zane, S.: "Wide-Band *Suzaku* Analysis of the Persistent Emission from SGR 0501+4516 during the 2008 Outburst", *Astrophys. J.*, **715**, Issue 1, 665–670, 2010
- [3] Kawaharada, M., Okabe, N., Umetsu, K., Takizawa, M., Matsushita, K., Fukazawa, Y., Hamana, T., Miyazaki, S., Nakazawa, K., & Ohashi, T.: "Suzaku Observation of A1689: Anisotropic Temperature and Entropy Distributions Associated with the Large-scale Structure", *The Astrophysical Journal*, **714**, Issue 1, 423–44, 2010
- [4] Finoguenov, A., Sarazin, C., L., Nakazawa, K., Wik,D., R. & Clarke, T., E.: "XMM-Newton Observation of the Northwest Radio Relic Region in A3667", *The Astrophysical Journal*, **715**, Issue 2, 1143–1151, 2010
- [5] Enoto, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Rea, N., Hurley, K. & Shibata, S.: "Broadband Study with *Suzaku* of the Magnetar Class", *The Astrophysical Journal Letters*, **722**, Issue 2, L162–167, 2010
- [6] Hayato, A., Yamaguchi, H., Tamagawa, T., Katsuda, S., Hwang, U., Hughes, J.P., Ozawa, M., Bamba, A., Kinugasa, K., Terada, Y., Furuzawa, A., Kunieda, H., & Makishima, K.: "Expansion Velocity of Ejecta in Tycho's Supernova Remnant Measured by Doppler Broadened X-ray Line Emission" *The Astrophysical Journal*, **725**, Issue 1, 894–903
- [7] Kubota, K., Ueda, Y., Kawai, N., Kotani, T., Namiki, M., Kinugasa, K., Ozaki, S., Iijima, T., Fabrika, S., Yuasa, T., Yamada, S. & Makishima, K.: "Suzaku and Optical Spectroscopic Observations of SS 433 in the 2006 April Multiwavelength Campaign", *Publ. Astron. Soc. Japan* **62**, Issue 2, 323–333, 2010
- [8] Enoto, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Nakagawa, Y. E., Sakamoto, T., Ohno, M., Takahashi, T., T., Yamaoka, K., Murakami, T. & Takahashi, H.: "Suzaku Discovery of a Hard X-Ray Tail in the Persistent Spectra from the Magnetar 1E 1547.0–5408 during its 2009 Activity", *Publ. Astron. Soc. Japan* **62**, Issue 2, 475–485, 2010
- [9] Konami, S., Matsushita, K., Nagino, R., Tashiro, M., Tamagawa, T., Makishima, K.: "Abundance Patterns in the Interstellar Medium of the S0 Galaxy NGC 1316 (Fornax A) Revealed with *Suzaku*" *Publ. Astron. Soc. Japan*, **62**, Issue 6, 1435–1443, 2010
- [10] Sato, K., Kawaharada, M., Nakazawa, K., Matsushita, K., Ishisaki, Y., Yamasaki, N., Y. & Ohashi, T.: "Metallicity of the Fossil Group NGC 1550 Observed with *Suzaku*", *Publ. Astron. Soc. Japan*, **62**, Issue 6, 1445–1454, 2010
- [11] Kokubun, M., Watanabe, S., Nakazawa, K., Tajima, H., Fukazawa, Y., Takahashi, T., Kataoka, J., Kamae, T., Katagiri, H., Madejski, G. M., Makishima, K., Mizuno, T., Ohno, M., Sato, R., Takahashi, H., Tanaka, T., Tashiro, M., Terada, Y., Yamaoka, K., & the HXI/SGD team: "Hard X-ray and gamma-ray detector for ASTRO-H based on Si and CdTe imaging sensors", *Nucl. Inst. Meth. Phys. A*, **623**, Issue 1, 425–427, 2010
- [12] Gandhi, P., Dhillon, V. S., Durant, M., Fabian, A. C., Kubota, A., Makishima, K. (他 6 名) et al.: "Rapid Optical and X-ray Timing Observations of GX339–4: Multicomponent Optical Variability in the Low/Hard State", *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.*, **407**, Issue 4, 2166–2192, 2010
- [13] Yuasa, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Saitou, K., Ishida, M., Ebisawa, K., Mori, H. & Yamada, S.: "White dwarf masses in intermediate polars observed with the *Suzaku* satellite", *Astron. Astrophys.* **520**, A25, 2010
- [14] 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**, in press, 2011
- [15] 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", *Publ. Astron. Soc. Japan*, in press, 2011
- [16] 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*, in press, 2011
- [17] Enoto, T., Makishima, K., Nakazawa, K., Kokubun, M., Kawaharada, M., Kotoku, J. & Shibasaki, N.: "Soft and Hard X-Ray Emissions

- from the Anomalous X-ray Pulsar 4U 0142+61 Observed with *Suzaku*”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, in press, 2011
- [18] 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”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, in press, 2011
- [19] Tsuchiya, H., Enoto, T., Yamada, S., Yuasa, T., Nakazawa, K., Kitaguchi, T., Kawaharada, M., Kokubun, M., Kato, H., Okano, M. & Makishima, K.: “Long-duration gamma-ray emissions from 2007 and 2008 winter thunderstorms”, *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, in press, 2011
- (会議抄録)
- Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray. Edited by Arnaud, Monique; Murray, Stephen S.; Takahashi, Tadayuki. Proceedings of the SPIE, **7732**, 2010
- [20] Mizuno, T., Hiragi, K., Fukazawa, Y., Umeki, Y., Odaka, H., Watanabe, S., Kokubun, M., Takahashi, T., Nakajima, K., Nakazawa, K., Makishima, K., Nakahira, S., Terada, Y., Tajima, H.: “Monte Carlo simulation study of in-orbit background for the soft gamma-ray detector on-board *ASTRO-H*”
- [21] Hanabata, Y., Fukazawa, Y., Yamaoka, K., Tajima, H., Kataoka, J., Nakazawa, K., Takahashi, H., Mizuno, T., Ohno, M., Kokubun, M., Takahashi, T., Watanabe, S., Tashiro, M., Terada, Y., Sasaki, C., Nakajima, K., Mizushima, T.: “Development of BGO active shield for the *ASTRO-H* soft gamma-ray detector”
- [22] Nishino, S., Fukazawa, Y., Mizuno, T., Takahashi, H., Hayashi, K., Hiragi, K., Mizuno, M., Yamada, S., Kawaharada, M., Kokubun, M., Nakazawa, K., Watanabe, S., Tanaka, T., Terada, Y.: “On-orbit calibration status of the hard x-ray detector (HXD) onboard *Suzaku*”
- [23] Nakazawa, K., Takahashi, T., Limousin, O., Kokubun, M., Watanabe, S., Laurent, P., Arnaud, M., Tajima, H.: “The hard x-ray imager onboard IXO”
- [24] Takahashi, T. et al. (計 177 名) including Makishima, K., Nakazawa, K., Uchiyama, H.: “The *ASTRO-H* Mission”
- [25] Tajima, H. et al. (計 29 名) including Makishima, K., Nakazawa, K.: “Soft gamma-ray detector for the *ASTRO-H* Mission”
- [26] Ozaki, M., Terada, Y., Kokubun, M., Yuasa, T., Ishisaki, Y. et al., “The Monte Carlo simulation framework of the *ASTRO-H* X-ray Observatory”

その他会議抄録

- [27] Iwakiri, W., Ohno, M., Kamae, T., Nakagawa, Y. E., Terada, Y., Tashiro, M. S., Yoshida, A., Yamaoka, K., Makishima, K.: “Timing Analysis of Unusual GRB 090709A Observed by *Suzaku* Wide-band All sky Monitor”, *Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts. AIP Conference Proceedings*, **1279**, 89–92, 2010
- [28] Hurley, K., Yamaoka, K., Ohno, M., Takahashi, T., Fukazawa, Y., Tashiro, M., Terada, Y., Murakami, T., Makishima, K., et al.: “The Third Interplanetary Network”, *ibid.*, 330–333, 2010
- [29] Gandhi, P., Dhillon, V. S., Durant, M., Fabian, A. C., Makishima, K., Marsh, T. R., Miller, J. M.; Shahbaz, T., Spruit, H. C.: Rapid timing studies of black hole binaries in Optical and X-rays: correlated and non-linear variability *X-ray Astronomy 2009; Present Status, Multi-Wavelength Approach and Future Perspectives: Proceedings of the International Conference; AIP Conference Proceedings*, **1248**, 119–122, 2010
- [30] Terada, Y., Harayama, A., Morigami, K., Ishida, M., Bamba, A., Dotani, T., Hayashi, T., Okada, S., Nakamura, R., ; Makishima, K., Mukai, K., Naik, S.: Systematic surveys of the non thermal emission from white dwarfs with *Suzaku* and *INTEGRAL*, *ibid.*, **1248**, 215–216, 2010
- [31] Yamada, S., Makishima, K., Nakazawa, K., Noda, H., Takahashi, H., Dotani, T., Kubota, A.; Ebisawa, K., Ueda, Y., Done, C.: “*Suzaku* wide-band observations of black-hole binaries and AGNs: continuum and Fe-K lines” *ibid.*, **1248**, 317–320, 2010
- [32] Konami, S., Matsushita, K., Sato, K., Nagino, R., Isobe, N., Tashiro, M. S., Seta, H., Matsuta, K., Tamagawa, T., Makishima, K.: “*Suzaku* Observation of the Metallicity in the Interstellar Medium of NGC 1316” *Highlights of Astronomy, Proceedings of the International Astronomical Union*, **15**, 286–286, 2010
- (学位論文)
- [33] Shin’ya, Yamada: “X-ray Studies of the Black Hole Binary Cygnus X-1 with *Suzaku*”, 博士学位論文
- [34] Takayuki, Yuasa, “*Suzaku* Studies of White Dwarf Stars and the Galactic X-ray Background Emission”, 博士学位論文
- [35] 烏井俊輔、「*ASTRO-H* 衛星搭載用の硬 X 線撮像検出器アクリティブシールド機能の最適化」、修士学位論文
- [36] 中島健太, “Mechanical design of the Hard X-ray Imager and the Soft γ -ray Detector onboard the *ASTRO-H* observatory”, 修士学位論文
- [37] 西岡博之, “Studies of APD readout of BGO crystal scintillators for the *ASTRO-H* mission”, 修士学位論文

- [38] 野田博文、"Thermal design of the Soft Gamma-ray Detector for the next astronomical satellite *ASTRO-H*", 修士学位論文
- <学術講演>
- (国際会議招待講演)
- [39] Makishima, K.: "Wide-Band X-ray Observations of Magnetars", *Physics in Intense Fields* (2010 November 15-18; KEK, Tsukuba)
- [40] Nakazawa, K. et al., "Non-thermal phenomena in merging clusters of galaxies as observed with 'Suzaku' and to be with *ASTRO-H*", *Non-thermal phenomena in colliding galaxy clusters 2010* (2010 November 15-18; Nice, France)
- [41] Makishima, K., Sasano, M., Nakajima, K., Nakano, T., Nishioka, H., Yuasa, T., Yamada, S., Nakazawa, K., Hiraga, J., S., Enoto, T., Nakagawa, Y., E., Mihara, T., Bamba, A., Sato, T., Terada, Y., Kohzu, T., & Yasuda, T., "Magnetars, X-ray Pulsars, and Related Objects", *The first year of MAXI: Monitoring variable X-ray sources 4th International MAXI Workshop* (2010 November 30-December 2; Tokyo, Aoyama Gakuin University)
- (国際会議一般講演)
- SpaceWire Conference 2010 (2010 June 22-24; St. Petersburg, Russian Federation)
- [42] Yuasa, T., Kokuyama, W., Makishima, K., Nakazawa, K., Nomachi, M., Odaka, H., Kokubun, M., Takashima, T., Takahashi, T., Fujishiro, I., and Hodoshima, F., "SpaceWire/RMAP-Based Data Acquisition Framework For Scientific Instruments: Overview, Application and Recent Updates"
- [43] Fujinaga, T., Yuasa, T. et al., "Development of SpaceWire Based Data Acquisition System for the X-Ray CCD Camera on Board *ASTRO-H*"
- [44] Kouzu, T., Yuasa, T. et al., "Verification of High Resolution Timing System with SpaceWire Network Onboard *ASTRO-H*"
- [45] Ozaki, M., Yuasa, T. et al., "SpaceWire Driven Architecture for the *ASTRO-H* Satellite"
- The first year of MAXI: Monitoring variable X-ray sources 4th International MAXI Workshop (2010 November 30-December 2; Tokyo, Aoyama Gakuin University)
- [46] Gandhi, P., Makishima, K., Kubota, A., et al, "Constraining accretion from coordinated multi-wavelength rapid timing observations of X-ray binaries"
- [47] Noda, H., Makishima, K., Yamada, S., & Nakazawa, K., "Interpreting the *Suzaku* Spectra of MCG-6-30-15 without Invoking a High Black-Hole Spin"
- [48] Torii, S., Makishima, K., Yamada, S., & Nakazawa, K.: "Revealing the spectral/temporal evolution of Cyg X-1 under *Suzaku* & MAXI collaboration"
- [49] Sasano, M., Makishima, K., Yuasa, T., Yamada, S., Nakazawa, & K., Nakajima, "Studies s of SFXTs with MAXI and *Suzaku*"
- [50] Sakurai, S., Makishima, K., Yamada, S., & Nakazawa, K., "LMXBs in their hard state: studies with *Suzaku*, MAXI, and *ASTRO-H*"
- [51] M. Ohno, Nakazawa,K., Makishima. K. et al., "All-sky Observations with *Suzaku* Wide-band All-sky Monitor and MAXI"
- [52] Nakano, T., Nishioka,H. , Uchiyama, H., Hiraga,J., S., Nakazawa, K., & Makishima, K., "Attempts toward Understanding the Formation of Magnetars"
- その他一般講演
- [53] Noda, H., Makishima, K., Yamada, S., Nakazawa K., "Suzaku Discovery of a Hard Component Varying Independently of the Power-Law Emission in MCG-6-30-15", *High Energy View of Accreting Objects: AGN and X-ray Binaries* (2010 October 4-15; Crete, Greece)
- [54] Torii, S., Yamada, S., Makishima, K., Nakazawa, K., "Geometrical Configuration of Accretion Flows in Cyg X-1 in the Low/Hard State with *Suzaku*", *ibid.*
- (国内会議/一般講演)
- 日本物理学会・秋季大会 (2010 年 9 月 11~14 日、九州工業大学)
- [55] 川原田円, 岡部信広, 梅津敬一, 滝沢元和, 松下恭子, 深沢泰司, 浜名崇, 宮崎聰, 中澤知洋, 大橋隆哉: 「Abell1689 銀河団周辺部の高温ガスの観測的研究」、11aSG-2
- [56] 高橋弘充、水野恒史、深沢泰司、湯浅孝行、柳田健之、ほか: 「PoGOLite 気球実験のパスファインダーフライト (1) :大気中性子モニター」、11pSG-1
- [57] 松岡正之、高橋弘充、水野恒史、深沢泰司、湯浅孝行、ほか: 「PoGOLite 気球実験のパスファインダーフライト (2) :データ取得システム」、11pSG-2
- [58] 佐藤有, 大野雅功, 渡辺伸, 川原田円, 太田方之, 田中康之, 小高裕和, 福山太郎, 斎藤新也, 佐々木智香子, 萩野浩一, 国分紀秀, 高橋忠幸, 田島宏康, 田中孝明, 深沢泰司, 水野恒史, 平木一至, 林克洋, 西野翔, 道津匡平, 朴寅春, 中澤知洋, 湯浅孝行, 中島健太, 西岡博之, 野田博文, 烏井俊輔, 牧島一夫, 片岡淳, 吉野将生, 他 HXI/SGD チーム: 「*ASTRO-H* 衛星搭載軟ガソマ線検出器におけるアクティビティードの効果の評価」、11pSG-3
- [59] 平木一至, 水野恒史, 深沢泰司, 小高裕和, 渡辺伸, 国分紀秀, 高橋忠幸, 中澤知洋, 下浦享, 中平聰志, 寺田幸功, 田島宏康, 他 HXI/SGD チーム: 「*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・モンテカルロシミュレータの開発とその評価」、11pSG-4

- [60] 萩野浩一, 渡辺伸, 川原田円, 石川真之介, 福山太郎, 斎藤新也, 国分紀秀, 高橋忠幸, 中澤知洋, 山田真也, 湯浅孝行, 鳥井俊輔, 中島健太, 西岡博之, 野田博文, 牧島一夫, 田島宏康, 田中孝明, 深沢泰司, 林克洋 他 HXI/SGD チーム: 「ASTRO-H衛星搭載硬 X 線イメージーパロトタイプの性能評価」、11pSG-5
- [61] 岩橋孝典, 玉川徹, 阿佐美ふみ, 早藤麻美, 小波さおり, 吉川瑛文, 牧島一夫, Jean Swank, Keith Jahoda ほか GEMS Collaboration: 「宇宙 X 線偏光観測衛星 GEMS 搭載用偏光計のバックグラウンドシミュレーション」、11aSG-9
- [62] 大野雅功, 佐藤有, 渡辺伸, 川原田円, 太田方之, 田中康之, 小高裕和, 斎藤新也, 佐々木智香子, 福山太郎, 萩野浩一, 国分紀秀, 高橋忠幸, 田島宏康, 田中孝明, 榎戸輝揚, 深沢泰司, 高橋弘充, 花畠義隆, 中澤知, 湯浅孝行, 中島健太, 西岡博之, 牧島一夫, 山岡和貴, 片岡淳, 吉野将生, 米徳大輔, 寺田幸功, 他 HXI/SGD チーム: 「ASTRO-H 搭載半導体コンプトンカメラシステムのトリガーロジック及び信号処理ファームウェアの開発」、12pSL-12
- [63] 川村静児 ほか (計 146 名) 中澤和洋含む「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (27): 設計・計画」、13pSH-1
- [64] 穀山涉, 中澤知洋, 国分紀秀, 湯浅孝行, 榎戸輝揚, ほか: 「宇宙実験実証プラットホーム (SWIM) を用いた超小型重力波検出器の開発 IX (軌道上運用 2)」、14pSH-13
- 日本天文学会・秋季年会 (2010 年 9 月 22 日～24 日、金沢大学)
- [65] 赤松弘規, 石崎欣尚, 大橋隆哉, 中澤知洋: 「衝突銀河団 Abell 3667 の温度構造と merger shock による電波レリック」、T03a
- [66] 稲田直久, 川原田円, 高橋労太, 小波さおり, 牧島一夫: 「Evolution of Galaxy Light Distributions in Galaxy Clusters」、T06a
- [67] Ozden Sengul, Kazuo Makishima: 「A study on Thermal Conditions at the Central Regions of non-cDClusters of Galaxies」、T07a
- [68] 内山秀樹, 湯浅孝行, 牧島一夫, 小山勝二, 松本浩典: 「『すざく』による強磁場激変星候補天体 Suzaku J 1740.5-3014 の発見」、J19a
- [69] 山田真也, 牧島一夫, 根来均, 中澤知洋, 鳥井俊輔: 「『すざく』衛星によるブラックホール連星 Cyg X-1 の広帯域ショット解析」、J25a
- [70] 鳥井俊輔, 山田真也, 牧島一夫, 中澤知洋 「『すざく』で迫る Low/Hard State における Cyg X-1 の降着流の幾何」、J26a
- [71] 山岡和貴, 中平聰志, 小谷太郎, 吉田篤正, 山田真也, 牧島一夫, 上田佳宏, 根来均, 高橋弘充, 他 すざく + MAXI チーム 「『すざく』と MAXI によるブラックホール新星 XTE J1752-223 の連携観測」、J27a
- [72] 笹野理, 牧島一夫, 湯浅孝行, 中澤知洋, 榎戸輝揚: 「『すざく』を用いた IGRJ16195-4945 における短時間増光の広帯域観測」、J29a
- [73] 櫻井壮希, 山田真也, 高橋弘充, 榎戸輝揚, 中澤知洋, 牧島一夫: 「『すざく』による Aql X-1 のソフト/ハード状態の検証」、J31a
- [74] 中川友進, 榎戸輝揚, 牧島一夫, 中澤知洋, 坂本貴紀, 吉田篤正, 山岡和貴: 「マグネターのバースト/X 線定常放射の広帯域スペクトルの研究」、J61a
- [75] 西岡博之, 榎戸輝揚, 坂本貴紀, 中川友進, 中澤知洋, 牧島一夫: 「新発見のマグネター SGR 1833-0832 の『すざく』ToO 観測」、J64a
- [76] 中野俊男, 牧島一夫, 中澤知洋, 内山秀樹, 平賀純子: 「マグネターに付随する超新星残骸 CTB109 の『すざく』による観測」、Q24a
- [77] 渡辺伸, 国分紀秀, 川原田円, 佐藤悟朗, 大野雅功, 田中康之, 太田方之, 高橋忠幸, 中澤知洋, 牧島一夫, 片岡淳, 中森健之, 田島宏康, 田中孝明, 深沢泰司, 水野恒史, 高橋弘充, 谷津陽一, Limousin Olivier, Philippe Laurent, Francois Lebrun, ほか ASTRO-H HXI チーム 「ASTRO-H衛星搭載硬 X 線イメージーパロト (HXI) の開発の現状 (V)」、W08a
- [78] 中島健太, 中澤知洋, 中野俊男, 西岡博之, 牧島一夫, 花畠義隆, 高橋弘充, 水野恒史, 深沢泰司, 山岡和貴, 田島宏康, 片岡淳, 大野雅功, 国分紀秀, 高橋忠幸, 渡辺伸, 田代信, 寺田幸功, ほか HXI/SGD チーム: 「ASTRO-H衛星硬 X 線・軟ガンマ線検出器アクティブシールドの機構開発」、W09a
- [79] 野田博文, 中澤知洋, 牧島一夫, 田島宏康, 田中孝明, 高橋忠幸, 国分紀秀, 渡辺伸, 深沢泰司, 他 SGD チーム: 「次期 X 線衛星 ASTRO-H 搭載の軟 γ 線検出器コンプトンカメラの熱設計」、W20a
- [80] 湯浅孝行, 中澤知洋, 牧島一夫, 能町正治, 小高裕和, 高橋忠幸, 尾崎正伸, 国分紀秀, 高島健: 「簡単に使用可能な高速 SpaceWire I/F の開発: SpaceWire-to-GigabitEther」、W31a
- [81] 神田展行 ほか (計 144 名) 中澤和洋含む: 「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (17)」、W54a
- 宇宙科学シンポジウム (2011 年 1 月 5 日～7 日、宇宙科学研究所)
- [82] 牧島一夫, 榎戸輝揚, 西岡博之, 中澤知洋, 平賀純子, 内山秀樹, 湯浅孝行, 山田真也, 中島健太, 笹野理, 中野俊男, 中川友進, 三原建弘, 山本堂之, 中島基樹, 古関優, 国分紀秀: 「『すざく』で見たマグネターとその関連天体」、ポスター P1-023
- [83] 大野雅功, 高橋忠幸 ほか: 「すざく衛星広帯域全天モニタ (WAM) による軟ガンマ線全天観測の現状」、ポスター P1-02B
- [84] 大杉節, 深沢泰司, 水野恒史 ほか: 「フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡 2 年目の成果」、ポスター P1-120
- [85] 山岡和貴, 中平聰志, 吉田篤正 ほか: MAXI とすざくによるブラックホール候補天体 XTE J1752-223 の X 線観測
- [86] 国分紀秀, 渡辺伸, 川原田円, 太田方之, 大野雅之, 佐藤悟朗, 森國城, 高橋忠幸, 中澤知洋, 内山秀樹, 牧島一夫 ほか: 「ASTRO-H衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の開発」、ポスター P2-011

- [87] 田島宏康ほか:「ASTRO-H Soft Gamma-ray Detector(軟ガソマ線検出器)」、ポスター P2-018
● 日本天文学会・春季年会 (2011 年 3 月 16 日～19 日、筑波大学、震災のため予稿集のみ)
- [88] 市川和也、松下恭子、岡部信広、梅津敬一、太田直美、大橋隆哉、川原田円、田村隆幸、佐藤浩介、滝沢元和、中澤知洋、深沢泰司、藤田裕: 「『すざく』衛星による Abell 1835 銀河団の外縁部の研究」、T01a
- [89] 稲田直久、川原田円、高橋労太、小波さおり、牧島一夫: 「Evolution of Galaxy Light Distributions in Galaxy Clusters. II.」、T05a
- [90] Ozden Sengul, Kazuo Makishima: 「A Study on Thermal Conditions at the Central Regions of non-cDClusters of Galaxies (2)」、T08a
- [91] Gu Liyi, Kazuo Makishima, Xu Haiguang: 「Two-Phase ICM in the Central Region of the Rich Cluster of Galaxies Abell 1795: A Joint *Chandra*, *XMM-Newton*, and *Suzaku* View」、T09a
- [92] 湯浅孝行、内山秀樹、中澤知洋、牧島一夫: 「『すざく』による銀河 X 線背景放射 (GRXE) の広帯域スペクトル分解」、Q26a
- [93] 山本堂之、三原建弘、杉崎睦、中島基樹、山岡和貴、松岡勝、森井幹雄、牧島一夫、ほか MAXI チーム: 「X 線連星パルサー GX 304-1 からのサイクロトロン共鳴吸収線の発見」、J22a
- [94] 神頭知美、寺田幸功、田代信、湯浅孝行、山田真也、牧島一夫: 「『すざく』衛星搭載 HXD による Crab の変動追跡」、J45a
- [95] 阿久津智忠 ほか (146 名) 中澤知洋 含む: 「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (18): 設計・計画・サイエンス」、W26a
- [96] 玉川徹、岩橋孝典、阿佐美ふみ、吉川瑛文、Jean Swank、Keith Jahoda、早藤麻美、田原謙、高橋忠幸、牧島一夫、ほか GEMS collaboration: 「X 線偏光観測衛星 GEMS の現状と偏光計テストユニット試験」、W33a
- [97] 澤田真理、信川正順、鶴剛、内山秀樹、他 XIS チーム: 「すざく衛星搭載 X 線 CCD カメラ XIS のエネルギー・スケール軌道上較正の現状」、W38b
- [98] 松岡正之、高橋弘充、花畠義隆、深沢泰司、大野雅功、国分紀秀、高橋忠幸、湯浅孝行、中澤知洋、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 搭載 硬 X 線撮像検出器/軟ガソマ線検出器のアクティブシールド部におけるデジタルフィルタの開発」、W51b
- [99] 萩野浩一、福山太郎、渡辺伸、佐藤有、齋藤新也、石川真之介、川原田円、国分紀秀、高橋忠幸、中澤知洋、牧島一夫、田島宏康、田中孝明、榎戸輝揚、深沢泰司、ほか HXI/SGD チーム: 「ASTRO-H 衛星搭載 硬 X 線撮像検出器用両面ストリップ検出器の性能評価」、W62a
- [100] 佐藤有、大野雅功、太田方之、渡辺伸、川原田円、小高裕和、古閑優、福山太郎、斎藤新也、萩野浩一、国分紀秀、高橋忠幸、水野恒史、平木一至、林克洋、西野翔、道津匡平、朴寅春、深沢泰司、田島宏康、田中孝明、榎戸輝揚、中澤知洋、内山秀樹、湯浅孝之、鳥井俊輔、西岡博之、櫻井壮希、笛野理、中野俊男、牧島一夫、片岡淳、吉野将生、ほか HXI/SGD チーム: 「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 CdTe 半導体検出器における放射化バックグラウンドの評価」、W63a
- [101] 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、高橋忠幸、森國城、西岡博之、笛野理、中澤知洋、牧島一夫、川上孝介、谷津陽一、松岡正之、花畠義隆、高橋弘充、深沢泰司、田島宏康、ほか HXI/SGD チーム: 「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」、W65a
● 日本物理学会・春季大会 (2011 年 3 月 25～28 日、新潟大学、震災のため講演概要集のみ)
- [102] 杉田聰司、山岡和貴、田代信、寺田幸功、岩切渉、高原一紀、安田哲也、玉川徹、芹野素子、中川友進、洪秀微、国分紀秀、大野雅功、高橋忠幸、深沢泰司、高橋拓也、上原岳士、花畠義隆、中澤知洋、牧島一夫、浦田裕次、Patrick P Tsai、山内誠、大森法輔、大休寺新、西岡祐介、Nicolas Vasquez、榎戸輝揚、村上敏夫、田島宏康、他「すざく」WAM チーム: 「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 (VII)」、25pGS-11
- [103] 土屋晴文、日比野欣也、川田和正、堀田直己、立山暢人、大西宗博、瀧田正人、陳鼎、黄晶、宮坂浩正、近藤一郎、高橋恵美子、霜田進、山田豊、宗像一起、牧島一夫: 「チベットでの雷や雷雲に由来する放射線の観測 II」、25pGX-4
- [104] 中澤知洋、中島健太、牧島一夫、深沢泰司、西野翔、滝沢元和、川原田円: 「『すざく』による銀河団からの硬 X 線探査」、26aGS-7
- [105] 櫻井壮希、山田真也、高橋弘充、中澤知洋、牧島一夫: 「『すざく』による弱磁場の中性子星連星 Aql X-1 のソフト/ハード状態の検証」、26aGS-9
- [106] 笛野理、中島健太、湯浅孝行、山田真也、中澤知洋、牧島一夫: 「『すざく』を用いた強磁場中性子星の短時間増光の観測」、26aGS-10
- [107] 中野俊男、牧島一夫、中澤知洋、平賀純子、内山秀樹: 「マグネターに付随する超新星残骸の『すざく』による観測的研究」、26aGS-12
- [108] 神頭知美、岩瀬かほり、寺田幸功、三嶋勇紀、田代信、石崎欣尚、湯浅孝行、能町正治、高橋忠幸、国分紀秀、尾崎正伸、ASTRO-H Collaborations: 「ASTRO-H 衛星の時刻配信における時刻精度の定量化 (2)」、27pGS-7
- [109] 田中孝明、内山泰伸、榎戸輝揚、太田方之、大野雅功、片岡淳、川原田円、国分紀秀、佐藤悟朗、高橋忠幸、高橋弘充、田島宏康、田代信、寺田幸功、中澤知洋、中森健之、深沢泰司、Roger Blandford、牧島一夫、Grzegorz Madejski、水野恒史、森國城、谷津陽一、山岡和貴、Philippe Laurent、Olivier Limousin、Francois Lebrun、渡辺伸、他 ASTRO-H SGD チーム: 「ASTRO-H 衛星搭載軟ガソマ線検出器 (SGD) の開発の現状」、27pGS-8

- [110] 野田博文, 牧島一夫, 中澤知洋, 桜井壮希, 笹野理, 中野俊男, 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, 他 SGD チーム: 「次期 X 線衛星 ASTRO-H 搭載の軟γ線検出器コンプトンカメラ熱設計」、27pGS-9
- [111] 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, 中澤知洋, 他 HXI/SGD チーム: 「次期 X 線観測衛星 ASTRO-H 搭載軟ガソマ線検出器用 Si-Pad 検出器の性能評価」、27pGS-10
- [112] 中島健太, 中野俊男, 中澤知洋, 牧島一夫, 花畠義隆, 深沢泰司, 山岡和貴, 田島宏康, 片岡淳, 高橋弘充, 水野恒史, 大野雅功, 国分紀秀, 高橋忠幸, 渡辺伸, 田代信, 寺田幸功, ほか HXI/SGD チーム: 「ASTRO-H 衛星硬 X 線・軟ガソマ線検出器アクティブシールドの構造設計」、27pGS-11
- [113] 西岡博之, 笹野理, 湯浅孝行, 山田真也, 中澤知洋, 牧島一夫, 深澤泰司, 斎藤龍彦, 吉野将生, 中森健之, 片岡淳, 谷津陽一: 「次期 X 線衛星 ASTRO-H へ向けた BGO 結晶シンチレータの APD 読み出しによる光収集効率の研究」、27pGS-12
- [114] 斎藤龍彦, 吉野将生, 中森健之, 片岡淳, 国分紀秀, 渡辺伸, 大野雅功, 高橋忠幸, 森國城, 西岡博之, 笹野理, 中澤知洋, 牧島一夫, 谷津陽一, 松岡正之, 高橋弘充, 深澤泰司, 田島宏康, ほか HXI/SGD チーム: 「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」、27pGS-13
- [115] 鳥井俊輔, 中澤知洋, 内山秀樹, 湯浅孝之, 西岡博之, 櫻井壮希, 笹野理, 中野俊男, 牧島一夫, 深沢泰司, 国分紀秀, 渡辺伸, 高橋忠幸, 斎藤新也, 福山太郎, 佐藤有, 萩野浩一, 大野雅功, 田島宏康, 榎戸輝揚, 片岡淳, 中森健之, 谷津陽一, ほか HXI/SGD チーム: 「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」、27pGS-14
- [116] 大野雅功, 川原田円, 国分紀秀, 榎戸輝揚, 深澤泰司, 高橋弘充, 中澤知洋, 湯浅孝行, 中島健太, 西岡博之, 牧島一夫, 寺田幸功, ほか: 「ASTRO-H 衛星搭載軟ガソマ線検出器によるガソマ線バーストの観測」、28aGN-10
- [117] 川村静児 ほか (計 146 名) 中澤和洋含む「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (30): 設計・計画」、28aGS-1
- [118] 穀山渉, 中澤知洋, 国分紀秀, 小高裕和, 湯浅孝行, 榎戸輝揚, ほか: 「宇宙実験実証プラットホーム (SWIM) を用いた超小型重力波検出器の開発 X (データ解析)」、28aGS-11
- その他一般講演
- [119] 牧島一夫: 「『さざく』衛星で探る宇宙高温プラズマ」、日本地球惑星科学連合 2010 年大会 3 学会合同 プラズマ物理セッション I (2010 年 5 月 23 日、幕張メッセ)
- [120] 牧島一夫: 「科学衛星と 30 年」、DECIGO ワーク ショップ (2010 年 6 月 14 日、東京大学小柴ホール)
- [121] 内山秀樹: 「『さざく』による銀河中心 $5^\circ \times 2^\circ$ 領域における星間吸収分布の測定」、国立天文台研究集会 「銀河中心 Sgr A* の観測的ブラックホール時空研究」 (2011 年 3 月 7 日 ~ 9 日、東京大学)
- (セミナー、一般向け講演)
- [122] 「さざくによる超強磁場天体マグネターの観測」、宇宙線研究所セミナー (2010 年 6 月 4 日)
- [123] 牧島一夫: 「宇宙をグラフにしよう」、東大付属中野高校講演会 (2010 年 7 月 20 日)
- [124] 牧島一夫: 「X 線で見る宇宙」、リバネス社主催・中高教員向け講演会 (2010 年 9 月 1 日)
- [125] 牧島一夫: 「科学衛星で探る宇宙のブラックホール」、駒場祭公開講座 (2010 年 11 月 23 日)
- [126] 牧島一夫: 「X 線で探る宇宙の最強磁場」、物理学教室ランチトーク (2011 年 4 月 8 日)

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、核融合研究に用いられる「トカマク」と呼ばれるトーラス型プラズマの高性能化に向けた研究を行っている。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。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駆動を使う方法がある。当研究室では 2 つの周波数帯の高周波駆動を使った加熱・電流駆動の原理検証実験を行っている。また、高周波加熱・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

高周波加熱・電流駆動実験

高周波駆動によるプラズマ加熱・電流駆動を目的として進行波を励起できる「コムラインアンテナ」を TST-2 に設置し、周波数 200 MHz の進行波をプラズマ中に励起した。これは低域混成波と呼ばれる波の周波数に対応する。比較的高いプラズマ電流 ($\sim 100 \text{ kA}$) や密度 ($\sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$) のプラズマに最大 130 kW のパワーを入射することに成功しているが、これまでには明らかな加熱・電流駆動効果は観測されていない。プラズマ位置をアンテナに対し相対的に移動させることにより、アンテナからプラズマ中に放射される電力が最大となる条件が特定された。アンテナによる波動励起およびプラズマ中の伝搬・吸収を考察するため、有限要素法汎用コード COMSOL によりアンテナから励起される波動を計算した (図 6.2.14)。進行波が励起されている様子が確認できる。この結果より、励起された波の波数スペクトルを求め、波動伝搬やプラズマとの相互作用を詳細に調べるために全波解析コードに与える初期条件として用いる。プラズマ中の波動伝搬は電子密度に強く影響されるため、プラズマ周縁部で静電プローブによる電子密度測定を行った。実験に用いられたプラズマの場合、計算で得られた励起波の波数と測定した電子密度から、励起された速波はプラズマ周縁部で遅波と結合し、プラズマ中心部まで到達できないことがわかる。これは実験結果と矛盾しない。実験では 0.1 T のトロイダル磁場を用いたが、0.3 T を用いれば 200 MHz の速波がプラズマ中心部まで到達できることが指摘されているので、今後はより高磁場で実験を行う予定である。

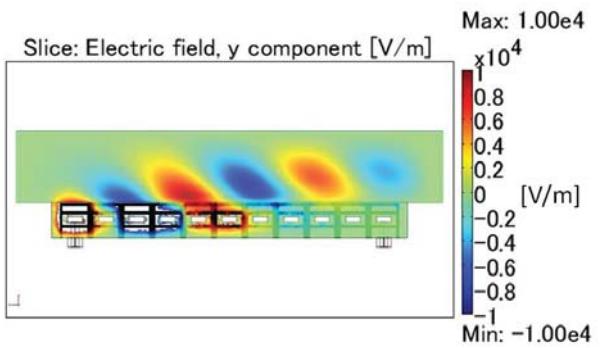


図 6.2.14: Wave electric field excited in the plasma by the comline antenna.

TST-2 では前年度までに、中心ソレノイド (CS) による電磁誘導を用いずに 2.45 GHz の電子サイクロトロン波を用いてプラズマを立ち上げる方法 (EC 立ち上げ) を確立しており、立ち上げられたプラズマは 21 MHz の波動を用いて維持できることも示されている。今年度、200 MHz の波動を使ってプラズマ立ち上げ実験を行ったところ、EC 立ち上げの際と同程度の 1 kA のプラズマ電流を流せることを示した。また、プラズマ立ち上げが可能なトロイダル磁場は EC 立ち上げの場合の下限より 1/3 程度低い領域まで拡張できることが分かった。これらの実験で励起される波は進行波ではない。次に進行波を励起できるコムラインアンテナを用いてプラズマ立ち上げ実験を行った。垂直磁場および RF パワーのゆっくりとした増加により、最大 12 kA のプラズマ電流が得られた。EC 立ち上げでは、プラズマ電流の大きさおよび方向は垂直磁場に比例することがわかつっていた。コムラインアンテナによるプラズマ立ち上げ実験では、進行波方向に対する垂直磁場の向きによって到達できるプラズマ電流の大きさに違いが表れた (図 6.2.15)。これは進行波による直接電流駆動の効果と考えられる。軟 X 線放射計測からプラズマ電流が大きくなるに従って電子温度が高くなっていること、硬 X 線計測からプラズマ電流の増大に合わせて高速電子が生成されることも明らかになっている。

EC 立ち上げが可能であることは以前から知られており、いくつかの ST 装置で精力的に研究されている。一方、維持された配位がどのような特徴を持ち、運転条件にどう依存するかは整理されていなかった。そこで様々な運転条件で維持されたプラズマの平衡解析を行い、平衡の特徴を調べた結果、平衡の形状と分布には 2 つの自由度があることが分かった。一つはトーラス外側での垂直磁場強度とトーラス内側での垂直磁場強度の比であり、もう一つは閉じた磁気面領域と全プラズマ領域の体積の比である。前者は充填ガス圧、EC 共鳴位置に依存し、後者は EC 加熱パワーに依存する。図 6.2.16 に充填ガス圧の異なる放電、EC 加熱パワーの異なる放電を含め 3 つの放電の平衡配位を示す。左側の平衡では電流密度がプラズマ中心で大きく、垂直磁場強度の比が 1 に近い。中央の平衡では電流密度がトーラス外側で大きく、トーラス内側の垂直磁場は 0 に近い。右側の平

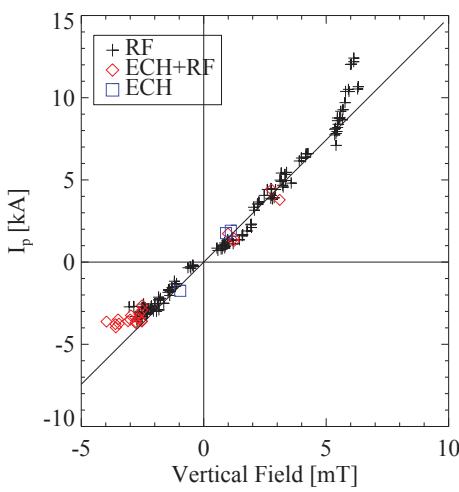


図 6.2.15: Relationship of plasma current and applied vertical field in plasma current start-up experiment using the combline antenna.

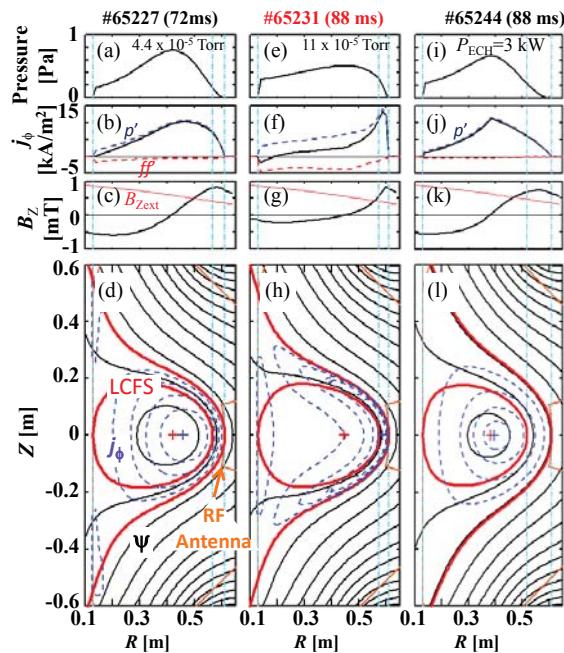


図 6.2.16: Comparison of reconstructed magnetic configuration and profiles for low filling pressure (a)–(d), high filling pressure (e)–(h), and low EC power (i)–(l) equilibria.

衡では開いた磁気面領域が大きく上下に広がっているのがわかる。さらに 200 MHz の高周波で維持されたプラズマを解析したところ、ループアンテナを用いた場合は図 6.2.16 の中央とよく似た配位、コムラインアンテナを用いた場合は図 6.2.16 の右側とよく似た配位となることがわかった。垂直磁場強度とその極性を変えて EC および 200 MHz (上記 2 種のアンテナ) で維持されたプラズマを調べた。プラズマ電流はおおよそ垂直磁場に比例し、平衡がプラズマに大きな影響を与えていた。また EC の場合は垂直磁場極性を変えてもプラズマ電流の絶対値は変わらず、圧力駆動電流が支配的であることが示唆された。

新アンテナ設計

TST-2 では低域混成周波数帯の波動により 12 kA までのプラズマ電流を得ているが、最終的な目標はプラズマ電流を 100 kA 程度まで増大させ、ST において CS を使わず低域混成波で高速イオン閉じ込めに十分なプラズマ電流が得られることを示すことがある。現在使用しているコムラインアンテナは速波進行波を励起するアンテナなので、遅波である低域混成波の励起効率は低い。現在、低域混成波を直接励起できるグリルアンテナを設計中である。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。200 MHz 電磁波の波長は 1.5 m と長いので、導波管内に誘電体を詰めてアンテナの小型化を行う。波動励起効率を有限要素法パッケージ COMSOL を用いて計算した結果、アンテナ前面のプラズマ密度に強く依存することが確かめられた。そのため、アンテナ前面のプラズマ密度を調整するための可動式リミターをアンテナ周囲に設置する。励起された波動の伝播・吸収は TORLH 全波解析コードと CQL3D Fokker-Planck コードの反復によって行う。マクスウェル分布のプラズマでは波の吸収は弱いが、準線形拡散による速度分布関数の歪みが大きくなるにつれて吸収が強くなることがわかった。

TST-2 では 0.1 T 程度のトロイダル磁場で EC 立ち上げを行ってきたが、低域混成波実験では 0.3 T 程度のトロイダル磁場が必要である。高磁場での EC 立ち上げには、現在使っている 2.45 GHz ではなく、8.2 GHz 程度の周波数が必要である。吉田研究室の所有するクライストロン (周波数 8.2 GHz、電力 ≤ 25 kW) からの高周波出力を分岐し、TST-2 まで導引するための導波管の敷設をほぼ完了し、8.2 GHz のマイクロ波を入射するためのホーンアンテナの設計を行っている。

乱流計測

プラズマの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 は実験機動性が高いため、統計精度を高めた乱流研究が可能である。プラズマの微視的不安定性を同定するため、電子密度・温度、空間電位、速度場、磁場などの揺動場の多点計測を目指している。観測可能な揺動場を拡

張するため、高速電圧掃引シングルプローブ法を開発した。シングルプローブ法は電極サイズ程度（数百 μm –数 mm）の極めて優れた空間分解能を持ち、電子温度・密度、空間電位が得られるが、時間分解能は電圧掃引時間（通常 ms オーダー）である。本研究では掃引周波数を高め、200 kHz までの揺動計測を目指した。掃引周波数を上げた場合に想定される問題点は、測定回路の交流インピーダンスによる計測信号の歪み、得られた高速サンプルデータの妥当性の確立である。計測データの詳細な分析により、歪みを生じさせている交流インピーダンス起源の成分を取り除くことに成功した。妥当性の検証については、近接した 2 点において一部の揺動場を浮遊電位法によって実測し、高速電圧掃引法と比較する手法が適用可能との指針を得、乱流による密度・温度・運動量輸送研究に必要な電子温度・密度および空間電位の揺動パワースペクトル推定の展望が得られた。

種々のプラズマ装置の周辺揺動観測で、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、ポロイダル断面上で非一様性が報告されている。乱流輸送の非対称性を観測することを目的として、静電プローブを用いて TST-2 の周辺プラズマで浮遊電位およびイオン飽和電流揺動の多点計測を行った。揺らぎが発生すると、プラズマ中の荷電粒子はその電場揺らぎによる $E \times B$ ドリフト運動によって、径方向の粒子速度の揺らぎが生じ、径方向に粒子輸送を引き起こす。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、あるいはそれら揺らぎの間の相関を計測する必要がある。初期結果として得られた周辺乱流のクロススペクトル構造は、浮遊電位とイオン飽和電流揺動は低周波から 100 kHz 付近まで相関が高く、プラズマの内側と外側では両者の位相差が異なることがわかった。

計測器開発

トムソン散乱はプラズマの基本パラメータである電子温度・密度を精度よく測定できる優れた計測法であり、TST-2 において開発が進められてきた。現在、レーザー 1 パルスに対して複数回散乱信号を計測するマルチパストムソン散乱法の開発を行っている。マルチパス法は、従来のトムソン散乱に比べ数倍の信号が得られるほか、プラズマの圧力非等方性や電流密度分布に関する情報も得られる。今年度はマルチパス法の原理実証として、レーザー 1 パルスに対し 2 回の信号を得るダブルパス配位でラマン散乱およびトムソン散乱計測を行い、電子密度、磁場に平行・垂直方向の電子温度 ($T_{e\parallel}$, $T_{e\perp}$)、および磁気軸上の電流密度の測定に成功した（図 6.2.17(a), (b)）。プラズマ圧力の非等方性はプラズマの平衡・不安定性に大きな影響を与える可能性がある。圧力非等方性の直接測定手法は確立していないため、トムソン散乱による非接触測定法が確立できれば画期的である。現状のシステムでは電子密度 $n_e > 3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ の範囲で 15% 以上の非等方性があれば測定可能である（図 6.2.17(c)）。電子密度 $n_e < 3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ にお

いて $T_{e\parallel}$ と $T_{e\perp}$ の大きな差 ($T_{e\parallel}/T_{e\perp} > 40\%$) が観測されているが、これが測定誤差によるものかプラズマの非等方性を反映しているのかについては解析中である。低域混成波を用いた電流駆動実験を行う TST-2 においては、非等方性や電流密度に関する情報は非常に重要である。プラズマ電流 $I_p \simeq 100 \text{ kA}$ 程度のプラズマに対し、ダブルパストムソン散乱を用いて推定した電流密度は $j_e \simeq 640 \text{ kAm}^{-2}$ であった。

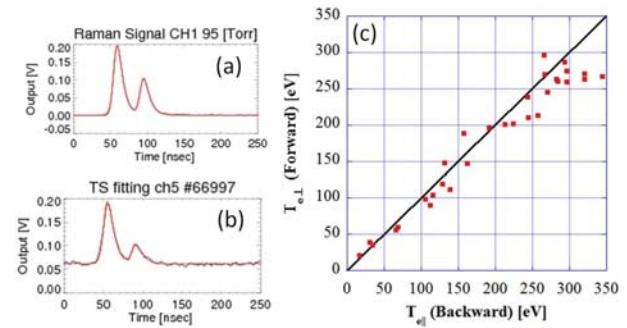


図 6.2.17: Double-pass Raman scattering signal (a), double-pass Thomson scattering signal (b), and comparison of $T_{e\parallel}$ and $T_{e\perp}$ (c). Two pulses in (a) and (b) correspond to the first and second laser paths.

中性ヘリウムの発光ラインの強度比は電子温度・密度に依存するので、計測結果と衝突輻射モデルに基づく計算結果を比較することにより、電子温度・密度が得られる。空間 8 チャンネルで 3 つの発光ラインを同時計測した。測定したライン強度は視線方向に積分された値なので、アーベル変換して放射率の径方向分布を得る。EC 立ち上げ実験では電流ジャンプ後の電子温度・密度ともプラズマ周辺領域で高いと推定された。

6.2.2 共同研究

QUESTにおけるトムソン散乱

九州大学の球状トカマク QUEST で高周波駆動による電流駆動実験が行われている。TST-2 と類似の方法でトムソン散乱計測システムの開発を行っている（図 6.2.18）。トムソン散乱で得られる信頼性の高い電子温度・密度分布を使うことにより、平衡解析の精度を向上でき、電流駆動機構の解明にも貢献できる。今年度は作業ステージを設置し、レーザー入射・集光フランジ部、レーザー出射フランジを設計・製作・設置した。高周波電流駆動プラズマは密度が低いので、レーザー入射・集光フランジ部には可能な限り大きな観測窓を設置し、未使用時に観測窓をプラズマから保護するため、観音開き式のシャッターを取り付けた。光源である Nd:YAG レーザーは

エネルギー 1.65 J, 繰り返し 10 Hz, パルス幅 6–8 ns, ビーム径 9 mm, ビーム広がり 0.45 mrad 以下であり, QUEST 本体からの電磁的影響が少ない位置に設置した。ビームはミラーを用いた伝送路を通り QUEST プラズマに入射される。伝送路の設置とビーム形状の確認を行い, 出射フランジよりも遠い 20 m 遠方でもビーム広がりは十分小さいことを確認した。散乱光を集光する球面ミラーは直径 500 mm のものを使用する予定である。ミラーホルダーを製作し, 集光試験を行った。温度を算出するための分光システムも構築中である。設計・製作したポリクロメータ 6 台を東京大学で波長較正する予定である。モノクロメータで分光した光を用いてポリクロメータの較正を行うが, 効率良く且つ高精度に波長較正を行うために, 自動波長スキヤンシステムを構築した。今後, 集光系及び分光・データ収集系等を設置してシステムを完成させ, 計測を開始する予定である。

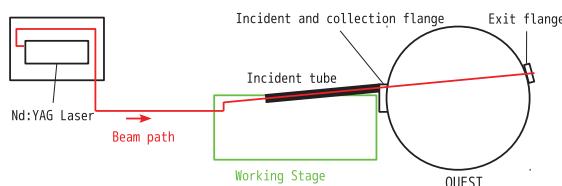


図 6.2.18: Schematic of Thomson scattering system in QUEST.

LHD におけるマイクロ波反射計を用いた ICRF 波動計測実験

プラズマ中に励起した高周波波動の非接触計測は, 高周波によるプラズマの加熱・維持の物理機構を解明する上で重要である。核融合科学研究所の LHD では, イオンサイクロトロン周波数帯の波動 (38.47 MHz) によるプラズマの加熱・維持実験が行われている。本研究はマイクロ波反射計による波動計測法の確立を目指している。マイクロ波反射計とは, プラズマ中にマイクロ波を入射し, カットオフ層で反射されたマイクロ波を計測するものであり, 入射波と反射波の位相を測定する。得られた信号のスペクトルを図 6.2.19 に示す。(1) は、マイクロ波の入射口および反射口に設置されたシャッターを閉じた場合の信号で、(2) がプラズマからの反射を測定した信号である。これらを比較すると, プラズマからの反射を測定した信号には広い裾野成分が確認でき、プラズマ中の揺らぎの影響を表していると考えられる。また、得られた位相揺らぎよりカットオフ層における振動電場を見積もると, 入射パワーから見積もられる振動電場に比べ小さかった。これは、プラズマによる高周波波動の吸収が原因であると考えられる。

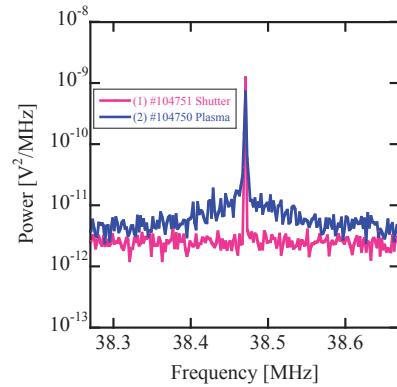


図 6.2.19: Frequency spectra without plasma (a) and with plasma (b).

微視的乱流による大域的運動量輸送

九州大学との共同研究で、プラズマの渦度・運動量輸送量（レイノルズ応力）を全方位角方向で測定可能な計測器を開発し、直線プラズマ装置に設置して実験を行った。直線プラズマでは、高温不均一磁化プラズマで普遍的な不安定性であるドリフト波を起源とした乱流や、その二次的不安定性が観測されており、渦度の 2 次元パターンの実測に成功した。また乱流運動量輸送量を方位角方向に積分して大域的な運動量輸送量を得、その確率分布関数を調べたところ、非ガウス的な振る舞いが見出された。

<報文>

(原著論文)

- [1] Y. Nagashima, S. Inagaki, K. Kamakaki, H. Arakawa, T. Yamada, S. Shinohara, Y. Kawai, M. Yagi, A. Fujisawa, S. -I. Itoh, K. Itoh and Y. Takase: Development of radially movable multi-channel Reynolds stress probe system for a cylindrical laboratory plasma, Rev. Sci. Instrum. **82** (2011) 033503.
- [2] M. Ishiguro, K. Hanada, K. Nakamura, O. Mitarai, H. Zushi, H. Idei, M. Sakamoto, M. Hasegawa, Y. Higashizono, Y. Takase, T. Maekawa, Y. Kishimoto, S. Kawasaki, H. Nakashima and A. Higashijima: Reconstruction of Vacuum Magnetic Flux in QUEST, Plasma Fusion Res. **5** (2010) S2083.
- [3] T. Kobayashi, S. Inagaki, H. Arakawa, K. Kamataki, Y. Nagashima, T. Yamada, S. Sugita, M. Yagi, N. Kasuya, A. Fujisawa, S. -I. Itoh and K. Itoh: Bispectral Analysis of Density and Potential Fluctuations in a High Neutral Density Cylindrical Plasma, Plasma Fusion Res. **5** (2010) S2047.
- [4] K. Kamataki, S. -I. Itoh, S. Inagaki, H. Arakawa, Y. Nagashima, T. Yamada, M. Yagi, A. Fujisawa and K. Itoh: ECRH Superposition on Linear Cylindrical Helicon Plasma in the LMD-U, Plasma Fusion Res. **5** (2010) S2046.

- [5] H. Arakawa, S. Inagaki, Y. Nagashima, T. Yamada, K. Kamataki, T. Kobayashi, S. Sugita, M. Yagi, N. Kasuya, A. Fujisawa, S. -I. Itoh and K. Itoh: Probability Density Function of Density Fluctuations in Cylindrical Helicon Plasmas, *Plasma Fusion Res.* **5** (2010) S2044.
- [6] T. Yamada, S. -I. Itoh, S. Inagaki, Y. Nagashima, S. Shinohara, N. Kasuya, K. Terasaka, K. Kamataki, H. Arakawa, M. Yagi, A. Fujisawa and K. Itoh: Nonlinear Mode Couplings in a Cylindrical Magnetized Plasma, *Plasma Fusion Res.* **5** (2010) S2016.
- [7] T. Yamada, R. Imazawa, S. Kamio, R. Hihara, K. Abe, M. Sakumura, Q. Cao, T. Oosako, H. Kobayashi, T. Wakatsuki, B. I. An, Y. Nagashima, H. Sakakita, H. Koguchi, S. Kiyama, Y. Hirano, M. Inomoto, A. Ejiri, Y. Takase and Y. Ono: Merging start-up experiments on the UTST spherical tokamak, *Plasma Fusion Res.* **5** (2010) S2100.
- [8] A. Ejiri, T. Yamaguchi, J. Hiratsuka, Y. Takase, M. Hasegawa and K. Narihara: Development of a bright polychromator for Thomson scattering measurements, *Plasma Fusion Res.* **5** (2010) S2082.
- [9] T. Yamaguchi, A. Ejiri, J. Hiratsuka, Y. Takase, Y. Nagashima, O. Watanabe, T. Sakamoto, T. Oosako, B. I. An, H. Kurashina, H. Kobayashi, H. Hayashi, H. Matsuzawa, K. Yamada, H. Kakuda, K. Hanashima and T. Wakatsuki: Development of a Thomson scattering system in the TST-2 spherical tokamak, *Plasma Fusion Res.* **5** (2010) S2092.
- [10] M. Sugihara, K. Oki, R. Ikezoe, T. Onchi, A. Sanpei, H. Himura, S. Masamune, T. Akiyama, A. Ejiri, K. Sakamoto, K. Nagasaki and V. Zhuravlev: Density Regimes of Low-Aspect-Ratio RFP Plasmas in RELAX, *Plasma Fusion Res.* **5** (2010) S2061.
- [11] Y. Nagashima, J. Ozaki, M. Sonehara, Y. Takase, A. Ejiri, K. Yamada, H. Kakuda, S. Inagaki, T. Oosako, B. I. An, H. Hayashi, K. Hanashima, J. Hiratsuka, H. Kobayashi, H. Kurashina, H. Matsuzawa, T. Sakamoto, T. Yamaguchi, O. Watanabe and T. Wakatsuki: Fluctuation measurement in the edge plasma on TST-2, *Plasma Fusion Res.* **5** (2010) S2049.
- [12] O. Watanabe, A. Ejiri, H. Kurashina, T. Ohsako, Y. Nagashima, T. Yamaguchi, T. Sakamoto, B. I. An, H. Hayashi, H. Kobayashi, K. Yamada, H. Kakuda, J. Hiratsuka, K. Hanashima, T. Wakatsuki and Y. Takase: Comparison of Hydrogen and Deuterium Plasmas in ECH Start-Up Experiment in the TST-2 Spherical Tokamak, *Plasma Fusion Res.* **5** (2010) S2032.
- [13] J. Hiratsuka, A. Ejiri, Y. Takase and T. Yamaguchi: Feasibility of a Multi-Pass Thomson Scattering System with Confocal Spherical Mirrors, *Plasma Fusion Res.* **5** (2010) 044.
- [14] H. Kurashina, A. Ejiri, Y. Takase, K. Hanashima, T. Sakamoto, O. Watanabe, Y. Nagashima, T. Yamaguchi, B. I. An, H. Kobayashi, H. Hayashi, K. Yamada, H. Matsuzawa, H. Kakuda, J. Hiratsuka, T. Wakatsuki and T. Oosako: Electron Density Measurements of Non-Inductive Start-Up Plasmas in the TST-2 Spherical Tokamak, *Plasma Fusion Res.* **5** (2010) 024.
- [15] J. Ozaki, M. Sonehara, Y. Nagashima, Y. Takase, A. Ejiri, K. Yamada, H. Kakuda, S. Inagaki, T. Oosako, B. I. An, H. Hayashi, K. Hanashima, J. Hiratsuka, H. Kobayashi, H. Kurashina, T. Sakamoto, T. Yamaguchi, O. Watanabe and T. Wakatsuki: Evaluation of Edge Electron Temperature Fluctuations Using a Conditional Technique on TST-2, *Plasma Fusion Res.* **5** (2010) 023.
- [16] Y. Nagashima, T. Oosako, Y. Takase, A. Ejiri, O. Watanabe, H. Kobayashi, Y. Adachi, H. Tojo, T. Yamaguchi, H. Kurashina, K. Yamada, B. I. An, H. Kasahara, F. Shimpo, R. Kumazawa, H. Hayashi, H. Matsuzawa, J. Hiratsuka, K. Hanashima, H. Kakuda, T. Sakamoto, and T. Wakatsuki: Observation of Beat Oscillation Generation by Coupled Waves Associated with Parametric Decay during Radio Frequency Wave Heating of a Spherical Tokamak Plasma, *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010) 245002.
- [17] K. Hanada, K. Sato, H. Zushi, K. Nakamura, M. Sakamoto, H. Idei, M. Hasegawa, Y. Takase, O. Mitarai, T. Maekawa, Y. Kishimoto, M. Ishiguro, T. Yoshinaga, H. Igami, N. Nishino, H. Honma, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, Y. Higashizono, A. Ando, N. Asakura, A. Ejiri, Y. Hirooka, A. Ishida, A. Komori, M. Matsukawa, O. Motojima, Y. Ogawa, N. Ohno, Y. Ono, M. Peng, S. Sudo, H. Yamada, N. Yoshida and Z. Yoshida: Steady-State Operation Scenario and the First Experimental Result on QUEST, *Plasma Fusion Res.* **5** (2010) S1007.
- [18] Y. Nagashima, K. Nagaoka, K. Itoh, A. Fujisawa, M. Isobe, T. Akiyama, C. Suzuki, S. Nishimura, Y. Yoshimura, K. Matsuoka, S. Okamura, Y. Takase, A. Ejiri, S. -I. Itoh, M. Yagi and CHS Group: Observation of Edge Reynolds Stress Increase Preceding an L-H Transition in Compact Helical System, *Plasma Fusion Res.* **5** (2010) 022.
- [19] T. Wakatsuki, Y. Nagashima, T. Oosako, H. Kobayashi, B. I. An, H. Kakuda, T. Yamada, R. Imazawa, O. Watanabe, T. Yamaguchi, H. Kurashina, H. Hayashi, K. Yamada, T. Sakamoto, K. Hanashima, J. Hiratsuka, S. Kamio, R. Hihara, K. Abe, M. Sakumura, Q. Cao, M. Inomoto, Y. Ono, A. Ejiri and Y. Takase: Direct Measurements of High Harmonic Fast Wave Profile in the UTST Spherical Tokamak Plasma, *Plasma Fusion Res.* **5** (2010) 018.

(会議抄録)

(学位論文)

- [20] 角田英俊: Plasma heating and current drive experiments using radio frequency waves at 200MHz on the TST-2 spherical tokamak, (修士論文)
- [21] 坂本拓也: Electron temperature and density profile measurements using Helium line intensity ratio on TST-2, (修士論文)
- [22] 平塚淳一: Development of advanced Thomson scattering system for the TST-2 spherical tokamak, (修士論文)
- [23] 花嶋賢太朗: TST-2 球状トカマクにおける高周波生成プラズマの電子密度分布, (修士論文)
- [24] 若月琢馬: Plasma Start-up and Heating Experiments Using Radio Frequency Waves in Spherical Tokamaks, (修士論文)
- [25] 小林弘明: TST-2 球状トカマクプラズマにおける高次高調速波入射時の非線形波動現象の研究, (修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [26] H. Kakuda, T. Wakatsuki, Y. Takase, C. P. Moeller, A. Ejiri, Y. Nagashima, O. Watanabe, T. Oosako, H. Kobayashi, R. Kumazawa, K. Saito, H. Kasahara, F. Shimpou, T. Muto, T. Seki, G. Nomura, S. Shiraiwa, O. Meneghini, T. Yamaguchi, T. Sakamoto, K. Hanashima, J. Hiratsuka, T. Ambo, R. Shino, and M. Sonehara: 200 MHz Fast Wave Experiment Using a Comline Antenna in the TST-2 Spherical Tokamak, US-Japan RF Physics Workshop. Toba, Japan, Feb. 7-9, 2011
- [27] T. Wakatsuki, H. Kakuda, Y. Takase, A. Ejiri, Y. Nagashima, O. Watanabe, T. Yamaguchi, H. Kobayashi, H. Kakuda, T. Sakamoto, K. Hanashima, J. Hiratsuka, T. Ambo, R. Shino, M. Sonehara, Y. Ono, M. Inomoto, T. Yamada, S. Kamio, K. Abe, Q. Cao, and M. Sakumura: Plasma Start-up Experiments in TST-2 and Direct Measurement of HHFW Field Profile in UTST, US-Japan RF Physics Workshop. Toba, Japan, Feb. 7-9, 2011
- [28] 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, 20th International Toki Conference, Toki, Japan, Dec. 7 - 10, 2010, P1-62.
- [29] Y. Takase, A. Ejiri, H. Kakuda, T. Wakatsuki, P. Bonoli, J. Wright, S. Shiraiwa, O. Meneghini, C. Moeller, T. Mutoh, R. Kumazawa, K. Saito, H. Kasahara, TST-2 Group: Development of a Plasma Current Ramp-up Technique for Spherical

Tokamaks by the Lower-Hybrid Wave, 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea, Oct 11-16, 2010 (FTP/P6-15)

- [30] H. Idei, M. Sakaguchi, E. I. Kalinnikova, K. Nagata, A. Fukuyama, H. Zushi, K. Hanada, M. Ishiguro, H. Igami, S. Kubo, K. Nakamura, A. Fujisawa, M. Sakamoto, M. Hasegawa, Higashizono, S. Tashima, R. Ogata, H. Q. Liu, I. Goda, T. Ryokai, S. K. Sharma, M. Isobe, A. Ejiri, K. Nagaoka, M. Osakabe, A. Tsushima, H. Nakanishi, T. Morisaki, N. Nishino, Y. Nakashima, H. Watanabe, K. Tokunaga, T. Tanabe, N. Yoshida, K. N. Sato, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, Y. Takase, T. Maekawa, O. Mitarai, M. Kikuchi, K. Toi and Y. Kishimoto: Phased-array Antenna System for Electron Bernstein Wave Heating and Current Drive Experiments in QUEST, 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea, Oct 11-16, 2010 (EXW/P7-31)
- [31] A. Ejiri, H. Kurashina, Y. Takase, K. Hanashima, T. Sakamoto, O. Watanabe, Y. Nagashima, T. Yamaguchi, B. I. An, H. Kobayashi, H. Hayashi, K. Yamada, H. Kakuda, J. Hiratsuka, T. Wakatsuki and M. Goto: Non-inductive Plasma Current Start-up Experiments in the TST-2 Spherical Tokamak, 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea, Oct 11-16, 2010 (EXW/P2-02)
- [32] 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. Saarela, A. N. Saveliev, V. F. Shevchenko, W. Suttrop, D. Temple, R. G. L. Vann and the MAST and NBI Teams: L-H Transition and Pedestal Studies on MAST, 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea, Oct 11-16, 2010 (EXC/2-3Ra)
- [33] T. Yamada, R. Imazawa, S. Kamio, R. Hihara, K. Abe, M. Sakumura, Q.H. Cao, Y. Takase, Y. Ono, H. Sakakita, H. Koguchi, S. Kiyama, and Y. Hirano: Double Null Merging Start-up Experiments in the University of Tokyo Spherical Tokamak, 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea, Oct 11-16, 2010 (EXS/P2-19)
- [34] D. Moreau, D. Mazon, J. Ferron, M. Walker, E. Schuster, Y. Ou, C. Xu, Y. Takase, Y. Sakamoto, S. Ide, T. Suzuki, ITPA-IOS Group Members and Experts: Plasma Models for Real-Time Control of Advanced Tokamak Scenarios, 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea, Oct 11-16, 2010 :(EXW/P2-07)
- [35] M. Uchida, T. Maekawa, H. Tanaka, S. Ide, Y. Takase, F. Watanabe, and S. Nishi: Generation of Initial Closed Flux Surface by ECH at Conventional Aspect Ratio of $R/a = 3$; Experiments on the LATE device and JT-60U Tokamak, 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea, Oct 11-16, 2010 (EXW/P2-12)

- [36] Y. Nagashima, Y. Takase, A. Ejiri, J. Ozaki, M. Sonehara, K. Yamada, B. I. An, H. Hayashi, K. Hanashima, J. Hiratsuka, H. Kakuda, H. Kobayashi, H. Kurashina, T. Sakamoto, T. Yamaguchi, O. Watanabe, and T. Wakatsuki: Evaluation of edge electron temperature fluctuation by the use of conditional techniques in the TST-2 spherical tokamak, US Transport Taskforce Workshop 2010, Annapolis, Maryland, USA, 13-16 April, 2010. I-P18

(国内会議)

一般講演

- [37] 江尻晶: ワーク・ライフ・バランスに関する大規模アンケート分析について, 第 66 回日本物理学会年次大会, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟, 2011 年 3 月 25-28 日 : 日本物理学会講演概要集第 4 分冊 27pTH-4
- [38] 永島芳彦, 江尻晶, 高瀬雄一, 曽根原正晃, 角田英俊, 渡邊理, 山口隆史, 平塚淳一, 坂本拓也, 花嶋賢太朗, 若月琢馬, 安保貴憲, 篠達太: 高速電圧掃引法と浮遊電極法により観測された揺動パワースペクトルの比較, 第 66 回日本物理学会年次大会, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟, 2011 年 3 月 25-28 日 : 日本物理学会講演概要集第 4 分冊 26pGW-9
- [39] 曽根原正晃, 永島芳彦, 江尻晶, 高瀬雄一, 角田英俊, 渡邊理, 山口隆史, 平塚淳一, 坂本拓也, 花嶋賢太朗, 若月琢馬, 安保貴憲, 篠達太: TST-2 球状トカマクにおける周辺揺動計測, 第 66 回日本物理学会年次大会, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟, 2011 年 3 月 25-28 日 : 日本物理学会講演概要集第 4 分冊 26pGW-10
- [40] 団子秀樹, 西野信博, S. BANERJEEB, 花田和明, 長谷川真, 石黒正貴, 田島西夜, 中村一男, 藤澤彰英, 出射浩, 坂本瑞樹, 川崎昌二, 中島寿年, 東島亜紀, 江尻晶, 高瀬雄一, 前川孝, 御手洗修, 福山淳: QUEST プラズマ SOL 揺動の高次モーメントを用いた“偶然力”的評価, 第 66 回日本物理学会年次大会, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟, 2011 年 3 月 25-28 日 : 日本物理学会講演概要集第 4 分冊 26pGW-11
- [41] 山田琢磨, 神尾修治, 阿部圭太, 作村守央, 曹慶紅, 鈴木直人, 渡辺岳典, 今澤良太, 井通暁, 高瀬雄一, 小野靖: UTST における外部コイルを用いた球状トカマク合体実験, 第 66 回日本物理学会年次大会, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟, 2011 年 3 月 25-28 日 : 日本物理学会講演概要集第 4 分冊 27pGY-4
- [42] 若月琢馬, Paul Bonoli, John C. Wright, 白岩俊一, Orso Meneghini, 高瀬雄一, 江尻晶, 永島芳彦, 渡邊理, 山口隆史, 角田英俊, 平塚淳一, 坂本拓也, 花嶋賢太朗, 安保貴憲, 篠達太, 曽根原正晃: TST-2 球状トカマクにおけるグリルアンテナを用いた低域混成波実験の検討, 第 66 回日本物理学会年次大会, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟, 2011 年 3 月 25-28 日 : 日本物理学会講演概要集第 4 分冊 27pGY-12
- [43] 平塚淳一, 江尻晶, 高瀬雄一, 山口隆史, 長谷川真, 永島芳彦, 渡邊理, 角田英俊, 坂本拓也, 花嶋賢太朗, 若月琢馬, 安保貴憲, 篠達太, 曽根原正晃: TST-2 球

状トカマクにおけるダブルバストムソン散乱を用いた電子温度非等方性測定手法の開発, 第 66 回日本物理学会年次大会, 新潟大学五十嵐キャンパス, 新潟, 2011 年 3 月 25-28 日 : 日本物理学会講演概要集第 4 分冊 28aGZ-9

- [44] 永島芳彦, 江尻晶, 高瀬雄一, 曽根原正晃, 角田英俊, 渡邊理, 山口隆史, 平塚淳一, 坂本拓也, 花嶋賢太朗, 若月琢馬, 安保貴憲, 篠達太: TST-2 における周辺揺動の観測, 電気学会「球状トカマク炉の経済性志向に伴う技術的課題」調査専門委員会、NIFS 共同研究「球状トカマク炉の経済性志向に伴う技術的課題」合同ワークショップ(土岐) 2011 年 3 月 15 日
- [45] 若月琢馬, 角田英俊, 高瀬雄一, 江尻晶, 永島芳彦, 渡邊理, 山口隆史, 小林弘明, 坂本拓也, 花嶋賢太朗, 平塚淳一, 安保貴憲, 篠達太, 曽根原正晃, 小野靖, 井通暁, 山田琢磨, 神尾修治, 阿部圭太, 曹慶紅, 作村守央: TST-2 におけるプラズマ立ち上げ実験と UTST における高次高調速波空間分布測定, NIFS 共同研究「球状トカマク炉の経済性志向に伴う技術的課題」合同ワークショップ(土岐) 2011 年 3 月 15 日
- [46] 江尻晶: 二周波数 ICRF 波動励起を利用した波動計測, LHD 計画共同研究成果報告会(土岐) 2011 年 1 月 13-14 日
- [47] 江尻晶: QUEST 用コンパクトムソン散乱計測器の開発, 双方向型共同研究成果報告会(土岐) 2011 年 1 月 20 日
- [48] 永島芳彦, 江尻晶, 高瀬雄一, 曽根原正晃, 角田英俊, 渡邊理, 山口隆史, 平塚淳一, 坂本拓也, 花嶋賢太朗, 若月琢馬, 安保貴憲, 篠達太: TST-2 における高速電圧掃引法を用いた揺動計測, 「燃焼プラズマでの輸送特性の理解と予測の高精度化に向けたトロイダルプラズマの閉じ込め・輸送に関する体系的研究」及び「閉じ込め・輸送サブクラスター会合」合同研究会 2011 年 1 月 27-28 日 於核融合科学研究所(土岐)
- [49] 江尻晶: 機械萌え、高校物理、核融合の接点、社会と核融合クラスター Web 広報サブクラスター平成 22 年度第 1 回会合(宇治) 2011 年 1 月 29 日
- [50] 石黒正貴, 花田和明, 劉海慶, 緒方良太, 磯部光孝, 田島西夜, 団子秀樹, 中村一男, 藤澤彰英, 出射浩, 坂本瑞樹, 長谷川真, 江尻晶, 高瀬雄一, 前川孝, 御手洗修, 川崎昌二, 中島寿年, 東島亜紀: 球状トカマク QUEST における高周波入射を用いた電流立ち上げ実験, プラズマ・核融合学会第 27 回年会(札幌) 2010 年 11 月 30 日-12 月 3 日、予稿: 02P77
- [51] 角田英俊, 若月琢馬, 安保貴憲, 高瀬雄一, 江尻晶, 永島芳彦, 渡邊理, 大迫琢也, 小林弘明, 熊沢隆平, 斎藤健二, 笠原寛史, 新保富士夫, 武藤敬, 関哲夫, 野村吾郎, 白岩俊一, O. Meneghini, 山口隆史, 坂本拓也, 花嶋賢太朗, 平塚淳一, 篠達太, 曽根原正晃: TST-2 球状トカマクにおける進行波アンテナを用いた 200 MHz 速波実験, プラズマ・核融合学会第 27 回年会(札幌) 2010 年 11 月 30 日-12 月 3 日、予稿: 02P80
- [52] 阿部圭太, 神尾修治, 作村守央, 曹慶紅, 鈴木直人, 渡辺岳典, 今澤良太, 山田琢磨, 井通暁, 江尻晶, 高瀬雄一, 小野靖: UTST プラズマ合体実験における

- 球状トカマク配位維持時間の改善, プラズマ・核融合学会第 27 回年会 (札幌) 2010 年 11 月 30 日 - 12 月 3 日、予稿 : 02P79
- [53] 神尾修治, 曹慶紅, 阿部圭太, 作村守央, 鈴木直人, 渡辺岳典, 石口孝司, 今澤良太, 山田琢磨, 井通暁, 江尻晶, 高瀬雄一, 小野靖: ドップラー分光を用いた ST プラズマ合体効果の実験的検証, プラズマ・核融合学会第 27 回年会 (札幌) 2010 年 11 月 30 日 - 12 月 3 日 : 予稿 : 01P16
- [54] 永田和也, 出射浩, 団子秀樹, 銅野皓介, 川崎昌二, 花田和明, 中村一男, 坂本瑞樹, 長谷川真, 中島寿年, 東島亜紀, 高瀬雄一, 前川孝, 御手洗修, 岸本泰明: QUEST における位相配列アンテナを用いた AM 反射計測, プラズマ・核融合学会第 27 回年会 (札幌) 2010 年 11 月 30 日 - 12 月 3 日 : 予稿 : 01P35
- [55] 池田旭彰, 花田和明, 石黒正貴, 長谷川真, 団子秀樹, 中村一男, 藤澤彰英, 出射浩, 坂本瑞樹, 高瀬雄一, 前川孝, 御手洗修, 川崎昌二, 中島寿年, 東島亜紀: QUEST における真空磁気面に対する渦電流の影響の評価, プラズマ・核融合学会第 27 回年会 (札幌) 2010 年 11 月 30 日 - 12 月 3 日 : 予稿 : 02P08
- [56] 永島芳彦, 江尻晶, 高瀬雄一, 渡邊理, 山口隆史, 小林弘明, 角田英俊, 坂本拓也, 花嶋賢太朗, 平塚淳一, 若月琢馬, 安保貴憲, 篠達太, 曽根原正晃: TST-2 における周辺電子温度揺動計測の試み, プラズマ・核融合学会第 27 回年会 (札幌) 2010 年 11 月 30 日 - 12 月 3 日 : 予稿 : 02P41
- [57] 緒方良太, 花田和明, 西野信博, H. Q. LIU, 石黒正貴, 団子秀樹, 中村一男, 藤澤彰英, 出射浩, 坂本瑞樹, 長谷川真, 高瀬雄一, 前川孝, 御手洗修, 川崎昌二, 中島寿年, 東島亜紀: QUEST における blob 径方向伝搬特性計測, プラズマ・核融合学会第 27 回年会 (札幌) 2010 年 11 月 30 日 - 12 月 3 日 : 予稿 : 03P75
- [58] 永島芳彦, 大迫琢也, 高瀬雄一, 江尻晶, 小林弘明, 渡邊理, 笠原寛史, 新保富士夫, 熊澤隆平, 山口隆史, 角田英俊, 坂本拓也, 花嶋賢太朗, 平塚淳一, 若月琢馬, 安保貴憲, 篠達太, 曽根原正晃: TST-2 高次高調速波波熱実験時のポンプ波周辺の非線形スペクトル解析, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪) 2010 年 9 月 23 日 - 26 日 : 日本物理学会講演概要集第 2 分冊 24pQJ-8
- [59] 団子秀樹, 西野信博, 花田和明, 長谷川真, 石黒正貴, 田島西夜, 中村一男, 藤澤彰英, 出射浩, 坂本瑞樹, 川崎昌二, 中島寿年, 東島亜紀, 江尻晶, 高瀬雄一, 前川孝, 御手洗修, 福山敦: QUEST プラズマ SOL 揺動 pdf の高次メーメントの空間構造について, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪) 2010 年 9 月 23 日 - 26 日 : 日本物理学会講演概要集第 2 分冊 24pQJ-6
- [60] 石黒正貴, 花田和明, 劇海慶, 緒方良太, 磯部光孝, 田島西夜, 団子秀樹, 中村一男, 藤澤彰英, 出射浩, 坂本瑞樹, 長谷川真, 江尻晶, 高瀬雄一, 前川孝, 御手洗修, 岸本泰明, 川崎昌二, 中島寿年, 東島亜紀: QUEST における非誘導電流駆動による閉磁気面形成について, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪) 2010 年 9 月 23 日 - 26 日 : 日本物理学会講演概要集第 2 分冊 26pQJ-9
- [61] 出射浩, E. Kalinnikova, 福山淳, 奴賀秀男, 伊神弘恵, 久保伸, 団子秀樹, 花田和明, 中村一男, 藤澤彰英, 坂本瑞樹, 長谷川真, 石黒正貴, 田島西夜, 了戒智文, S. K. Sharma, 劇海慶, 緒方良太, 川崎昌二, 中島寿年, 東島亜紀, 江尻晶, 高瀬雄一, 前川孝, 御手洗修: QUEST における電子バーン・シタイン波加熱・電流駆動実験のための多重光線・フォッカーブランク解析: 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪) 2010 年 9 月 23 日 - 26 日 : 日本物理学会講演概要集第 2 分冊 26pQJ-8
- [62] 花田和明, 石黒正貴, 団子秀樹, 長谷川真, 田島西夜, 中村一男, 藤澤彰英, 出射浩, 坂本瑞樹, 川崎昌二, 中島寿年, 東島亜紀, 西野信博, 江尻晶, 高瀬雄一, 前川孝, 田中仁, 御手洗修, 福山淳: QUEST における非誘導電流駆動実験, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪) 2010 年 9 月 23 日 - 26 日 : 日本物理学会講演概要集第 2 分冊 26pQJ-7
- [63] 若月琢馬, 渡邊理, 高瀬雄一, 江尻晶, 永島芳彦, 山口隆史, 小林弘明, 角田英俊, 坂本拓也, 花嶋賢太朗, 平塚淳一, 安保貴憲, 篠達太, 曽根原正晃: TST-2 球状トカマクにおける 200MHz 電磁波を用いた非誘導立ち上げプラズマの電流維持, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪) 2010 年 9 月 23 日 - 26 日 : 日本物理学会講演概要集第 2 分冊 26pQJ-6
- [64] 永島芳彦, TST-2 グループ: TST-2 実験の現状, 第 5 回 QUEST 研究会 (春日) 2010 年 8 月 30 日 - 31 日
- [65] 高瀬雄一: TST-2 での 200MHz 高周波実験, 第 5 回 QUEST 研究会 (春日) 2010 年 8 月 30 日 - 31 日
- [66] 江尻晶, 山口隆史, 平塚淳一, 篠達太, 高瀬雄一, 長谷川真, 成原一途: コンパクトなトムソン散乱システムの開発, 第 5 回 QUEST 研究会 (春日) 2010 年 8 月 30 日 - 31 日
- [67] 江尻晶, 高瀬雄一: 非等方圧力平衡によるバナナ状圧力分布, 第 8 回核融合エネルギー連合講演会 (高山) 2010 年 6 月 10 日 - 11 日 : 10A-25p
- [68] 平塚淳一, 江尻晶, 高瀬雄一, 山口隆史: 共焦点ミラーを用いたトムソン散乱計測, 第 8 回核融合エネルギー連合講演会 (高山) 2010 年 6 月 10 日 - 11 日 : 11B-12p
- [69] 渡邊理, 永島芳彦, 倉品博樹, 山口隆史, 小林弘明, 角田英俊, 坂本拓也, 花嶋賢太朗, 平塚淳一, 若月琢馬, 江尻晶, 高瀬雄一: TST-2 における EC 立ち上げ ST プラズマ生成時の波動スペクトル解析, 第 8 回核融合エネルギー連合講演会 (高山) 2010 年 6 月 10 日 - 11 日 : 11A-37p
- [70] 若月琢馬, 永島芳彦, 大迫琢也, 小林弘明, 安秉日, 角田英俊, 渡邊理, 山口隆史, 倉品博樹, 林裕之, 山田幸太郎, 坂本拓也, 花嶋賢太朗, 平塚淳一, 今澤良太, 神尾修治, 日原竜磨, 作村守央, 曹慶紅, 山田琢磨, 井通暁, 小野靖, 江尻晶, 高瀬雄一: UTST 球状トカマクにおける高次高調速波空間分布測定, 第 8 回核融合エネルギー連合講演会 (高山) 2010 年 6 月 10 日 - 11 日 : 11A-36p
- [71] 出射浩, 团子秀樹, 花田和明, 中村一男, 藤澤彰英, 坂本瑞樹, 長谷川真, 東園裕太, 石黒正貴, 田島西夜, E. Kalinnikova, H. Liu, 坂口政嗣, 永田和也, 了戒

智文, S. K. Sharma, 高瀬雄一, 御手洗修, 前川孝,
岸本泰明: QUEST における位相配列アンテナを用いた
加熱・電流駆動実験, 第 8 回核融合エネルギー連合
講演会(高山) 2010 年 6 月 10 日-11 日 : 10A-24p

6.3 坪野研究室

本研究室では重力と相対論に関する実験的研究を進めている。その中でも、重力波検出は一貫して研究室の中心テーマとなっている。現在は、高感度なレーザー干渉計を用いた重力波検出に力を注いでいる。これらの研究に関連して、熱雑音や精密計測に関する研究も同時に進めている。

日本の重力波研究の長年の目標計画であった大型レーザー干渉計重力波検出器計画 LCGT プロジェクトが、ついに 2010 年 10 月よりスタートした。これ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。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いる。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、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。[3, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 57, 59]

6.3.1 地上レーザー干渉計重力波検出器

スタートした大型レーザー干渉計 LCGT プロジェクト

日本の重力波研究者グループの悲願であった LCGT (Large-scale Gravitational Wave Telescope) 計画が、ついに 2010 年 10 月から最先端研究基盤事業としてスタートすることが認められた。LCGT 計画は、基線長 3 km のレーザー干渉計型重力波検出器を神岡地下のサイトに建設するものである。この重力波検出器では、干渉計を構成する鏡を 20 K の低温に冷却するとともに、高出力レーザー光源を用い、干渉計方式を RSE と呼ばれる方式を採用する事で、TAMA より 2 桁以上高い感度が実現される。それによって、連星合体からの重力波については約 200 Mpc 遠方のイベントまで観測する事ができる見込みである。その範囲にある銀河数を考慮すると、1 年に 10 回程度の頻度で重力波イベントを観測できることが期待できる。また、もし我々の銀河系内で超新星爆発が発生すれば、そこからの重力波も、LCGT によって十分観測可能である。[19, 43, 49, 56, 58]

LCGT の主干渉計設計

当研究室では LCGT 主干渉計の設計チームリーダーである麻生を中心として、LCGT の光学設計及び制御方法の設計を行なっている。LCGT は RSE と呼ばれる干渉計方式を採用するが、この方式では制御すべき鏡の自由度が第一世代干渉計と比較して増える。従って、新しい制御方法の開発が必要となる。また、この制御方法では、主干渉計の雑音を増加さ

せないように、低雑音な誤差信号取得方法を用いなければならない。そのため、主干渉計の様々なパラメータを最適化する必要がある。我々は、干渉計シミュレーションツールを用いた詳細な検討を行ない、主干渉計の各種パラメータ及び、制御信号取得方法を決定した。[42]

6.3.2 宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO

DECIGO, DPF

DECIGO (DECi-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory) は、日本のグループが中心となり、2027 年ごろの打ち上げを目指して検討が進められている宇宙空間重力波望遠鏡計画である。DECIGO は、互いに 1000 km 離れた 3 台のスペースクラフト内に収められた鏡の間の距離をレーザー干渉計を用いて精密に測定することで重力波を観測する装置である。DECIGO は、連星中性子星や連星ブラックホールの合体現象に関してはほぼ宇宙全体を観測範囲に持ち、また、初期宇宙で発生した重力波を直接捕らえることができるだけの感度を持つ、非常に強力な観測装置になるはずである。

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、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。[2, 9, 26, 37, 38, 45, 46, 55]

DPF 向け Fabry-Perot 干渉計実験

DPF には鏡をとりつけた 2 つの試験質量からなる Fabry-Perot 共振器、モノリシックな入出射光学系、そして全体を囲う熱シールドからなる干渉計モジュールが搭載される。Fabry-Perot 共振器はドラッグフリー制御によって非接触保持された 2 つの鏡で構成され、共振器長は 30 cm となっている。DPF ではこの共振器長の変動から 0.1-1 Hz の周波数帯域における重力波観測や、地球重力場観測を行う。

2010 年度は BBM 向けに製作された部品が全て揃い、共振器長と 2 つの鏡の pitch と yaw それぞれの姿勢制御に成功した。Fabry-Perot 共振器の全 5 自由度の制御ができ、干渉計制御の動作確認ができたことになる。実験では懸架された 2 つのアルミ製試験マスから成る Fabry-Perot 共振器と、低膨張率ガラス基板に光学素子をシリケートボンディングして

作られた入射光学系を用い、制御用アクチュエータとしてはコイル-マグネット型のものを用いた。また制御には SWIM _{$\mu\nu$} の気球実験で用いられた FPGA ボードを使い、衛星向けを意識したデジタル制御を行った。[20, 25, 28, 39, 48]

DPF を利用した地球重力場観測

DPF は、重力波の為の技術検証、及び重力波観測を目的とするだけでなく、地球の微細な重力場構造を観測する事も重要な科学的目的の一つと位置付けている。DPF による地球重力場の測定は、海流の流量の変化や、地下水位の変化、南極の氷の厚さなどといった情報を提供する事ができ、有用な地球環境モニターとして期待されている。

測定方法としては、衛星軌道を観測する事で地球の重力場を観測する Satellite-Satellite Tracking in the high-low mode (SST-hl) という方法と、重力勾配を測定する事で地球重力場の構造を観測する Satellite Gravity Gradiometry (SGG) という 2 つの方法が検討されている。

SGG は、Fabry-Perot 干渉計の 2 つの鏡にかかる力の差が、干渉計の腕の長さの変化に現れる事を利用して重力勾配を測定する方法である。

一方、地球を周回する衛星の軌道は、基本的には地球の重力場で決定されるため、衛星軌道を GPS によって測定すれば重力場も算出する事ができるというのが SST-hl の考え方である。ただし実際は、太陽風や空気抵抗などといった衛星軌道に影響を及ぼす外乱が衛星には働いている。そこで外乱の分だけ衛星軌道を補正する為、外乱量を測定する装置として加速度計が衛星に搭載される予定である。

この加速度計は、重力波検出に使用される Fabry-Perot 干渉計の鏡をマウントしているテストマスを衛星と非接触に置き、衛星に追随するように制御する。制御の際に衛星とテストマスの相対位置を検出するセンサーとして、テストマスに接着された鏡と共に差動マイケルソン干渉計を構築するレーザーセンサーを使用する。本研究ではそのレーザーセンサーの感度を評価し、GPS の精度で制限されるより十分良い精度を持ったセンサーである事を示した。同時に、動作点が非常に狭く、衛星内の扱いが難しいと予想されるなどといった問題点も明らかにした。

更に、この 2 つの方法によって、地球重力場を球面調和関数に展開した時にそれらの各次数をどれだけの精度で観測できるかを見積もった。その結果、SGG の方法では約 120 次以下の低次数の球面調和関数の係数は、過去の重力場観測衛星を超える精度で観測する事が可能である事が明らかになった。また、SST-hl の方法でも、SGG の方法や過去の観測結果より精度は悪いものの、50 次以下の係数では有意義な結果が得られるであろうという結果を得た。これらの見積もりにより、DPF を用いる事によって海流や地下水位などといった環境を 1 年を通してモニターリングする事が可能になり、更には国外の他の重力場観測衛星ミッションと協力する事によって更に良い精度の測定ができると期待できるという事を示す事がで

きた。[21, 29, 31, 32]

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。

残留ガスによる外力とねじれ振り子の回転のダンピング係数は揺動散逸定理によって関係づけられる。そのため、ねじれ振り子の腕に取り付けられた長方形型試験マスとその周りに配置された壁との間の距離を変えていくダンピング係数の変化を測定することで Squeeze film damping の効果を評価することができる。Squeeze film damping の効果がモンテカルロシミュレーションと一致することは過去の実験で既に検証されており、今回行った実験でも誤差の範囲で一致していた。Squeeze film damping の効果は壁を例えれば楕円形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 2 mm 間隔で細長い穴をあけて楕円形にした壁を用いてダンピング測定をした結果、試験マスと壁との距離が 1mm 程度の距離で Squeeze film damping による残留ガス雑音が 1/4 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形にすることで 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。[40, 47]

SWIM _{$\mu\nu$}

SWIM (SpaceWire Interface demonstration Module) は、次世代の宇宙用通信規格 SpaceWire を持った汎用小型演算処理・制御システムである。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。

SWIM の超小型宇宙実験プラットホーム開発の一環として、我々は超小型重力波検出器 (SWIM _{$\mu\nu$}) を開発し、その運用を行った。SWIM _{$\mu\nu$} は、80mm 立方程度の大きさのねじれ型重力波アンテナモジュール 2 つと制御用基板で構成されている。これは小型であるために、地上の大型重力波検出器に匹敵する感度は実現できないが、試験質量変動の検出や非接触制御など、将来の本格的な宇宙空間重力波検出器のための実証試験をする最初のステップとなる。

今年度の約半年間の運用で、「宇宙空間に存在する検出器」として初めての重力波観測運転を実施した。その際には地上設置型ねじれ型重力波アンテナと観測時間を合わせることで、地上-宇宙の同時重力波観測測定も加えて実施した。これらの測定により、(1) 衛星搭載のため、慣性系に対して回転する重力波検出器による周波数変換、(2) 衛星検出器-地上検出器による相対位置関係が変化する同時重力波観

測、という2点について独自な測定ができたことになる。これは、重力波源の位置の特定、偏波の分離など、これまでにない新たな解析手法研究の基礎データとなる。また、(3) 小型衛星上の振動環境の測定、についても工学的に重要なデータとなる可能性があり、これらについてデータ検討と解析の準備を進めた。[5, 16, 22, 23, 27, 30, 41, 54]

6.3.3 磁気浮上重力波検出器

背景重力波のデータ解析

磁気浮上重力波検出器とは、新しいタイプの地上重力波検出器 Torsion-bar Antenna (TOBA) のプロトタイプである。TOBA は、重力波からの潮汐力によるねじれ振子の回転を読み取る事で、重力波を検出するものである。従来のレーザー干渉計型のような重力波検出器は感度を約 100 Hz 以上の高周波数帯域にしか持たないのでに対し、TOBA は 1 Hz 以下の低周波の重力波を観測する事ができるのが大きな特色である。1 Hz 以下の低周波重力波には、宇宙背景重力波や巨大ブラックホール連星からの重力波などといった、宇宙論的に非常に興味深い現象が存在すると期待されており、天文学・物理学双方の観点から、その検出が強く望まれている。1 Hz 以下の低周波重力波を観測する手段としては、他にも LISA や DECIGO のように、宇宙空間にレーザー干渉計型重力波検出器を構成する計画も進められているが、TOBA は地上で観測ができる為、比較的安価で建設が可能、ノイズ対策やアップデートが可能であるなどといった利点がある。

現在は、この検出器を用いて TOBA で初めての同時観測・相関解析の研究が進められている。磁気浮上重力波検出器は、東京大学と京都大学の2か所に設置されており、それを用いて約 5 時間の同時観測を行い、背景重力波をターゲットに相関解析を行っている。これによって、0.1 – 1.0 Hz 帯の背景重力波に対して新たな上限値を設ける事ができるとの見積もりがされており、現在詳細な解析を進めている最中である。

この研究によって、背景重力波は検出こそされないとと思われるものの、TOBA を用いた同時観測・相関解析の検証のみならず、将来の背景重力波検出の可能性を示す結果となっている。[1, 4, 6, 7, 24, 35, 50]

重力波データに対する擬似雑音時系列の生成

磁気浮上重力波検出器を用いた背景重力波探査に向けた研究を行なっている。特に、SWIM _{$\mu\nu$} とのコインシデンス解析を行う際、データ解析パイプラインのチューニングを行うには、バックグラウンドデータが大量に必要になる。しかし、SWIM _{$\mu\nu$} の観測時間は短いため、充分なバックグラウンドデータが得られない。そこで、SWIM _{$\mu\nu$} と同じスペクトルを持つ擬似データを計算機上で生成する研究を本年度冬学期の学生実験として行なった。まずは元となるデータの

パワースペクトルを精度よくポール/ゼロでフィットする。その後、白色雑音を種として、得られたポール/ゼロと同じ形のスペクトルを持つ擬似データを生成する。結果、バックグラウンドスタディに必要な擬似データを任意の長さで生成することが可能になった。

6.3.4 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、共役な物理量の揺らぎが等しく、かつその一方は対称的な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の一方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り、そのため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增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。2010 年度には、SHG, OPO を作成し、OPO においてパラメトリック增幅によるダウンコンバージョンを確認した。

今後はホモダイン測定によるスクイーズド光の観測を行い、小型のプロトタイプ重力波検出器の量子雑音の低減を目指す。[18, 34, 51]

6.3.5 超高安定レーザー光源の開発

低温光共振器を用いた超高安定光源

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、さらなる周波数安定化のために、冷却した光共振器の開発を行なっている。

現在、低温で高い機械的 Q 値を持ち、かつ熱膨張率が低い素材として、単結晶シリコンを用いた光共振器の研究を行なっている。シリコンは、低温において極めて高い機械的 Q 値と高い熱伝導率を持つため、共振器の素材として有望である。また、18K 附近に熱伝導率のゼロ点があることが報告されており、この温度を用いれば ULE ガラス同様に温度揺らぎ

による共振器長変動を取り除くことができる。今年度は実験装置全体の概念設計と、共振器、冷却系のデザインを行なった。[33]

光共振器支持法の研究

地面振動が本研究で用いる光共振器に伝わると、共振器の弾性変形によって共振器長が変動してしまう。これは超高安定な光共振器を作る上で大きな問題となる。この効果は共振器を対称性良く支持することによって、大部分はキャンセル可能であることが知られている。これまで、等方弾性体として扱えるULE製光共振器において様々な支持方法が提案されてきた。我々は結晶であるシリコンを用いるため、それに応じた最適な支持方法を探索している。そのため、有限要素法で立方晶の弾性行列を用いて弾性変形の計算を行なった。材料モデルの妥当性は、以前に当研究室で測定した円筒形単結晶シリコンの共振周波数と、このモデルを用いて有限要素法で計算した結果を照合することで確認した。今後は、支持方法を変化させながら、長さ変動が最小になる点を探す予定である。[53]

冷却系のデザイン

光共振器を冷却するために用いる冷凍機は、低振動であることが求められる。一般に低振動とされるパルス管冷凍機を用いても、コールドヘッドが圧力脈動で振動する効果が無視できない。そこで、我々は最近開発されたヘリウム再凝縮型冷凍機を利用する計画を立てている。この方式では、冷凍機がヘリウムガスで満たされたチャンバーで覆われている。コールドヘッドでヘリウムが液化され、このチャンバーの底部には液体ヘリウムが溜まっている。この底面と光共振器をヒートリンクで繋ぐことによって、共振器を冷却する。底面は振動するコールドヘッドとは機械的な接触を持たないため、振動伝達を大幅に抑えることができる。また、ヘリウム圧力を安定化することで、液体ヘリウムの温度も安定化することができる。パルス管のコールドヘッドはパルス周波数で脈動することが知られているので、それを回避する有効な対策となる。今年度は冷却系の概念設計を完了し、現在メーカーと詳細設計を詰めている段階である。[60]

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

ある種の超弦理論によれば、重力の逆二乗則は厳密には成立せず、サブミリメートル領域でそのずれを検証可能であると言われている。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

動子を使ってこの検証を行っている。これはねじれ振動子が高いQ値と低い共振周波数をもつため重力信号のS/N比を高くすることが可能だからである。具体的な測定法としてはねじれ振動子の底面にある深さ5mm程度の窪み(missing-mass)の下でアルミ円盤に12回対称に穴を開けたもの(attractor)をモーターで回転させ、ねじれ振動子に働くトルクを測定することによって重力を測定する。

2010年度はこのための予備実験として制作したねじれ振動子の感度評価、変調重力場を発生させるモーターの周波数制御を中心に行った。感度評価ではねじれ振動子の感度が $1 \times 10^{-15} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ で、室温のブラウン運動を十分に測定できる感度であることが確認でき、数値計算で得られた重力信号の大きさに対して十分な感度をもっていることが確認できた。モーターの周波数制御ではPLL制御を用いて、モーターの回転周波数の揺らぎを0.1%に抑えることに成功した。

今後はねじれ振動子による重力信号の測定および本格的な重力の逆二乗則の検証を行っていく予定である。[36, 52]

分子の分光による重力法則検証実験

Newtonによって示された重力逆二乗則の検証は、階層性問題の解決への道筋を含む興味深いテーマである。我々は京都大学の量子光学研究室と共同で、Yb₂分子の分光を用いてnmスケールの重力逆二乗則を検証する研究に取り組んでいる。

分子間ポテンシャルの測定には二光子光会合という技術を用いている。解離極限付近での分子の束縛エネルギーはおよそ100MHz程度であるが、これに等しい周波数差を持つ2本のレーザーを原子集団に照射することで原子集団から分子が生成されることを利用している。ここで重要なのは2本の光の周波数差であり、周波数の絶対値はそれほど問題とならない。100MHz程度の周波数差はGPSにロックされたシンセサイザとAOMを用いれば7桁程度の精度で実現することができ、本研究に必要とされる高精度のエネルギー測定を可能にしている。また、本研究においては10nK程度に冷却された原子集団が必要とされるが、これも光磁気トラップや蒸発冷却法を用いた冷却により達成されている。

現状では、既に京都大学の装置を用いたデータの測定を終え、補正項 α の解析を開始している。[44]

<受賞>

- [1] 正田亜八香 : Best Student Poster Award at the Gravitational-wave Physics and Astronomy Workshop (University of Wisconsin-Milwaukee, Jan. 26, 2011).

<報文>

(原著論文)

- [2] Seiji Kawamura, Masaki Ando, Naoki Seto, Shuichi Sato, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono *et al.*,

- and the DECIGO working group: The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO, *Class. Quantum Grav.* 28 (2011) 094011.
- [3] J. Abadie, et al., Search for gravitational waves associated with the August 2006 timing glitch of the Vela pulsar, *Physical Review D*, 83, 042001, 2011.
 - [4] 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.* (2011) (in press).
 - [5] Wataru Kokuyama, Kenji Numata, and Jordan Camp: Simple iodine reference at 1064 nm for absolute laser frequency determination in space applications, *Applied Optics*, 49, 6264-6267 (2010).
 - [6] K. Ishidoshiro, M. Ando, A. Takamori, K. Okada, K. Tsubono: Gravitational-wave detector realized by a superconductor, *Physica C* **470** (2010) 1841-1844.
 - [7] Masaki Ando, Koji Ishidoshiro, Kazuhiro Yamamoto, Kent Yagi, Wataru Kokuyama, Kimio Tsubono, and Akiteru Takamori: Torsion-Bar Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observations, *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 161101.
 - [8] J. Abadie, et al., Calibration of the LIGO gravitational wave detectors in the fifth science run *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A*, 624, 223, 2010.
 - [9] M. Ando, S. Kawamura, N. Seto, et al., DECIGO and DECIGO pathfinder Classical and Quantum Gravity, 27 084010, 2010.
 - [10] J. Abadie, et al., First search for gravitational waves from the youngest known neutron star *Astrophysical Journal*, 722 1504, 2010.
 - [11] J. Abadie, et al., Predictions for the rates of compact binary coalescences observable by ground-based gravitational-wave detectors *Classical and Quantum Gravity*, 27 173001, 2010.
 - [12] . Abadie, et al., All-sky search for gravitational-wave bursts in the first joint LIGO-GEO-Virgo run *Physical Review D*, 81 102001, 2010.
 - [13] B. Abbott, et al., Search for gravitational-wave bursts associated with gamma-ray bursts using data from ligo science run 5 and virgo science run 1 *Astrophysical Journal*, 715 1438, 2010.
 - [14] J. Abadie, et al., Search for gravitational-wave inspiral signals associated with short gamma-ray bursts during ligo's fifth and virgo's first science run *Astrophysical Journal*, 715 1453, 2010.
 - [15] B. Abbott, et al., Searches for gravitational waves from known pulsars with science run 5 LIGO data *Astrophysical Journal*, 713 671, 2010.
- (国内雑誌)
- [16] 安東正樹、穀山涉、坪野公夫:はじめての宇宙実験—超小型重力波検出器SWIM $\mu\nu$ 、*日本物理学会誌* **65-12** (2010) 987-990.
 - [17] 坪野公夫: 理学の匠「重力波の計測」、*理学系研究科・理学部ニュース* **42-2** (2010) 10.
- (学位論文)
- [18] 松本伸之: 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、修士論文、2011年。
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [19] Yoichi Aso, Measuring Coating Thermal Noise with Cryogenic Sapphire Cavities, 2010 Gravitational Wave Advanced Detector Workshop, Kyoto, May 2010.
 - [20] Yuta Michimura, Yoichi Aso, Koji Ishidoshiro, Shuichi Sato, Masaki Ando, Akitoshi Ueda, Seiji Kawamura, Kimio Tsubono: *Development of the interferometer module for DECIGO Pathfinder*, The 8th International LISA Symposium (July 2010, California, USA).
 - [21] A. Shoda, Y. Michimura, W. Kokuyama, Y. Aso, K. Tsubono, M. Ando, A. Araya, S. Sato, Sensitivity Estimates for the Observation of the Earth's gravity field by DECIGO Pathfinder, 8th LISA Symposium (June 28, 2010, Stanford University).
 - [22] Wataru Kokuyama, Masaki Ando, Takeshi Takashima, et al.: In-orbit operation of a compact torsion-bar gravitational wave detector: SWIM $\mu\nu$, 8th International LISA Symposium (June 28, 2010, Stanford University).
 - [23] Wataru Kokuyama, Kenji Numata, and Jordan Camp: Simple Iodine Wavemeter for LISA, 8th International LISA Symposium (June 28, 2010, Stanford University).
 - [24] A Shoda, K Okada, K Ishidoshiro, M Ando, Y Aso, K Tsubono, Search for a Stochastic Gravitational Wave Background with Torsion-bar Antenna, *Gravitational-wave Physics and Astronomy Workshop*, (January 26th, 2011, University of Wisconsin-Milwaukee).
- (国内会議)
- 一般講演
- [25] 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, 上田暁俊, 川村静児, 坪野公夫: DECIGO Pathfinder 向けプロトタイプ干渉計実験, 第 11 回宇宙科学シンポジウム (2011 年 1 月, 宇宙科学研究所本部).

- [26] 谷山涉, 正田亜八香, 安東正樹, 麻生洋一, 坪野公夫 DECIGO Pathfinder で実現実証される技術の応用 –惑星重力場観測衛星– 第 11 回宇宙科学シンポジウム (2011 年 1 月 5 日, JAXA/ISAS).
- [27] 谷山涉, 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, 苫山圭以子, 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, 若林野花: SDS-1/SWIM 搭載超小型重力波検出器の運用とデータ解析, 第 11 回宇宙科学シンポジウム (2011 年 1 月 5 日, JAXA/ISAS).
- [28] 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, 上田暁俊, 川村静児, 坪野公夫: DECIGO Pathfinder 向けプロトタイプ干渉計実験, 第 1 回小型科学衛星シンポジウム (2011 年 3 月, 宇宙科学研究所本部).
- [29] 谷山涉, 正田亜八香, 安東正樹, 麻生洋一, 坪野公夫 DECIGO Pathfinder で実現実証される技術の応用 –惑星重力場観測衛星–, 第 1 回小型科学衛星シンポジウム (2011 年 3 月 1 日, JAXA/ISAS).
- [30] 谷山涉, 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, 苫山圭以子, 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, 若林野花: SDS-1/SWIM 搭載超小型重力波検出器の運用とデータ解析, 第 1 回小型科学衛星シンポジウム (2011 年 3 月 1 日, JAXA/ISAS).
- [31] 正田亜八香、新谷昌人、道村雄太、麻生洋一、安東正樹、谷山涉、坪野公夫、佐藤修一、DECIGO pathfinder における地球重力場測定の感度評価、宇宙科学シンポジウム (2011 年 1 月 5 日、宇宙科学研究所本部) .
- [32] 正田亜八香、新谷昌人、道村雄太、麻生洋一、安東正樹、谷山涉、坪野公夫、佐藤修一、DECIGO pathfinder における地球重力場測定の感度評価、小型衛星衛星シンポジウム (2011 年 3 月 1 日、宇宙科学研究所本部) .
- [33] 坪野公夫, 波多野智, 池上健, 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, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [34] 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 IV , 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [35] 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 II , 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [36] 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 II , 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [37] 川村静児, 安東正樹, 濑戸直樹, 佐藤修一, 中村卓史, 坪野公夫, 船木一幸, 横山順一, 神田展行, 田中貴浩, 沼田健司, 高島健, 井岡邦仁, 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, 市來淨與, 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, 大渕喜之, 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, 洪峰雷, 郡和範, 谷山涉, 苫山圭以子, 古在由秀, 小鳩康史, 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, 謙訪雄大, 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, 内藤勲夫, 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, 中山宣典, 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, 斎田涉, 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 (30) : 設計・計画, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [38] 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, 江尻悠美子, 鈴木理恵子, 横藤里奈, 大渕喜之, 岡田則夫, 正田亜八香, 道村唯太, 坪野公夫, 谷山涉, 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 (2) , 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [39] 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, 上田暁俊, 川村静児,, 坪野公夫, DECIGO Pathfinder 向けプロトタイプ干渉計実験 III , 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [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 II , 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [41] 谷山涉, 安東正樹, 高島健, 森脇成典, 石徹白晃治, 高橋走, 新谷昌人, 麻生洋一, 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, 苫山圭以子, 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ホーム (SWIM) を用いた超小型重力波検出器の開発 X (データ解析) , 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [42] 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 辰巳大輔, 山本博章, 安東正樹, 山元一広, 新井宏二, 我妻一博, 西田恵里奈, LCGT Collaboration, LCGT の干渉計制御, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [43] 大石奈緒子, 宮川治, 麻生洋一, 和泉究, 三代木伸二, 斎藤陽紀, 道村唯太, LCGT Collaboration, LCGT デジタルシステムの構築 (I) , 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .

- [44] 高橋走, 山田裕貴, 菊地悠, 高須洋介, 榎本勝成, 安東正樹, 高橋義朗, イッタルビウム原子の光会合分光による重力逆二乗則の検証実験, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月) .
- [45] 川村静児, 安東正樹, 濑戸直樹, 佐藤修一, 船木一幸, 中村卓史, 坪野公夫, 横山順一, 沼田健司, 神田展行, 高島健, 田中貴浩, 井岡邦仁, 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, 市來淳與, 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, 大渕喜之, 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, 小泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山涉, 苔山圭以子, 古在由秀, 小鳩康史, 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, 辻川信二, 常定芳基, 豊嶋守生, 鳥居泰男, 内藤勲夫, 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, 斎田渉, 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, 菅泰志, 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, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (27) : 設計・計画, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [46] 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, 江尻悠美子, 鈴木理恵子, 権藤里奈, 大渕喜之, 岡田則夫, 正田亜八香, 道村唯太, 坪野公夫, 穀山涉, 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 (1), 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [47] 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, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [48] 道村唯太, 麻生洋一, 石徹白晃治, 佐藤修一, 安東正樹, 上田暁俊, 川村静児, 坪野公夫, DECIGO Pathfinder 向けプロトタイプ干渉計実験 II, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [49] 梶田隆章, 黒田和明, 中谷一郎, 大橋正健, 藤本眞克, 川村静児, 齋藤芳男, 鈴木敏一, 坪野公夫, 三尾典克, 神田展行, 中村卓史, 安東正樹, その他 LCGT Collaboration Members, 大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) 計画 XIII, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [50] 正田亜八香, 岡田健志, 穀山涉, 安東正樹, 石徹白晃治, 西澤篤志, 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, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [51] 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 III, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [52] 柴田和憲, 牛場崇文, 大塚茂巳, 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, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [53] 麻生洋一, 穀山涉, 坪野公夫, 高本将男, 香取秀俊, 低温サファイア共振器を用いた超高温安定レーザーの開発 II, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [54] 穀山涉, 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ホーム (SWIM) を用いた超小型重力波検出器の開発 IX (軌道上運用 2), 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [55] 阿久津智忠, 安東正樹, 川村静児, 佐藤修一, 麻生洋一, 上田暁俊, 新谷昌人, 道村唯太, 穀山涉, 江尻悠美子, 鈴木理恵子, 鳥居泰男, DECIGO pathfinder の信号処理系の開発, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [56] 宮川治, 麻生洋一, Stefan Ballmer,, 辰巳大輔, 斎藤陽紀, 大石奈緒子, 三代木伸二, CLIO Collaboration, 低温レーザー干渉計 CLIO(30) デジタル制御 (IV), 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州) .
- [57] 坪野公夫, 重力波で宇宙を見る—検出実験の現状—、理学部オープンキャンパス 2010 講演会 (2010 年 8 月, 理学部 1 号館、東大).

招待講演

- [58] 麻生洋一, The LCGT Collaboration, 超高感度重力波検出器のための光学設計と制御第 58 回応用物理学学会学術講演会, シンポジウム「ついに始まった重力波観測用巨大干渉計の建設」.
- [59] 坪野公夫, 重力波をとらえる、河合塾エンリッチ講座 (セミナー) (2010 年 10 月, 河合塾本郷校、東京).
- [60] 麻生洋一, 低温光共振器を用いた超高温安定レーザー, 先端的極低温冷却技術調査研究会, 高エネルギー加速器研究機構, 2011/3/11.

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。非平衡系の研究は大きく分けて、熱ゆらぎが無視できるようなマクロな非平衡系と熱ゆらぎと非平衡ゆらぎが競合するようなミクロな非平衡系の研究に分けることができる。マクロな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おり、これらは一般に自己組織化現象と呼ばれている。平衡から遠く離れた系における自己組織化現象の普遍的性質を明らかにすることが第一の大きな課題である。一方で、近年の1分子計測技術やナノテクノロジーの発展は、非平衡統計力学に急速な変革をもたらしつつある。そこでは例えば、平衡近傍で成り立つ法則である揺動散逸定理がどのように破れるのか、破れ方の形式が問題となる。このように非平衡統計力学の源流につながるミクロ非平衡系の分野でも最近大きな進展があり、新たな法則の探究や検証を行うことが第二の大きな課題である。

非平衡状態において自発的にパターンや乱れが生じる自己組織化現象は、流体現象などにおいてその存在が知られていた。しかし、力学系の分岐理論や相空間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な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、固体力学、粉体、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。以上に加えてごく最近では、平衡から遠く離れた系に対する統計力学に関する著しい進展が見られ、非平衡系における揺らぎの性質についての理解が飛躍的に進みつつある。こうした研究の行く先に、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。したがって研究の戦略としては、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。

6.4.1 非線形非平衡系の物理

液晶電気対流の乱流界面成長における普遍揺らぎ

臨界現象に代表されるスケール不变な物理系の示す普遍挙動は、平衡系に関してはその強力な普遍性が豊かな理論構造とともに深く理解されている。非平衡系において同種の普遍性が如何に現れるかを整理し、理解することは、非平衡統計力学の可能性を探る上で重要な礎となる。

スケール不变な非平衡現象の代表例として挙げられるのが揺らぎを伴う界面成長であり、実験・理論ともに様々な系で確認されている。理論的にはそれらが Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) クラスと呼ばれる普遍挙動を示すことがよく知られており、近年の進展により揺らぎ分布や相関が厳密に予言されている一方で、実験的には普遍スケーリングの検証すら困難な状況が続いている。そこで当研究室では、界面成長の普遍性の精密かつ包括的な検証を目的とし、液晶電気対流で見られる乱流界面成長の実験を行った。

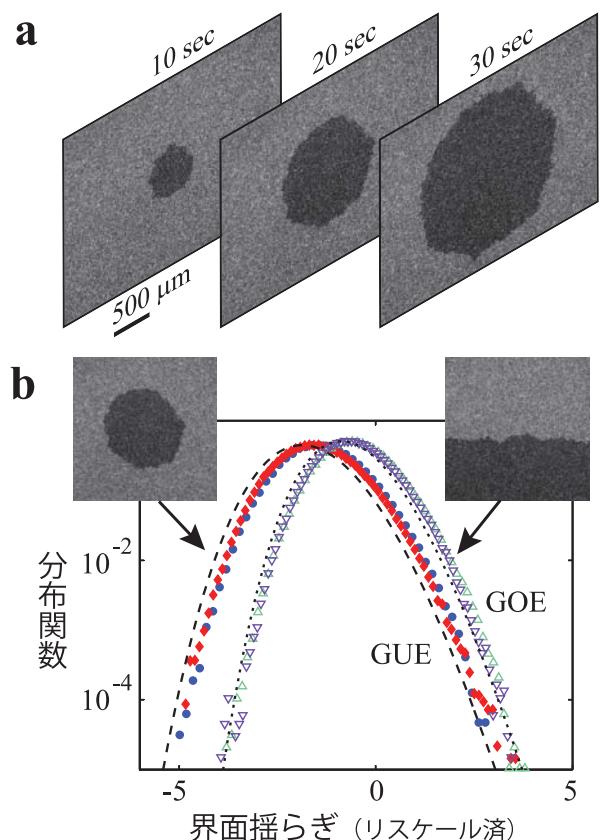


図 6.4.20: (a) 成長する DSM2 クラスター。(b) 円形界面および平面界面の揺らぎ分布。それぞれ、GUE および GOE ランダム行列の最大固有値分布 (Tracy-Widom 分布) と一致する。

ネマチック液晶に高い交流電圧を印加すると DSM2 と呼ばれる位相欠陥乱流が生じるが、この際電圧が高いと DSM2 ドメインは成長し（図 6.4.20a）、その界面はスケール不变な roughening を示す。我々は界面成長をトリガーする DSM2 核をレーザーで作りだす技術を開発し、円形界面と平面界面の 2 種類に対して、界面揺らぎの統計を詳細に解析した。結果、DSM2 界面は KPZ クラスの普遍指数を明確に示しただけでなく、可解モデルで予言されていた揺らぎ分布と相關関数の普遍性も疑いの余地なく実証した（図 6.4.20b）。現れた普遍分布はランダム行列理論と密接な関係を持つだけでなく、円形界面か平面界面かというジオメトリに依存する特異な性質を持ち（図 6.4.20b）、初めての定量的実験証拠が与えられたことの意義は大きい [1, 12, 13, 36, 67]。

液晶のトポロジカル欠陥渦

近年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は、構成方程式が古典流体よりもシンプルであることから、特に乱流の雛形として非平衡統計力学の観点からも注目される。しかし古典系に比べてあまりに理想的で、有限レイノルズ数の粘性流体を記述できるのかは疑問である。

我々は、離散化されたトポロジカル欠陥が粘性流体中に存在する液晶系に着目し、細線振動による欠陥生成と乱流転移の測定にとりくんだ [17, 23, 44, 52, 56]。これにより、液晶中において、流れとの相互作用によって配向場が乱され、欠陥が生成、伸張し、衝突、組換をおこなう過程が明確に観察できた（図 6.4.21）。欠陥生成の機構を解明するうえでは、量子系では困難な実空間での直接観察ができる系は重要であり、今回古典系において現実的な実験を構築することに成功したことは、液晶系のみならず量子系も含めて、欠陥乱流を統一的に理解する一助となることが期待される。

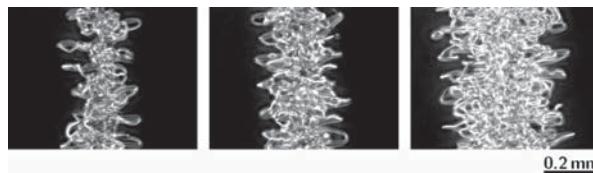


図 6.4.21: 振動細線の周囲で展開する液晶欠陥渦糸

流体における非平衡現象：熱対流および沸騰現象

極めて高いレーリー数の熱対流を実現できる熱対流の実験装置とその測定方法の開発は、乱流理論の進展にとって重要である。本研究室ではこれまで低プランタル数流体である液体金属を用いてレーリー数、レイノルズ数とも高い熱乱流状態を作り出し、外部から非接触非侵襲で速度場を計測する超音波計測の

手法を開発してきた。その中で、流体中の 2 次元速度場を測定する方法として、超音波トランスデューサーを z 軸方向にスキャンしながら、長手方向の速度プロファイルを瞬時に計測することで、乱流中の巨視的な秩序構造や、エネルギースペクトラムを計測することに成功した [10]。

このように、熱対流系に関する研究はこれまで、気体あるいは液体など単一相の状態を用いて行われたものが殆どであり、気体と液体が共存している系の研究は極めて少ない。

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。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 [39]。今回得られた結果として、沸騰に由来する圧力および温度の変動は沸騰の共同的な振る舞いの有無によって著しく変化することが分かった。

時系列データより、温度と圧力が振動していることが分かる（図 6.4.22 (b)）。これは単一の沸騰（気泡の発生）が周期的に生じることに由来する。一方で周期的な沸騰とは異なった大きな変動が生じている領域がある（図 6.4.22 (a)）。この変動は沸騰が共同的に発生したことにより生じたものと考えられる。共同的な沸騰とは単一の沸騰が次の沸騰を誘起することで連続的に沸騰が発生している状態を指す。その結果、単一の沸騰と比べてより多くの熱が奪われることで温度が大きく減少する。このような共同現象は間欠的に発生し、それに伴った圧力と温度の振動が測定された [24]。沸騰の共同性についてはすでに報告されているが、本研究のように物質的に閉じた系で、温度だけではなく圧力の変動も測定したという例は見られない。

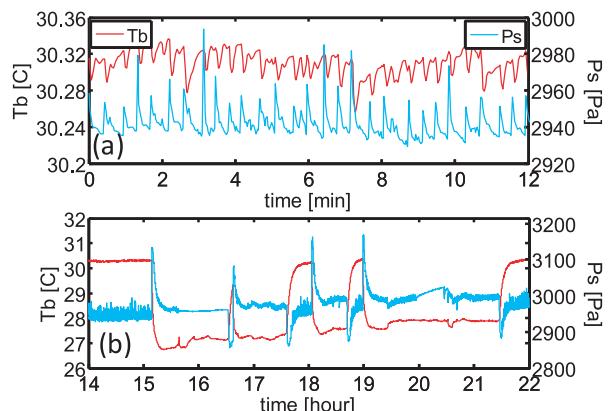


図 6.4.22: 加熱面温度 (Tb) と内部圧力 (Ps) の変動。
(a) 周期的な沸騰。Ps のスパイク的な上昇が 1 回の沸騰に対応する。(b) 間欠的に Tb が大きく減少している。それに伴い圧力は一時的に増大するが、後に指数的に減衰する。その後の値は大規模な変動以前と比べて大きな変化は見られない。

濃厚懸濁液の界面不安定性とパターンダイナミクス

流体の界面の不安定性は様々な研究がされており、ソリトンやオシロンなどの孤立パターンの研究も多く行われている。一方で、孤立パターンの研究という観点に立つと、反応拡散系や生物物理における分裂するパターンや変形しながら動き回るパターンの研究が近年注目を集めている。しかし、これらの孤立パターンは流体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 χ 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(図 6.4.23(a))。また、分裂する穴は十分に加振強度が大きいと時空カオスを示す事が分かった。分裂する穴の時空カオスに対し確率的な解析を行った結果、本来全く異なる系である反応拡散系における分裂するパターンの結果と類似していることが分かった。これより分裂するパターンの時空カオスが持つ普遍性が示唆されている [15, 16, 73]。同様の孤立パターンとして、先立って F.Merkel らにより安定な穴が発見されていたが、分裂する穴との関連性は分かっていなかった。そこで加振周波数・充填率を変え実験を行ったところ、安定な穴から分裂する穴へと亜臨界的に分岐することを見た [22, 42, 70]。これらの実験結果を踏まえ、我々は穴の変形と運動のモデルを対称性の議論から導いた。このモデルでは亜臨界ピッチフォーク分岐が起り、間欠的な変形、変形と運動の方向がそろう性質、ジグザグ運動など、実験で得られた特徴的な性質を再現できることが分かった(図 6.4.23(b), [76])。次に我々は J.M.Schleier-Smith らにより垂直加振下の懸濁液で発見された大きな盛り上がり(heap)のモデルを流体の方程式から導いた。このモデルでは懸濁液が容器との間でスリップをし、スリップが起こる臨界応力が加振と共に振動しているという仮定と薄膜近似を使っている [57, 74]。モデルの解析の結果、不安定性の種類、臨界加振強度、対流状の流れ、ヒステリシスなどの実験結果が良く説明できることが分かった。以上のように、濃厚懸濁液におけるパターンの発生・分岐から乱流化までを実験的・理論的に研究している。

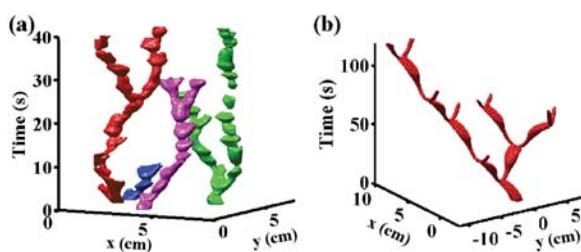


図 6.4.23: (a) 分裂する穴の時空間プロット。充填率 33%、周波数 100Hz、加振強度 153m/s^2 (b) 分裂する穴のモデルの計算結果の時空間プロット

情報熱力学： 情報量を含む非平衡関係式とその検証

古くはマックスウェルの悪魔から、系の情報を利用することで仕事を取り出せるという熱力学第二法則に一見矛盾する問題が、現在にいたるまで広く研究してきた。実際には系の相空間の情報を得てフィードバック制御を行うことで、制御系と系の二つが強く結びつき、熱力学第二法則に反することなく系と熱浴二つのエントロピー生成を負にすることが可能である。最近このエントロピー生成を負にできる量の下限が、フィードバックの際に系から実効的に得られた情報量である相互情報量によって決定されることが明らかになった。

我々は、中央大学の鳥谷部祥一氏、宗行英朗氏と共に、シラード型のマックスウェル悪魔に対応する実験系を実現し、情報と熱力学をつなぐ基本的関係式が成立していることを実証した。実験は、片側がガラス基板上の 1 点で接地し、点の周りで回転可能な直径約 300 nm のポリスチレン粒子対からなし、対向するガラス基板上に 4 つの電極があり、印加する電圧を制御することで粒子対に螺旋階段状のポテンシャル（トルクと周期ポテンシャルの和）を与えることができる。粒子対はブラウン運動を行い、階段の 1 ステップは、 $3k_B T$ の高さであるため、粒子はトルクによって平均的には階段を下るが、時折は熱ゆらぎによって階段を登る。このゆらぎを高速度カメラで観測し、粒子が階段を登った場合は、ポテンシャルを切り替えて階段を下るのをふせぎ、それ以外の場合は何もしないという操作を繰り返すことで、粒子をポテンシャルの勾配に逆らって階段を登らせることができた。ポテンシャルの切り替えによって粒子にした仕事を測定でき、これらを差し引いても粒子はトルクに逆らって回転し、外部に仕事をしたことを定量的に確認した。この実験における情報から自由エネルギーへの変換効率は最大で 28 % であった。さらに、逆操作を行う実験から一般化 Jarzynski 等式を初めて検証することに成功した [3]。

また、我々は情報熱力学の前提が成り立つホワイトガウスノイズを持つ 1 次元 Langevin 系を用いて、各物理量と相互情報量の関係を研究した。

まず Langevin 系では、Harada-Sasa 等式と呼ばれる熱浴への熱散逸量は揺動散逸定理の破れで表せるという式が存在するが、我々はこの式のフィードバック制御下での表式の導出に成功した。ここからフィードバック制御のある Langevin 系での、揺動散逸定理の破れに対する相互情報量による制限式を導出した。これに関連して測定誤差を含んだフィードバックのある Langevin 系のモデルを作成し、測定誤差がガウス型の場合と離散的な場合で、系のパラメータに依らず相互情報量による制限が成り立つことを解析的に示した。このモデルによると、測定誤差のシグナルノイズ比 (SN 比) が小さい、つまり誤差が大きく相互情報量が小さいときに、よりエントロピー的な制限が効いてくるという結果が得られた。またこの Harada-Sasa 等式による拡張から、定常的な制御によって達成される有効温度の情報量的な下限を議論することが可能であり、我々は質量と摩擦係数で定義される緩和時間内にどれだけの相互情報量を得たかで、有効温度のエントロピー的な下限が

決まるという表式を発見した [49, 27, 59]。

自律系の自由エネルギー伝達効率

微小系の熱力学の枠組みでは近年、マクロ系による外場の切り替えにより、ミクロな粒子などの系に対して熱力学的な仕事／測定＋フィードバック操作を施す実験や、こうした設定での熱力学関係式／第二法則を議論する理論的な研究が盛んである。それに対して、生体内で進む反応は、そのような外部系による操作など存在しない、自律的な環境で起こっている。通常の熱力学で想定される、予め決められた操作をゆらぎ無しに行うマクロな操作と比べて、生体分子などは、ゆらぎの支配的な世界で自発的に操作を進める機能を備えているという点で、大きく異なっている。

こうした自律的な反応進行を条件とした自由エネルギー伝達の効率は、マクロな操作を仮定した理想極限に比べ、低くなることが予想される。細胞内などでの小さいスケールでの自由エネルギーのやりとりが、低い効率に縛られているとすれば、生体分子ネットワークなどのダイナミカルな挙動にも影響している可能性がある。自律的に働く分子機械の設計に向けても、外的の操作を想定しない場合の自由エネルギーコストは、重要な問題となりうる。

本研究では、自律型の自由エネルギー伝達として、化学共役系による非平衡度の受け渡しを議論した。近年の熱力学への情報理論的なアプローチにも関連し、伝達効率 σ_f の上限が、第二法則による限界 1 よりも優位に小さい値により抑えられるという式、

$$\sigma_f \leq \frac{D(q||p)}{D(q||p) + D(p||q)} \leq 1, \quad (4.1.1)$$

を導き、その意義を定量的に調べた。[9, 50, 28]。

6.4.2 非平衡ソフトマターの物理

Experimental verification of self-thermophoresis

Self-propulsion is the motion of an object in a particular direction by consuming energy without external forces. It is a typical example of nonequilibrium systems, which have recently been developing but are still not well understood as equilibrium systems. Recent studies suggest that once the energy consumption of an object can be used to create its local gradient, a new kind of self-propulsion, so called self-phoretic motion, can be realized. However, the relation between phoretic motion and self-phoretic motion is not clear due to lack of experimental verifications.

Our work for answering these questions is to create a Janus particles comprised of half-coated by gold as an energy consumer to create a local temperature gradient. We experimentally showed that

the Janus particle is able to move under isotropic laser illumination. The particle has an intrinsic direction, namely polarity, and accordingly creates a local temperature gradient. The mechanism is similar to thermophoresis but the temperature gradient is not externally applied. Such so-called self-thermophoretic motion has only been predicted theoretically, while there are no experimental evidences. My results provide supporting evidence for motions caused by self-phoretic mechanism, indeed sharing the same properties with its corresponding phoretic motion. Such an experimental verification between phoretic motion and self-phoretic motion is lacking in the present studies of self-phoretic motions [4, 19, 75].

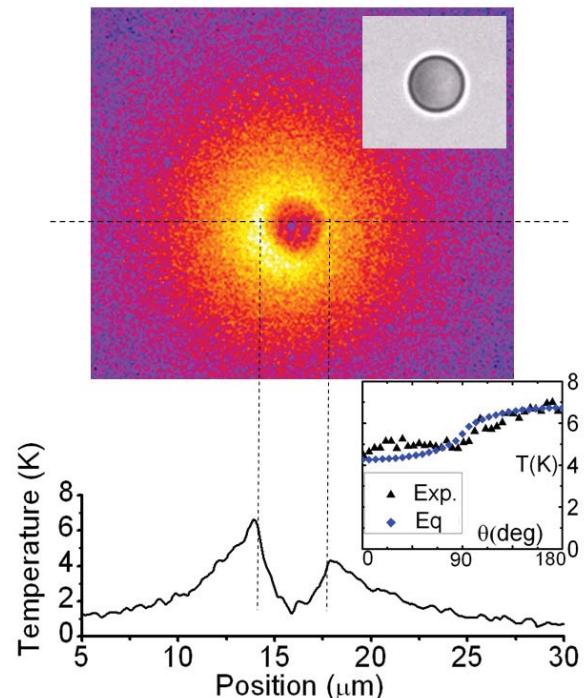


図 6.4.24: Self-thermophoresis of optical Janus particle, temperature distribution: experiment and theory.

自己駆動する非対称粒子の運動と相互作用

コロイド粒子のブラウン運動がどのように自己駆動運動に変化するかを調べることは、非平衡統計力学の問題として興味深い。実際ここ十年ほどで、いろいろなサイズや形状、非対称性をもつ粒子を生成する技術が大いに発展したため、多種多様な自己駆動粒子を作ることができるようになった。そのため、自己駆動運動の詳細を理解するにあたって、ミクロな系におけるさまざまな実験的研究が行われてきた。

しかし、これらの実験においては、得られる粒子の運動の情報が制限されるという問題点があった。

本実験で用いた非対称なコロイド粒子 (Janus 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。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。そのため、運動が制限されることなく、その上運動の情報も失わないような実験系を得ることができた。また、粒子速度は電場の二乗に比例し、溶液の塩濃度に依存することもわかった。これらの粒子は周りの粒子と相互作用しながらさまざまな興味深い振る舞いを見せる。粒子間の相互作用を理解することを目的として、上記のような 2 次元系で数ミクロンの非対称粒子を用いて実験を行った。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、周波数を変えることにより、粒子の運動方向及び粒子間相互作用の変化が見られた。周波数を上げることにより、駆動方向が逆転することに加えて、粒子同士が結合してチェーンを形成することがわかった。

さらに、粒子が自己駆動する際に受ける力を測定する目的として、回転する Janus 粒子 (図 1 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る。実際、Janus 粒子が受ける力は電場に依存することがわかった (図 1)。また、FT から得られた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を用いて力のオーダーを推定した。ストークスの式に、壁に近い場合の補正を入れることにより、両結果が一致した (図 1) [20, 25, 43, 48, 53]。

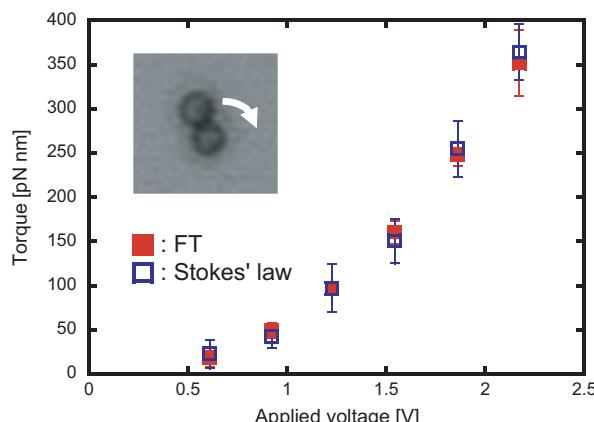


図 6.4.25: ゆらぎの定理 (FT) を用いて測定したトルクとストークスの式により推定したトルクとの比較。Inset : 回転する Janus 粒子。

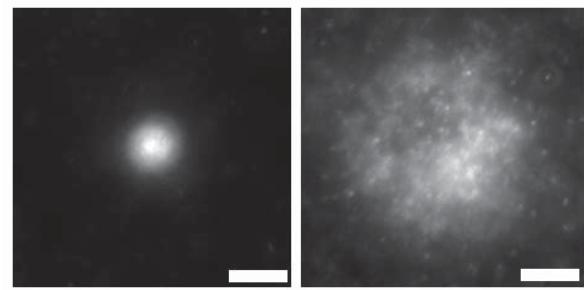


図 6.4.26: 蛍光コロイド粒子の蛍光顕微鏡画像。高分子として Ficoll を加えた場合 (左図) では、PEG を加えた場合 (右図) に比べてコロイド粒子がより強く中心に集まっている。スケールバーは 10 μm。

非平衡状態でのエントロピーカと新しいマイクロマニピュレーション法

温度の異なる系を接触させると、熱が高温側から低温側へ流れる。この事実は平衡熱力学によって説明されるが、線形非平衡熱力学の枠組みによれば、温度勾配は熱だけではなく他の熱力学変数の流れを生じさせ得る。そのひとつの例が、温度勾配によって粒子の流れが生じる Soret 効果であり、多成分流体やコロイド溶液を対象として多くの実験がなされてきた。

これまで当研究室では、高分子とそれよりもサイズの大きいコロイド粒子を混合した系に温度勾配をかけると、通常のソーレ効果と異なり、多くのコロイド粒子は元来のソーレ効果による移動方向によらず、高温側に泳動し、その泳動力が温度勾配と高分子濃度で制御できることを発見した。レーザーにより、局所的な温度勾配を形成すると、光だけでコロイド粒子の集積や移動を制御できる新たなマイクロマニピュレーション法として期待されている。この効果の原因として、我々は、平衡状態におけるエントロピーカである枯渇効果が粒子の周りに流体の流れを誘起し、反作用としてコロイド粒子が温度勾配に逆らって輸送される現象として説明することに成功した [31, 32, 34]。その原因を非平衡枯渇効果として平易に日本語で説明した [11]。

また最近、この現象の理論に基づいて、他の中性高分子でも同じ現象が見られると予想して、赤外線レーザーによってコロイド溶液を局所的に加熱する実験を行った。そして、高分子として Ficoll と呼ばれるスクロースの共重合体を用いたときに、PEG の場合とくらべてコロイド粒子が非常に強く高温部に集合する (図 6.4.26) ことを見いだした。

また、この現象の本質的な因子であると考えられている高分子自体の Soret 効果についての測定も行い、溶液中で Ficoll は PEG とは逆方向の Soret 効果を示すという実験結果を得た。この結果は、Ficoll 溶液中のコロイド粒子の Soret 効果は PEG の場合と似ているように見えるが、実際には異なる物理的メ

カニズムが働いていることを示唆している [26, 58]。

微小な物理系に対するパラメータ推定論

タンパク質のダイナミクスの研究では、アミノ酸の数と同程度の膨大な自由度を考慮するのが一般的だ。しかし、最近の1分子実験や分子シミュレーションの結果を統合すると、少なくともモーターランパク質など比較的大きな構造変化をするタンパク質は、その大域的で遅いダイナミクスは高々2～3程度の自由度で粗視化できることがわかつてきた。このような実験結果をふまえて、タンパク質のダイナミクスを低次元のLangevin系でモデル化する試みがされている。しかしタンパク質1分子の動きは直接観察出来ない。リンカーを介して結合されたプローブ粒子の動きから、タンパク質の動きや粗視化モデルの物性パラメータを推定する枠組みが必要となる。

前年度に引き続き、この問題に対してベイズ推定の枠組みで取り組み、隠れた自由度を持つ微小系に対するパラメータ推定法を構築した。Lanveginモデルで数値実験を行い、その有効性を確認した。一方で内部自由度の緩和時間よりもプローブの緩和時間が長くなるとき、推定結果が急激に不安定になる一種の相転移を初めて見出した。パラメータ推定が容易な領域では、観測時間に比例して推定誤差が減少していくことが確かめられ、我々の理論と一致する結果を得た [7, 21, 37, 38, 47, 62, 64, 68, 69, 72]。モデルパラメータが決まれば、経路確率の隠れた自由度に関する最大化で、隠れた自由度の最尤軌道も求めることができる。しかし、準安定状態が多数あるポテンシャルを含むLangevin系の場合、通常の緩和法では最尤軌道の計算コストが膨大になることが分かった。そこで、摂動展開を用いて最尤軌道の近似解を逐次的に構成する手法を考案した（往復法）。1分子実験の粗視化モデルで数値実験を行い、緩和法に比べて3桁以上速く解が収束することを確認した（図6.4.27）。さらに、初期条件と境界条件の選択によらず、ほぼ一意で適切な解が得られるることを示した。[8, 40, 51, 62, 64, 68, 72]

6.4.3 生命現象の物理

自己駆動界面のダイナミクスの記述

真核生細胞は複雑な形態変化を起こしながらその重心移動を行っており、その運動様式は細胞運動と呼ばれている（図6.4.28(a)）。このような運動は、アクティブマターと呼ばれる自立系の例として、近年物理的視点からも盛んに研究されている。本研究では細胞運動を念頭に置きつつ、やわらかいアクティブマターの普遍的記述を試みた。

本研究では、Browerらによって提唱された幾何モデルを自己駆動ソフトマターに応用した [2, 29, 18, 54]。幾何モデルとは、界面の局所的性質によってのみ界面の運動が生成するとしたモデルである。すなわち我々は、ソフトマターの運動がその内部からの

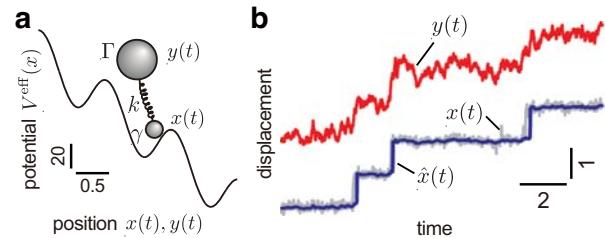


図 6.4.27: 往復法による最尤軌道の推定結果 (a) モーターランパク質の1分子実験の粗視化モデルの例。 $x(t)$ がタンパク質の自由度、 $y(t)$ がプローブの変位に対応している。このように粗視化できる具体的な実験条件は文献 [8] を参照のこと。(b) (a) の粗視化モデルで $y(t)$ [赤] しか観測できないと仮定し、往復法を使って $x(t)$ [グレー] の最尤軌道 $\hat{x}(t)$ [青] を求めた。

力によって生成されるとし、そのとき内部からかかる力がソフトマターの界面に局所的にかかると仮定するのである。ただしこれだけでは自己駆動性は記述できず、自己駆動性に非局所的効果が必要であることを提唱した。非局所的効果を摂動として界面の運動方程式に取り込み、さらに摂動展開することによってこの界面が自己駆動を始める分岐を起こすことを示した（図6.4.28(b)）。本研究で明らかになった性質は真核生細胞の細胞運動でも有効であると考えられ、今後の細胞運動の研究に有効な手段を与えることになるであろう。

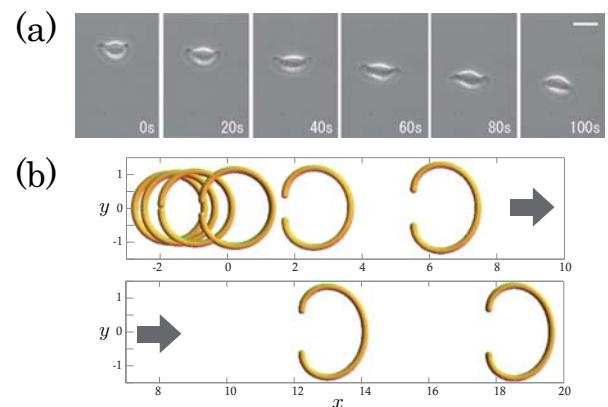


図 6.4.28: (a) ケラトサイト細胞が示す自発運動。スケールバーは $10\mu\text{m}$ 。(b) 非局所的幾何モデルによって与えられる界面のダイナミクス。

細胞運動の力学的特性の解明

細胞運動は多数の要素が協奏的に働く複雑な過程であり、その物理的な記述のためには、形・速度・力場などの細胞レベルのマクロな量の間の関係が手掛かりとなる。本研究室では、細胞が基盤に及ぼす力の測定を軸にそれらの量の間の関係を明らかにすることを目指している。

本年度は力測定の実験条件の最適化および解析プログラムの作成を行った。まず力測定の際の測定条件を画像解析の方法を含めて検討し、レーザー強度・照射時間の最適化を行った。その結果、1時間以上連続した測定が可能となったが、これは先行研究が10分程度であるのに比べて大きな進歩である。同時に計算手法を改良し、先行研究よりも高い空間解像度で力場が計算できるようになった（図6.4.29. (A)）。

さらに得られた測定結果について、多重極展開を用いた解析を行った（図6.4.29. (B-D)）。その結果、力場の空間分布と細胞の進行方向には関係があることがわかった。力場の空間分布と細胞の形のダイナミクスとの関係を明らかにすることが今後の課題である[30, 41, 45, 55, 63]。

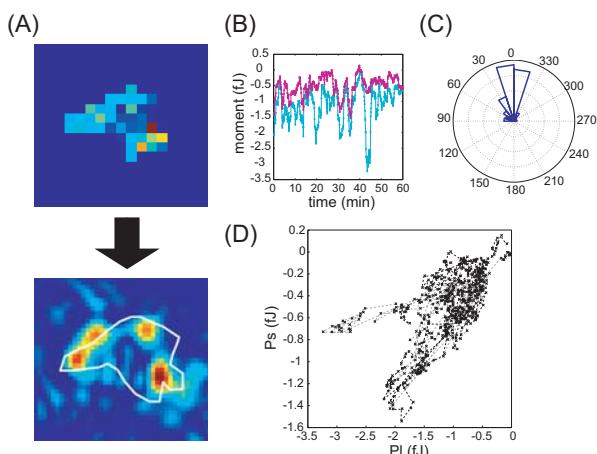


図 6.4.29: (A):力場の空間解像度の進歩。先行研究(上)に比べて高い空間解像度で力場を計算した結果、力場が強く局在化している様子がわかった。(B-D):力場のダイナミクス。力場のモーメントを計算し(B)、その主軸と進行方向との間に相関を見出した(C)。さらに固有値を軸にプロットし直すことで、2つの固有値の間に相関があることがわかる(D)。

また、細胞が置かれた柔らかいゲル中の蛍光ビーズの z 方向の変化も計測することにより、単一の細胞が発生する力の情報を4次元(x,y,z,t)計測した。その結果明らかになったこととして、細胞は水平方向と同じ程度の垂直方向の力を発生しており、周辺でゲルを上向きに引っ張り、中心部では逆に下向きの力を出している。また、力の非対称性は運動方向と相関があることを明らかにした[5]。本研究は、Physical Review Letters (December 7, 2010) の表紙を飾った。

Letters (December 7, 2010) の表紙を飾った。

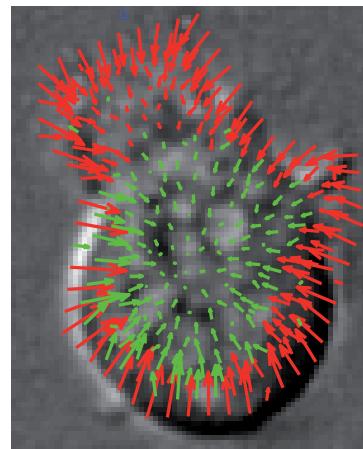


図 6.4.30: 単一細胞が発生する応力の z 方向成分

<報文>

(原著論文)

- [1] Kazumasa A. Takeuchi and Masaki Sano: Universal Fluctuations of Growing Interfaces: Evidence in Turbulent Liquid Crystals, Physical Review Letters, **104**, 230601 (2010).
- [2] Toru Hiraiwa, Miki Y. Matsuo, Takahiro Ohkuma, Takao Ohta, and Masaki Sano: Dynamics of a deformable self-propelled domain, Europhys. Lett. **91**, 20001 (2010).
- [3] Shoichi Toyabe, Takahiro Sagawa, Masahito Ueda, Eiro Muneyuki, and Masaki Sano: Experimental demonstration of information-to-energy conversion and validation of the generalized Jarzynski equality, Nature Physics, **6**, 988 (2010).
- [4] Hong-Ren Jiang, Natsuhiko Yoshinaga, Masaki Sano: Active Motion of Janus Particle by Self-thermophoresis in Defocused Laser Beam, Phys. Rev. Lett. **105**, 268302 (2010). (selected for an Editor's Suggestion and highlighted with a Viewpoint in Physics of APS.)
- [5] Helene Delanoe-Ayari, Jean-Paul Rieu, and Masaki Sano: 4D Traction Force Microscopy Reveals Asymmetric Cortical Forces in Migrating Dictyostelium Cells, Phys. Rev. Lett., **105**, 248103 (2010).
- [6] Takahiro Harada, Hisa-Aki Tanaka, Michael J. Hankins, and Istvan Z. Kiss: Optimal Waveform for the Entrainment of a Weakly Forced Oscillator, Phys. Rev. Lett. **105**, 088301 (2010).

- [7] Makito Miyazaki and Takahiro Harada: Bayesian estimation of the internal structure of proteins from single-molecule measurements, *J. Chem. Phys.*, **134**, 085108 (2011).
- [8] Makito Miyazaki and Takahiro Harada: Go-and-Back method: Effective estimation of the hidden motion of proteins from single-molecule time series, *J. Chem. Phys.*, **134**, 135104 (2011).
- [9] Kyogo Kawaguchi and Masaki Sano: Efficiency of Free Energy Transduction in Autonomous Systems, arXiv:1103.1961.
- [10] Marguerite Bienia and Masaki Sano: Non-destructive ultrasonic velocimetry for central region velocity fields in turbulent Rayleigh-Benard convection of mercury, *Flow Measurement and Instrumentation*, DOI 10.1016/j.flowmeasinst.2011.03.009, online publication, Mar-24 (2011).
- (国内雑誌)
- [11] 佐野雅己: “高分子による非平衡状態の枯渇効果”、*高分子*, **59**, 490-491 (2010).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [12] Kazumasa A. Takeuchi and Masaki Sano: Geometry-dependent universality in growing interfaces – Evidence in liquid-crystal turbulence –, StatPhysHK Complexity, Computation, Information, July 13-16, 2010, Hong Kong, China.
- [13] Kazumasa A. Takeuchi and Masaki Sano: Universal fluctuations of growing interfaces: evidence in turbulent liquid crystals, Statphys24, Jul. 19-23, 2010, Cairns, Australia.
- [14] Masaki Sano, Nonequilibrium depletion force in a temperature gradient, Statphys24, July 19-23, 2010, Cairns, Australia.
- [15] Hiroyuki Ebata and Masaki Sano: Dynamics of self-replicating holes in a vertically vibrated dense suspension, Statphys24, Cairns Australia, July 19-23, 2010.
- [16] Hiroyuki Ebata and Masaki Sano: Self replicating patterns in vertically vibrated wet granules, International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter 2010, Nara, August 17-20, 2010.
- [17] Masafumi Kuroda and Masaki Sano: Turbulence in Liquid Crystal Excited by Vibrating Wire, International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter 2010, Nara, Japan.
- [18] Miki Y. Matsuo, Hirokazu R. Tanimoto, and Masaki Sano: Anomalous motion of active deformable particle, International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter 2010, Nara, August 17-20, 2010.
- [19] Hong-Ren Jiang, Natsuhiko Yoshinaga and Masaki Sano: Active Motion of Janus Particle by Self-thermophoresis in Defocused Laser Beam, Workshop on chemi-Thermo-EM phoresis in Complex Fluid, Pohang, Korea, Aug. 24-29, 2010.
- [20] Ryo Suzuki and Masaki Sano: An experiment on collective motion of Janus particles under AC electric field, International Workshop on Statistical Physics and Biology of Collective Motion, Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Nov. 8-12, 2010.
- [21] Makito Miyazaki and Takahiro Harada: Bayesian estimation of the internal structure of proteins from single-molecule measurements, The 4th Mechanobiology Workshop and Biophysical Society Joint Meeting, November 9-12, 2010, Mechanobiology Institute Singapore, Singapore.
- [22] Hiroyuki Ebata, Miki Y. Matsuo, and Masaki Sano: Self-propelled deformable holes in vertically vibrated wet granules, Recent Progress in Physics of Dissipative Particles, Kyoto, November 24-26, 2010.
- [23] Masafumi Kuroda and Masaki Sano: Turbulence in Liquid Crystal Excited by Vibrating Wire, Korea Univ. and The Univ. of Tokyo 1st Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 21-23, 2011, Tokyo, Japan.
- [24] Yutaro Matsui and Masaki Sano: Heat Transfer Characteristics of Gas and Liquid Two-Phase Thermal Convection in the Presence of the First Order Phase Transition, Korea Univ. and The Univ. of Tokyo 1st Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 21-23, 2011, Tokyo, Japan.
- [25] Ryo Suzuki, Hong-Ren Jiang, and Masaki Sano: Self-Propelling Asymmetrical Colloids in AC Electric Field -Controllable Artificial Microswimmers, Korea Univ. and The Univ. of Tokyo 1st Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 21-23, 2011, Tokyo, Japan.
- [26] Yohei Nakayama and Masaki Sano: Laser-induced Temperature Gradient can manipulate Colloidal Particles Under A Polymer Solution, Korea University - The University of Tokyo 1st Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 21-23, 2011, Tokyo, Japan.
- [27] Sosuke Ito and Masaki Sano: A fluctuation of a colloidal particle under feedback control with error, Korea University - The University of Tokyo 1 st Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 21-23, 2011, Tokyo, Japan.
- [28] Kyogo Kawaguchi and Masaki Sano: Information Transmission in Autonomic Systems, Korea University - The University of Tokyo 1st Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 21-23, 2011, Tokyo, Japan.
- [29] Miki Y. Matsuo and Masaki Sano: Geometrical model of a self-propelled broken interface and its

- application to cell motility, Korea Univ. and The Univ. of Tokyo 1st Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 21-23, 2011, Tokyo, Japan.
- [30] Hirokazu R. Tanimoto and Masaki Sano: Dynamics of traction stress and shape modes of migrating cells -exploring the force-shape relationship: Korea Univ. and The Univ. of Tokyo 1st Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 21-23, 2011, Tokyo, Japan.
- (招待講演)
- [31] M. Sano: Non-equilibrium transport of colloidal soft matter: from anomalous transport to self-propelled dynamics, International Symposium on Nonequilibrium Softmatter 2010, Aug. 17-20, 2010, Nara, Japan.
- [32] Masaki Sano: Tunable Thermophoresis of Colloids using Nonequilibrium Depletion Effect, Asia Pacific Center for Theoretical Physics (APCTP) Workshop on Chemi-Thermo-EM Phoresis in Complex Fluids, Aug. 25-28, 2010, Pohang, Korea.
- [33] Masaki Sano: Cell locomotion: experiments and modeling, International Workshop "Emerging Topics in Nonlinear Science", Sept. 12 – 18, 2010, Schloss Goldrain, Italy.
- [34] Masaki Sano: Micromanipulation of Colloids and Biological Cells based on Nanoscale Hydrodynamic Effects, The Seventh International Conference on Flow Dynamics (ICFD2010), Nov. 1-3, 2010, Sendai, Japan.
- [35] Masaki Sano: Information and fluctuation in small worlds: From active soft matter to cell mechanics, 1st Korea University - The University of Tokyo Joint Workshop on Bio-Soft Matter, Feb. 21-23, 2011, Tokyo, Japan.
- [36] Kazumasa A. Takeuchi and Masaki Sano: Dynamics of Turbulent Interfaces and Universality in the Electroconvection of Liquid Crystals, East Asian PostGraduate Workshop on Soft Matter, Apr. 28-30, 2010, Hong Kong, China.
- (国内会議)
- 一般講演
- [37] 宮崎牧人, 原田崇広: 1分子計測における逆問題: タンパク質の内部構造に対するベイズ推定, 第10回東京大学生命科学シンポジウム(東京大学), 2010年5月1日.
- [38] 原田崇広, 鳥谷部祥一, 宮崎牧人: 1分子実験: プローブのトラジェクトリから情報を絞り出す, 特定領域研究「膜超分子モーターの革新的ナノサイエンス」第5回班会議(学習院大学), 2010年5月24-25日.
- [39] 松井裕太郎, 佐野雅己: 気液共存系熱対流における熱輸送と内部構造, 日本流体力学会年会2010(北海道大学) 2010年9月9-11日.
- [40] 宮崎牧人, 原田崇広: 分子モーターのステップ軌道の効率的な推定, 第48回日本生物物理学会年会(東北大学), 2010年9月20-22日.
- [41] 谷本博一、佐野雅己: On the amoeba-kerato mode transition, 生物物理学学会、仙台、2010年9月20-22日.
- [42] 江端宏之, 佐野雅己: 懸濁液界面におけるパターンの自発運動と変形のダイナミクス, 日本物理学会2010年秋季大会 2010年秋季大会(大阪府立大学), 2010年9月23-26日.
- [43] 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及び協同現象, 日本物理学会2010年秋季大会(大阪府立大学), 2010年9月23-26日.
- [44] 黒田真史, 佐野雅己: 振動細線による液晶トポロジカル欠陥乱流の生成, 日本物理学会2010年秋季大会(大阪府立大学), 2010年9月23-26日.
- [45] 谷本博一、佐野雅己: 細胞の力と形の関係, 日本物理学会2010年秋季大会(大阪府立大学), 2010年9月23-26日.
- [46] 江端宏之, 山本美希, 佐野雅己: 懸濁液界面におけるパターンの自発運動と変形のダイナミクス, 日本物理学会2010年秋季大会(大阪府立大学), 2010年9月23-26日.
- [47] 宮崎牧人, 原田崇広: タンパク質の内部構造に対するベイズ推定, 特定領域研究「膜超分子モーターの革新的ナノサイエンス」終了シンポジウム(大阪大学), 2010年11月18日.
- [48] 鈴木量、佐野雅己: 自己駆動する非対称粒子の運動と相互作用, 基研研究会「非平衡系の物理学: 非平衡ゆらぎと集団挙動」, 京都大学, 2010年11月18~20日.
- [49] 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, 基研研究会「非平衡系の物理-非平衡ゆらぎと集団挙動」, 京都大学, 2010年11月18~20日.
- [50] 川口喬吾, 佐野雅己: Information Transmission in Autonomic Systems, 基研研究会『非平衡系の物理-非平衡ゆらぎと集団挙動』(京都大学基礎物理学研究所) 2010年11月18-20日.
- [51] 宮崎牧人, 原田崇広: 往復法: タンパク質の隠れた自由度の動きの効率的な推定, 定量生物学の会第3回年会(東京大学), 2010年11月27-28日.
- [52] 黒田真史, 佐野雅己: 振動細線による液晶トポロジカル欠陥の生成, 第9回関東ソフトマター研究会, 東京, 2010年12月11日.
- [53] 鈴木量、佐野雅己: 「自己駆動粒子の集団挙動」、2010年12月11日、第9回関東ソフトマター研究会、お茶の水女子大学
- [54] 山本美希, 佐野雅己: 自己駆動界面の幾何学とケラトサイト運動、アクティブマター研究会2011, 東京, 2010年2月7日.
- [55] 谷本博一、佐野雅己: 細胞の力と形の関係、アクティブマター研究会2011, 東京, 2010年2月7日.

- [56] 黒田真史, 佐野雅己: 液晶における欠陥渦生成とダイナミクス, 日本物理学会 第 66 回年次大会 (新潟大学) 2011 年 3 月 25-28 日 [震災のため中止].
- [57] 江端宏之, 佐野雅己: スラリーにおける heaping の連続体モデルについて, 日本物理学会 第 66 回年次大会 (新潟大学) 2011 年 3 月 25-28 日 [震災のため中止].
- [58] 中山洋平、佐野雅己: 高分子濃度勾配中のコロイドの運動、日本物理学会 第 66 回年次大会 (新潟大学) 2011 年 3 月 25-28 日 [震災のため中止].
- [59] 伊藤創祐, 佐野雅己: フィードバック制御下での揺動散逸定理の破れと有効温度に対する制限, 日本物理学会 第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 25-28 日 [震災のため中止].
- [60] 佐野雅己: コロイド粒子系を用いた非平衡実験と非平衡関係式, 特定領域研究「ソフトマター物理」第 5 回領域研究会, 2011 年 1 月 6-8 日. 東京大学一条ホール, 東京.
- [61] 佐野雅己: 予測と制御を含む情報処理と物理法則, 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会, 2010 年 12 月 20 日, 東北大学、仙台.

招待講演

- [62] 宮崎牧人: 理論生物学と学習・統計との新たな接点～1 分子計測データに対するパラメータ推定, 第 13 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2010) (東京大学), 2010 年 11 月 4-6 日.
- [63] 谷本博一、佐野雅己: 細胞の力と形の関係、定量生物学研究会、東京、2010 年 11 月 26-28 日.
- [64] 宮崎牧人: ランジュバン系に対するベイズ推定: 1 分子時系列からタンパク質の粗視化モデルを構築する, ワークショップ「力学的決定性と統計性の中間領域を探る IV」, 新潟, 2011 年 3 月 22-25 日 [震災のため中止].
- [65] 佐野雅己: 非平衡状態の微粒子系における特異な輸送現象と動的構造形成, ワークショップ: 創発現象の世界 2, 九州大学医学部百年記念講堂, 2010 年 6 月 11 日, 福岡.
- [66] 佐野雅己: 沸騰、凝縮、対流 一ポットの中のサイエンス, 土井正男氏紫綬褒章受章記念ミニシンポジウム, 「キッチンの中のサイエンス」, 東京大学工学部 6 号館, 2010 年 6 月 5 日, 東京.

(セミナー)

- [67] Kazumasa A. Takeuchi: Growing interfaces in liquid-crystal turbulence: universal scaling and fluctuations, Hong Kong Baptist University, Department of Physics セミナー, 2010 年 4 月 27 日.
- [68] 宮崎牧人: 隠れた自由度を持つ微小系に対するパラメータ推定～タンパク質 1 分子計測への応用～, 東京大学生産技術研究所 小林研究室セミナー, 東京大学, 2010 年 4 月 28 日.
- [69] 宮崎牧人: 隠れた自由度を持つ微小系に対するパラメータ推定～タンパク質 1 分子計測への応用～, 学習院大学 西坂研究室セミナー, 学習院大学, 2010 年 5 月 10 日.

- [70] 江端宏之, 佐野雅己: Dynamics of deformed holes in vertically vibrated dense suspensions, 京都大学基礎物理学研究所 物性セミナー, 京都大学, 2010 年 10 月 13 日.
- [71] 黒田真史: 位相欠陥の動く物理, 東京大学総合文化研究科 佐々研究室セミナー, 2010 年 10 月 28 日.
- [72] 宮崎牧人: Parameter estimation on single-molecule time series, Manfred Opper 氏を囲む会, 東京大学, 2010 年 11 月 5 日.
- [73] Hiroyuki Ebata and Masaki Sano: Self-replicating patterns in vertically vibrated dense suspensions, Japan-Slovenia Seminar on Nonlinear Science, Osaka Prefecture University, November 8-9, 2010.
- [74] 江端宏之: 垂直加振下のスラリーにおける Heaping の連続体モデルについて, 鳥取非線形研究会 2010, 鳥取大学, 2010 年 12 月 16 日.
- [75] Hong-Ren Jiang and Masaki Sano: From nonequilibrium soft matter to active matter, Academia Sinica, Taipei, Taiwan, Feb. 15, 2010
- [76] 江端宏之, 松尾美希, 佐野雅己: 垂直振動下の懸濁液におけるパターンの分岐解析, 自然科学縦横無尽 2010, 京都大学, 2011 年 3 月 15 日.
- [77] 佐野雅己: Non-equilibrium transport of colloidal soft matter: From anomalous transport to self-propelled dynamics, 東京大学理学部物理学科, 初田研セミナー, 2010 年 5 月 12 日, 東京大学.

(その他)

- [78] 佐野雅己: 非平衡の科学: 秩序と乱れを生み出す不安定性のメカニズム, 東大 EMP 第 4 期プログラム, 講義, 2010 年 6 月 5 日, 東京大学.
- [79] 佐野雅己: 非平衡の世界を理解する: 秩序と乱れを生み出す不安定性のメカニズム, 東大 EMP 講義第 5 期プログラム, 2011 年 2 月 11 日, 東京大学.

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、生命的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つてきた。即ち、微量分子の組成から、現在の物理状態だけでなく、「過去」を辿ることができる。本研究室では、このような独創的視点を軸に、星・惑星系形成過程の多面的に研究している。

【なぜ電波を観測するのか】 星間分子雲の温度はおよそ10 K程度と低い。この「宇宙の中でも最も低温の天体」を観測するには、最もエネルギーの低い電磁波である「電波」が有効である。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、厚い星間物質に包まれた星形成の核心部分を容易に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する。それらの観測により、星間分子雲の運動や分子組成を捉えることができる。

【ALMA（アルマ）に向けて】 近年、ミリ波、サブミリ波観測の進展は著しい。超伝導技術を用いた低雑音ヘテロダイイン受信機の実現がその背景にある。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。しかし、感度、分解能はまだ十分である。それを解決するのがALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) である。ALMAは、南米チリの標高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望遠鏡（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、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。

【テラヘルツ帯観測技術の開拓】 テラヘルツ帯は電波と赤外線との中間にあたり、観測的研究がまだ十分に進んでいない波長域である。そこにはC⁺, N⁺などの原子スペクトル線の他、CH, H₂D⁺, HD₂⁺などの基本的分子のスペクトル線がある。それらの観測により、上で述べた星・惑星系形成における物質進化の要を押さえることができる。世界的には2009年5月に打ち上げられたHerschel衛星によりテラヘル

ツ帯観測のフロンティアが開かれつつある。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、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うことを計画している。本研究室は、1998年から2005年までの間、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、テラヘルツ天文学を創生したいと考えている。

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、電波観測により大きな進歩を遂げつつある。その結果、低質量星近傍の分子組成が天体によって大きく異なることがわかつってきた。その一つの典型は、HCOOCH₃などの大型飽和有機分子が原始星近傍の100 AU程度の領域に豊富に見られる天体で、ホットコリノ天体と呼ばれる（へびつかい座のIRAS16293-2422など）。もう一つの典型は、炭素鎖分子が異常に豊富な低質量星（おうし座のL1527、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CH₄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と見られる。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是、母体となる分子雲の収縮時間の違いによると考えられ、星形成を探る新しい手段として注目されている。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がもたれる。本研究室では、低質量星形領域を中心に幅広く研究を進めている。

L1527におけるCH₃Dの検出

メタン(CH₄)は、星間空間において最も基本的な有機分子であり、星間塵氷層の主要な構成物質でもある。しかし、回転遷移が禁制であることから、低温星間分子雲での存在は確認されてこなかった。このような状況にあって、我々は、メタンの重水素化物であるCH₃Dに着目し、アリゾナ大学のSMT 10 m望遠鏡を用いて、おうし座のL1527原始星方向での回転遷移輝線($J_K = 1_0 - 0_0$; 232.6 GHz)の探索を行った。60時間に及ぶ観測の結果、そのスペクトル線を検出に初めて成功した。L1527は、代表的WCCC天体であり、CH₄の蒸発をきっかけとして炭素鎖分子が形成されていると考えられている。今回のCH₃D検出は、我々が提案したWCCCのメカニズムを支持する結果と言える。

TMC-1Aの高励起スペクトル線

上で述べたように、同じ進化段階(Class 0)にある低質量原始星でも分子組成は大きく異なる。そこで、

次に問題となるのが、「この分子組成の多様性が惑星系形成に向けてどのように進化していくのか」という点である。そこで、我々は、L1527と同じ領域にある Class I 天体 TMC-1Aにおいて、野辺山 45 m 望遠鏡や IRAM 30 m 望遠鏡を用いて様々な炭素鎖分子のスペクトル線観測を行った。その結果、高励起スペクトル線において、低励起のスペクトル線 (6.3 km s^{-1}) とは異なる視線速度 (5.8 km s^{-1}) の成分を検出した。この 5.8 km s^{-1} 成分は、原始星方向に集中していることが確認でき、TMC-1A が L1527 の進化したものに相当する天体である可能性が高まった。今後、化学的多様性の進化を理解するにあたり、Class I の WCCC 天体を発見できたことは非常に大きな成果と言える。

Lupus-1A の発見

我々は、最近、炭素鎖分子のスペクトル線が全天で最も明るい天体 Lupus-1A を発見した。アメリカ国立天文台の 100 m 電波望遠鏡による観測で、Lupus-1A には C_6H や C_8H 、 HC_9N など長い炭素鎖を持つ分子が豊富に存在していることがわかった。1976 年に TMC-1 という炭素鎖分子が豊富な星なしこアが発見されて以来、これを凌ぐ天体は見つかってこなかった。しかし、南天のおおかみ座の Lupus-1A は、炭素鎖分子の存在量が TMC-1 とほぼ同じであり、「第二の TMC-1」とも言うべき特異な天体であることがわかった。そればかりか、TMC-1 でも検出されていない C_4H^- などの負イオンも検出することができた。Lupus-1A の発見により、炭素鎖化学の理解や未知の分子の探査に大きな進展をもたらすであろう。

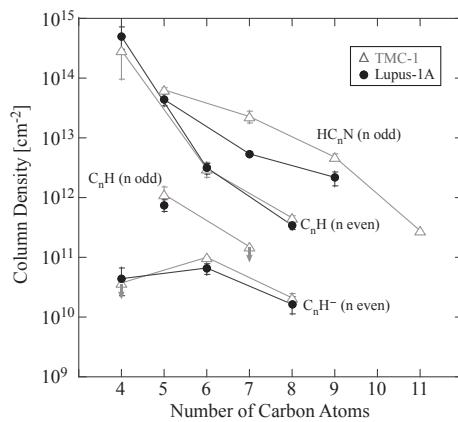


図 6.5.31: Column densities of carbon-chain molecules in TMC-1 and Lupus-1A

低質量星形成領域の重水素濃縮

低温の星間分子雲では、重水素は分子に濃縮される。宇宙における重水素の存在比は $D/H \sim 10^{-5}$ であるが、星間分子雲中の分子における比は $0.01 - 0.1$ と高い（重水素濃縮）。原始星が誕生すると、その近傍の温度が上がり、この比が低くなることが期待される。しかし、その時間スケールは分子イオンでは 100 yr 程度と短いが、中性分子では $10^4 - 10^5 \text{ yr}$ と長い。従って分子イオンの重水素濃縮度は原始星方向で下がるが、中性種の重水素濃縮度は原始星誕生直前の状態を保持すると期待される。そこで、低質量 class 0 原始星 IRAS16293-2422 と L1551 について、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて観測を行った。その結果、 $\text{DCO}^+/\text{H}^{13}\text{CO}^+$ 比は原始星方向で確かに減少していることがわかった。一方、 $\text{DNC}/\text{HN}^{13}\text{C}$ については変化がなく、分子種によって重水素濃縮度の変化の違いがあることが確かめられた。

系外銀河の GMC スケールでの分子組成

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。その探求にはこれまで GMC の物理状態や運動を直接調べるアプローチがとられてきたが、GMC が置かれている環境が分子組成に及ぼす影響を調べる手法も、相補的に有効と考えられる。しかし、活動銀河核や爆発的星形成領域などの極限的環境下にある分子ガスを除き、GMC スケールでの分子組成の系統的研究はほとんどない。我々は、野辺山 45 m 望遠鏡を用い、近傍円盤銀河 M51 の渦状腕に付随する GMC について 90 GHz 帯のスペクトル線サーベイを行った。観測の結果、 CCH 、 HNCO 、 CH_3OH 、 CS 、 C^{18}O 、 ^{13}CO を検出した。系外銀河の渦状腕において、これほど多くの分子が同時に検出されたのは初めてである。この結果は、GMC スケールの構造の形成・進化の研究に対しても、分子組成からの探究が可能であることを示している。

6.5.3 スペクトル線サーベイ観測

国立天文台野辺山観測所のレガシープロジェクトの一つとして、45 m 望遠鏡を用いた衝撃波領域 L1157 B1 と低質量星形成領域 L1527(WCCC 天体) のスペクトル線サーベイ、および ASTE 10 m 望遠鏡を用いた衝撃波領域 BHR71 と星形成領域 (IRAS15398-3359, RCRA IRS7B, G28.34) のスペクトル線サーベイを推進している。ある周波数範囲のスペクトル線をくまなく観測することで、それぞれの分子組成の全貌を先入観なく明らかにしつつある。

低質量星形成領域 L1527

L1527（距離 140 pc）における WCCC の全貌を明らかにする目的で、波長 3 mm 帯のスペクトル線

サーベイ観測を野辺山 45 m 望遠鏡を用いて行っている。この天体ではスペクトル線幅が狭いので (~ 0.5 km/s)、一度に観測できる周波数範囲が限られる。それにもかかわらず、これまでの 4 年間の観測で、83-92 GHz の範囲をノイズレベル 5 mK 以下の高感度でサーベイし、様々な炭素鎖分子やそれらの重水素同位体種・ ^{13}C 同位体種のスペクトル線を検出した。また、多くの未同定線も見出された。一方で、 HCOOCH_3 や CH_3OCH_3 など、IRAS16293-2422 を始めとするホットコリノ天体で豊富に存在する大型飽和有機分子は検出されなかった。L1157 におけるラインサーベイの結果は、WCCC の機構の理解を進めるだけでなく、他の低質量星形成領域の分子組成を理解する上でも大いに役立つと期待される。

衝撃波領域 L1157 B1

宇宙空間では、星形成領域、超新星残骸、銀河中心など、至る所に衝撃波現象が見られる。我々は、衝撃波領域の化学過程を明らかにするため、L1157 B1 のラインサーベイ観測を野辺山 45 m 望遠鏡を用いて行っている。L1157 B1 は、低質量原始星 IRAS 20386+6751（距離 440 pc）から吹き出した双極分子流が周辺ガスに衝突して生じた衝撃波領域である。昨年までに 81.5-94.5 GHz, 96.3-97.5 GHz の範囲が観測されており、本年度は新しい自己相關型分光計を用いてさらに 94.5-96.3 GHz, 97.5-115.5 GHz 帯の観測を進めた。その結果、28 種類の分子（同位体種を除く）の 120 本の輝線を検出し、L1157 B1 の分子組成のほぼ全容を捉えることができた。

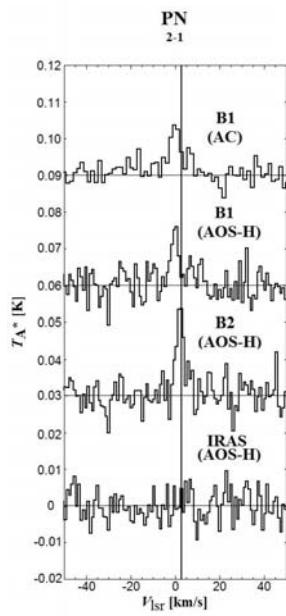


図 6.5.32: The $\text{PN}(J = 2-1)$ spectra observed toward the B1, B2, and protostar positions in L1157

本年度の第 1 の成果は、炭素鎖分子 CCS($J_N =$

$9_8 - 8_7, 8_9 - 7_8, 8_7 - 7_6, 7_6 - 6_5$) の検出である。炭素鎖分子は、これまで星なしこアなどの冷たい分子雲でよく観測されるが、衝撃波領域では注目されてこなかった。我々が検出した輝線は速度幅が 5 km s $^{-1}$ 程度あり、CCS のような炭素鎖分子が周辺ガス中ではなく、衝撃波領域に主に存在していることを示している。CCS の生成と衝撃波がどのような関わりを持つのかは謎であり、今後の課題である。

第 2 の成果は PN の検出である (図 6.5.32)。PN は星間分子雲で知られる唯一のリンを含む分子であり、これまで Sgr B2, Ori KL, W51 といった大質量星形成領域でのみ検出されてきた。しかし、これらの領域は大規模かつ複雑であるため、PN の生成過程の観測的理解に結びつかなかった。今回、我々は、PN ($J = 2-1$) の輝線を L1157 B1, L1157 B2 の 2 つの衝撃波領域で検出した。一方、L1157 原始星方向では検出できなかったことから、PN の生成に衝撃波が何らかの役割を果たしていることがわかった。

70 GHz 帯 2SB 受信機の開発

野辺山 45 m 望遠鏡によるスペクトル線サーベイ観測を 70 GHz 帯まで拡張する目的で、2SB 型の SIS 受信機を製作した。70 GHz 帯には多くの分子の重水素化物や、 CH_2 , NS などの基本的分子のスペクトル線が存在する。スペクトル線サーベイの観測領域としては重要であるにもかかわらず、80-115 GHz 帯に比べて世界的にも観測的空白域となっている。本年度、製作した受信機を野辺山 45 m 望遠鏡の旧ビーム系に搭載し、試験観測を行った。72 GHz での受信機雑音は 300 K 程度であり、これまでの受信機 (S80) の 1/2 である。直交 2 偏波が同時観測できることを考えると、8 倍の観測効率の向上が見込まれる。

ASTE によるラインサーベイ

チリに設置した ASTE 10 m 鏡を使い 345 GHz 帯のスペクトル線サーベイを、6 つの天体に対して行った。観測天体は、低質量 class 0 原始星でホットコリノ候補天体の R CrA IRS7B, WCCC 天体 IRAS 15398-3359、赤外線暗黒星雲 G28.34 (MM1, MM4, MM9)、および低質量原始星 BHR71 に付随する衝撃波領域である。R CrA IRS7B については、332 - 364 GHz の範囲を r.m.s 雜音温度 (T_{MB}) で 11-21 mK という高い感度で観測した (図 6.5.33)。その結果、17 の基本的な分子及び重水素化合物を含む 16 の同位体分子を検出した。これらの分子は 3 個以下の重い原子を含む分子であり、より複雑な有機分子は検出されなかった。R CrA IRS7B は、これまで H_2CO や CH_3OH のスペクトル強度からホットコリノ天体であると考えられてきた。しかし、本観測から CN や CCH 等が典型的なホットコリノ天体である IRAS 16293-2422 よりも多いことがわかり、ホットコリノと WCCC の中間的な性質を持つ可能性が示された。

さらに、本サーベイでは複数の天体で同じ周波数領域の分子輝線スペクトルが得られたため、先入観

なく天体ごとの分子組成をスペクトルパターンとして比較可能である。例えば、大質量星形成領域の赤外線暗黒星雲 G28.34 のパターンは、衝撃波領域の BHR71 のパターンに類似している。これは星形成に伴うアウトフローが卓越しているためと考えられる。このような「化学分析」は、天体の構造と進化を探る新しい手法となると期待される。

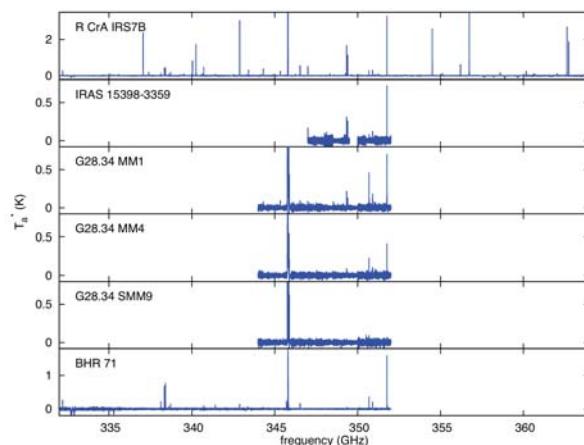


図 6.5.33: Spectral line survey with ASTE

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（ヘテロダインミクサ）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、超伝導キ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て、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) 热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。

HEB ミクサの開発と評価

本研究室では 800 GHz 帯、1.5 THz 帯の超伝導 HEB ミクサを開発している。それには数 nm の膜厚の超伝導薄膜を用いる。しかし、高い超伝導転移温度を維持したまま超伝導物質を数 nm 厚に成膜することは技術的に難しい。超伝導素材としては、世界的に NbTiN、NbN が用いられている。NbTiN はどんな基板に成膜してもある程度高い転移温度を示すため、本研究室でも当初 NbTiN を用いて開発を進めてきた。一方、NbN は高い転移温度を得るために、基板の種類が限られる。我々の目指す宇宙観測応用に最適な導波管型 HEB ミクサには石英基板が必須である。そのため、NbN を用いた素子の製作は事実上不可能であった。しかし、昨年度、NbN と石英基板の間に AlN 緩衝層を導入することで高い転移温度をもつ NbN 薄膜が得られることを見出した。そこで現在、NbTiN、NbN+AlN 薄膜を用いた 2 種類の HEB ミクサを開発している。

宇宙からの微弱な信号を捉えるために、HEB ミクサは低雑音である必要がある。我々は雑音性能が素子のインピーダンス、つまり、マイクロブリッジのサイズに依存すると考え、様々なサイズのマイクロブリッジをもつ素子を作成、測定した。その結果、NbTiN 素子では 800 GHz 帯で受信機雑音温度 470 K、1.5 THz 帯では 570 K という低雑音化に成功した。また、NbN+AlN 素子でもそれぞれ 450 K、1100 K を達成した。これらの性能は実際の観測に用いるに十分な性能である。特に 1.5 THz 帯の NbTiN 素子の 570 K は量子雑音の約 8 倍にあたり、現在報告されている中では世界最高性能である。

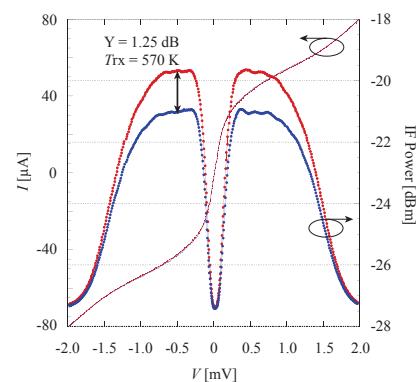


図 6.5.34: I-V curve and the RF response of the 1.5 THz waveguide HEB mixer

ASTE 搭載用受信機の設計、製作

チリのアタカマ砂漠にある ASTE 10 m 望遠鏡に搭載する受信機カートリッジを製作した。観測周波数帯は 900 GHz/1.3-1.5 THz 帯である。これらの周波数帯には基本的な原子、分子の出す回転スペクト

ルが含まれ、それらの観測により、星間分子雲の物質進化の「要」を捉えることができる。受信機はこの2つのバンドをカバーする。主鏡から導かれたビームはワイヤグリッドで直交2偏波に分けられ、デュワー外から準光学的に導入された局部発振信号と結合した後に導波管型HEBミクサに導かれる。ASTE望遠鏡の口径は10mであるが、本観測では鏡面精度のよい内側約7mのみを使用する。それでも主鏡径3mのHerschel宇宙望遠鏡の2倍以上の空間分解能をもつ。2011年度の試験観測に向けて、組み上げと性能評価が進行中である。

加熱成膜を取り入れた HEB ミクサの製作

HEBミクサのIF帯域を広げるためには、数nm厚の超伝導薄膜が必要である。超伝導薄膜の高品質化に効果的と考えられているのが成膜時に基板を高温に加熱する「基板加熱」である。基板を高温にすることで、高い結晶性を持つ膜を成膜できると期待される。本研究室では昨年NbTiN膜の成膜装置に赤外線ランプを用いた基板加熱機構を導入しており、これを用いて基板加熱が与える影響を調べた。その結果、400°Cに加熱して成膜した場合、厚さ8nmのNbTiN膜でT_cが6.8Kから10.1Kへの上昇が見られた。また昨年報告したAlNによる緩衝層を入れる方法と併用するとT_cは13.3Kまで上昇した。これは基板加熱による上昇分と緩衝層による上昇分の和と同程度の値である。

基板加熱による膜質の向上が確かめられたため、これをHEBミクサの製作工程に取り入れる方法について検討した。これまでのプロセスでは有機レジストを用いたリフトオフ用いているので、基板を加熱するとレジストが焦げ付いてしまう問題があった。これを解決する方法として、有機レジストのパターンを一旦アルミニウムに転写し、エッチングにより目的の形に超伝導膜を加工するという方法を考案した。この方法を用いて基板加熱過程を取り入れたHEBミクサ製作を行ったところ、必要な加工精度は確保でき、超伝導転移も確認された。この方法の最適化を進め、HEBミクサの性能向上を図りたい。

準光学HEBミクサの製作

1.9THz以上の高周波HEBミクサの開発では、特に細線の微細化と薄膜化の改良に取り組んだ。まず幅1μm、長さ0.2μm、厚み6nmのNbTiN超伝導細線を作成し、これを準光学型2次元平面アンテナに集積して、4Kパルス管冷凍機で冷却を行った。その結果、強い超伝導電流が観測され、1.9THz帯のCW発振信号(数μW)を照射しても、充分に細線を励起できないほどであった。このため、NbTiNの薄膜プロセスの最適化を行いながら、細線長0.1-0.15μm、厚み3-5nmの超薄膜化の条件出しを進めた。さらに細線の経年劣化の抑制と、IF広帯域化を目的とし、細線上にAlN膜をスパッタするプロセスについてもテストした。本研究は、名古屋大学大学院理

学研究科の福井康雄教授・前澤裕之助教らとの共同開発により推進している。

3 THz帯量子カスケードレーザーの開発

2THzを超える高い周波数帯域では、局部発振器として満足な光源を入手することが難しい。そこで、量子カスケードレーザー(QCL)に着目し、情報通信研究機構(NICT) 實業グループとの共同で開発を行った。製作プロセス条件の最適化、特にドライエッティングの導入により、導波路幅の小さな素子を製作できるようになった。その結果、発振周波数3.1THzにおいて連続発振に国内ではじめて成功した。出力は最大で34μWであり、連続発振における最高動作温度は74Kであった。

上述のように開発したQCLを局部発振器として用い、本研究室で開発した準光学型HEBミクサによる3THz帯ヘテロダイン受信機を構築した。QCLとHEBミクサはそれぞれ別々の液体Heデュワーに搭載し、ビームスプリッターにはワイヤグリッドを用いた。位相敏感検波を利用したY-factor法で雑音温度の測定を行ったところ、受信機雑音温度5600K(DSB)を得た。この値は、光学系による損失を考慮すると2100Kとなる。これは3THz帯のHEBミクサ受信機としてほぼ世界的な水準である。これにより、我々が開発してきたTHz QCLが局部発振器として十分使用に耐えることが確かめられた。また、THz帯HEBミクサには一般にNbN薄膜が用いられているが、NbTiN薄膜を用いてもほぼ同等な性能を得られることがわかった。

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Sakai, N. Sakai, T. Hirota, and S. Yamamoto, “A Survey of Molecular Lines toward Massive Clumps in Early Evolutionary Stages of High-mass Star Formation”, *Astrophys. J.*, **714**, 1658 (2010).
- [2] N. Sakai, T. Shiino, T. Hirota, T. Sakai, and S. Yamamoto, “Long Carbon-chain Molecules and Their Anions in the Starless Core, Lupus-1A”, *Astrophys. J.*, **718**, L85 (2010).
- [3] T. Hirota, N. Sakai, and S. Yamamoto, “Depletion of CCS in a Candidate Warm-carbon-chain-chemistry Source L483”, *Astrophys. J.*, **720**, 1370 (2010).
- [4] N. Sakai, T. Sakai, T. Hirota, and S. Yamamoto, “Distribution of Carbon-Chain Molecules in L1527”, *Astrophys. J.*, **722**, 1633 (2010).
- [5] Watanabe, Y., Sorai, K., Kuno, N., and Habe, A., “Refined molecular gas mass and star-formation efficiency in NGC 3627”, *MNRAS*, 411, 1409-1417 (2011).
- [6] 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 (2011).
- [7] 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 B1 Shocked Region”, *Publ. Astron. Soc. Japan* in press.
- [8] H. Maezawa, T. Yamakura, T. Shiino, S. Yamamoto, S. Shiba, N. Sakai, Y. Irimajiri, L. Jiang, N. Nakai, M. Seta, A. Mizuno, T. Nagahama, and Y. Fukui, “Stability of a Quasi-Optical Superconducting NbTiN Hot-Electron Bolometer Mixer at 1.5 THz Frequency Band”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2011, in press.

(国内雑誌)

- [9] 坂井 南美、「化学の目で見た星形成：星形成領域の多様性」、*日本惑星科学会誌*、Vol. 20, No. 1, 2011

(学位論文)

- [10] 芝祥一、“Development of Terahertz Quantum Cascade Lasers and Application to Heterodyne Receivers for Astronomical Observations”, 博士論文(2011年3月)
- [11] 山口貴弘、「星形成領域 L1157 における衝撃波化学」、修士論文(2011年3月)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [12] Sakai, N. “Chemical Diversity of Low-Mass Star Forming Regions”, The Early Phase of Star Formation EPoS 2010, Castle Ringberg, Germany, June 2010.
- [13] Sakai, N. “Chemical Diversity of Low-Mass Star Forming Regions”, The 5th Zermatt ISM Symposium, Zermatt, Switzerland, Sep. 2010.
- [14] Watanabe,Y., Sakai, N., Lindberg, J., Jorgensen, J., Bisschop, S., and Yamamoto,S., “Line survey of RCRA IRAS7B in the 345GHz window with ASTE”, Workshop on Interstellar Matter 2010, Sapporo, Japan, September 13 -15, 2010
- [15] Watanabe,Y., Sorai,K., Kuno,N., and Tosaki, T., “Molecular Gas and Star Formation in Barred Spiral Galaxy NGC 3627”, The 5th Zermatt ISM Symposium, Zermatt, Switzerland, September, 2010
- [16] T. Yamaguchi, M. Sugimura, N. Sakai, T. Sakai, T. Umemoto, S. Takano, S. Yamamoto, H. Nomura, Y. Aikawa, N. Hirano, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, S. Takakuwa, T.J. Millar, and NRO 45 m Line Survey Group, “Line Survey of L1157 B1 Shocked Region”, The 5th Zermatt ISM Symposium, Zermatt, Switzerland, September 2010.

- [17] S. Shiba, N. Sekine, Y. Irimajiri, I. Hosako, T. Koyama, H. Maezawa, and S. Yamamoto, “Development of THz Coherent Sources Using Quantum Cascade Lasers,” Progress in Electromagnetics Research Symposium 1P9-36(poster), Marrakesh, Morocco, March 2011

招待講演

- [18] N. Sakai, “Recent Progress of Carbon-Chain Chemistry in Molecular Clouds”, Workshop for Interstellar Matter 2010, ILTS, Hokkaido University, Sapporo, Japan, Sep. 2010.
- [19] S. Yamamoto, “Chemical Evolution of Low-Mass Star Forming Regions”, 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, Taipei, Taiwan, June, 2010.

(国内会議)

一般講演

- [20] 坂井 南美、山本 智: 「星間分子雲における炭素鎖分子の ^{13}C 同位体異常」、分子分光研究会、東京工業大学、2010年5月
- [21] 椎野竜哉、坂井南美、酒井剛、廣田朋也、山本智、「原始星近傍での CCS、 HC_3N 分子の大局的分布」、日本天文学会秋期年会 P27b、金沢大学、2010年9月
- [22] 坂井南美、酒井 剛、高野 秀路、山本 智、ラインサーベイチーム、「野辺山 45 m 鏡レガシープロジェクト：L1157 のラインサーベイ観測」、日本天文学会秋期年会 Q29c、金沢大学、2010年9月
- [23] 山口貴弘、杉村美佳、坂井南美、酒井剛、梅本智文、高野秀路、山本智、野村英子、相川祐理、平野尚美、Sheng-Yuan Liu, Yu-Nung Su, 高桑繁久、他 NRO 45 m ラインサーベイグループ、「L1157 の衝撃波領域におけるラインサーベイ」、日本天文学会秋季年会 Q30c、金沢大学、2010年9月

- [24] 入交芳久、芝祥一、関根徳彦、寶迫巖、小山知記、前澤裕之、山本智、「局部発振器用 THz-QCL の開発」、ミリ波・テラヘルツ波デバイス・システム研究会(電子情報通信学会 電子デバイス研究会)、東北大大学、2010年12月

招待講演

- [25] 坂井 南美「Chemical Diversity of Low-Mass Star Forming Regions」、地球惑星連合大会、幕張メッセ、2010年5月
- [26] 坂井 南美「星の誕生と化学進化」、第40回天文・天体物理夏の学校、ホテル日航豊橋、2010年8月

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來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展開

本研究室では、レーザー技術に基づいた分子操作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つ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制御が可能であることの原理実証実験に成功した。これらの実験は、分子の回転周期に比べてレーザー光のパルス幅が十分長い、いわゆる断熱領域で行われたものである。この場合、分子の配向度は、レーザー強度に追随して高くなり、レーザー強度が最大のときに配向度も最大となる。一方、光電子の観測や高精度の分光実験では、高強度レーザー電場が存在しない状況で試料分子の配向を実現することが望まれる。本研究室では、静電場とレーザー電場の併用による手法が断熱領域で有効なことに着目し、分子の回転周期 T_{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。実験の概略はつぎのとおりである。高強度2波長レーザー電場には、ナノ秒Nd:YAGレーザーの基本波(波長 $\lambda = 1064$ nm)とその第2高調波($\lambda = 532$ nm)を用いた。1/2波長板を用いて2波長の偏光方向を平行にして実験に使用した。2波長間の相対位相は溶融石英板の回転により制御した。2波長レーザー光を色消しレンズで集光し、真空チャンバーの相互作用領域に導いた。典型的なピーク強度は、1064 nm光が 1.6×10^{12} W/cm²、532 nm光が 5.0×10^{11} W/cm²であった。分子試料には背圧90 atmのHeをキャリアガスとして室温での分圧が約1 Torrの C_6H_5I 分子を用い、パルスバルブを使用して超音速分子線として供給した。分子が配向している様子は、velocity map型の2次元イオン画像化装置を用いて観測した。2波長レーザー光のピーク強度付近で高強度フェムト秒Ti:sapphireレーザーパルス(ピーク強度 $\sim 3 \times 10^{14}$ W/cm²)を集光照射することにより、 C_6H_5I 分子の2価イオンを生成し、クーロン爆裂で生成されるフラグメントイオン I^+ の角度分布を観測した(フラグメントイオン $C_6H_5^+$ は、2波長レーザー電場の存在下で解離してしまうため、観測できなかった)。2波長レーザーパルスによって配向した分子のみを検出する為に、Ti:sapphireレーザー光の光路にテレスコープを挿入してビーム径を制御し、Ti:sapphireレーザー光の集光径が2波長レーザー光の集光径よりも小さくなるように調整した。2波長レーザー光の偏光方向は検出器面に平行にし、Ti:sapphireレーザー光のそれは、多光子イオン化率の角度依存性の影響を避ける為、検出器面に垂直にした。2次元検出器はマイクロチャンネルプレートと蛍光板で構成されており、蛍光板のイメージをCCDカメラで撮影した。

最も大きな配向度が観測されたときの相対位相差を便宜的に $\phi = 0$ とし、配向度の指標である $\langle \cos \theta \rangle$ (θ は、2 波長レーザー光の偏光方向と分子軸のなす角) を、相対位相差 ϕ の関数として測定すると、 $\langle \cos \theta \rangle$ が、 2π を周期として変調している様子が確認できた。この観測結果は、高強度非共鳴 2 波長レーザー電場を用いて、 C_6H_5I 分子の配向制御が実現していることの明確な証拠と解釈することができる。先に General valve を用い、背圧 9 atm の Ar をキャリアガスとして使用したとき、配向を示す明確な証拠は得られなかつたが、今回 Even-Lavie valve を用い、背圧 90 atm の He をキャリアガスとして使用することによって配向を示す明確な証拠を得ることができた。General valve を用いたときの配列度 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ が 0.65 程度であったのに対し、Even-Lavie valve を用いたときのそれが 0.92 にまで増大したことは、Even-Lavie valve の採用により分子の初期回転温度を下げることができたことを意味している。すなわち、今回の観測結果は、配向度の増大に初期回転温度の低下が有効であることを示すとともに、非共鳴 2 波長レーザー電場を用いる本手法の汎用性を示している。

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つた。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を決断した。

今年度は、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開発を行つた。分子偏向器は直径 6 mm、長さ 100 mm のロッド (高電圧を印加) と半円形の溝を掘ったアース電極を数ミリの間隔で配置したものであり、間隙に均一な電場勾配を形成できる。分子偏向器を通過する分子は、その回転量子状態に応じて異なる Stark シフトを受ける、即ち、電場勾配の方向に力を受けるので、分子線の下流域で電場の勾配方向 (本装置では鉛直方向) に量子状態を選別できる。 C_6H_5I 分子を試料とし、Ne をキャリアガスとして検証実験を行つた。試料の検出器として用いた四重極質量分析計 (Q マス) の前に直径 0.6 mm のアパーチャを装着し、アパーチャと Q マスを上下に移動しながら試料分子の収量を測定したところ、ロッドに高電圧を印加した場合には、分子線の分布が鉛直上方に広がること、即ち、量子状態が選別されることを確認することに成功した。一方、六極集束器は六角形の頂点の位置にロッド形状の電極 (今回の装置では長さ 310 mm の六極電極 2 段で構成) を配置したものであり、隣接する電極に互いに逆極性の高電圧を印加することにより、内部に不均一電場が形成される。不均一電場中で

分子が受ける Stark シフトの結果、特定の回転量子状態にある分子には中心軸からの変位に比例する弾性力が働き单振動を起こすので、適切な印加電圧のときに六極集束器を通過後の測定位置に分子を集めさせることができる。 CH_3I 分子を試料とし、Ar あるいは Kr をキャリアガスとして検証実験を行つた。軌道シミュレーションとの比較から、回転量子状態 $|J, K, M\rangle = |1, \pm 1, \mp 1\rangle, |2, \pm 1, \mp 2\rangle, |2, \pm 1, \mp 1\rangle$ に由来するピークが観測された。即ち、これらの回転量子状態の選別に成功した。(六極集束器の立上げに当たり、大阪大学産業科学研究所の笠井俊夫特任教授のご協力を得た。また、大阪大学科学教育機器リノベーションセンター技術専門職員の西山雅祥氏、及び、同センターの橋之口道宏助教からは、技術的なアドバイスをいただいた。ここに記して謝意を表する。) なお、分子偏向器の開発でも六極集束器の開発でも装置のアライメントは極めて重要である。開発の当初、He-Ne レーザーを用いていたのに対し、建築現場等で使用されているオートレベルを導入することにより、直接内部を目視できるので作業効率とアライメントの精度を大幅に向上させることができた。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。

6.6.2 量子状態選別された分子の配向状態を評価するシミュレーションコードの開発

本研究室ではこれまでに、静電場とレーザー電場を併用して配向を実現する手法、非共鳴 2 波長レーザー電場を用いて配向を実現する手法 (T. Kanai and H. Sakai, J. Chem. Phys. **115**, 5492 (2001))、静電場とピーク強度付近で急峻に遮断されるレーザー電場を用いてレーザー電場のない条件下で配向を実現する手法 (Y. Sugawara *et al.*, Phys. Rev. A **77**, 031403(R) (2008))、さらには、ピーク強度付近で急峻に遮断される非共鳴 2 波長レーザー電場を用いて完全に電場のない条件下で配向を実現する手法 (M. Muramatsu *et al.*, Phys. Rev. A **79**, 011403(R) (2009)) などで配向状態を評価するシミュレーションコードの開発を進めてきた。これらのシミュレーションにおける分子試料としては、いわゆる thermal ensemble を考えて來たので、回転状態 $|J, M\rangle$ (M は角運動量量子数 J の電場方向への射影である) を基底として展開された波動関数の挙動を調べてきた。

一方、項目 6.6.1 の最後でも述べたように、最近本研究室では回転量子状態を選別された分子試料を用意して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している。例えば、六極集束器を用いて試料分子の量子状態を選別すると、角運動量量子数 J の分子軸方向への射影成分 K も含む $|J, K, M\rangle$ で指定される状態が選別される。したがって、特定

の回転量子状態 $|J, K, M\rangle$ にある分子試料の配向状態を調べるために、回転状態 $|J, K, M\rangle$ を基底として展開された波動関数を用いたシミュレーションコードを開発する必要がある。

今年度は特に、非対称コマ分子の3次元配向制御の様子を調べるためのシミュレーションコードの開発を行った。3次元配向制御の手法としては、静電場と楕円偏光したレーザー電場を併用する手法(断熱領域で実証済み、H. Tanji, S. Minemoto, and H. Sakai, Phys. Rev. A **72**, 063401 (2005))と、偏光方向を交差させた非共鳴2波長レーザー電場を用いる全光学的な手法が考えられる。さらに、これらの手法にプラズマシャッター技術を適用してレーザー電場を急峻に遮断することができれば、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(全光学的な手法の場合には完全にフィールドフリーな条件下で)、3次元配向を実現できると期待される。実際に、開発したシミュレーションコードを用い、量子状態選別した L-alanine 分子、あるいは初期回転温度 $T_{\text{rot}} = 0.1 \text{ K}$ の L-alanine 分子の3次元配向過程を調べ、レーザー電場の存在しない条件下で高い配向度を実現できることを検証した。上記のアプローチは、レーザー電場の存在しない条件下で非対称コマ分子の3次元配向を実現する最も堅実なアプローチであると考えられる。本研究室では、その実現のために必要な要素技術の大半を既に有するとともに、上述したように分子の回転量子状態の選別に必要な装置の開発も行った。近い将来の実現を目指して精力的に研究を進めている。

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。今年度は、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 $\tau \sim 25 \text{ fs}$ 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。

フェムト秒 Ti:sapphire レーザーの出力(パルス幅 $\tau \sim 25 \text{ fs}$ 、波長 $\lambda \sim 800 \text{ nm}$)を原子や分子のジェット中に集光照射し高次高調波を発生させた。フェムト秒パルスの CEP は $f\text{-to-}2f$ 干渉計で計測及び制御した。配列した分子を試料とする場合には、パルスを干渉計に入れてポンプ光とプローブ光を用意し、ポンプ光の照射により非断熱的配列を誘起し、分子が alignment 状態あるいは anti-alignment 状態になるタイミングでプローブ光を照射して高調波を発生させた。発生した高調波のスペクトルは、平面結像

型斜入射分光器と CCD カメラを用いて観測した。

試料ジェットの位置に対するレーザー光の集光位置を変化させると高調波のピークスペクトルの広がり方が変化した。ピークスペクトルが大きく広がるような集光条件では、高調波の発生過程で電子がトンネルイオン化してから再結合するまでの経路が長い、いわゆるロングトラジェクターの寄与が大きくなるような位相整合条件が実現していると考えられる。このような場合、高調波は一般にチャーピしておらず、フェムトパルスの立ち上がりでより高い周波数成分が発生し、立下りでより低い周波数成分が発生していると考えられる。奇数次高調波のピークの間にはその広がったスペクトル間の干渉パターンが観測され、CEP の変化とともにこの干渉パターンが移動する様子も確認できた。

高調波スペクトルをフーリエ変換して解析した結果、チャーピしてスペクトルが広がった隣り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。

さらに、今後 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の設計と試作も行った。

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衝突断面積 $\sigma(\omega)$ を評価できることである。このアプローチに従って、本研究室では電気通信大学量子・物質工学科の梅垣俊仁博士、森下亨博士、渡辺信一博士、および、カンザス州立大学物理学科の Anh-Thu Le 博士との共同研究において、希ガス原子 Ar, Kr, Xe 中からの高次高調波スペクトルを観測し、正確な再衝突電子波束 $W(E)$ を用いて再結合断面積 $\sigma(\omega)$ を評価するとともに、理論計算から求められた $\sigma(\omega)$ と比較することによりその妥当性を検証した(S. Minemoto *et al.*, Phys. Rev. A **78**, 061402(R) (2008))。上記の考え方をさらに発展させることにより、原子分子に関するいわゆる「完全実験」の目的である全ての双極子行列要素の振幅と位相を決めることが可能になると期待される。直線分子については、配列した分子から発生する高次高調波の偏光特性を調べることにより、必要な情報を得ることができると考えられる。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。

そこで今年度は、配列した N₂, O₂, CO₂ 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るようになった。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は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、分子の回転運動のため 1/4 周期ごとに再び配列するので、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。今回特に CO₂ 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が明らかになった。この観測結果は π_g の対称性をもつ CO₂ 分子の HOMO の性質を反映していると考えられる。

6.6.5 その他

今年度は修士課程の大学院生 2 名が加入する一方、修士 3 名を輩出した。また、4 月には特任研究員の山城亮氏が着任し、12 月には高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・放射光科学第一研究系特任助教の水野智也氏を客員共同研究員として迎えた。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大谷育生君、吉野一慶君(夏学期)、及び、江川隆太君、富樫康平君(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、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。

<受賞>

- [1] 加藤康作、理学系研究科研究奨励賞(修士)、2011 年 3 月。

<報文>

(原著論文)

- [2] Keita Oda, Masafumi Hita, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "All-optical molecular orientation," Physical Review Letters **104**, 213901 (2010).
[3] Yuichiro Oguchi, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Dependence of the generation efficiency of high-order sum and difference frequencies

in the extreme ultraviolet region on the wavelength of an added tunable laser field,” Journal of the Physical Society of Japan **80**, 014301 (2011).

- [4] Hiroki Mizutani, Shinichirou Minemoto, Yuichiro Oguchi, and Hirofumi Sakai, “Effect of nuclear motion observed in high-order harmonic generation from D₂/H₂ molecules with intense multi-cycle 1300 nm and 800 nm pulses,” Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics **44**, 081002 (2011) (Fast Track Communication).
- [5] Kosaku Kato, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “High-order harmonic generation from aligned molecules with 1300-nm and 800-nm pulses,” submitted.
- [6] Shinichirou Minemoto and Hirofumi Sakai, “Measuring polarizability anisotropies of rare gas diatomic molecules by laser-induced molecular alignment technique,” submitted.

(会議抄録)

- [7] Shinichirou K. Minemoto, Kosaku Kato, and Hirofumi Sakai, “High-order harmonic generation from aligned molecules with intense femtosecond 800- and 1300-nm pulses,” Ultrafast Phenomena XVII, ed. by M. Chergui, D. M. Jonas, E. Riedle, R. W. Schoenlein, A. J. Taylor, Oxford University Press, pp. 33-35 (2011).
- [8] Kosaku Kato, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Degree-of-alignment dependence of high-order harmonic generation from CO₂ molecules,” Ultrafast Phenomena XVII, ed. by M. Chergui, D. M. Jonas, E. Riedle, R. W. Schoenlein, A. J. Taylor, Oxford University Press, pp. 56-58 (2011).

(著書)

- [9] 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 Pub. Co. Inc., in press.

(国内雑誌)

- [10] 酒井広文、「レーザー電場を用いた気体分子の配列・配向制御」、Journal of the Vacuum Society of Japan (真空)、**53**, No. 11, pp. 668–674 (2010).

(学位論文)

- [11] Kosaku Kato, “High-order harmonic generation from aligned molecules with 800-nm and 1300-nm femtosecond pulses,” Master’s thesis, March 2011.
- [12] 鈴木美大、「分子配向制御のための六極集束器の開発」、修士論文、2011年3月。

- [13] 星野哲朗、「分子配向制御のための分子偏向器の開発」、修士論文、2011年3月。

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [14] Hirofumi Sakai, “All-optical approach to orient gas-phase molecules (Highlighted Keynote Lecture),” 8th International Conference of Computational Methods in Science and Engineering (ICCMSE 2010), Psalidi, Kos, Greece, October 6, 2010.
- [15] Hirofumi Sakai, “Molecular orientation with an all-optical technique,” The 13th International Symposium of Stereodynamics of Chemical Reactions (Stereodynamics 2010), Santa Cruz, California, USA, December 1, 2010.

- [16] Hirofumi Sakai, “Title to be announced,” International Symposium on Attoscience and Ultrafast Quantum Control (SASQC11), London, UK, September 2011.

- [17] Hirofumi Sakai, “Title to be announced,” 9th International Conference of Computational Methods in Science and Engineering (ICCMSE 2011), Halkidiki, Greece, October, 2011.

一般講演

- [18] Shinichirou Minemoto, Kosaku Kato, and Hirofumi Sakai, “High-order harmonic generation from aligned molecules with intense femtosecond 800- and 1300-nm pulses,” 17th International Conference on Ultrafast Phenomena, Snowmass, Colorado, USA, July 21, 2010.

- [19] Kosaku Kato, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Degree-of-alignment dependence of high-order harmonic generation from CO₂ molecules,” 17th International Conference on Ultrafast Phenomena, Snowmass, Colorado, USA, July 20, 2010.

- [20] Y. Sakemi, S. Minemoto, K. Kato, and H. Sakai, “Carrier-envelope-phase effects on high-order harmonic generation from atoms and molecules,” to present at 3rd International Conference on Attosecond Physics, Sapporo, Hokkaido, Japan, July, 2011.

(国内会議)

一般講演

- [21] 村松雅弘、峰本紳一郎、酒井広文、「回転状態を選択した分子の2波長レーザー電場を用いた配向制御」、2010年(平成22年)秋季第71回応用物理学学会学術講演会、長崎大学文教キャンパス、2010年9月14日。

- [22] 村松雅弘、峰本紳一郎、酒井広文、「回転量子状態 (J,K,M) を選択した分子の超短パルス 2 波長レーザー電場を用いた配向制御」、レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会、電気通信大学、2011 年 1 月 9 日。
- [23] 酒見悠介、峰本紳一郎、加藤康作、酒井広文、「原子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」、レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会、電気通信大学、2011 年 1 月 10 日。
- [24] 峰本紳一郎、酒見悠介、加藤康作、酒井広文、「搬送波包絡位相を制御したフェムト秒パルスによる高次高調波発生過程」、日本物理学会第 66 回年次大会、新潟大学五十嵐キャンパス、2011 年 3 月 25 日。
- [25] 江川隆太、富樫康平、大谷育生、吉野一慶、峰本紳一郎、酒井広文、「配列した分子中から発生する第 3 高調波の偏光特性」、2011 年（平成 23 年）春季第 58 回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、2011 年 3 月 25 日。
- [26] 星野哲朗、山城亮、文堤會、鈴木美大、峰本紳一郎、水野智也、柳下明、酒井広文、「分子偏向器の開発と分子配向制御への応用」、2011 年（平成 23 年）春季第 58 回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、2011 年 3 月 25 日。
- [27] 村松雅弘、峰本紳一郎、酒井広文、「量子状態選択した分子のフィールドフリーな条件下における全光学的 3 次元配向制御」、2011 年（平成 23 年）春季第 58 回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、2011 年 3 月 25 日。
- [28] 加藤康作、酒見悠介、峰本紳一郎、酒井広文、「搬送波包絡位相を制御したパルスを用いた原子分子中からの高次高調波発生」、2011 年（平成 23 年）春季第 58 回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、2011 年 3 月 25 日。
- [29] Jehoi Mun, Midai Suzuki, Ryo Yamashiro, Tetsuro Hoshino, Tomoya Mizuno, Shinichirou Minemoto, Toshio Kasai, Akira Yagishita, Hirofumi Sakai, "Development of a hexapole focuser for controlling molecular orientation," 第 27 回化学反応討論会で発表予定、東京工業大学大岡山キャンパス、2011 年 6 月 8 日。

6.7 五神研究室

4月より物理学教室に五神研究室が発足した。本研究室では、光と物質の相互作用を利用して、物質系に生じる多体量子現象とそこに生じる新しい光学現象の探索を進めている。半導体の励起子系、電子正孔系、反強磁性体のマグノン、冷却原子系といった幅広い物質系を対象としている。特に、電子正孔系の真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。また、微細加工技術を駆使して、キラル対称性をもつ人工ナノ構造を作製し、光やテラヘルツ電磁波に対する特異な光学応答の研究を進めている。物理学教室における活動に加え、工学系研究科附属光量子科学研究中心において、テラヘルツからX線におよぶ新しい光源の開発とその応用に関する研究を進めている。本年度は、理化学研究所と共同で、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」を開始した。このプログラムのもとで、高輝度高繰り返しの新型コヒーレント光源（“フォトンリング”施設）の開発に取り組んでいる。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

励起子 Bose-Einstein 凝縮相への到達

半導体において光励起して形成される励起子は、電子と正孔という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、我々はスピニ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。寿命が長いことの代償として、発光による励起子の観測が難しいため、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、パラ励起子の数や温度を正確に評価する手法を開拓してきた。

冷却原子気体の研究と大きく異なり、固体における励起子については粒子間の相互作用に関する情報がなく、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。そこで我々は、上記の分光法（励起子 Lyman 分光法）を用いて、生成する励起子数の関数として実際に蓄積されたパラ励起子の密度を評価した。その結果、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} よりも遙かに低い密度であっても、励起子間の 2 体衝突に伴うロスによって励起子密度が頭打ちになることを見いだした。詳細な解析の結果、この非常に大きな非弾性散乱の断面積は温度が低いほど増大（熱的波数の逆数に比例）し、s 波非弾性散乱の量子論的取り扱いの帰結である $1/v$ 則を示すことが分かった。さらに、

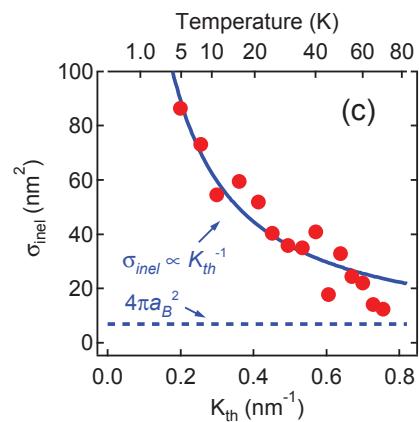


図 6.7.35: 励起子ライマン分光法を用いて測定した、亜酸化銅における 1s パラ励起子の非弾性散乱断面積とその温度依存性。

10^{17} cm^{-3} の密度においては、この散乱により実効的寿命が非常に短く熱平衡に到達できないことが判明し、BEC に到達するためには転移温度を 2 K よりも遙かに低い温度に設定することで転移密度を下げる必要が生じた [4]。

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。このような低温における限られた冷凍機の冷却能力の下、効果的に高い密度を実現するために、半導体結晶に不均一歪を印加羽することで励起子の 3 次元調和ポテンシャルを形成した。低密度極限においてパラ励起子が 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 転移に必要である 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、基底状態を多数の粒子が占有すると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ためこのような減少となることを見いだした。すなわち、凝縮体の割合は小さいものの、励起子が確かに BEC 相に転移することを初めて突きとめることに成功した [8]。

ダイヤモンド電子正孔系における低温多体現象の探索

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 [22]。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 [29]。

極低温原子気体を用いた強相関多体系の研究

レーザー冷却された極低温原子気体は、相互作用を自在に制御可能なユニークな量子縮退系として注目を集めており、我々はこれを用いた強相関多体系の研究を開始した。本年度は理学部4号館において実験室の整備を行い、光学定盤、机や棚の搬入を皮切りに、冷却原子系の研究を進める環境を整えた。今後いよいよ実験装置の開発を進め、フェルミ粒子であるリチウム6原子とボース粒子であるリチウム7原子の同時量子縮退の実現を目指し、将来の幅広い強相関多体系の研究に適した実験系を実現する。

6.7.2 非自明な光学現象の探索とその応用

人工キラルナノ周期構造による円偏光自然放出制御

円偏光状態の光は、スピントロニクス、量子情報やバイオ分野での応用等が期待されている。円偏光の光を直接発するデバイスについて、共振器量子電気力学効果を利用して新しい原理を提案し、実証した。

ガリウム砒素系の半導体を用いて、発光体としてインジウム砒素量子ドットが配置された光導波路上に左型の格子が配置された構造(半導体人工キラルナノ周期構造)を作製した(図6.7.36(a)(b))。この試料の光励起発光スペクトルの右回り及び左回り円偏光成分を測定したところ、その強度は大きく異なり、観測された円偏光度は最大26%に達した(図6.7.36(c))。これは、構造のキラリティーによって構造内部の円偏光真空場モード密度分布が左右で大きく非対称になった結果、量子ドットからの自然放出が円偏光化していることを示すものである。真空場分布の数値計算から予想される円偏光度の大きさは、実験値と良く一致した。この手法は、本来キラリティーを有しない物質を人工的に細工することで、大きなキラリティーを誘起し、それによって発光を円偏光にする新しい手法である。この研究結果は、Physical Review Lettersに掲載された[7]。また、この論文は、Physical Review FocusおよびNPG(Nature Publishing Group) Asia Materialsにハイライトされた。

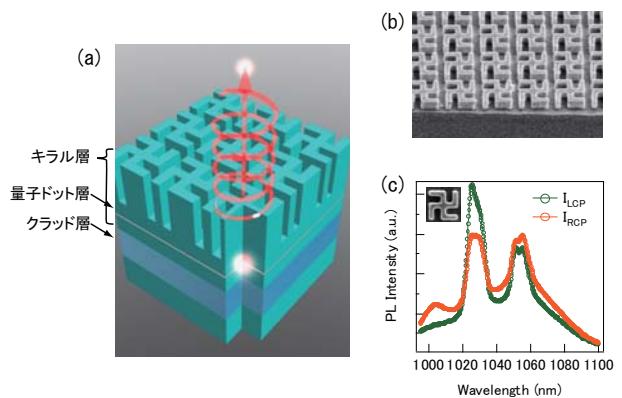


図 6.7.36: (a) 人工キラルナノ周期構造の模式図、(b) 人工キラルナノ周期構造の SEM 画像、(c) 左向き円人工キラルナノ周期構造の発光スペクトル

人工キラル構造による THz 旋光性の動的制御

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。我々は Si 基板上の擬二次元人工キラル格子に対して光励起を行うことで、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た。変調技術において応答速度は重要であり、緩和ダイナミクスの解明が必要である。そのために低繰り返しの光励起と高繰り返しの THz 検出を組み合わせた計測法を開発した。この方法により、通常の单一の繰り返し周波数の光パルスを用いた光学遅延では困難な、ns から ms までの広い時間スケールのダイナミクスを THz 領域で周波数分解して検出することが可能になった。その結果、キラル格子に対する光励起で生じるキラリティーの起源が、Si 基板内のキラル形状のキャリア分布であり、緩和時間がキャリア寿命だけでなくキャリア拡散による分布の均一化にも依存する、ということを明確に示すことに成功した。

NiO 反磁性共鳴による磁気テラヘルツ放射

非線形光学応答を用いた磁化のコヒーレントな制御は近年特に注目されているが、角運動量保存則の果たす役割についての理解は未だ十分とは言えない。本研究では特に結晶角運動量の果たす役割に着目し、結晶の離散対称性を反映して結晶角運動量も離散的な値をもってやり取りされる「ウムクラップ過程の角運動量版」がおきることを明らかにした。特に3回回転対称性が存在することによって初めて生じるプロセスが存在することがわかった[図6.7.37(a)]。

このような結晶の離散対称性が光誘起磁化に与える効果を示すために、実効的に3回回転対称性を持つマルチドメインの反強磁性体 NiO からの磁気放射についての実験を進めた[図6.7.37(b)]。この結晶に超短パルスレーザーを照射することでラマン的な非線形応答によって磁化が生じる。それからの放射

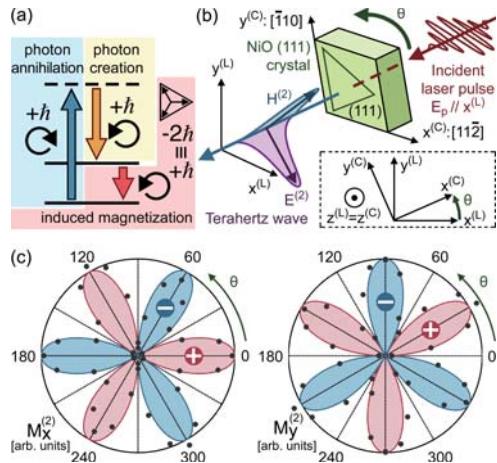


図 6.7.37: (a) ラマン過程による磁化誘起では右回り円偏光の光子を吸収して左回り円偏光の光子が放出された場合には $-2\hbar$ の角運動量が磁化に与えられるが、これは磁化ベクトルには直接与えられない。しかし 3 回対称の系から 3 \hbar の結晶角運動量を受け取ることでこれが磁化ベクトルの持つことができる角運動量 \hbar となり、磁化の誘起が可能になる。(b) 実験配置 結晶 (C) を実験系 (L) から角 θ だけ回転させている。(c) 誘起された磁化ベクトルの θ 依存性。実線は理論、黒点は実験によるものである。

によって磁化を観測したところ、理論的な選択則と磁化偏角の観測結果が非常に良い一致を見せた [図 6.7.37(b)] [6, 37]。

上記の議論によると、ある角運動量を転写する過程がある場合、必ずそれと逆符号で同じ大きさの角運動量転写過程が存在する。そのため偏光状態の定まったひとつの光パルスを用いた場合、直線偏波した磁化しか生成することができない。この困難を解決するために、偏光状態の異なる二つの光パルスを用意し、その偏光状態とパルス間隔を調整することで、NiO 結晶中に任意の偏波を持つスピニ波を生成することができることを示した [38]。

グラファイト薄膜からの THz 放射

グラフェンなどのナノカーボン材料は特異なキャリア輸送現象を示すため、近年注目を集めている。近年、ナノグラファイト薄膜において、ナノ秒パルス光の照射により入射光の波数の面内成分に応じた電流が流れるという”フォントンドラッグ効果”が観測されている。我々はグラファイト薄膜試料に対してフェムト秒レーザーを照射した時に THz パルス波の放射が起こることを発見した。さらに、励起光の偏光と THz 放射の偏光の関係を詳細に測定した(図 6.7.38)。この THz 放射の起源はフォントンドラッグ電流であり、グラファイトの結晶構造の対称性を反映したフォントンドラッグ効果のテンソル非零成分を考慮することで、THz 放射の偏光依存性が良く説明された [23]。

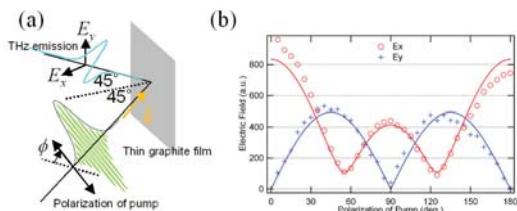


図 6.7.38: (a) THz 放射の偏光依存性測定の模式図。試料はガラス基板上の 20 層程度のグラファイト薄膜。(b) 偏光依存性の測定結果。プロットが測定結果、実線が対称性を考慮したフィッティング。

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 力所から取り出し、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と考察した [5]。

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が実現できる準備が整った。

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 [62]。

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（”フォトニング”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中心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] 五神真：第14回 松尾学術賞「レーザー分光法による固体における光量子物理学の研究」、(財)松尾学術振興財団、2010年10月28日。

<報文>

(原著論文)

- [2] T. Unuma, Y. Ino, M. Kuwata-Gonokami, G. Bastard, and K. Hirakawa: Transient Bloch oscillation with the symmetry-governed phase in semiconductor superlattices, *Phys. Rev. B* **81**, 125329/1-6 (2010).
- [3] T. Unuma, Y. Ino, M. Kuwata-Gonokami, E. M. Vartiainen, K.-E. Peiponen, and K. Hirakawa: Determination of the time origin by the maximum entropy method in time-domain terahertz emission spectroscopy, *Optics Express*, **18**, 15853-15858 (2010).

- [4] K. Yoshioka, T. Ideguchi, AndréMysyrowicz, and M. Kuwata-Gonokami: Quantum inelastic collisions between paraexcitons in Cu₂O, *Phys. Rev. B*, **81**, 041201/1-4(R) (2010).
- [5] N. Kuse, Y. Nomura, A. Ozawa, M. Kuwata-Gonokami, S. Watanabe, and Yohei Kobayashi: Self-compensation of third-order dispersion for ultrashort pulse generation demonstrated in an Yb fiber oscillator, *Optics Letters*, **35**, 3868-3870 (2010).
- [6] T. Higuchi, N. Kanda, H. Tamaru, M. Kuwata-Gonokami: Selection rules for light-induced magnetization of a crystal with threefold symmetry: The case of antiferromagnetic NiO, *Phys. Rev. Lett.*, **106** 047401/1-4 (2011).
- [7] K. Konishi, M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Arakawa, and M. Kuwata-Gonokami: Circularly Polarized Light Emission from Semiconductor Planar Chiral Nanostructures, *Phys. Rev. Lett.*, **106** 057402/1-4 (2011).
- [8] K. Yoshioka, E. Chae, and M. Kuwata-Gonokami: Transition to a Bose-Einstein condensate and relaxation explosion of excitons at sub-Kelvin temperatures, *Nature Communications* to be published

(国内雑誌)

- [9] 五神真: 「光学教育」、光学、Vol.39、No.4、pp.199-201 (2010).

(学位論文)

修士論文

- [10] 今村隆寛: モード同期ファイバーレーザーによる共振器増強テラヘルツ波発生 (2011年3月、東京大学大学院工学系研究科)
- [11] 織田拓磨: 単一分子分光測定による電荷移動遷移特性の環境揺らぎの観測 (2011年3月、東京大学大学院工学系研究科)
- [12] 朴仁用: 光伝導測定によるCu₂O励起子の解離過程探索 (2011年3月、東京大学大学院工学系研究科)

(著書)

- [13] M. Kuwata-Gonokami: High-Density Excitons in Semiconductors. In: Bhattacharya P, Fornari R, Kamimura H, (eds.), *Comprehensive Semiconductor Science and Technology*, **2** pp.213-255 Amsterdam: Elsevier

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [14] K. Konishi, N. Kanda, M. Kuwata-Gonokami: Polarization control with planer chiral grating structures, SPIE-The International Society for Optical Engineering, (Brussels, Belgium), April, 2010.

- [15] N. Kanda, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami: THz polarization control with chiral grating structures, The 7th Asia-Pacific Laser Symposium, (Jeju island, Korea), May, 2010.
 - [16] M. Kuwata-Gonokami: Advanced photons for condensed matter, The 4th Yamada Symposium Advanced Photon and Science Evolution, (Osaka, Japan), June, 2010.
 - [17] M. Kuwata-Gonokami: Stability of an ensemble of excitons in a quantum degenerate regime in a bulk semiconductor of Cu₂O - Search for Bose-Einstein Condensation of excitons, The 41th Winter Colloquium on the PHYSICS of QUANTUM ELECTRONICS, (Snowbird, USA), Jan., 2011.
 - [18] M. Kuwata-Gonokami: Search for exciton BEC in a Cu₂O crystal, ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultracold Atoms and Molecules, UCAM2011, (Koshiba Hall, Japan), Jan., 2011.
- 一般講演（口頭）
- [19] K. Konishi, M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Arakawa and M. Kuwata-Gonokami: Circularly-Polarized Light Emission from Semiconductor Planar Chiral Photonic Crystals, CLEO/QELS:2010, (San Jose, USA), May, 2010.
 - [20] N. Kuse, M. Kuwata-Gonokami, Y. Nomura, S. Watanabe, Y. Kobayashi: Experimental Study of Pulse Evolution in a 30-fs Mode-Locked Yb-Fiber Oscillator, CLEO/QELS:2010, (San Jose, USA), May, 2010.
 - [21] K. Yoshioka, T. Ideguchi, and M. Kuwata-Gonokami: Quantum mechanical inelastic collision of cold paraexcitons in cuprous oxide, International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed and Nano Materials, EXCON'10, (Brisbane, Australia), July, 2010.
 - [22] J. Omachi, T. Suzuki, N. T. Long, K. Yoshioka, N. Naka, and M. Kuwata-Gonokami: Mid-infrared dielectric response of electron-hole droplets in diamond, International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed and Nano Materials, EXCON'10, (Brisbane, Australia), July, 2010.
 - [23] N. Kanda, P. Obraztsov, Y. Okane, T. Higuchi, K. Konishi, A. V. Tyrnina, Yu. P. Svirko, and M. Kuwata-Gonokami: Terahertz Emission from Nano Carbon and Graphite Films, Nanocarbon Photonics and Optoelectronics (NPO) 2010, (National Park Koli, Finland), Aug., 2010.
 - [24] H. Hirabayashi, N. Naka, K. Tanaka, M. Kuwata-Gonokami, Y. P. Svirko, and Alexander N. Obraztsov: Three-dimensional Raman imaging of diamond nanotips, International Workshop "Nanocarbon Photonics and Optoelectronics" (National Park Koli, Finland), Aug., 2010.

- [25] K. Konishi, M. Kuwata-Gonokami, M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, and Y. Arakawa: Circularly-Polarized Photoluminescence from Semiconductor Chiral Photonic Nanostructures, NANOMET2011, (Tirol, Austria), Jan., 2011.

- [26] K. Yoshioka, and M. Kuwata-Gonokami: Quantum degenerate state of trapped 1s paraexcitons in Cu₂O at sub-Kelvin temperature, 5th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems (ICSCE-5), (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland), Feb., 2011.

一般講演（ポスター）

- [27] K. Yoshioka, T. Ideguchi, and M. Kuwata-Gonokami: Quantum-mechanical inelastic collisions of Wannier-Mott excitons, CLEO/QELS:2010, (San Jose, USA), May, 2010.
 - [28] K. Yoshioka, I. Park, M. Kuwata-Gonokami: Photoconductivity of Cu₂O in the presence of high density 1s paraexcitons, International Workshop on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors, NOEKS10, (Paderborn, Germany), Aug., 2010.
 - [29] J. Omachi, T. Suzuki, K. Kato, K. Yoshioka, N. Naka, and M. Kuwata-Gonokami: Observation of polyexcitons in diamond, International Workshop on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors, NOEKS10, (Paderborn, Germany), Aug., 2010.
 - [30] N. Naka, Y. Hazama, T. Kitamura, J. Omachi, M. Kuwata-Gonokami, H. Stoltz: Photoluminescence study on excitonic fine structure in diamond, International Workshop on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors, NOEKS10, (Paderborn, Germany), Aug., 2010.
 - [31] N. Kanda, K. Konishi, M. Kuwata-Gonokami: Dynamics of Photo-induced Terahertz Optical Activity in Metal Chiral Gratingsl, NANOMET2011, (Tirol, Austria), Jan., 2011.
 - [32] K. Yoshioka, E. Chae, and M. Kuwata-Gonokami: Stability of Bose-Einstein condensation of dark excitons in cuprous oxide ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultracold Atoms and Molecules, UCAM2011, (Koshiba Hall, Japan), Jan., 2011.
- (国内会議)
- 招待講演
- [33] 五神真: 先端レーザー技術による光物理学の展開、日本学術会議主催公開シンポジウム「先端フォトニクスの展望」、日本学術会議講堂、2010年4月

- [34] 五神真: 科学技術イノベーションと高度科学技術人材育成の課題、北海道大学 情報科学研究科 グローバル COE プログラム 「知の創出を支える次世代 IT 基盤拠点」第3回 若手研究者支援のための産学協同 GCOE 国内シンポジウム 2010、北海道大学、2010 年 10 月
- [35] 五神真: 高密度電子正孔系の物質相一励起子ガスの基底状態を求めて、日本物理学会第 66 回年次大会、新潟大学五十嵐キャンパス、2011 年 3 月
- 一般講演（口頭）
- [36] 久世直也、野村雄高、小澤陽、五神真、小林洋平: Yb ファイバーレーザーによる光周波数コムの開発、第 71 回応用物理学会学術講演会、長崎大学、2010 年 9 月
- [37] 樋口卓也、神田夏輝、清水裕勝、田丸博晴、吉岡孝高、五神真: 反強磁性体マグノン共鳴による差周波発生理論、日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学、2010 年 9 月
- [38] 神田夏輝、清水裕勝、樋口卓也、小西邦昭、吉岡孝高、五神真: 反強磁性マグノンのベクトルコヒーレント制御による THz 放射制御、日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学、2010 年 9 月
- [39] 朴仁用、吉岡孝高、五神真: 可視光照射による亜酸化銅励起子の再励起効果日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学、2010 年 9 月
- [40] 宮下顕、吉岡孝高、五神真: 音響光学分散フィルタによる Cu₂O 励起子励起過程のコヒーレント制御、日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学、2010 年 9 月
- [41] 挟間優治、中暢子、田中耕一郎、D, Heinrich Stolz、北村鉄人、大間知潤子、五神真: ダイヤモンドにおける励起子微細構造の検証、日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学、2010 年 9 月
- [42] 鵜沼毅也、井野雄介、五神真、平川一彦: GaAs/AlAs 超格子における THz 放射電場波形の時間原点とプロット振動の位相 III、日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学、2010 年 9 月
- [43] 織田拓磨、吉岡孝高、竹田研爾、五神真: 単一ドナーアクセプター対の時系列光子相関計数測定、日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学、2010 年 9 月
- [44] 平林肇、中暢子、田中耕一郎、五神真、Y.P. Svirko, A.N. Obraztsov: ダイヤモンドナノチップのラマンイメージングと内部歪みの効果、日本物理学会第 66 回年次大会、新潟大学五十嵐キャンパス、2011 年 3 月
- 一般講演（ポスター）
- [45] 小西邦昭、野村政宏、熊谷直人、岩本敏、荒川泰彦、五神真: 半導体キラルナノ周期構造を用いた円偏光発光制御、ナノ量子情報エレクトロニクス公開シンポジウム、武田先端知ホール、2010 年 12 月
- [46] 朴仁用、吉岡孝高、五神真再励起光照射による亜酸化銅の励起子増強効果ナノ量子情報エレクトロニクス公開シンポジウム、武田先端知ホール、2010 年 12 月
- [47] 織田拓磨、吉岡孝高、竹田研爾、五神真单一ドナーアクセプター対の強度相関測定ナノ量子情報エレクトロニクス公開シンポジウム、武田先端知ホール、2010 年 12 月
- [48] 宮下顕、吉岡孝高、五神真位相変調された光パルスによる極低温高密度励起子の生成ナノ量子情報エレクトロニクス公開シンポジウム、武田先端知ホール、2010 年 12 月
- [49] 挟間優治、中暢子、五神真、田中耕一郎: 共鳴励起以下のダイヤモンドの励起子発光、日本物理学会第 66 回年次大会、新潟大学五十嵐キャンパス、2011 年 3 月
(セミナー等)
- [50] 五神真: 「動的相関光科学」領域紹介および「半導体における電子正孔系の物質相と光機能」、特定領域研究「光-分子強血同反応場の創成」領域および新学術領域研究「半導体における動的相関電子系の光科学」領域合同シンポジウム、日本科学未来館、2010 年 5 月
- [51] 五神真: 先端レーザー科学による物性科学の展開、渡部俊太郎先生退官記念会、学士会館、2010 年 6 月
- [52] 五神真: 光物理学の展開-光による物質相の量子制御と光科学-、東京大学大学院理学系研究科物理教室コロキウム、小柴ホール、2010 年 7 月
- [53] 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～、DYCE 若手道場 2010、兵庫県有馬温泉、2010 年 10 月
- [54] 大間知潤子: 中赤外誘導吸収測定によるダイヤモンド電子正孔液滴の形成と緩和ダイナミクスの観測、DYCE 若手道場 2010、兵庫県有馬温泉、2010 年 10 月
- [55] 宮下顕: 音響光学分散フィルタによる Cu₂O 励起子生成過程のコヒーレント制御、DYCE 若手道場 2010、兵庫県有馬温泉、2010 年 10 月
- [56] 神田夏輝: マグノンのベクトルコヒーレント制御による反強磁性体 NiO からの円偏光 THz 放射、DYCE 若手道場 2010、兵庫県有馬温泉、2010 年 10 月
- [57] 小西邦昭: 半導体人工キラル周期構造からの円偏光放射、DYCE 若手道場 2010、兵庫県有馬温泉、2010 年 10 月
- [58] 吉岡孝高: サブケルビン領域における高密度励起子の生成、DYCE 若手道場 2010、兵庫県有馬温泉、2010 年 10 月
- [59] 平林肇、中暢子、田中耕一郎、五神真、Y.P. Svirko, A.N. Obraztsov: CVD 法により作成されたダイヤモンドナノチップの 3 次元ラマン分光、第 21 回光物性研究会、大阪市立大学杉本キャンパス、2010 年 12 月
(ポスター)
- [60] 五神真: 電子正孔系の量子操作と量子演算機能探索、FIRST 量子情報処理プロジェクト全体会議 2010、ホテルニューフジヤ（熱海）、2010 年 12 月
- [61] 武村尚友、織田拓磨、大間知潤子、吉岡孝高、五神真: フォトンカウンティングストリークカメラを用いた光子相関測定、FIRST 量子情報処理プロジェクト全体会議 2010、ホテルニューフジヤ（熱海）、2010 年 12 月（ポスター）

- [62] 小西邦昭: 半導体キラルナノ周期構造による円偏光発光制御、FIRST 量子情報処理プロジェクト全体会議 2010、ホテルニューフジヤ（熱海）、2010 年 12 月（ポスター）
- [63] 五神真: 電子正孔・励起子量子凝縮相の光操作と制御、第 4 回 DYCE シンポジウム、京都大学、2011 年 1 月
- [64] 五神真: 先端フォトン科学グループの活動報告—加速するフォトンサイエンス、GCOE「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」中間報告会、東大工学部 2 号館、2011 年 2 月
- [65] 大間知潤子: ダイヤモンドにおける低温電子正孔相の探索、低温センター研究交流会、弥生講堂アネックス・セイホクギャラリー、2011 年 3 月

6.8 能瀬研究室

脳・神経系は多数の神経細胞がシナプスという構造を介して連絡した複雑な回路である。このなかを神経インパルスが伝わることが、脳機能の基本であると考えられているが、その実体はほとんど謎のままである。一体、どのような回路の中を、どのようにインパルスが伝わることにより高度な情報処理が可能になるのか？また、複雑な神経回路が正確に形成されるための設計図は私達の遺伝子にどのように記述されているのか？当研究室では、ショウジョウバエの神経系をモデルとし、これらの問題に迫っている。

これまでに、バイオイメージングや遺伝子操作を用いて軸索やシナプスを可視化することにより、神経の配線が形成される仕組みを明らかにしてきた。現在、この研究を回路レベルに発展させ、複数の神経配線からなる機能的な神経回路が、どのようにして構築され、機能するのかを調べる研究を進めている。特に、近年急速に発達した光技術と遺伝子工学とを組み合わせた手法を用いて、神経細胞の活動を可視化・操作する実験を行なっている。また、このような実験に理論的考察を加えることにより、神経回路の動作原理を探る研究も開始した。配線パターンの分かっているモデル神経回路において、個々の神経細胞の活動をリアルタイムに追跡することにより、神経回路の情報処理の仕組みを明らかにすることが私達の夢である。

6.8.1 シナプス形成の生物物理

シナプスは神経細胞が他の神経細胞や筋肉細胞と接合、連絡する部位で、神経伝達の中心的位置を占める。にもかかわらず、秩序だった分子装置の集積であるシナプス構造がどのようにしてできていくのか、についてのわれわれの理解は限られている。当研究室ではショウジョウバエ神経筋シナプスをモデルとして、シナプス形成の分子機構を探っている。

神経活動操作によるショウジョウバエ神経筋シナプスの可塑的発達の解析（濱谷裕樹、福井愛、能瀬聰直）

神経細胞間は、シナプスと呼ばれる特殊な構造を形成している。このシナプスでの情報伝達過程が脳の情報処理の中心的な役割を担っている。このシナプスは活動依存的に、構造や機能を変化させる性質を持っており、学習や記憶といった脳の可塑性を生み出していると考えられている。従って、シナプスの可塑的変化のメカニズムを理解することは、脳・神経系の機能を理解する上で非常に重要であると考えられている。

我々はショウジョウバエ幼虫の神経筋結合を用いて、シナプス可塑性の研究を行なっている。シナプス可塑性の研究において、神経活動を人為的に操作することが重要であるが、先行研究では、突然変異

体を用い、神経活動を恒常に変化させる手法のみが用いられてきた。しかし、発生段階のどの時期における神経活動がシナプス可塑性に重要なかについてはほとんど明らかになっていたなかった。そこで本研究では、光や温度に依存して神経活動を亢進する分子ツール（ChR2 および TRPA1）を用いて、神経活動を、特定の時期に一時的に活性化させることによって、シナプス可塑性を誘導する実験系を開発した。この実験系を用い、ショウジョウバエ胚・幼虫の神経細胞の活動を一過的に亢進させ、その数日後の神経筋シナプスの形態を解析した結果、孵化前後の時期が、シナプス構造（ブトン）の形態可塑性を引き起こすのに重要な時期であることを見いだした。さらに、シナプス前部での神経活動亢進、ブトンの数の増加に応じて、シナプス後細胞において、神経伝達物質受容体である GluRIIA や、転写因子 Lola の転写量が減少した。この結果はシナプス前細胞での活動依存的変化が後細胞に誘導する分子的変化の一端を明らかにするものである。

これまで、ショウジョウバエの神経筋結合部を用いたシナプス可塑性の研究は多数報告されてきた。しかし、突然変異体を用いて恒常に神経活動が活性化された場合のものが主だった。そのため発生過程におけるどの時期の神経活動がシナプス可塑性の誘導に特に重要なかについては未解明だった。本研究では、ChR2 と dTRPA1 を用いて、神経活動を特定の時期に、一時的に刺激することにより、シナプス可塑性を引き起こすことに成功した。その結果、孵化前後が、シナプス可塑性を引き起こすのに重要な時期のひとつであることが示された。今後、様々な時期に刺激を加えることによって、時系列的にシナプス可塑性と発生過程の関係性をより詳しく解析することが可能である。

6.8.2 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。

感覚神経シナプスの形成とその発達可塑性（奥沢暁子、高坂洋史、能瀬聰直）

ショウジョウバエ幼虫は、筋収縮の伝播からなるぜん動運動により前進する。ショウジョウバエ幼虫は頭尾方向に並んだ 11 の体節からなり、体節の筋収縮が順次尾端から頭端に向かって隣接体節を伝播することでぜん動運動が達成される。この体節間の協調した筋収縮パターンは中枢神経回路で生成されるが、感覚神経による中枢へのフィードバックによってより環境に適合した運動が実現される。

我々は、ショウジョウバエの胚から幼虫への発達過程において、この感覚神経フィードバック入力が運動回路の形成にどのような役割を果たすかについて研究を進めている。前年度までに、胚期から幼虫にかけてフィードバック感覚神経細胞の中核投射発達過程が運動機能と相関性を持って発達することが明らかとなつたため、感覚神経細胞の投射の形態の発達と運動機能の関係についてさらに詳しい検討を行つた。

まず、感覚神経終末の発達が、行動の成熟に依存する可能性について検証した。感覚細胞は体壁の筋収縮を検知していると考えられる。感覚神経細胞の活動が神経末端の構造変化に与える影響を検討するために、筋収縮ができない mhc (筋タンパク質ミオシン重鎖) 欠失変異体と、感覚神経細胞の感覚受容能が低下した nompC (感覚受容チャンネルタンパク質) 欠失変異体において、脂溶性蛍光色素による単一細胞ラベリング法により感覚神経末端の形態を解析した。高解像度での感覚神経軸索終末の可視化により、筋収縮、または感覚受容を阻害したときに感覚神経終末部での分枝の刈込みが正常に行われないことが明らかとなつた。このことから、感覚神経終末の発達には筋収縮の受容による活動依存的なシグナルが必須であることが明らかとなつた。

感覚神経の中核内投射形成過程を分子レベルで明らかにするために、感覚神経細胞の投射が正しく行われるために必要な遺伝子のスクリーニングを開始した。感覚神経細胞のみで、様々な遺伝子の強制発現や発現抑制を行なうことで、感覚神経の中核内投射やぜん動運動にどのような影響が生じるかを解析している。

感覚神経中枢投射は、感覚運動回路の一要素として運動に関わっている。しかし、感覚神経が情報を受け渡す先である中枢内の神経はいまだに同定されていない。そこで後項に示すシナプス接続の可視化技術 (GRASP) を用いて、感覚神経の下流神経細胞の探索を並行して行なっている。

感覚入力に依存した運動回路の機能発達（伏木彬、高坂洋史、能瀬聰直）

神経回路が成熟する過程には、環境からの刺激または自発的な発火活動に応じて神経間の接続を再構成する時期があり、この可塑的な現象は神経間の形態的かつ機能的な変化を伴いながら活動依存的に組織化されると考えられている。動物の生命維持活動の基本となる歩行や遊泳といった定型的な運動は、中枢パターン生成器 (CPG: Central Pattern Generator) と呼ばれる神経回路によって制御されており、CPG によって規定される運動パターンは感覚入力により調整されることで、外界の状況に適した行動が実現される。しかし、運動機能の発達過程における感覚入力の役割及びその長期的な影響についての細胞・分子機構はほとんど明らかにされていない。

本研究では、ショウジョウバエ胚・幼虫を用いて、CPG によって制御されているぜん動運動の発達過程における感覚受容の役割を調べた。先行研究より、胚

発生後期に運動パターンが著しく発達することが分かっており、回路が劇的に変化するこの時期が最も可塑性が高いと予想される。そこで、胚発生後期において感覚神経細胞の活動を操作し、運動機能が成熟する過程での感覚入力の影響を調べた。

ショウジョウバエの感覚神経細胞は三種類に分けられるが、その中でも運動制御において詳細が明らかにされていない chondotonal neurons (chos) に着目した。まず、ぜん動運動を制御する神経回路が完成している時期での chos の役割を調べた。chos 特異的に遺伝子発現を誘導する系統を用いて chos を細胞死誘導及び一時的な神経伝達阻害をしたところ、対照個体と比べてぜん動運動が遅くなつた。一方、chos の神経活動を強制亢進させた場合も対照個体と比べて運動が遅くなっていた。以上の結果は、chos の活動が運動回路の制御に重要であること、また単調にぜん動運動の速さと対応するわけではないことを示している。

次に chos の活動が運動回路の発達に与える影響を調べた。その結果、胚発生後期の 6 時間（産卵後 15 時間から孵化直前の産卵後 21 時間）に chos の神経活動を抑制した場合、その影響が三齢幼虫期（産卵後 96 時間）においても残存し、対照個体と比べてぜん動運動が遅くなることが分かった。このことは、運動機能を獲得する過程で、chos が筋収縮の情報を CPG へフィードバックすることが重要であることを示唆する。そこで、より短期間抑制した場合の可塑的な効果を調べることにより、胚発生後期の中でも特定の時期での chos の活動が重要であるかを探った。産卵後 15 時間から 21 時間を 2 時間ごとの区画にわけ、この短い時間だけ chos の神経活動を抑制したところ、産卵後 15 時間からの 2 時間、および 19 時間からの 2 時間で抑制した場合は、対照個体と比べて運動の差異が見られなかつたが、産卵後 16, 17, 18 時間から 2 時間抑制した場合は、6 時間抑制した場合と同様、ぜん動運動が遅くなることが分かった。これらの実験結果より、chos の胚発生後期における活動はぜん動運動機能の発達において通常運動を促すような働きをしており、特定の時期での操作が運動パターンに可塑性を及ぼすことが分かった。また、胚発生後期の中でも、感受性の高い時期「臨界期」が存在することが明らかになつた。

今後は、この可塑性の起きた個体の中枢神経系もしくは末梢神経系の回路網の形態的な変化に着目する。たとえば、運動に異常が生じたのは、感覚神経細胞の伝達効率が落ちたためといった要因が予想される。可塑性の起きた個体の回路網を観察することで、運動機能が成熟する過程での感覚入力の役割をさらに詳しく検証する予定である。

シナプス接続マーカー GRASP を用いた運動神経細胞支配性介在神経細胞の探索（板倉由季、高坂洋史、高須悦子、能瀬聰直）

神経回路の動作原理を明らかにするためには、回路内に含まれる神経細胞群を同定し、それらがどのように接続されて回路を作っているのか、またその

回路が機能するにあたってそれぞれの神経細胞がどのように活動するのかを調べることが必要である。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、まずこの回路内の未知の神経細胞を同定するべく、既に同定されている運動神経細胞の上位の神経細胞の同定に取り組んだ。方法としては、GRASP システムを用いた。GRASP システムとは、蛍光タンパク質 GFP を非蛍光性の sp-GFP1-10 と sp-GFP11 の 2 つに分割し、それらが接触すると GFP が再構成して蛍光性が生じるという原理を用いて、2 つの細胞が近接しているかどうかを解析する手法である。ある神経細胞群の細胞表面に sp-GFP1-10 を発現させ、別の神経細胞群の表面に sp-GFP11 を発現させる。両者の間でシナプスが形成されると、互いの細胞膜が十分近接するため、そのシナプス近傍で GFP が再構成されて蛍光を発するようになる。これにより運動神経細胞とシナプスを作る細胞群を見つけ出し、その性質や機能を調べるなどして運動神経細胞の上位の神経細胞の同定を行うことが可能になる。

まず運動神経細胞に sp-GFP11 を発現し、同時に cha-gal4 系統によりアセチルコリン作動性神経細胞で sp-GFP1-10 を発現させたところ、幼虫の神経節内において GRASP シグナルを検出することができた。これは、運動神経細胞とアセチルコリン性神経細胞との間のシナプス部の可視化に成功したことを意味する。

cha-gal4 系統は、多くの神経細胞で遺伝子発現を誘導する。回路内の神経細胞を詳細に解析するため、より少数の神経細胞群でのみ遺伝子発現を誘導する gal4 系統を用いて GRASP によるスクリーニングを行なったところ、運動神経細胞との間で GRASP シグナルを発する系統をいくつか得ることができた。

こうして運動神経細胞の上位神経細胞の候補として挙がった神経細胞群に関して、どのような活動パターンを示すのかをカルシウムイメージング法によって調べた。これはカルシウムイオンと結合すると蛍光性を生じるタンパク質 G-CaMP を用い、神経細胞の興奮をそれに伴って生じる細胞内カルシウムイオン濃度の上昇によって可視化する手法である。ある gal4 系統において、可視化される体節ごとに存在する特定の神経細胞群において、神経活動が尾側頭側に向かって順番に伝播していく様子が観察された。観察された活動は運動神経細胞がぜん動運動に伴って示す活動パターンと類似しているので、この細胞群は運動神経細胞の活動制御に関わっている可能性が高い。

今後はこれらの神経細胞群の機能を調べるために、その活動の人為的な活性化や抑制により幼虫の運動への影響を与えるかについて解析を行なう計画である。さらにその際の運動神経細胞の活動パターンへの影響を調べることで、これらの神経細胞がまさに運動神経細胞の活動を直接引き起こすのか、もしくは他の神経細胞と協調して何らかの調節を行っているのかといったことを明らかにできると考えている。

運動制御を担う介在神経細胞の同定とその機能解析 (高坂洋史、高須悦子、能瀬聰直)

運動制御に関する介在神経細胞を同定するために、カルシウムイメージング法を用いて gal4 系統のスクリーニングを行なった。その結果、中枢神経内の少数（体節あたり約 20 個）の神経細胞に発現し、ぜん動運動パターンに類似した伝播活動パターンを示す gal4 系統の同定に成功した。GRASP システムを用いた解析によりこれらの介在神経細胞が、運動神経細胞を直接支配していることが示唆された。遺伝的モザイクを用いた単一細胞解析により、この細胞は近傍の体節にのみ神経線維を伸展する局所神経細胞であることが分かった。これらの解剖学的知見から、この細胞が体節内の局所回路において運動制御をしていると考えられる。この細胞の機能を調べるために、温度感受性ダイナミンタンパク質を用いて、この介在神経細胞の活動を抑制したところ、蠕動運動の速度が低下するという異常が現れた。逆に、温度感受性 TRP チャンネルタンパク質を用いて活動を恒常に亢進させてもぜん動運動の速度が低下したことから、この介在神経細胞の適切な活動が運動制御において必要であることが分かった。これまで、運動制御に関わる介在神経細胞の中で、遺伝的な操作が可能なものは限られていた。この介在神経細胞の同定により、運動発達過程の遺伝学的解析が大きく進展すると考えられる。

6.8.3 神経回路の活動ダイナミクス

神経回路は時空間的な活動パターンを生成することで機能を生みだす。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高速に制御できるようになった。我々はこれらの技術をショウジョウバエ幼虫の中枢神経系に適用することによって、神経回路の動的特性の解明を目指している。

ショウジョウバエ幼虫の運動回路における機能局在の解析（中川義章、高坂洋史、能瀬聰直）

中枢神経回路は多様な神経細胞によって構成され、その各々が特有の活動パターンを示すことにより、回路全体として時空間的活動パターンが生起する。回路内の多彩な活動パターンを分析するために、神経活動のイメージングと光制御を行なった。まず、幼虫の神経回路全体の活動パターンを調べるために、神経系全体に G-CaMP を発現させ神経活動の可視化を行った。G-CaMP とはカルシウム (Ca^{2+}) 感受性蛍光タンパク質である。G-CaMP を使うことにより神経活動を蛍光強度変化として捉える事ができる。経時的な蛍光測定の結果、以下 3 点の特徴的な活動パターンが中枢神経系の神経節内で観測された。

活動パターン 1. 頭尾軸方向の活動伝播

活動パターン2. 神経節尾端部で局所的な活動

活動パターン3. 神経節尾側数体節のみの活動

これら3つの活動パターンがどのようにぜん動運動に関与するのか以下具体的に調べた。

活動パターン1に関して、神経活動と筋収縮活動を同時に測定するとこの活動パターンと筋肉のぜん動運動が完全に一致したことから、これは、ぜん動運動パターンを直接反映した神経活動パターンであると考えられる。

次に、活動パターン2と活動パターン1を比較した結果、有意な頻度で、活動パターン2が活動パターン1に先行して起こったことから、活動パターン2がぜん動運動の開始に関係することが示唆された。活動パターン2が見られる部位を局所的に損傷させたところ、筋肉が全く動かなくなったことから、活動パターン2はぜん動運動に必要であることが示唆された。活動パターン2の活動を詳細に見たところ、活動パターン2から伸びる神経繊維が活動パターン3の頭側境目まで上行して伸びていることが分かった。

活動パターン3に関して、神経活動と筋収縮活動を同時に測定した結果、活動パターン3はぜん動運動の開始期に見られる尾端筋収縮と対応することが分かった。神経細胞全体に Channelrhodopsin2 (ChR2) を発現させ、活動パターン3の活動部位活性化を行った。ChR2は青色光を照射すると神経細胞内に活動電位を生じ神経細胞を興奮させる。活動パターン3の頭側境目の神経細胞を ChR2 で興奮させたところ、ぜん動運動が起きた。この結果は神経全体ではなく運動神経細胞だけに ChR2 を発現させた時でも得られたことから、活動パターン3の境目にある運動神経細胞を活性化するとぜん動運動が起きることが分かった。

これらの結果から、ぜん動運動の開始は、1. 神経節尾側数体節の活動上昇、2. 神経節尾端及び、そこから上行する神経線維の活動上昇、3. A4 体節付近での運動神経細胞の活動上昇、というステップを経て誘導されると考えられる。

ハロロドプシンを用いた神経活動ダイナミクスの解析（稻田健吾、高坂洋史、高須悦子、能瀬聰直）

ある特定の神経細胞の活動を一過的に抑制することで、その細胞の役割や回路全体のダイナミクスを調べることができる。これまで、温度感受性タンパク質を用いた神経活動の抑制法が広く用いられてきた。温度制御には数秒を要するため、回路のダイナミクスを秒単位より細かい時間スケールで解析には、温度感受性タンパク質は適していない。近年発達した、ハロロドプシンを用いた光による神経活動抑制法はそれを補うものであり、回路のダイナミクスを解析する有用なツールである。我々は、ハロロドプシンを発現するショウジョウバエ系統を作成し、ぜん動運動のダイナミクスの解析を進めた。

まず、運動神経細胞にハロロドプシンを発現させ、光照射を行なったところ、筋肉の弛緩が起こった。このことから、ハロロドプシンがショウジョウバエに

おいても機能することが分かった。

次に、運動神経細胞の活動の一過的な抑制がぜん動運動に与える効果を調べた。ぜん動運動は、尾端から頭端に向けて伝播する局所的筋収縮の波である。局所的筋収縮が伝播している途中で運動神経細胞の活動を抑制すれば、当然運動は停止するが、我々が注目したのはその後、どこから運動が再開するのかという点である。2つの可能性が考えられる。運動出力がなくても介在神経細胞を介して回路内を神経活動が伝播するならば、運動の再開は新しく尾端から起こると予想される。一方、運動出力がないと次の体節へ活動が引き継がれない場合は、運動の再開は光によって停止した体節から起こると考えられる。ハロロドプシンを用いて、運動神経細胞を一過的に活動抑制したところ、興味深いことに、運動の再開は、光によって停止していた体節から起こった。このことは、運動神経細胞の活動が隣接する体節への活動伝播に必要であることを示唆すると同時に、回路内に状態を保持する機構が存在することを示している。

上記の光刺激は、全ての運動神経細胞の活動を抑制するため、隣接する体節への活動が伝播しなかつたのが、1. 停止した体節から隣接体節へのシグナルがないためなのか、2. 隣接した体節の運動神経細胞が抑制されたためなのか区別できない。そこで、刺激光を集光させることで、より局所的な神経活動抑制を行なった。單一体節の活動を抑制した場合、1ならば、停止した体節から運動が再開するはずである。一方、2ならば、隣接した体節の活動から再開すると考えられる。レーザーを用いて局所的な活動抑制を行なったところ、ぜん動運動は停止した体節から再開した。このことは、運動神経細胞の活動自体が隣接体節の運動神経細胞の活動に必要であることを見ている。

カルシウムイメージング法を用いた中枢内介在神経細胞の活動解析（澤井貴史、高坂洋史、能瀬聰直）

神経回路は複数の神経細胞から構成されており、これらの神経細胞が活動を時空間的に変化させることによって様々な機能を生み出すと考えられている。これまでに個々の神経細胞の活動パターンに関する知見は多く得られているが、複数の神経細胞から構成された神経回路が様々な機能を生み出す仕組みについて明らかになっていることは少ない。そこで、本研究ではショウジョウバエ幼虫の腹部神経節においてカルシウムイメージングを用いて、回路内の様々な神経細胞群の活動の可視化を行なった。

ショウジョウバエ幼虫の中枢神経系内の神経細胞は、大きくわけて2種類ある。筋肉細胞にシナプスをつくり、筋収縮を引き起こす運動神経細胞と、運動神経細胞以外の介在神経細胞である。運動神経細胞については解剖学的、生理学的に詳しく研究されている。当研究室では、幼虫のぜん動運動を反映して、中枢神経系において運動神経細胞の活動が尾端から頭端へと順次伝播していく様子を観察している。しかし、介在神経細胞の活動や機能生成機構などに

ついてはほとんど明らかになっていないため、本研究では介在神経細胞に焦点を当てた。

遺伝学的手法である Gal4-UAS システムを用い、周囲の Ca²⁺-濃度に応じて蛍光強度が変化する G-CaMP タンパク質を特定の細胞でのみ発現させることで神経活動を光により測定するカルシウムイメージングを行った。これまでに特定の細胞群で発現する Gal4 系統が多数作成されている。本研究ではカルシウムイメージングを用いて、神経活動のパターンから Gal4 系統のスクリーニング（探索）を行った。その結果、振動性の活動を示す少数の細胞に発現する gal4 系統を見出した。

次に、この振動性の神経活動の役割について検討を行った。幼虫はぜん動運動によって移動するが、この運動は筋収縮の伝播が繰り返し起こることで引き起こされる。そこで、振動性の神経活動と体壁の筋収縮を同時に可視化したところ、神経活動と体壁の筋収縮伝播が同調して起こる様子が観察された。このことは、振動性の神経活動がぜん動運動のタイミング生成を反映している可能性を示唆する。

この同調性について以下の定量解析を行った。データ (original)において、神経活動の上昇と筋収縮の発生が互いに 3 秒以内のときに生じたイベントを相關ありとして、その頻度を算出した。一方、比較対象 (shuffle) として、神経活動のデータを前半・後半を入れ替えて筋収縮の発生との間の相関を求めた。Shuffle では、神経活動、および筋収縮のそれぞれの発生は original と同じだが、相互関係が異なっている。各個体における original と shuffle の相関率を paired-t test を用いて検定した結果、神経活動の振動と筋収縮の波に時間的な相関があるという結果が得られた。（p < 0.001）

今後、この振動性の神経細胞群の構造や機能を免疫染色法等を用いて詳細に解析していく予定である。

6.8.4 その他

今年度の研究は以下の科学研究費補助金によって支援された。ここに記し、謝意を表する。

- ・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（代表：能瀬聰直）」、計画研究「時空間パターンを生み出すメゾ回路の作動原理」（研究代表者：能瀬聰直）
- ・若手研究（B）
「局所神経回路形成による運動機能獲得過程の解明」（研究代表者：高坂洋史）

＜報文＞

(原著論文)

- [1] Morimoto T, Nobechi M, Komatsu A, Miyakawa H and Nose A. Subunit-specific and homeostatic regulation of glutamate receptor localization by CaMKII in Drosophila neuromuscular junctions. *Neuroscience* 165, 1284-1292 (2010).

- [2] Inaki, M, Shinza-Kameda, M, Ismat, A., Frasch, M and Nose, A. Drosophila Tey represses transcription of a repulsive cue Toll and generates neuromuscular target specificity. *Development* 137, 2139-2146 (2010).

(学位論文)

- [3] 稲田健吾 : Optical dissection of neural dynamics in Drosophila larvae with halorhodopsin (修士論文、新領域創成科学研究科)
- [4] 中川義章 : ショウジョウバエ幼虫の運動回路における機能局在の解析 (修士論文、新領域創成科学研究科)
- [5] 濱谷裕樹 : 神経活動操作によるショウジョウバエ神経筋シナプスの可塑的発達の解析 (修士論文、新領域創成科学研究科)
- [6] 伏木彬 : 感覚入力に依存した運動回路の機能発達 (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., Nii, R., Nakagawa, Y., Inada, K. and Nose, A.: Imaging activity propagation in the larval motor circuits that regulate peristalsis. NeuroFly2010 “13th European Drosophila neurobiology conference”, 2010.9.1-5. Manchester, UK
- [8] Okusawa, S., Kohsaka, H. and Nose, A.: Formation and plasticity of feedback neurons for Drosophila larval peristalsis movements. Korea University - The University of Tokyo 1st Joint Workshop on Bio-Soft Matter, 2011.2.21-23, Tokyo
- [9] Kohsaka, H., Nii, R., Nakagawa, Y. and Nose, A.: Imaging and manipulating neural activities within the motor circuit of the Drosophila larvae. Korea University - The University of Tokyo 1st Joint Workshop on Bio-Soft Matter. 2011.2.21-23, Tokyo

招待講演

- [10] Inaki, M., Shinza-Kameda, M., Frasch, M., and Nose, A.: Generation of synaptic specificity by target repulsion Roles and transcriptional regulation of local inhibitory cues. Cold Spring Harbor Asia Francis Crick Symposium on Neuroscience, 2010.4.12-17, Suzhou, China
- [11] Nose, A.: Dynamics of molecules, synapses and circuits that generate motor function. Korea University - The University of Tokyo 1st Joint Workshop on Bio-Soft Matter, 2011.2.21-23, Tokyo

(国内会議)

一般講演

- [12] Inada, K., Kohsaka, H., Takasu, E. and Nose, A.: Temporal perturbation of neural activity in Drosophila larvae undergoing locomotion. 第 33 回日本神経科学大会、2010.9.2-4、神戸

- [13] Nakagawa, Y., Kohsaka, H. and Nose, A.: Functional localization of neuronal components controlling larval peristaltic movements in *Drosophila*. 第33回日本神経科学大会、2010.9.2-4、神戸
- [14] 能瀬聰直：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「メゾ神経回路」第一回領域会議、2010.10.19、熱海

招待講演

- [15] 能瀬聰直：光で探るショウジョウバエ運動回路の作動原理、新学術領域「分子行動学」ワークショップ、2010.8.18、福岡
- [16] Kohsaka, H., Nii, R., Nakagawa, Y., Inada, K. and Nose, A.: Imaging activity propagation in the *Drosophila* motor circuits that regulate larval peristalsis. Neuro 2010 神経科学学会シンポジウム、2010.9.3、神戸
- [17] 能瀬聰直：光操作によるショウジョウバエ運動回路の機能解剖、生理研光操作研究会、2010.9.10、岡崎

(セミナー)

- [18] 高坂洋史：神経回路の時空間活動パターンのモデル化、脳科学若手の会ワークショップ、2010.4.3-4、埼玉
- [19] 能瀬聰直：運動機能を生む分子・シナプス・回路のダイナミクス、慶應大 brain club、2010.6.4、東京
- [20] 能瀬聰直：メゾスコピック神経回路から探る脳の情報処理基盤、新領域研究科、学融合セミナー、2011.1.25、柏

(集中講義)

- [21] Nose, A.: "Axon Target recognition" 沖縄科学技術大学院大学 Okinawa Institute of Science and Technology, Developmental Neurobiology Course, 2010.7.12-23, 沖縄

(新聞報道)

- [22] 日本経済新聞（2011年3月20日）ミクロで観る生命、4. 成長するハエの卵、神経回路ができる瞬間

6.9 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変化を解析する。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。

6.9.1 筋肉ミオシン1分子の弾性とステップサイズの測定

筋肉の力の発生源は、ミオシンと呼ばれる数十nmの長さのタンパク質である。このミオシンが、アクチンと呼ばれるタンパク質に結合し、アクチン纖維を一方向に動かすことで力を発生する。このとき、ミオシン分子に内在するバネ的な構造部位を伸ばすことにより、力を発生している。また他のミオシンによりアクチンは継続的に移動するため、力を出し終えたミオシンのバネ構造部位は逆に押し縮められ、抵抗力を生むことが予想される。このように、各ミオシン分子のバネ弹性構造による収縮方向への力と抵抗力の総和が、外に取り出される筋肉の収縮力となる。故に「如何に抵抗力を抑えて、ミオシンの力を効率的に収縮力として伝達できるか?」が筋収縮運動のキーポイントである。従って、この筋収縮の分子ダイナミクスを理解するためには、ミオシン1分子の発生する力および抵抗力を捉える必要がある。そこで、我々はミオシンの弾性特性に着目した。なぜなら、弾性特性から収縮(+)方向に発する力とバネ弹性部位の伸び、また負方向に発する抵抗力とバネ弹性部位の縮みの関係を把握することができるからである。ミオシン1分子の弾性計測には、ピコニュートン・ナノメートルでの高精度な力・変位計測が必要になる。そこで本研究では、蛍光寿命が長く高輝度な量子ドットを用いた蛍光イメージングと、光ピンセットを用いた力計測を組み合わせた顕微鏡装置を開発した。グリーンレーザーにより励起された量子ドットの蛍光像と青LEDによるビーズの透過像は、CCDカメラ画面内の上下半分に各々、投影した。量子ドット1粒子は明滅する特徴があり、計測精度を下げる原因になるので、明滅の起きない数粒子が重合した量子ドットをアクチンに結合させ、その蛍光位置を2次元ガウスフィットによる画像解析で追跡し、ミオシン頭部の変位を計測した。一方、アクチン両端に結合させたビーズを光ピンセットによりトラップし、ミオシン頭部に作用する力を計測した。また、ミオシンをアクチンと結合させた後、アクチン両端を光ピンセットにより左右に繰り返し振ること

で、ミオシンの伸長・短縮を繰り返し行い、このときの力と変位波形を加算平均することにより、変位計測の精度を0.3 nmまで上げる事に成功した。このような高精度な計測により得られたミオシンの力-変位関係から、ミオシンの弾性率(曲線の傾き)が非線形であることが初めて判明した(図6.9.39)。この非線形な弾性特性から、ミオシンは力を発生するときはミオシン尾部(S2)の紐のような構造領域が伸びきり、楕円形状のミオシンとぶ部位が主に伸ばされ、硬いバネを伸ばしたときのような大きな力を出せる事がわかった(図6.9.39)。一方、力を出し終えた後は、S2位が紐のように柔らかくなつて、他の分子の力発生の邪魔にならないことで力発生の効率を上げている。我々が開発した高精度な蛍光1分子イメージング技術とレーザートラップ技術を融合させた計測により、筋肉の収縮を担うタンパク素子ミオシンには、このような巧みな機能が備わっており、筋肉がより大きな力を出し、かつ速く動く仕組みが解明された。

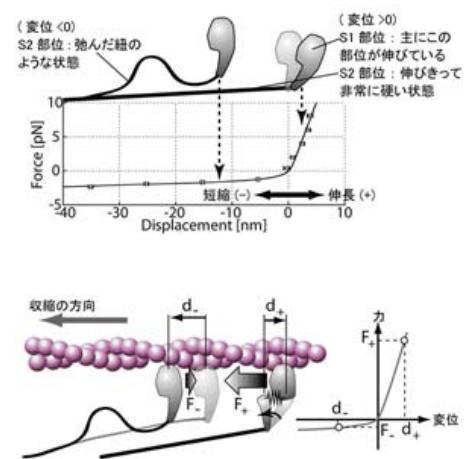


図 6.9.39: 筋肉ミオシンの非線形弾性(上図)と筋収縮の新しい力発生モデル(下図)

6.9.2 組換えヒト細胞質ダイニン1分子の力・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、ダイニンは微小管のマイナス端方向へ運動し、細胞膜から核付近までオルガネラを輸送し、キネシンは微小管上を反対方向に移動して核から細胞膜まで輸送を行なう。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な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“tag-of-war 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5pN以上であり、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。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。

6.9.3 ヘテロダイニンの運動特性

細胞質ダイニンは、微小管から解離することなく100ステップ以上進行することができるモータータンパク質である。1分子の細胞質ダイニンには2つの頭部が存在しているが、1つの頭部を切り出してみると1ステップする際の約8割の時間は微小管から解離した状態にあることが、以前の私の研究から明らかになっている。従って、細胞質ダイニンが微小管上を100ステップ以上連続的に進むためには、二つの頭部が互いに制御しあうことで協調的に運動する必要がある。本研究はダイニンがいかにして二つの頭部を協調させているのか明らかにすることを目的としている。これまで細胞質ダイニンは2つの頭部が交互に力発生することで、微小管上を二足歩行していると予想してきた。しかし一方の頭部をモーター活性を完全に失った不活性頭部に代えても、元の4割程度の速度で微小管上を二足歩行するという現象を見いだした。このような挙動は従来のモデルでは説明できないため、片足が死んだダイニンの歩行様式を詳細かつ定量的に調べることで、分子モーターの新たな動作機構を発見できると期待される。そこで、全反射型蛍光顕微鏡を用いてダイニンの運動を詳細に追跡することで、片足が不活性なダイニンも野生型ダイニンとほぼ同じステップサイズで運動していることが明らかになった。このことは不活

性頭部と生きている足を交互に前方へと移動させてダイニンが運動していることを示唆している。また不活性頭部はそれ自身では微小管から解離しないため、ダイニンが前方に進むためには正常な頭部が死んだ足を微小管から引き剥がすことが必要だと考えられる。その際には、2つの頭部が物理的に結合している尾部を介して分子内張力がかかっているものと予想されたため、柔軟なリンカーを挿入することで尾部を介した分子内張力を低減させたダイニン組換え体を作製した。その組換え体の運動の様子を観察したところ、片足が死んだダイニンでも野生型でもリンカー挿入による影響はなかった。したがってダイニン分子内の2つの頭部は尾部以外の部分でも、直接相互作用していることが示唆された。これらは2つの頭部が協調して微小管上を長距離運動するというダイニンの性質の分子機構を調査するうえで非常に重要な知見である。

6.9.4 微小管動態イメージング

微小管は極性を持った非常に動的な細胞内構造体であり、細胞分裂や接着、細胞内輸送など多くの重要な働きを担っているほか、腫瘍細胞の移動にも関わっていることが知られている。本研究はマウス *in vivo*において細胞内の微小管動態をナノメーター精度で観察・解析することを目的としている。具体的には、細胞内の微小管結合タンパク質 EB1 の動態変化をマウス生体内において経時観察し、生体内における細胞内微小管の動態変化をナノメーター精度で解析した。微小管結合タンパク質 (end-binding protein 1, EB1 と略す) は微小管プラス端集積因子の一種で、他のプラス端集積因子と共に微小管の機能制御に働いていると考えられているが、その機能の詳細は未だ不明である。EB1 分子の局在は、微小管先端を起点にして尾を引くような様相を呈する(図 6.9.40)。つまり EB1 の集積を追跡することで細胞内における微小管の動態を観察することが可能になる。本研究では、ヒト乳癌由来培養細胞内で発現させた EB1-GFP のコメット様の局在を微小管伸長端マーカーとして利用し、動態の観察・追跡を行った。観察にはスピンドルディスク型共焦点顕微鏡 (横河・CSU) を使用した。自動輝点追跡プログラムを用いて EB1-GFP コメットの輝度中心をナノメーター精度で追跡することにより、EB1-GFP の細胞内速度分布を微小管伸長速度の細胞内分布として算出した。その結果、中心体付近の EB1 コメット速度は細胞膜付近のものより速いことが明らかになった。また、細胞外マトリクスを模したゲル中で立体培養を行った細胞(図 6.9.40)でも同様の傾向が見られた。さらに、生きたマウスの体内における微小管動態を調査するため、GFP-EB1 を発現したヒト乳癌細胞をヌードマウスに移植し、移植細胞内の GFP-EB1 の *in vivo* 観察を行うことに成功した。*In vivo*において細胞内タンパク質の動態を観察する手法は、血流や免疫系、細胞外マトリクス等の多様な要素が存在する生体内において、細胞の周辺微小環境変化への応答や、生体への薬剤投与に対する応答を分子レベルで解析、定量することを可能にすると期待される。

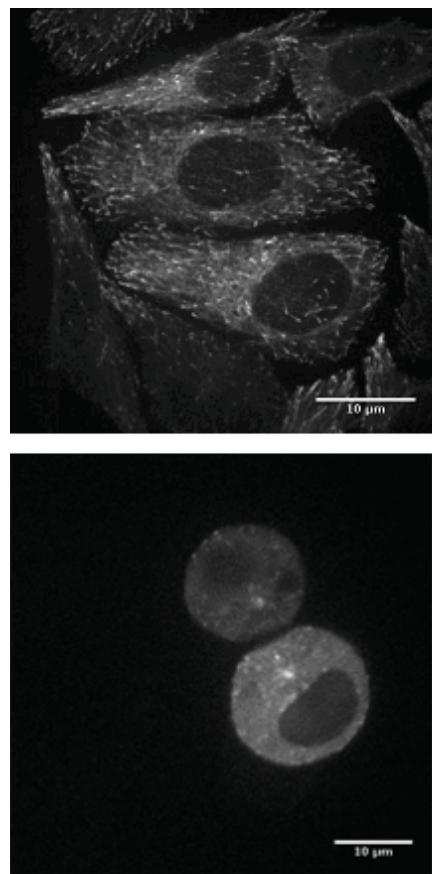


図 6.9.40: EB1 のイメージング上図 細胞、下図マウス

<報文>

(原著論文)

- [1] Junji Imamura, *Yasuhiro Suzuki, Kohsuke Gonda, Chandra Nath Roy, Hiroyuki Gatanaga, Noriaki Ohuchi and Hideo Higuchi Single Particle Tracking Confirms That Multivalent Tat Protein Transduction Domain-induced Heparan Sulfate Proteoglycan Cross-linkage Activates Rac1 for Internalization J. Biol. Chem. 286, 10581-10592 (2011)
- [2] Hirota Y., A. Meunier, S. Huang, T. Shimozawa, O. Yamada, Y.S Kida, M. Inoue, T. Ito, H. Kato, M. Sakaguchi, T. Sunabori, M. Nakaya, S. Nonaka, T. Ogura, H. Higuchi, H. Okano, N. Spassky, and *K. Sawamoto. Planar polarity of multiciliated ependymal cells involves the anterior migration of basal bodies regulated by non-muscle myosin II. Development 137, 3037-3046 (2010)
- [3] Kaya M. and *H. Higuchi. Non-linear elasticity and an 8 nm working stroke of single myosin molecules in myofilaments. Science 329, 686-689 (2010)

- [4] Fujita H, H. Hatakeyama, TM. Watanabe, M. Sato, H. Higuchi and * M. Kanzaki. Identification of Three Distinct Functional Sites of Insulin-mediated GLUT4 Trafficking in Adipocytes Using Quantitative Single Molecule Imaging. Mol. Biol. Cell 21, 2721-2731 (2010)

- [5] Watanabe TM, H. Tokuo, K. Gonda, H. Higuchi and * M. Ikebe. Myosin-X induces filopodia by multiple elongation mechanism. J. Biol. Chem. 285, 19605-14 (2010)

(国内雑誌)

- [6] 権田幸祐, 樋口秀男, 渡邊朋信, 武田元博, 大内憲明, 「ナノイメージングで探る癌転移の仕組み」 SURGERY FRONTIER Vol 11, 50-57 (2011. 3)

- [7] 茅 元司 「骨格筋ミオシン 1 分子の非線形弾性により見えてきた筋収縮の巧みな分子機構」生物物理 51 (1), 30-31.

- [8] Tomohiro Shima, Kazuo Sutoh, Takahide Kon Functional Analysis of the Dynein Motor Domain Dynein handbook, (2011.2)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [9] Motoshi Kaya and Hideo Higuchi "Measurement of elasticity in single myosins and actin filaments by novel fluorescence imaging and optical trapping techniques." Actin, the Cytoskeleton, and the Nucleus Workshop, 2010 Singapore.

- [10] T. Shimozawa and S. Ishiawat. "Detection of structural distortion in single actin filaments induced by tensile force under fluorescence microscopy " The 4th Mechanobiology Workshop and Biophysical Society Joint Meeting "Actin, the Cytoskeleton, and the Nucleus " 36-Pos Nov. 9-12, 2010 Singapore.

- [11] F. Kobirumaki, T. Shimozawa, K. Gonda and H. Higuchi. "in vivo imaging of Microtubule dynamics: fluorescence observation of engrafted EB1-GFP expressing tumor cells in living mice." The 4th International Symposium on Nanomedicine (ISNM2010) Nov. 29 - Dec. 1, 2010 Okazaki, Japan.

- [12] F. Kobirumaki, T. Shimozawa, K. Gonda and H. Higuchi. "Dynamics of Microtubule Tips in vivo: tracking the EB1-GFP comets in tumor tissues of living mice." The 16th Takeda Science Foundation Symposium on Bioscience "Casting light on life" Dec. 1-2, 2010 Tokyo, Japan.

- [13] Hideo Higuchi, "Single molecule biophysics of motor proteins." 1st Korea University-Tokyo University Joint Workshop Feb. 23, 2011, Tokyo, Japan

- [14] Motoshi Kaya, Hideo Higuchi “Non-liner elasticity of single skeletal myoshins is a key property for corrective force generation in muscle.” 1st Korea University-Tokyo University Joint Workshop Feb. 23, 2011, Tokyo, Japan
- [15] Tomohiro Shima, “The mechanism for coordination between two heads of cytoplasmic dynein.” 1st Korea University-Tokyo University Joint Workshop Feb. 23, 2010, Tokyo, Japan
- [16] Togo Shimozawa “Dynamics of Microtubule Tips in vivo: tracking the EB1-GFP comets in tumor tissues of living mice.” 1st Korea University-Tokyo University Joint Workshop Feb. 23, 2011, Tokyo, Japan
- [17] T. Kambara, T. Shima, H. Higuchi, “Unbinding force of cytoplasmic dynein.” 1st Korea University-Tokyo University Joint Workshop Feb. 23, 2011, Tokyo, Japan
- [18] T. Kambara, T. Shima, H. Higuchi, “Unbinding force of cytoplasmic dynein.” 55th Annual Meeting of the Biophysical Society, Baltimore, MD, USA, March 8, 2011
- [19] Tomohiro Shima, Kohji Ito, Takahide Kon, Motoshi Kaya, Hideo Higuchi, Kazuo Sutoh “Two motor domains of cytoplasmic dynein directly interact each other” 55th Annual Meeting of the Biophysical Society, Baltimore, MD, USA, March 9, 2011
- (国内会議)
- 一般講演
- [20] F. Kobirumaki, T. Shimozawa, K. Gonda, and H. Higuchi. “Analysis of microtubule growing ends dynamics by fluorescence imaging of EB1-GFP in mice tumor cells” 1P328, 1J1255 日本生物物理学会第48回年会, 仙台, 2010.9.20
- [21] Takuya Yamada, Takuya Kobayashi, Tomohiro Shima, Motoshi Kaya, Hideo Higuchi. Kinesin neck linker の Stiffness 計測, 日本生物物理学会第48回年会, 仙台, 2010.9.22
- [22] Tomohiro Shima, Takahide Kon, Motoshi Kaya, Hideo Higuchi, Kazuo Sutoh “Two motor domains of cytoplasmic dynein directly interact each other.” 日本生物物理学会第48回年会, 仙台, 2010.9.22
- [23] 島 知弘、「細胞質ダイニンが二足歩行を達成するための機構」第3回国定量生物学の会、東京都目黒区、2010.11.27 - 28
- [24] 小林 琢也 茅 元司 樋口 秀男「マウス骨格筋の invivo イメージングの試み」生体運動班会議 大阪市立大学・杉本キャンパス 2011.1.7
- [25] 神原丈敏、島知弘、樋口秀男、「ヒト細胞質ダイニン組換え体発現と破断力測定」生体運動班会議 大阪市立大学・杉本キャンパス 2011.1.8
- 招待講演
- [26] 樋口秀男 「量子ドットを用いたマウス内分子イメージング」 医薬研究に向けた最先端ライブイメージング Wako つくばフォーラム 2010.7
- [27] 茅 元司 樋口秀男 「量子ドットによる蛍光イメージングと光ピンセットによる力計測により見えてきた筋収縮の巧みな分子機構」 日本バイオイメージング学会 第19回学術講演会 シンポジウムII 「バイオイメージング技術の新展開」 慶應義塾大学日吉キャンパス 2010.9
- [28] 樋口秀男 「階層を登る1分子生理学-1分子内から個体へ-」 岡崎 2010.10.5
- [29] 樋口秀男 「階層を登る1分子生理学-1分子内から個体へ-」 センシングバイオロジーシンポジウム 東京 2010.12.9
- <その他>
- (報道)
- [30] フジテレビ ニュース JAPAN 「検証乳がん」 2010.7.7
- [31] 日本経済新聞(全国版) 「筋肉の運動効率が高い理由解明」 2010.8.7
- [32] 朝日新聞 「「省エネ」筋肉の秘密解明」 2010.8.13
- [33] 科学新聞 「筋肉がエネルギーを高効率利用する仕組み 東大グループ分子レベルで解明」 2010.8.13
- [34] 新潟日報 「効率高い筋肉の仕組み」 2010.8.23
- [35] 長崎新聞 「サイエンス/効率高い筋肉の仕組み」 2010. 08.26
- [36] 岐阜新聞 「筋肉はエコ設計」 2010.8.26
- [37] nature japan jobs 「骨格筋が効率よく動ける仕組みを解明」 2010.8.27
- [38] 秋田魁新報 「効率高い筋肉収縮の仕組み 分子レベルで解明」 2010.8.31
- [39] 東奥日報 「筋肉はエコ設計」 2010.9.2
- [40] 北海道新聞 「筋肉収縮仕組みは「エコ」」 2010.9.6
- [41] 化学 vol.65 「筋肉が効率よく運動できる理由を解明」 2010.9.18
- [42] 岩手日報 「力出すとたるみ省エネ 筋肉収縮の仕組み解明」 2010.09.22
- (特許)
- [43] 樋口秀男、下澤東吾 特願 2010-124566 「共焦点顕微鏡画像システム」 出願日：2010年5月31日

7 技術部門

(大塚、佐伯、藤代、八幡、*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月から技術部門に柏葉を迎えた。技術部門の担当教員(坪野、福山、相原、山本、須藤、岡本、杉浦(地惑)、長谷川(化学))と技術職員とで月に1度の物理技術室ミーティングを行っている。

7.1 実験装置試作室 (大塚、柏葉、南城、阿部)

利用状況

2010年4月から2011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(414件)
- 設計及び部品等の問い合わせ・外注発注(114件)
- 他教室から作業依頼及び問い合わせ
主な依頼者(五月祭、素粒子センター、ビックバン宇宙国際研究センター、地球惑星科学 茅根研、船森研、吉川研、生物科学 植物生態学研究室、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、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1日から6月21日まで下記の内容で工作講習会を行った。

- 参加人員: 40名
- 実習内容
 1. 測定器(ノギス)の使い方
 2. ねじの種類
 3. シャーリング(切断機)の使用方法
 4. 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

7.2 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)
- 理学系研究科・理学部環境安全管理室メンバー
- 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号館担当者

7.3 IT 関連業務 (藤代)

- 専攻内各サーバ運用
- 専攻内ネットワークシステムの運用(各研究室及び理学部ネットワーク室)
- 理学部情報システム室業務(事務室へのシンクライアント端末導入、東京大学職員メールシステムへの移行)
- テレビ会議システムの運用と管理
- ソフトウェアのライセンス管理

7.4 学生実験 (佐伯、八幡、藤代、柏葉)

- 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。
- 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」、「メスバウアー効果」を指導した。
- 物理学実験I(藤代)
3年生夏学期の物理学実験Iの「計算機」の技術指導をした。
平成22年度「計算機実験」マニュアルの電子化に携わった。
- 3年生実験(物理学実験I、II)のテーマの振り分け(八幡、佐伯、柏葉)
- 物理学実験機器更新(八幡)
「エレクトロニクスI」、「エレクトロニクスII」の実験機器を更新した。

7.5 各種委員会

- 技術委員会 (佐伯)
- 運営委員会 (佐伯)
- 男女共同参画委員会 (佐伯)
- 理学系寒剤管理委員会 (八幡)
理学系寒剤管理委員会の立ち上げから参加した。
実働担当者として液体窒素の継続供給を行っている。
汲み出しシステムの故障対応を実施。

<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、2011 年 3 月）。

<学術講演>

- [2] 八幡和志：物理学実験授業の実験機器更新、機器・分析技術研究会（東工大、2010 年 9 月）。
- [3] 八幡和志：物理学実験担当業務の紹介、第 25 回理学系研究科・理学部 技術シンポジウム（東京大学 2010 年 11 月）。

II

Summary of activities in 2010

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, Tetsufumi Hirano, Noritaka Shimizu 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. Shimizu), 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 includes 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], while striking effect of three-body force has been shown in [2] for the first time. The structure of such unstable nuclei have been calculated by Monte Carlo Shell Model and conventional shell model with further developments, for example, a new extrapolation method [3]. Their applications have been made in collaborations with experimentalists in internationally distributed, *e.g.*, [4, 5].

The mean-field based formulation of the Interacting Boson Model is a new original approach being developed [6]. This approach is so general and powerful that its applications are being spread very fast in big collaborations [7].

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 [8].

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 hadron interaction [9]
2. Lattice QCD studies on baryon-baryon potential [10]
3. Random matrix theory for high density matter [11]
4. Boson-fermion mixture in ultracold atoms [12]
5. Gap formation in monolayer graphene [13]
6. Resummation of perturbation theory [14]

High Energy Hadron Physics

In High Energy Hadron Physics group (T. Hirano), the physics of the quark-gluon plasma and dynamics of relativistic heavy ion collisions are studied theoretically based on relativistic hydrodynamics and relativistic kinetic theories. Main subjects include (1) hydrodynamic description of the space-time evolution of the quark-gluon plasma in relativistic heavy ion collisions [15, 16, 18], (2) transport description of hadrons and their dissipation (3) analyses of the quark-gluon plasma through hard probes such as jets and heavy quarks/quarkonia , (4) color glass condensate for high energy colliding hadrons/nuclei, and (5) quantum non-abelian vortices in dense QCD matter [17]

References

- [1] Takaharu Otsuka, Toshio Suzuki, Michio Honma, Yutaka Utsuno, Naofumi Tsunoda, Koshiroh 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*)
- [2] T. Otsuka, T. Suzuki, J.D. Holt, *et al.*, "Three-Body Forces and the Limit of Oxygen Isotopes", Phys. Rev. Lett., **105**, 032501 (2010)
- [3] 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)
- [4] P. Fallon, E. Rodriguez-Vieitez, A.O. Macchiavelli, *et al.*, "Two-proton knockout from Mg-32: Intruder amplitudes in Ne-30 and implications for the binding of F-29, F-31", Phys. Rev., **C81**, 041302 (2010).
- [5] A.N. Deacon, J.F. Smith, S.J. Freeman, *et al.*, "Cross-shell excitations near the "island of inversion": Structure of Mg-30", Phys. Rev., **C82**, 034305 (2010)
- [6] K. Nomura, N. Shimizu, T. Otsuka, "Formulating the interacting boson model by mean-field methods", Phys. Rev., **C81**, 044307 (2010)
- [7] K. Nomura, T. Otsuka, R. Rodriguez-Guzman, *et al.*, "Structural evolution in Pt isotopes with the interacting boson model Hamiltonian derived from the Gogny energy density functional", Phys. Rev., **C83**, 014309 (2011)
- [8] 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)
- [9] T. Kawanai and S. Sasaki, "Charmonium-nucleon potential from lattice QCD", Phys. Rev. **D82**, 091501(R) (2010).
- [10] T. Inoue, N. Ishii, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki [HAL QCD collaboration], "Baryon-baryon interactions in the flavor SU(3) limit from full QCD simulations on the lattice", Prog. Theor. Phys. **124**, 591 (2010).
- [11] G. Akemann, T. Kanazawa, M.J. Phillips, T. Wettig, "Random matrix theory of unquenched two-colour QCD with nonzero chemical potential", JHEP **1103**, 066 (2011)
- [12] Kenji Maeda, "Large N expansion for Stronglycoupled Boson-Fermion Mixtures", Ann. Phys. **326**, 1032-1052 (2011).
- [13] Y. Araki, "Chiral Symmetry Breaking in Monolayer Graphene by Strong Coupling Expansion of Compact and Non-compact U(1) Lattice Gauge Theories", Ann. Phys. (2011) in press.
- [14] T. Hayata, "Rescaled Perturbation Theory", Prog. Theor. Phys. **124**, 1097 (2010).
- [15] A. Monnai and T. Hirano: "Relativistic Dissipative Hydrodynamic Equations at the Second Order for Multi-Component Systems with Multiple Conserved Currents", Nucl. Phys. A **847**, 283 (2010).
- [16] T. Hirano, P. Huovinen and Y. Nara: "Elliptic flow in U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV: Prediction from a hybrid approach", Phys. Rev. C **83**, 021902(R) (2011).
- [17] Y. Hirano, T. Kanazawa and M. Nitta: "Topological Interactions of Non-Abelian Vortices with Quasi-Particles in High Density QCD", to appear in Phys. Rev. D (arXiv:1012.6042[hep-ph]).
- [18] H. Song, S. A. Bass, U. W. Heinz, T. Hirano and C. Shen: "200 A GeV Au+Au collisions serve a nearly perfect quark-gluon liquid", to appear in Phys. Rev. Lett. (arXiv:1011.2783 [nucl-th]).

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] [19] [14] [16]
 - 1.2 Dark Matter [15] [1] [4]
 - 1.3 Supersymmetric models [6] [17] [3]
 - 1.4 B meson mixing [5] [21]
 - 1.5 Anomaly puzzle [7]
 - 1.6 Inflation Model [18]
 - 1.7 Holographic QCD
 - 1.8 Chiral fermion on the lattice [8] [9]
2. Superstring Theory.
 - 2.1 F theory [12] [13]
 - 2.2 Correspondence between 4D supersymmetric gauge theory and 2D gravity [10]
 - 2.3 AdS/CFT Correspondence, Kerr/CFT Correspondence [20]

References

- [1] K. Ishiwata, S. Matsumoto and T. Moroi, “Decaying Dark Matter in Supersymmetric Model and Cosmic-Ray Observations,” JHEP **1012**, 006 (2010).
- [2] T. Ito and T. Moroi, “Spin and Chirality Determination of Superparticles with Long-Lived Stau at the LHC,” Phys. Lett. B **694**, 349 (2011).
- [3] S. K. Kang, T. Morozumi and N. Yokozaki, “Effects of Large Threshold Corrections in Supersymmetric Type-I Seesaw Model,” JHEP **1011**, 061 (2010) [arXiv:1005.1354 [hep-ph]].
- [4] K. Hamaguchi and N. Yokozaki, “Soft Leptogenesis and Gravitino Dark Matter in Gauge Mediation,” Phys. Lett. B **694**, 398 (2011) [arXiv:1007.3323 [hep-ph]].
- [5] M. Endo and N. Yokozaki, “Large CP Violation in B_s Meson Mixing with EDM constraint in Supersymmetry,” JHEP **1103**, 130 (2011) [arXiv:1012.5501 [hep-ph]].
- [6] T. T. Yanagida, K. Yonekura, “A Conformal Gauge Mediation and Dark Matter with Only One Parameter,” Phys. Lett. **B693**, 281-286 (2010). [arXiv:1006.2271 [hep-ph]].
- [7] K. Yonekura, “Notes on Operator Equations of Supercurrent Multiplets and Anomaly Puzzle in Supersymmetric Field Theories,” JHEP **1009**, 049 (2010). [arXiv:1004.1296 [hep-th]].
- [8] Y. Kikukawa and K. Usui, “Reflection Positivity of Free Overlap Fermions,” Phys. Rev. D **82**, 114503 (2010) [arXiv:1005.3751 [hep-lat]].
- [9] Y. Kikukawa and K. Usui, “Reflection Positivity of N=1 Wess-Zumino model on the lattice with exact $U(1)_R$ symmetry,” arXiv:1012.5601 [hep-lat].

- [10] S. Kanno, Y. Matsuo and S. Shiba, “Analysis of correlation functions in Toda theory and AGT-W relation for SU(3) quiver,” Phys. Rev. D **82**, 066009 (2010) [arXiv:1007.0601 [hep-th]].
- [11] T. Kawano and F. Yagi, “ a -Maximization in $\mathcal{N} = 1$ Supersymmetric $Spin(10)$ Gauge Theories,” Int. J. Mod. Phys. A **25**, 5595 (2010).
- [12] H. Hayashi, T. Kawano, Y. Tsuchiya and T. Watari, ”Flavor Structure in F-theory Compactifications,” JHEP **1008**, 036 (2010).
- [13] H. Hayashi, T. Kawano, Y. Tsuchiya, T. Watari, “More on Dimension-4 Proton Decay Problem in F-theory -Spectral Surface, Discriminant Locus and Monodromy-,” Nucl. Phys. **B840**, 304-348 (2010).
- [14] R. Sato, S. Shirai, ”LHC Reach of Low Scale Gauge Mediation with Perturbatively Stable Vacuum,” Phys.Lett.B692:126-129, 2010.
- [15] R. Saito, S. Shirai, ”Primordial Black Hole as a Source of the Boost Factor,” Phys.Lett.B697:95-100,2010.
- [16] E. Nakamura, S. Shirai, ”Discovery Potential for Low-Scale Gauge Mediation at Early LHC,” JHEP 1103:115, 2011.
- [17] M. Ibe, R. Sato, T. T. Yanagida and K. Yonekura, ”Gravitino Dark Matter and Light Gluino in an R-invariant Low Scale Gauge Mediation,” arXiv:1012.5466 [hep-ph].
- [18] N. Haba, S. Matsumoto and R. Sato, ”Sneutrino Inflation with Asymmetric Dark Matter,” arXiv:1101.5679 [hep-ph].
- [19] M. Endo, K. Hamaguchi, K. Nakaji, ”Probing High Reheating Temperature Scenarios at the LHC with Long-Lived Staus,” JHEP **1011**, 004 (2010). [arXiv:1008.2307 [hep-ph]].
- [20] T. Nishioka, H. Tanaka, ”Lifshitz-like Janus Solutions,” JHEP 02 (2011) 023
- [21] M. Endo, S. Shirai and T. T. Yanagida, ”Split Generation in the SUSY Mass Spectrum and $B_s - \bar{B}_s$ Mixing,” to appear in PTP. [arXiv:1009.3366 [hep-ph]].

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

Antiprotonic helium laser spectroscopy Atomic transition frequencies in antiprotonic helium (together with those in hydrogen) yield information on the Rydberg constant and the proton-to-electron mass ratio, thereby contributing to the CODATA 2006 recommended values of the fundamental physical constants.

In order to further improve the antiprotonic helium laser spectroscopy precision, we have developed new Doppler-free spectroscopy methods with which it should be possible to determine the (anti)proton-to-electron mass ratio with a relative standard uncertainty better than 10^{-10} (i.e., better than the current CODATA value) within a few years.

Antihydrogen Spectroscopic comparison of hydrogen and antihydrogen ($\bar{p} - e^+$) atoms is considered to be one of the most stringent test of the CPT symmetry. At CERN, we can now routinely form antihydrogen atoms by mixing antiprotons and positrons, and our current goal is to capture antihydrogen atoms by using a superconducting octupole magnet system. At the same time, development of an “antihydrogen beam”, with which we plan to measure the antihydrogen ground-state hyperfine splitting, is in progress.

\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 100 keV. In 2010, we developed a beam

profile monitor for the ultra-low-energy antiproton beams, and succeeded in precisely guiding the beams to our targets using this monitor and ion-optical calculations. We are now developing detectors to measure the cross sections, and we will carry the measurement of the \bar{p} -nucleus annihilation cross sections.

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 ISODLE 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.

For the CRIS method, we plan to use a nanosecond titanium-sapphire laser developed by the ASACUSA experiment at CERN. This laser will be operated with a high output power of \sim kW and a narrow linewidth of 100 MHz, and thus allow the measurement of the isotope shifts (\sim 10 GHz) and hyperfine structures (\sim 100 MHz) of francium isotopes with relatively low yields (several ions/s). In 2010, we have started to set up the laser for the experiment in 2011.

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 2010, we analyzed the data of hydrogen and helium-3 target measurement carried out during the beam time of SIDDHARTA experiment in fiscal year 2009. For kaonic hydrogen atom, we are finalizing the conclusion on its $1s$ -level shift and width with respect to the energy level determined only by the electromagnetic interaction. The result will be published in the coming months. On the other hand, from the first measurement of kaonic helium-3 X-ray in SIDDHARTA experiment, we determined with a precision of less than 10 eV that the $2p$ -level shift of kaonic helium-3 atom is a small one close to zero. To establish a concrete conclusion on the $2p$ -level shift of kaonic helium-3 atom, the result from E17 experiment under preparation at J-PARC is necessary.

X-ray spectroscopy of kaonic helium at J-PARC The $2p$ -level shifts in kaonic helium 3 and kaonic helium 4, and the isotopic shift between them give a strong constraint to the kaon-nucleus interaction. A recent x-ray measurement by SIDDHARTA group implied a finite isotopic shift which can not be explained by the optical model framework. Then, the J-PARC E17, which is the first experiment to be carried out at K1.8BR beamline in the J-PARC hadron experimental facility, is now proposing kaonic helium 4 measurement, in addition to the originally proposed kaonic helium 3 measurement, to precisely determine the isotopic shift. In fiscal year 2010, we proceeded the kaon beam tuning of K1.8BR beamline and succeeded in operating SDDs (silicon drift x-ray detectors) under the beam condition. The damage to our detectors by the earthquake is limited and the E17 is expected to run soon after the recovery of the facility.

4) Study of kaonic nuclei

Study of kaonic nucleus via the stopped K^- reaction on helium 4 In FSY 2005, we have performed KEK-PS E549, to measure (semi-)inclusive ${}^4\text{He}(K_{\text{stopped}}^-, N)$ spectra, and obtained strict upper limits for the formation of narrow $\bar{K}NNN$ states with total isospin $T = 0/1$. Meanwhile, the ${}^4\text{He}(K_{\text{stopped}}^-, YN/Yd)$ semi-exclusive spectra exhibited unresolved wide strengths which are well separable from multi-nucleon processes. They could be the signal of non-mesonic YN/YNN decay of

strongly-bound $\bar{K}NN/\bar{K}NNN$ states. In FSY 2010, we have further identified $\Sigma^0 NNN$ final states by the study of ΛNN triple coincidence events, and found that the proton momentum spectrum from the final states is clearly deviated from the one expected from the two-nucleon absorption process, and most likely to be the signal of those multibaryonic states. As a byproduct, we have identified the four-nucleon absorption process of K^- meson at rest, $K^-{}^4\text{He} \rightarrow \Lambda t$ for the first time.

Search for K^-pp and K^-pn deeply-bound kaonic states at J-PARC The J-PARC E15, to be scheduled after E17 at K1.8BR beamline, will use the ${}^3\text{He}(K^-, N)$ reaction to search for K^-pp/K^-pn . E15 is a kinematically complete experiment in which all reaction products are detected exclusively especially for $K^-pp \rightarrow \Lambda p$ channel, and it aims to provide decisive information on the nature of the simplest kaonic nucleus. In FSY 2010, we have installed the Cylindrical Drift Chamber (CDC) into the solenoid magnet, tested the performance of the system (Cylindrical Detector System - CDS) with the activated magnetic field, and performed the CDS calibration with 0.9 GeV/c K^- beam, so that $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ and $K_s^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ reactions were successfully reconstructed.

5) Precision spectroscopy of pionic atoms

We are planning a precise pionic-atom spectroscopy experiment with BigRIPS at RIBF. 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 October 2010 we performed a pilot experiment to construct ion optics for the dispersion matching with the $(d, {}^3\text{He})$ reaction and to check performance of the focal plane detectors which will be used in the production experiment. The beam was provided by the SRC with an energy of 250 MeV/nucleon and an intensity of $\sim 4 \times 10^{11}/\text{s}$. This high intensity deuteron beam hits the target, $10 \text{ mg/cm}^2 {}^{122}\text{Sn}$, and produces a large number of protons of $\sim 200 \text{ kHz}$ as background at the focal plane.

We could construct the BigRIPS optics by using the ${}^{14}\text{N}$ beam and the thick Cu target and confirm the optics of the beam transfer line was consistent with the designed optics. We also confirmed that all detectors worked with high intensity beam as we expected. We could measure the track with the design resolution by MWDCs and identify ${}^3\text{He}$ in the large background of protons by TOF and energy loss of scintillators.

6) Study of muonium production targets

Ultra-slow polarized muon beam whose energy of $0.5\sim30\text{keV}$ 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, $15\sim20/\text{s}$ 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 muonium from the muonium formation target (3%), and laser ionization ($\sim 10^{-5}$) are needed. As for muonium formation target, silica-based or alumina-based materials are promising. In order to develop the new muonium formation target, we fabricated samples of (i)Silica nanoporous plate(ii)Alumina nanoporous plate (iii)Silica Aerogel, and measured muon-muonium conversion rate and muonium diffusion of them in TRIUMF. As a result, sample(iii) has muon-muonium conversion rate of 70% compared to heat-tungsten foil($T= 3000 \text{ K}$) that have been used in RIKEN RAL facility. Meanwhile, energy of emitted muonium is comparable with thermal energy of room temperature so that the density distribution of muonium around the target surface suppose to be higher than that of conventional muonium target. In the next year, with a new laser system, we will perform practical test of new muonium production target in the RIKEN-RAL muon facility.

4 Ozawa Group

Research Subjects: Experimental study of non-perturbative QCD

Member: Kyoichiro Ozawa

Study of quark-gluon-plasma at RHIC

In 10 years operation of Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at Brookhaven National Laboratory (BNL), many new phenomena related to hot and dense nuclear matter have been discovered. We performed the PHENIX experiment at RHIC and produced many new results on a wide range of physics subjects, including charged and neutral hadron production, single electron production, event isotropy, and many other topics.

In spite of these fruitful results, there are still remaining questions to be answered to further characterize the state of matter formed at RHIC. In particular, chiral properties of the dense matter produced has not been obtained, and should be provided. For the study of the chiral properties, vector mesons, such as ϕ , ω and ρ are interesting mesons because the restoration of approximate chiral symmetry at high temperature may modify their mass and width. These modifications can be shown directly in the line shape of the e^+e^- mass spectra. Here, the measurements with lepton decays are essential, since leptons are not interact with the medium and carry direct information about conditions and properties of the medium. However, large background in electron pairs due to π^0 Dalitz decays and γ conversion make the measurement difficult in the past RHIC data. In the last year, we have successfully installed and operated a new detector, which is called Hadron Blind Detector(HBD), to suppress the background.

In this year, we have focused on rejection of gamma conversions at HBD itself, since such conversions can be a serious background in high multiplicity environment due to a scintillation light. As a result, we have successfully developed analysis scheme to reject such background statistically.

Study of mechanism of hadronic mass generation at J-PARC

The chiral property of QCD in dense($\rho \neq 0$) nuclear matter has also attracted wide interest in the field of hadron physics. In hot and/or dense matter, broken chiral symmetry is subject to be restored either partially or completely and, hence, the properties of hadrons can be modified. To observe such an effect, measurements of the in-medium decay of vector mesons are highly desirable for the direct determination of the meson properties in matter. We are planning two new experiments at J-PARC to measure vector meson mass at normal nuclear density.

One new experiment aim to collect 100 times larger statistics of ϕ meson than that collected by the KEK experiment. We can discuss the velocity dependence of the mass spectra of vector mesons more precisely and compare with the theoretical predictions. We are also able to use larger and smaller nuclear targets as lead and proton, For this experiment, new detector based on Gas Electron Multiplier (GEM), which is originally developed at CERN, is under developing. Using GEM, we are investigating 2 dimensional tracker for high rate counting. A prototype is reconstructed and reasonable signals are observed.

In this year, large sizes (20cm and 30cm) of GEM foils are developed and tested. An test experiment is performed at LNS test beam line at Tohoku Univ. Position resolutions of large size GEMs are evaluated using an electron beam. As shown in Fig. 2.1.5, a position resolution of $100 \mu\text{m}$ is obtained both for 20 cm and 30 cm GEMs.

Also, we propose combined measurements of nuclear ω bound state and direct ω mass modification. Nuclear ω bound states are measured in $p(\pi^-, n)\omega$ reaction and decays of generated ω meson are also measured with $\omega \rightarrow \pi^0\gamma$ mode. Such exclusive measurement can supply essential information to establish partial restoration of the chiral symmetry in nucleus.

We constructed TOF counters in this year and tested them at LEPS beam line at Spring-8 to evaluate its timing resolution and neutron efficiency. The timing resolution of 60 ps is obtained. Analysis for the neutron efficiency is on-going.

Tests of EM Calorimeter is performed at LNS GeV- γ beam line at Tohoku University. As a EM Calorimeter, we are planning to use CsI crystals, which is used at KEK-E246. Photon readout on CsI crystal is changed from Photo Diode to Avalanche photo diode to cope with high counting rate at J-PARC. Then, energy resolution of CsI crystal and Avalanche photo diode is evaluated using an electron beam. Results are shown in Fig. 2.1.6. Obtained energy resolution is enough for our purpose.

5 Komamiya group

Research Subjects: (1) Preparation for an accelerator technology and an experiment for the International linear e^+e^- collider ILC; (2) Experiment for studying gravitational quantum effects and searching for new medium range force using ultra-cold neutron beam; (3) Physics analyses in the ATLAS experiment at the LHC pp collider; (4) Data analyses for the BES-II experiment at BEPC-I, and TOF detector construction for BES-III experiment at BEPC-II;

Member: Sachio Komamiya, Yoshio Kamiya

We, particle physicists, are entering an exciting period in which new paradigm of the field will be opened on the TeV energy scale 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. In 2004 August the main linac technology was internationally agreed to use 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 in the end of 2012. We are working on ILC accelerator related hardware development, especially on the beam delivery system. We are developing the Shintake beam size monitor for the ATF2, which is a test accelerator system for ILC located at KEK. The Shintake beam size monitor is able to measure $O(10)[\text{nm}]$ beam size, 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 the down stream. The phase of the fringe is moved step-by-step, the total photon energy is measured in 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. Also 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 and searching for new short-range force using ultra-cold neutron beam: A detector to measure gravitational bound states of ultra-cold neutrons is developed. We decided to use CCD's for the position measurement of the UCN's. The CCD is going to be covered by a ^{10}B layer to convert neutron to charged nuclear fragments. The UCNs are going through a neutron guide of 100 $[\mu]$ height and their density is modulated in height as forming bound states within the guide due to the earth's gravity. In 2008 we tested our neutron detector at ILL Grenoble. In 2009 we started the test experiment at ILL. We are analyzing the data. We will improve our detector and measure the modulation of the neutron density distribution in 2011.

3) ATLAS experiment at LHC: The epoch of new paradigm for particle physics is going to open with the experiments at LHC. LHC started its operation in the end of 2009. The high energy collision at 7 TeV (CMS) has been started in the end of March 2010. The ATLAS detector is continuously recording data at high energies. Some of our students work on data analysis at LHC. Search for supersymmetric particles with the missing transverse energy and with b-quark signal.

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 made a 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 baryon-pair production in J/ψ decay using 5.8M BES-II J/ψ events. Now 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 have built a prototype detector of a size of $1700 \times 667 \times 551 \text{ mm}^3$ and weight of 270kg. It is now deployed at Hamaoka Nuclear Power Station of Chubu Electric Power Co., Inc.

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. Sumico consists of a cryogen-free 4T superconducting magnet with an effective length of 2300 mm and PIN photodiodes as x-ray detectors. By now, we put upper limits of $g_{a\gamma\gamma} < (5.6\text{--}13.4) \times 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$ to axion - photon coupling constant for the axion mass $m_a < 0.27 \text{ eV}$ and $0.84 \text{ eV} < m_a < 1.00 \text{ eV}$. The latter is a newly explored mass region which CERN Axion Solar Telescope(CAST) group that started later has not reached yet. We planned to continue the measurement in which we scan the mass region from 1eV 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 now ready and 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.

7 Aihara/Yokoama 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.

Staff Members: H. Aihara, M. Yokoyama, H. Kakuno and T. Abe

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 began a study of anomalous magnetic moment of the τ lepton, $(g-2)_\tau$, which is sensitive to physics beyond the Standard Model. Using ~ 900 million τ - $\bar{\tau}$ pairs recorded with the Belle detector, we intend to improve a precision of $(g-2)_\tau$ measurement by a factor of ~ 10 over previous measurements.

The Super KEKB 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 the reduction and control of

the background from accelerator. We measured the background level of KEKB with a special run. By extrapolating it to the Super KEKB condition with a simulation, we estimated the background level at Belle II. The optimization of interaction region is in progress based on our results.

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.

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 to June 2010. One candidate of electron neutrino event is observed at the Super-Kamiokande detector, while 0.3 background events are expected. With more data, we expect to lead the study of neutrino oscillation.

In order to pursue the study of properties of neutrino beyond T2K, we have started the design of 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. 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.

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 measured the cross section of the inclusive ν_μ charged current interaction on carbon. Using this measurement, we have also searched for neutrino oscillation together with MiniBooNE collaboration.

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.

1. H. Fujimori, H. Aihara, S. Mineo, H. Miyatake, S. Miyazaki, H. Nakaya, T. Uchida, “Back-End Readout Electronics for Hyper Suprime-Cam,” IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, N14-9, 2010.
2. Y. Nakajima *et al.* [SciBooNE Collaboration], “Measurement of inclusive charged current interactions on carbon in a few-GeV neutrino beam,” Phys. Rev. D **83**, 012005 (2011).
3. T. Abe, H. Aihara, M. Iwasaki, K. Kasimura, S. Mineo, T. Uchida, M. Tanaka, Y. Kawai, H. Kyushima, M. Suyama, M. Shiozawa “R&D status of large aperture Hybrid Avalanche Photo-Detector,” Nucl.Instrum.Meth.A623:279-281,2010.

8 Asai group

Research Subjects: (1) Particle Physics with the energy frontier accelerators (LEP and LHC) (2) Physics analysis in the ATLAS experiment at the LHC: (Higgs, SUSY and Extra-dimension) (3) Particles Physics without accelerator: tabletop size (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: We are focusing on Higgs boson whose masses is lighter than 140 GeV. $H \rightarrow \gamma\gamma$, $\tau\tau$ and WW are the promising channels. We search for the Higgs with these three modes and No evidence was observed. We need more luminosity for Higgs hunting and we can reach the luminosity of discovery within 2 years.

- SUSY: We contributes SUSY study at the ATLAS experiment as a convener. We have developed methods of the data-driven background estimation for all channels, and we found out that we can estimate background number//distributions from the data itself with accuracy of 10-30% even in the early of the state. Now we have real data and search for the SUSY with the various event topologies, and no evidence was observed in all topologies. We set stringent limit on the dark matter.
- 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 2TeV 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:
 - Search for extra-dimension with positronium → invisible.
 - Search for CP violation of the lepton sector using positronium.
 - Precise measurement Search HFS of the positronium.
 - Developing high power (>500W) stable sub THz RF source
 - Spin-rotation of positronium

9 Aoki Group

Subject: Theoretical condensed-matter physics

Members: Hideo Aoki, Takashi Oka

Our main interests are many-body effects in electron systems, i.e., **superconductivity, magnetism and topological systems**, for which we envisage a **materials design for correlated electron systems** and novel **non-equilibrium** phenomena should be realised. Studies in the 2010 academic year include:

- Superconductivity
 - Superconductivity in iron-based compounds
 - Superconductivity in solids of aromatic molecules
 - High-Tc cuprate revisited and analogues designed[1]
 - Collective modes in multi-band superconductors [2]
- Magnetism
 - Design of ferromagnetism in cold atoms [3] and organics [4]
 - Multiferroic multiband systems
- Topological systems: Quantum Hall systems[12] and graphene
 - Graphene QHE and chiral symmetry[5,6]
 - Optica (THz) Hall effect in graphene[7]
 - Many-body and quantum-dot states in graphene [8]
- Non-equilibrium and nonlinear phenomena in correlated electron systems
 - Non-linear transport in the dielectrically broken Mott insulator [9,10]
 - Dynamical repulsion-attraction conversion in intense ac fields [11]
 - Photovoltaic Hall effect in graphene

[1] H. Sakakibara, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki: Two orbital model explains why the single-layer Hg cuprate have higher superconducting transition temperature than the La cuprate, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 057003 (2010).

- [2] Y. Ota, M. Machida, T. Koyama and H. Aoki: Leggett's collective modes in multiband superfluids and superconductors — Multiple dynamical classes, *Phys. Rev. B* **83**, 060507(R) (2011).
- [3] M. Okumura, S. Yamada, M. Machida and H. Aoki: Phase-separated ferromagnetism in spin-imbalanced Fermi atoms loaded on an optical ladder, *Phys. Rev. A* **83**, 031606(R) (2011).
- [4] Y. Suwa, R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: First-principles study of ferromagnetism for an organic polymer dimethylaminopyrrole, *Phys. Rev. B* **82**, 235127 (2010).
- [5] 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).
- [6] H. Watanabe, Y. Hatsugai and H. Aoki: Half-integer contributions to the quantum Hall conductivity from single Dirac cones, *Phys. Rev. B* **82**, 241403(R) (2010).
- [7] Y. Ikebe, T. Morimoto, R. Masutomi, T. Okamoto, H. Aoki and R. Shimano: Optical Hall effect in the integer quantum Hall regime, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 256802 (2010).
- [8] P. A. Maksym, M. Roy, M. F. Craciun, S. Russo, M. Yamamoto, S. Tarucha and H. Aoki: Proposal for a magnetic field induced graphene dot, *J. Phys.: Conf. Ser.* **245**, 012030 (2010).
- [9] T. Oka and H. Aoki: Dielectric breakdown in a Mott Insulator: many-body Schwinger-Landau-Zener mechanism studied with a generalized Bethe ansatz, *Phys. Rev. B* **81**, 033103 (2010).
- [10] M. Eckstein, T. Oka and P. Werner: Dielectric breakdown of Mott insulators in dynamical mean-field theory *Phys. Rev. Lett.* **105**, 146404 (2010).
- [11] 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.*, to be published.
- [12] Hideo Aoki: Integer quantum Hall effect (a chapter in *Comprehensive Semiconductor Science & Technology* ed by P. Bhattacharya, R. Fornari and H. Kamimura, Elsevier, 2011).

10 Miyashita Group

Research Subjects: Statistical Mechanics, Phase Transitions, Quantum Spin systems,
Quantum Dynamics, Non-equilibrium Phenomena

Member: Seiji Miyashita and Keiji Saito

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 aspects of phase transitions. [1]

One is the phase transition in long-range Interacting systems. So far, phase transitions of spin systems have been studied mainly on the fixed lattice. However, we pointed out that difference of local lattice structure, e.g. the sizes of the high-spin (HS) and the low-spin (LS) in the spin-crossover materials causes lattice distortions. This degree of freedom of lattice deformation causes an effective long range interaction for ordering of bistable states. We have pointed out that the critical property of this type of models belongs to the universality class of the mean-field model, and also that its dynamical critical properties, such as the spinodal phenomena, are described by the corresponding mean-field theory. In the last year, in particular, we studied on the spatial ordering patterns of the system with long range interaction. In the long range interaction system with periodic boundary condition, the system does not show compact ordering cluster even at the critical point in contrast to the usual short range systems in which the correlation length diverges and infinite clusters appear. [41, 45] We studied how the correlation length changes if both short and long range interactions exists. We derived a scaling relation of the correlation length as function of the ratio of the short and long range interactions, and confirmed by a Monte Carlo simulation. We also studied how switching between the two ordered state occurs in system with open boundary condition, and found a scale-invariant property. [3, 4, 41, 45]

We also studied in which condition systems with long range interaction are described by the mean-field theory. It is known that in the cases where the interaction energy per spin diverges, 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 for the state of mean-field state becomes unstable in such parameter region. We are studying the properties of such states. [5, 31, 39]

Hiroko Tokoro made experimental studies on novel magnetic materials in collaboration with Ohkoshi laboratory (chemistry department). [6, 58, 59]

We also studied the general structure of the so-called mixed phase which has been found in the generalized 6-state clock model with a quasi-degenerate energy structure. We found various new type phases and phase transitions. [37, 43] We also studied on the classification of the first order phase transitions in the Potts model with the so-called transparent states.

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. We have studied quantum phase transitions in spin systems and also itinerant electron systems. In particular, the mechanism of Nagaoka ferromagnetism provides an interesting magnetic property in system where we control the chemical potential of the itinerant electrons (Hubbard model). We proposed a system in which the transition between magnetic and non-magnetic state takes place with this mechanism and the property of the model is studied by the DMRG method. [50]

As a study on the exact solvable models, we studied the exact property of spin chain by making use of algebraic Bethe anzatz. In particular, we investigated properties of boundary states of $S = 1$ spin chain. [22, 23, 26, 27, 28, 29] We also studied a nontrivial symmetry in a one-dimensional $S = 1$ bilinear-biquadratic model by an exact diagonalization method. [57].

We also studied the dynamical properties and also response. Coherent dynamics of quantum systems has also various characteristic features, and attracts interests from the view point of quantum information processing. We have studied such novel quantum phases and quantum responses. [2] Parts of the subject are studied as an activity of the JST CREST project (Quantum-mechanical cooperative phenomena and their applications). [47]

Quantum response to external fields is one of the important subjects in our group, and we have studied resonant spectrum of interacting system by proposing a direct numerical method for the Kubo formula, and extended it to systems with dissipative dynamics. [48, 49]. In the last year, we studied the line spectrum of a spin chain with an alternative Dzyaloshinsky-Moriya interactions at high temperature limit, and analyzed it in the relation with the autocorrelation function of the spin torque which shows a deviation from the gaussian relaxation at long time. We discussed an extension of the Kubo-Tomita theory. [7]

We also studied hybridization of a spin system in the cavity and the cavity photon which attracts interests from the view point of coupling of photon information and materials. We published a paper with the related experiments[8], which has been reviewed as a possible realization of the Quantum RAM. We extended the study to detailed structure of the line shape by studying the energy structure of hybridized systems.

Moreover, we studied origins of decoherence of the Rabi oscillation which is regarded as an evidence of quantum coherence. We classified the characterization of the origins of the decoherence, e.g. the local distribution of magnetic field and the magnetic anisotropy, and the dipolar-dipolar interactions among the spins, etc. We are applying it to the related experiments.

How the equilibrium (canonical distribution) is realized is also a big topic in statistical mechanics. We have studied an isolated spin system and study the dynamics explicitly, and observed how the local system approaches to a stationary state and it is resemble to the canonical distribution as a function of strength and type of the interaction between the local system and the rest system. [9]

We have studied quantum effect in the conveyance process of particle dragged by a potential well. We studied origins of the non-adiabatic transition during the process, and analyzed them from the view points of the resonant state for systems with the quantum tunneling. [56].

We also studied dynamical properties of quantum systems under transverse field in the context of the quantum annealing. [10, 11].

On the duality between particle and wave in quantum mechanics, we studied in what condition we can realize the wave nature in a model of particles. [12, 13]

As to the transport phenomena, we studied universal feature of the current fluctuation. We derived a generated cumulant function and examine the proposal of the additivity principle of Derrida. We also studied the AC conductance of the heat conductivity. [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 52, 53, 54, 55]

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, mesoscopic systems, organic conductors, unconventional superconductivity, and Tomonaga-Luttinger liquid theory. The followings are the current topics in our group.

- High- T_c superconductivity

Inhomogeneity and two-gap features in high- T_c superconductors.

Mott metal-insulator transition and superconductivity.[6]

- New superconductor: Iron-pnictide

Effects of nonmagnetic impurities in iron-pnictide superconductors.[1]

Quasi-particle interference patterns in d-wave superconductors.

Orbital-selective superconductivity and the effect of lattice distortion.[5]

- Organic conductors

Modeling and magnetism in one-dimensional Fe-phthalocyanine compounds.

Novel spin-liquid states in an anisotropic-triangular spin-system.

Static nonequilibrium state of the competing charge orders under an electric field.

- Theories of anisotropic superconductivity

Spatial patterns of the two-dimensional FFLO superconductivity near zero temperature.

- Dirac electrons

Dissipationless current due to the interband effects of magnetic field in Dirac fermion systems.

Spin-polarized currents in Dirac fermion systems.

- Four-state classical Potts model with a novel type of frustrations

- Theories on heavy fermion systems

A renormalization-group study for the two-level Kondo model with conduction electrons.[2]

Competition between the Kondo-Yoshida singlet and the crystal-field singlet for f² configuration.[3]

Crossover from local Fermi liquid to heavy Fermi liquid.[4]

[1] T. Kariyado and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 083704 (2010).

[2] H. Matsuura, S. Tanikawa, and K. Miyake: J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 074705 (2010).

[3] S. Nishiyama, H. Matsuura, and K. Miyake: J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 104711 (2010).

[4] H. Watanabe and M. Ogata: Phys. Rev. B **81**, 113111 (2010).

[5] N. Arakawa and M. Ogata: to appear in J. Phys. Soc. Jpn.. “Orbital-Selective Superconductivity and the Effect of Lattice Distortion in Iron-Based Superconductors”

[6] H. Yokoyama, T. Miyagawa, M. Ogata: submitted to J. Phys. Soc. Jpn.. “Effect of Doublon-Holon Binding on Mott transition—Variational Monte Carlo Study of Two-Dimensional Bose Hubbard Models”

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.

In FY2010, we predicted theoretically novel two-dimensional interface ferromagnetism at AlN/MgB₂(0001) using DFT calculations (Y. Gohda and S. Tsuneyuki, Phys. Rev. Lett. **106**, 047201 (2011)). First-principles electron transport calculations demonstrate that this interfacial spin polarization is responsible for quantum spin transport. The magnetization can be controlled by applied gate bias voltages.

We also developed or improved several methodologies for first-principles study of electronic, structural and dynamical properties of materials. One of the major achievements is that we obtained first converged results of the electronic structure calculation of a large-gap insulator by the Transcorrelated (TC) method, a wave function theory we have developed for several years.

In summary, our research subjects in FY2010 were as follows:

- New methods of electronic structure calculation
 - Generalized anharmonic lattice model of crystals for investigating thermal conductivity
 - First-principles wavefunction theory for solids based on the Transcorrelated method
 - 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 electronic structure calculation
 - Two-Dimensional Intrinsic Ferromagnetism at Nitride-Boride Interfaces
 - Oxygen vacancy and hydrogen impurities in BaTiO₃
 - Electric dipole layer at the water-electrode interface

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.

[1] S. Ideta, K. Takashima, M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, H. Anzai, T. Fujita, Y. Nakashima, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Ono, M. Kubota, D. H. Lu, Z.-X. Shen, K. M. Kojima, and S. Uchida: Enhanced superconducting gaps in the tri-layer high-temperature Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+δ} cuprate superconductor, Phys. Rev. Lett. **104** 227001-1-4, (2010).

[2] T. Yoshida, M. Hashimoto, T. Takizawa, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, and H. Eisaki: Mass renormalization in the band width-controlled Mott-Hubbard systems SrVO₃ and CaVO₃ studied by angle-resolved photoemission spectroscopy, Phys. Rev. B **82**, 085119-1-5 (2010).

[3] V.R. Singh, Y. Sakamoto, T. Kataoka, M. Kobayashi, Y. Yamazaki, A. Fujimori, F.-H. Chang, D.-J. Huang, H.-J. Lin, C.T. Chen, H. Toyosaki, T. Fukumura, and M. Kawasaki: Bulk and surface magnetization of Co atoms in rutile Ti_{1-x}Co_xO_{2-δ} thin films revealed by x-ray magnetic circular dichroism, J. Phys. Condens. Mat. **23**, 176001-1-5 (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 CuO₄ 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, μ SR 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 Sr_{14-x}Ca_xCu₂₄O₄₁ and undoped La₆Ca₈Cu₂₄O₄₁:

- 1) From the high pressure (P) study we constructed and $x-P$ phase diagram (in collaboration with Prof. N. Môri'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 $x=0$, Sr₁₄Cu₂₄O₄₁, 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 La₆Ca₈Cu₂₄O₄₁ 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 Yba₂Cu₃O_{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 CuO₂ 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 Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ}. The result reveals an apparent segregation of the electronic structure into SC domains of ~3mm 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 mageto-optical Kerr effect measurements. Main results in this year are as follows.

(1) Surface electronic transport: 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: 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.

(4) Construction of new apparatuses: Green's-function STM (low-temperature four-tip STM), micro-four-point probes apparatus at mK under strong magnetic field.

- [1] S. Yamazaki, Y. Hosomura, I. Matsuda, R. Hobara, T. Eguchi, Y. Hasegawa, and S. Hasegawa: *Metallic Transport in a Monatomic Layer of In on a Silicon Surface*, Physical Review Letters **106**, 116802 (Mar, 2011).
- [2] N. Miyata, R. Hobara, H. Narita, T. Hirahara, S. Hasegawa, and I. Matsuda: *Development of surface magneto-transport measurement with micro-four-point probe method and the measurement of Bi nanofilm on Si(111)*, Japanese Journal of Applied Physics **50**, 036602 (Mar, 2011).
- [3] I. Matsuda, K. Kubo, F. Nakamura, T. Hirahara, S. Yamazaki, W. H. Choi, H. W. Yeom, H. Narita, Y. Fukaya, M. Hashimoto, A. Kawasuso, S. Hasegawa, and K. Kobayashi: *Electron compound nature in a surface atomic layer of two-dimensional triangle lattice*, Physical Review B **82**, 165330 (Nov, 2010).
- [4] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Takeichi, H. Miyazaki, S. Kimura, I. Matsuda, A. Kakizaki, and S. Hasegawa: *Anomalous transport in an n-type topological insulator ultrathin Bi_2Se_3 film*, Physical Review B **82**, 155309 (Oct. 2010) (selected as Editors' Suggestions).
- [5] H. Morikawa, K. S. Kim, Y. Kitaoka, T. Hirahara, S. Hasegawa and H. W. Yeom: *Conductance transition and interwire ordering of Pb nanowires on Si(557)*, Physical Review B **82**, 045423 (Jul, 2010).
- [6] A. Nishide, Y. Takeichi, T. Okuda, A. A. Taskin, T. Hirahara, K. Nakatsuji, F. Komori, A. Kakizaki, Y. Ando, and I. Matsuda: *Spin-polarized surface bands of a three-dimensional topological insulator studied by high-resolution spin- and angle-resolved photoemission spectroscopy*, New Journal of Physics **12**, 065011 (Jun, 2010).
- [7] Y. Niinuma, Y. Saisyu, T. Hirahara, R. Hobara, S. Hasegawa, H. Mizuno, and T. Nagamura: *Development of an UHV-SMOKE system using permanent magnets*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **8**, 298 (Jun, 2010).
- [8] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, and S. Hasegawa: *Topological metal at the surface of an ultrathin $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ alloy film*, Physical Review B **81**, 165422 (Apr, 2010) (selected as Editors' Suggestions).
- [9] Y. Sakamoto, T. Hirahara, H. Miyazaki, S. Kimura, and S. Hasegawa: *Spectroscopic evidence of a topological quantum phase transition in ultrathin Bi_2Se_3 films*, Physical Review B **81**, 165432 (Apr, 2010).
- [10] K. He, Y. Takeichi, M. Ogawa, T. Okuda, P. Moras, D. Topwal, A. Harasawa, T. Hirahara, C. Carbone, A. Kakizaki, and I. Matsuda: *Direct spectroscopic evidence of spin-dependent hybridization between Rashba-split surface states and quantum-well states*, Physical Review Letters **104**, 156805 (Apr, 2010).

16 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 and superconductors.

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 $50 \mu\text{K}$, using various experimental techniques such as NMR, calorimetry, scanning tunneling microscopy and spectroscopy (STM/STS), 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 has the critical point but ^4He does not in pure 2D case. We have measured low-temperature heat capacities (C) of the second-, third- and fourth-layer ^3He adsorbed on a graphite surface preplated

with monolayer ^4He 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 third layer and ^3He atoms form 2D paddles at low densities ($\rho < 1.5 \text{ nm}^{-2}$). This year, we found that even the second layer, where the confinement potential from the substrate is stronger, does not have the critical point, too. Moreover, the density of the 2D paddle is comparable with that in third layer. 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.

2. Other ongoing experiments on 2D ^3He :

We are preparing a new sample cell for high-precision heat capacity measurements of the possible order-disorder transition near $T = 1 \text{ K}$ in the second layer ^3He on graphite using a ZYX exfoliated graphite substrate which has much larger micro-crystalline size than the previous one. The purpose of this experiment is to confirm the existence of such a commensurate phase, the 4/7 phase, at the expected density around which many interesting quantum phenomena are proposed to emerge at low temperatures. Designing of a LEED (low energy electron diffraction) experiment below 0.5 K is also undergoing in order to determine the structures of the commensurate phase unambiguously. A cryogen-free dilution refrigerator which will be used for these next generation experiments has been tested successfully with the lowest temperature of 12 mK and the cooling power of 200 μW at $T = 100 \text{ mK}$.

3. Kosterlitz-Thouless transition of the Sn island network on Graphene:

Since graphene is fabricated on top of a substrate, one can directly couple dopants with two dimensional 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 proximity effect. Actually, graphene has been shown to effectively carry proximity-induced Josephson currents injected from contacting electrodes. On the other hand, it has also known that elemental superconductor Sn readily form self-assembled islands when deposited on graphene at room temperature. Therefore, Sn islands on graphene is a good candidate to study the superconducting proximity effect and 2D Josephson junction network.

The graphene samples are prepared by exfoliating Kish graphite onto SiO_2 substrate. Sn is deposited on graphene with photo-lithographed electrodes in high vacuum, and their transport properties are measured at temperatures down to 0.5 K and in magnetic fields up to 9 T. A sample with Sn of nominally 30 nm thick actually shows islands with about 300 nm diameter and about 20 nm separation in scanning electron microscope image. The temperature dependence of the resistance shows two types of superconducting transitions. The resistance drops suddenly with decreasing temperature at $T \sim 3.9 \text{ K}$ reflecting the superconducting transition of Sn islands. At $2.0 \text{ K} < T < 3.9 \text{ K}$, the resistance shows $\exp(-1/\sqrt{T})$ dependence suggesting Kosterlitz-Thouless (KT) superconducting transition in 2D. From this analysis, KT transition temperature T_{KT} is estimated to be 2.06 K. The resistance does not become zero and gradually decreases with decreasing temperature at $T < 2.0 \text{ K}$, that is presumably because of the finite size effect, since there estimated to be only 6 islands in between electrodes. In magnetic fields of $B > B_c = 77 \text{ mT}$, the slope of the temperature dependence changes its sign from metallic to insulating. In addition, the resistance shows thermally activated $1/T$ dependence in $B < B_c$. These results suggest the field induced superconductor-insulator transition in this superconducting Sn network on graphene.

4. Band gap tuning in functionalized Graphene:

Graphene has a gapless band structure, and it is important for graphene electronics to engineer a band gap in this material. Since the gapless character in graphene is protected by the high symmetry of its lattice, in which two carbon sites in the unit cell are equivalent, the simplest way of gap-opening is to lift the symmetry. One of the approaches to modify the electronic properties is to functionalize the graphene by atom deposition. It is expected that there would be a energy gap with enhanced density of states (DOS) when adatoms form ordered structure on graphene. To experimentaly confirm

this property, we preliminary studied the DOS of Xe atom adsorbed on graphite with STS. We found that a energy gap with an order of ± 1 V is created when the Xe form a $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ adsorbed structure.

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 as well as the application of scanning probe microscopy techniques.

In 2010, we have modified our experimental setup in order to mount a scanning tunneling microscope.

2. Superconductivity of ultrathin Bi films on cleaved GaAs surfaces:

We have performed magnetotransport measurements on ultrathin Bi films on GaAs(110) surfaces. To reduce disorder arising from the substrate, we used cleaved surfaces of insulating GaAs. The critical film thickness for superconductivity was obtained to be 0.42 nm, which is thinner than the previous data for different kinds of substrates. In the study of $I - V$ characteristics, we observed discontinuous jump in the temperature dependence of the power α in $V \propto I^\alpha$, which is associated with “universal jump” of the Kosterlitz-Thouless transition. This indicates that the KT transition can occur in amorphous films as well as Josephson-coupled arrays.

3. Strongly correlated two dimensional systems:

Cyclotron resonance of two-dimensional electrons is studied at low temperatures down to 0.4 K for a high-mobility Si/SiGe quantum well which exhibits a metallic temperature dependence of dc resistivity ρ . The relaxation time τ_{CR} shows a negative temperature dependence, which is similar to that of the transport scattering time τ_t obtained from ρ . The ratio τ_{CR}/τ_t at 0.4 K increases as the electron density N_s decreases, and exceeds unity when N_s approaches the critical density for the metal-insulator transition. [R. Masutomi *et al.*, Phys. Rev. Lett. (accepted for publication).]

18 Shimano Group

Research Subjects: Optical and Terahertz Spectroscopy of Condensed Matter

Member: Ryo Shimano and Shinichi Watanabe

We study light-matter interactions and many body quantum correlations in solids. In order to investigate the role of electron and/or spin correlations in the excited states as well as the ground states, we focus on the low energy electromagnetic responses, in particular in the terahertz(THz) (1THz~4meV) frequency range where quasi-particle excitations and various collective excitations exist. The research summary in this year is as follows.

1. **High density electron-hole system:** We investigated the thermodynamics of high density electron and hole(e-h) system in Si by optical pump and terahertz probe experiments. Through the observation of 1s-2p transition of excitons at 3 THz, we revealed the cooling dynamics of the e-h system and also the formation dynamics of excitons. Towards the realization of quantum degenerate phases such as exciton Bose Einstein condensation and e-h BCS phase, an essential difficulty exists in indirect gap semiconductors, i.e., the spontaneous condensation of e-h system into e-h droplets(EHD). To overcome this difficulty, we developed a pressure anvil cell that can apply uniaxial stress to the crystal so that the formation of EHD is suppressed. We also studied the fine structures of excitons in Si under the magnetic field. Zeeman and diamagnetic shift of excitons are clearly observed through the 1s-2p exciton transitions. By applying the magnetic field, accumulation of excitons into the spin-forbidden lowest energy state is observed.
2. **Optical Hall effect:** We investigated the optical(terahertz frequency) Hall effect in: 1) 2-dimensional electron gas(2DEG) system of a GaAs/AlGaAs heterostructure in the integer quantum Hall regime, and 2) itinerant ferromagnet SrRuO₃, by using highly sensitive THz polarization spectroscopy technique. In the 2DEG system, the optical Hall conductivity $\sigma_{xy}(\omega)$ exhibits a plateau-like behavior around the Landau-level filling $\nu = 2$, indicating that the carrier localization effect, a crucial ingredient in the integer QHE, affects the optical Hall conductivity even in the THz regime. In a SrRuO₃ film, we studied the THz frequency anomalous Hall effect(AHE) and determined $\sigma_{xy}(\omega)$ from the Faraday rotation spectrum. A resonant structure was observed in $\sigma_{xy}(\omega)$ spectrum, which is reasonably accounted for by the Berry phase theory of AHE.
3. **Study of electromagnon in multiferroics:** Electric active magnetic excitation, termed electromagnon, has been proposed in multiferroic TbMnO₃ as a collective excitation in a ferroelectric spin-spiral phase, but their origin had been controversial. We performed comprehensive study of electromagnon in rare earth manganite RMnO₃(R=Dy, Tb, EuY) by THz time-domain spectroscopy and experimentally clarified two types of electromagnon, arising from 1) symmetric($s_i \cdot s_j$) and 2) anti-symmetric($s_i \times s_j$) exchange interaction between the neighboring Mn spins.
4. **Development of intense THz light source:** We developed an intense THz light source with the peak electric-field amplitude as large as 0.9 MV/cm, by using optical rectification of femtosecond laser pulses in a LiNbO₃ crystal. By using the developed intense THz pulses, we have demonstrated; 1) dynamical Stark effect of excitons in carbon nanotubes, 2) THz field-acceleration of carriers in carbon nanotubes that results in impact excitation of excitons, 3) THz pulse-induced melting of charge-order in a quasi-2D organic conductor θ -(BEDT-TTF)₂CsZn(SCN)₄.

References

- [1] T. Suzuki and R. Shimano, Phys. Rev. B **83**, 085207 (2011).
- [2] R. Shimano, T. Suzuki, Physica Status Solidi (c) **8**, p. 1153-1156 (2011).
- [3] S. Watanabe, N. Minami, and R. Shimano, Optics Express **19**, 1528 (2011).
- [4] J. Fujioka, Y. Ida, Y. Takahashi, N. Kida, R. Shimano, and Y. Tokura, Phys. Rev. B **82**, 140409(R) (2010).
- [5] S. Seki, N. Kida, S. Kumakura, R. Shimano, and Y. Tokura, Phys. Rev. Lett. **105**, 097207 (2010).
- [6] T. Ogawa, S. Watanabe, N. Minami, and R. Shimano, Appl. Phys. Lett. **97**, 041111 (2010).
- [7] Y. Ikebe, T. Morimoto, R. Masutomi, T. Okamoto, H. Aoki, and R. Shimano, Phys. Rev. Lett. **104**, 256802 (2010).
- [8] S. Watanabe, R. Kondo, S. Kagoshima, and R. Shimano, Physica B **405**, S360-S362 (2010).

19 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;

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

20 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 the last 15 years. 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 [1,2,3]
 - Error models for distributed quantum information processing
 - Distributed Quantum Computation over the Buttery Network [4]
 - Controllization of a unitary operation
 - Functionality-preserving randomization for unitary operations
- Entanglement theory
 - Multipartite entanglement [5]
 - Random states generation by Hamiltonian dynamics with multi-body interactions
 - Entanglement property of states randomly distributed in a Hilbert space with symmetry
 - Entanglement witness non-equilibrium steady state [6]
 - Detecting entanglement production during a non-equilibrium process
 - Structural characteriziation of graph states for quantum information processing [7]
- Quantum tomography
 - Error probability analysis in quantum tomography [8]
 - Quantum tomography under incomplete settings
 - Adaptive quantum estimation
 - Operational indistinguishability in quantum tomography [9]
 - Continuous variable 2-designs
- Foundation of quantum mechanics
 - Memory effect of the environment and thermalization of a quantum system
 - Analysis of bipartite nonlocal correlation and non-locality distillation

Please refer our webpage: <http://www.eve.phys.s.u-tokyo.ac.jp/indexe.htm>

References

1. A. Soeda and M. Murao, *Delocalization power of global unitary operations on quantum information*”, *New J. Phys.* **12**, 093013 (2010)
2. A. Soeda and M. Murao, *Comparing globalness of bipartite unitary operations acting on quantum information: delocalization power, entanglement cost, and entangling power*, arXiv:1010.4599 (2010)

3. A. Soeda, P. S. Turner and M. Murao, *Entanglement cost of implementing controlled-unitary operations*, arXiv:1008.1129 (2010)
4. A. Soeda, Y. Kinjo, P.S. Turner and M. Murao, *Quantum Computation over the Butterfly Network*, arXiv:1010.4350 (2010)
5. M. Aulbach, D. Markham and M. Murao, *The maximally entangled symmetric state in terms of the geometric measure*, New J. Phys. **12**, 073025 (2010)
6. J. Hide, *A steady state entanglement witness*, arXiv:1102.0220 (2010)
7. M. Mhalla, M. Murao, S. Perdrix, M. Someya and P. S. Turner, *Which graph states are useful for quantum information processing?*, arXiv: 1006.2616 (2010)
8. T. Sugiyama, P. S. Turner, and M. Murao, *Error probability analysis in quantum tomography: A tool for evaluating experiments*, Phys. Rev A **83**, 012105 (2011)
9. P. S. Turner, T. Sugiyama, T. Rudolph, *Testing for multiparticle indistinguishability*, Proceedings of the 10th International Conference on Quantum Communication, Measurement & Computing, (2010)

21 Ueda Group

Research Subjects: Bose-Einstein condensation, Fermionic superfluidity, cold molecules, measurement theory, quantum information, quantum control

Member: Masahito Ueda and Yuki Kawaguchi

21.1 Quantum States of Ultracold Atoms

Bogoliubov theory and Lee-Huang-Yang corrections in spin-1 and spin-2 Bose-Einstein condensates in the presence of the quadratic Zeeman effect

We develop Bogoliubov theory of spin-1 and spin-2 Bose-Einstein condensates (BECs) in the presence of a quadratic Zeeman effect, and derive the Lee-Huang-Yang (LHY) corrections to the ground-state energy, pressure, sound velocity, and quantum depletion. We investigate all the phases of spin-1 and spin-2 BECs that can be realized experimentally. We also examine the stability of each phase against quantum fluctuations and the quadratic Zeeman effect. Furthermore, we discuss a relationship between the number of symmetry generators that are spontaneously broken and that of Nambu-Goldstone (NG) modes. It is found that in the spin-2 nematic phase there are special Bogoliubov modes that have gapless linear dispersion relations but do not belong to the NG modes.

Quasi-Nambu-Goldstone Modes in Bose-Einstein Condensates

We show that quasi-Nambu-Goldstone (NG) modes, which play prominent roles in high energy physics but have been elusive experimentally, can be realized with atomic Bose-Einstein condensates. The quasi-NG modes emerge when the symmetry of a ground state is larger than that of the Hamiltonian. When they appear, the conventional vacuum manifold should be enlarged. Consequently, topological defects that are stable within the conventional vacuum manifold become unstable and decay by emitting the quasi-NG modes. Contrary to conventional wisdom, however, we show that the topological defects are stabilized by quantum fluctuations that make the quasi-NG modes massive, thereby suppressing their emission.

Spontaneous magnetic ordering in a ferromagnetic spinor dipolar Bose-Einstein condensate

We study the spin dynamics of a spin-1 ferromagnetic Bose-Einstein condensate with magnetic dipole-dipole interaction (MDDI) based on the Gross-Pitaevskii and Bogoliubov theories. We find that various magnetic structures such as checkerboards and stripes emerge in the course of the dynamics due to the combined effects of spin-exchange interaction, MDDI, quadratic Zeeman and finite-size effects, and nonstationary initial conditions. However, the short-range magnetic order observed by the Berkeley group [Phys. Rev. Lett. 100, 170403 (2008)] is not fully reproduced in our calculations; the periodicity of the order differs by a factor of 3 and the checkerboard pattern eventually dissolves in the course of time.

Hydrodynamic equation of a spinor dipolar Bose-Einstein condensate

We introduce equations of motion for spin dynamics in a ferromagnetic Bose-Einstein condensate with magnetic dipole-dipole interaction, written using a vector expressing the superfluid velocity and a complex scalar describing the magnetization. This simple hydrodynamical description extracts the dynamics of spin wave and affords a straightforward approach by which to investigate the spin dynamics of the condensate. To demonstrate the advantages of the description, we illustrate dynamical instability and magnetic fluctuation preference, which are expressed in analytical forms.

Nonuniversal Efimov Atom-Dimer Resonances in a Three-Component Mixture of ${}^6\text{Li}$

The Efimov states are universal trimer states in a three-body system with resonant two-body interactions. We measured the magnetic-field dependence of the atom-dimer loss a three-component mixture of ${}^6\text{Li}$ atoms, and observed two enhanced atom-dimer loss at 602 G and 685 G. These loss peaks correspond to the degeneracy points of the energy levels of dimers and the Efimov states, and the number of peaks indicates the existence of the ground and first excited Efimov trimers. We also found that the locations of these peaks disagree with universal theory predictions, in a way that cannot be explained by non-universal 2-body properties. We constructed theoretical models that characterize the non-universal three-body physics of three-component ${}^6\text{Li}$ atoms with a monotonic-energy-dependent three-body parameter. This result was published in Physical Review Letters in 2010.

21.2 Quantum Information, Quantum Measurement, and Information thermodynamics

Experimental realization of the Szilard engine [Nature Physics 6, 988-992 (2010)]

In 1929, Leo Szilard proposed a model of "Maxwell's demon," which converts the obtained information to the free energy (or the work) by feedback control. We have demonstrated the experimental realization of the Szilard engine for the first time. We performed a real-time feedback control on a single colloidal particle of the submicron scale at the room temperature. As a result, we succeeded to increase the particle free energy by the feedback control, and observed that the free-energy increase was larger than the input work. We have also experimentally verified the generalized Jarzynski equality, which was theoretically proposed by us. This work was the collaboration with the Muneyuki group (Chuo Univ.) and the Sano group (Univ. Tokyo), was published in Nature Physics, and was highlighted by News and Views.

Theoretical analysis of the quantum Szilard engine [Phys. Rev. Lett. 106, 070401 (2011)]

We theoretically studied the quantum version of the Szilard engine with multi particles. As a result, we derived the general formula that gives the work that can be extracted from the engine. In particular, we found the quantum effect for the case of the single quantum particle, in which we need a positive amount of work to insert a barrier to the engine. We also found that the identical-particle effect is observed for the multi particle case. For example, the amount of work that can be extracted from the Bosonic engine is larger than the work from the Fermionic engine. The quantum work was shown to converge to the

classical work with distinguishable particles. This work was published in Physical Review Letters, selected for Editor's suggestion, and featured by Physics Viewpoint.

22 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. Confirmed black holes have masses in the range from several to several billion solar masses. Utilizing wide-band *Suzaku* spectra, we have shown that the matter accreting onto stellar-mass black holes and active galactic nuclei [3] both forms inhomogeneous hot “corona” that Comptonizes soft photons into hard X-rays. Evidence for rapid black-hole rotation, claimed by some foreign researchers, is considered rather inconclusive or doubtful [5].

Neutron Stars with Various Magnetic Fields: Using *Suzaku*, we are studying neutron stars with a variety of magnetic field strengths, B . The least magnetized ones with $B < 10^9$ G, known as X-ray burst sources, behave rather similarly to stellar-mass black holes. Ordinary binary X-ray pulsars have $B \sim 10^{12}$ G, as estimated via the detection of electron cyclotron absorption lines. Some “fast transient” objects may have $B \sim 10^{13}$ G. Finally, we have revealed that about 10 “magnetars”, supposed to have $B = 10^{14-15}$ G, emit unusual hard X-ray components, extending to ~ 100 keV with very flat spectra [2]. We speculate that the magnetism of neutron stars is a manifestation of ferromagnetism in nuclear matter.

Plasma Heating and Particle Acceleration: The universe is full of processes of plasma heating and particle acceleration. In fact, 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. There, large-scale magnetic structures, and their interactions with moving galaxies, are considered to be of essential importance [4].

White Dwarfs and the Galactic Ridge Emission: From the 1980’s, an apparently extended X-ray emission, called Galactic Ridge X-ray Emission, was known to distribute along our Galactic plane. Using *Suzaku*, we have shown that this phenomenon can be considered, at least in energies above ~ 10 keV, as an assembly of X-ray emission from numerous mass-accreting magnetic white dwarfs. This is supported by a close resemblance between the Galactic Ridge X-ray Emission spectra and those of nearby individual white dwarf binaries [1].

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 the development of “SpaceWire” technology, large BGO scintillators, and mechanical/thermal designs of the instruments.

1. Yuasa, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Saitou, K., Ishida, M., Ebisawa, K., Mori, H. & Yamada, S.: “White Dwarf Masses in Intermediate Polars Observed with the *Suzaku* Satellite”, *Astron. Astrophys.* **520**, A25 (2010)
2. Enoto, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Rea, N., Hurley, K. & Shibata, S.: “Broadband Study with *Suzaku* of the Magnetar Class”, *The Astrophysical Journal Letters*, **722**, Issue 2, L162–167 (2010)
3. Noda, H., Makishima, K., Uehara, Y., Yamada, S., Nakazawa, K.: “*Suzaku* Discovery of a Hard Component Varying Independently of the Power-Law Emission in MCG6-30-15 *Publ. Astr. Soc. Japan* **63**, in press (2011)
4. Takahashi, I., Kawaharada, M., Makishima, K., Matsushita, K., Fukazawa, Y., Ikebe, Y., Kitaguchi, T., Kokubun, M., Nakazawa, K., Okuyama, S., Ota, N. & Tamura, T. “X-ray Diagnostics of Thermal Conditions of the Hot Plasmas in the Centaurus Cluster”, *Astrophys. J.* **701**, 377–395 (2009)

5. Yamada, S., Makishima, K., Uehara, Y., Nakazawa, K., Takahashi, H., Dotani, T., Ueda, Y., Ebisawa, K., Kubota, A. & Gandhi, P.: "Is the Black Hole in GX 339-4 Really Spinning Rapidly?", *Astrophys. J. Let.* **707**, L109–L103 (2009)

23 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, Yoshihiko Nagashima

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 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 burning plasmas. 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 in our group using the TST-2 spherical tokamak. TST-2 is now located in a new experimental building in Kashiwa Campus. Our group is tackling the problem of creating and sustaining ST plasmas using radio frequency (RF) waves.

In TST-2 RF power is used to form the initial ST plasma and to ramp up the plasma current I_p . Previous experiments have demonstrated plasma start-up using RF powers at 2.45 GHz (ECH) and/or 21 MHz. RF waves at 200 MHz were excited with either symmetric or asymmetric wavenumber spectrum (standing wave or travelling wave). With 200 MHz RF power, the lower limit of magnetic field strength for plasma start-up could be extended downward by roughly a factor of three compared to ECH. I_p ramp-up to 12 kA was achieved with the travelling wavenumber spectrum in combination with a slowly increasing vertical field, compared to typical levels of 1–2 kA achievable with the symmetric spectrum. When the wave-driven current is in the same direction as I_p , a stable ST configuration is obtained, but when the wave-driven current is in the opposite direction a large I_p modulation (transition between two states) was observed. The asymmetric behavior observed with travelling waves launched in opposite directions indicates that the contribution of wave-driven current is significant. A build-up of energetic electrons as I_p is ramped up, observed by hard X-ray spectroscopy, also indicates the importance of the wave-driven current. The plasma configuration was reconstructed based on magnetic measurements. Two representative equilibria were obtained, one with centrally peaked current density profile, and the other with a peak near the outboard boundary. With ECH, both types are observed depending on the gas pressure. Only the outboard peaked current density profile was obtained by RF with symmetric spectrum, whereas centrally peaked current density profile was also obtained by RF with travelling spectrum. These profiles are probably manifestations of the different RF power deposition profiles. RF power (200 MHz) was also excited in inductively formed plasmas with $I_p \simeq 100$ kA. No conclusive evidence of current drive or heating has been observed with up to 130 kW of RF power. This is most likely due to the low magnetic field (0.1 T) used in this experiment. For the toroidal mode number (18) of the excited wave and the plasma density (10^{18} m^{-3}) measured near the antenna, higher magnetic fields (0.3 T) are needed for the excited wave to reach the plasma core, based on numerical modelling of RF waves. Experiments at higher magnetic fields with improved antennas which can excite a more desirable wave polarization are planned in 2011.

Plasma transport is governed by microscopic turbulence. In order to measure the electron temperature fluctuation using electrostatic probes, the fast voltage sweeping technique was developed. The validity of the current-voltage characteristic curve was confirmed. The fitting errors in the evaluation of the electron temperature itself are less than 10 % of fluctuation levels in the electron temperature. In order to improve the signal-to-noise ratio in low density plasmas, and to measure the electron pressure anisotropy and the electron current density, a multi-pass Thomson scattering system is being developed. As a proof-of-principle, a double-pass Thomson scattering system is being tested. The electron pressure parallel to the magnetic field ($p_{e\parallel}$), electron pressure perpendicular to the magnetic field ($p_{e\perp}$), and electron current density

(j_e) at magnetic axis can be measured. This system should be able to measure temperature anisotropies of over 15 % ($T_{e\parallel}/T_{e\perp} > 15\%$) in high density ($n_e > 3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$) plasmas. A high time resolution electron temperature and density measurement using helium line intensity ratios based on the collisional-radiative model is being developed. The intensity ratio can be calculated using Collisional-Radiative model. A 24-channel system (8 spatial channels at three wavelengths) is in use. Initial results indicate that both electron temperature and density have profiles peaked on the outboard side.

24 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, LCGT (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope) was approved and funded by the Leading-edge Research Infrastructure Program of the Japanese government. 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.

- Ground based laser interferometric gravitational wave detectors
 - LCGT has started !
 - Design of LCGT interferometer
- Space laser interferometer
 - Space laser interferometer, DECIGO, DECIGO pathfinder, DPF
 - FP cavity for DPF
 - DPF gradiometer in space
 - Study of the effect of the residual gas
 - SWIM _{$\mu\nu$}
- Development of a gravitational wave detector using magnetic levitation
 - Data analysis for the background gravitational waves
 - Generation of the mimic data for gravitational wave analysis
- High sensitive laser interferometer using non-classical light
 - Generation of the squeezed light
- Development of the ultra stable laser source
 - Laser stabilization using a cryogenic cavity
 - Study of the cavity support
 - Study of the cryostat design
- Gravitational force at small distances

- Measurement using torsion-type resonant antenna
- Measurement by the spectroscopy of the molecule

references

- [1] Masaki Ando, Koji Ishidohiro, Kazuhiro Yamamoto, Kent Yagi, Wataru Kokuyama, Kimio Tsubono, and Akiteru Takamori: Torsion-Bar Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observations, *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 161101.
- [2] Seiji Kawamura, Masaki Ando, Naoki Seto, Shuichi Sato, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono *et al.*, and the DECIGO working group: The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO, *Class. Quantum Grav.* **28** (2011) 094011.

25 Sano Harada Group

Research Subjects: Physics of out-of-equilibrium systems and living matter

Members: Masaki Sano and Takahiro Harada

Main research topics of our group are nonlinear dynamics, pattern formation in dissipative systems, nonequilibrium statistical mechanics, and biophysics. By closely studying oscillations, chaos, and turbulent behavior and fluctuations in fluidic, solidic, and granular materials as well as chemical reactions and biological systems, we wish to discover a diverse of novel phenomena and distils simple and universal laws underlying such phenomena. Our research are grounded on dynamical systems theory, statistical mechanics, soft matter physics, and laboratory experiments. The following are the representative research subjects in our laboratory.

1. Study of turbulence

- (1) Search for the ultimate scaling regime in developed thermal turbulence
- (2) Study of statistical properties and coherent structures in turbulence
- (3) Turbulence - turbulence transition in electro hydrodynamic convection of liquid crystals

2. Nonlinear Dynamics and Chaos

- (1) Pattern forming phenomena and their universalities in dissipative systems including granular materials
- (2) Spatio-temporal dynamics in spatially extended dissipative systems

3. Nonequilibrium statistical mechanics and softmatter physics

- (1) Fundamental studies on the nature of fluctuations and responses of system far from equilibrium
- (2) Developing a general theory of measurements on small complex systems
- (3) Manipulation of soft materials via novel optical trap techniques
- (4) Softmatter physics on polymers, thermophoretic flows and other related topics

3. Dynamical aspects of biological systems

- (1) Single molecule level measurement of DNA collapsing, DNA-protein interaction, and gene expression
- (2) Study of slow dynamics in cellular functions
- (3) Mechanical aspects of cell migration
- (4) Pattern formation of bacteria

References

1. Kazumasa A. Takeuchi and Masaki Sano: Universal Fluctuations of Growing Interfaces: Evidence in Turbulent Liquid Crystals, *Physical Review Letters*, **104**, 230601 (2010).
2. Toru Hiraiwa, Miki Y. Matsuo, Takahiro Ohkuma, Takao Ohta, and Masaki Sano: Dynamics of a deformable self-propelled domain, *Europhys. Lett.* **91**, 20001 (2010).
3. Shoichi Toyabe, Takahiro Sagawa, Masahito Ueda, Eiro Muneyuki, and Masaki Sano: Experimental demonstration of information-to-energy conversion and validation of the generalized Jarzynski equality, *Nature Physics*, **6**, 988 (2010).
4. Hong-Ren Jiang, Natsuhiko Yoshinaga, Masaki Sano: Active Motion of Janus Particle by Self-thermophoresis in Defocused Laser Beam, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 268302 (2010). (selected for an Editor's Suggestion and highlighted with a Viewpoint in Physics of APS.)
5. Helene Delanoe-Ayari, Jean-Paul Rieu, and Masaki Sano: 4D Traction Force Microscopy Reveals Asymmetric Cortical Forces in Migrating Dictyostelium Cells, *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 248103 (2010).
6. Takahiro Harada, Hisa-Aki Tanaka, Michael J. Hankins, and Istvan Z. Kiss: Optimal Waveform for the Entrainment of a Weakly Forced Oscillator, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 088301 (2010).
7. Makito Miyazaki and Takahiro Harada: Bayesian estimation of the internal structure of proteins from single-molecule measurements, *J. Chem. Phys.*, **134**, 085108 (2011).
8. Makito Miyazaki and Takahiro Harada: Go-and-Back method: Effective estimation of the hidden motion of proteins from single-molecule time series, *J. Chem. Phys.*, **134**, 135104 (2011).
9. Kyogo Kawaguchi and Masaki Sano: Efficiency of Free Energy Transduction in Autonomous Systems, arXiv:1103.1961.
10. Marguerite Bienia and Masaki Sano: Non-destructive ultrasonic velocimetry for central region velocity fields in turbulent Rayleigh-Benard convection of mercury, *Flow Measurement and Instrumentation*, DOI 10.1016/j.flowmeasinst.2011.03.009, online publication, Mar-24 (2011).

26 Yamamoto Group

Research Subjects: Submillimeter-wave and Terahertz Astronomy, Star and Planet Formation, Chemical Evolution of Interstellar Molecular Clouds, Development of Terahertz Detectors

Member: Satoshi Yamamoto and 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 in the world.

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 CH₄ which is evaporated from ice mantles. This has recently been confirmed by our detection of CH₃D 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 570 K at 1.5 THz, which is the best performance at this frequency 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 is now being assembled, which will be installed on the ASTE 10 m telescope for astronomical observations in 2011.

- [1] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., Abundant Carbon-Chain Molecules toward the Low-Mass Protostar IRAS04368+2557 in L1527?h, ApJ, 672, 371 (2008).
- [2] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., Deuterated Molecules in Warm Carbon Chain Chemistry: The L1527 Case?h, 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?h, Supercond. Sci. Technol. 23, 045004 (2010).

27 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) All-optical molecular orientation [1]

We report clear evidence of all-optical orientation of carbonyl sulfide molecules with an intense nonresonant two-color laser field in the adiabatic regime. The technique relies on the combined effects of anisotropic hyperpolarizability interaction and anisotropic polarizability interaction and does not rely on the permanent dipole interaction with an electrostatic field. It is demonstrated that the molecular orientation can be controlled simply by changing the relative phase between the two wavelength fields. The present technique brings researchers a new steering tool of gaseous molecules and will be quite useful in various fields such as electronic stereodynamics in molecules and ultrafast molecular imaging.

(2) Dependence of the generation efficiency of high-order sum and difference frequencies in the extreme ultraviolet region on the wavelength of an added tunable laser field [2]

We investigate the dependence of the generation efficiency of sum and difference frequencies in the extreme ultraviolet (xuv) region on the wavelength of an added tunable laser field. The wavelength of the added field ranges from 600 nm to 1500 nm. The generation efficiency of sum and difference frequencies is dramatically enhanced when the wavelength of the added field is longer than that of the fundamental field for pure harmonics. The discussions are held to the added field with perturbative intensity first, and they are further extended to that with nonperturbative intensity.

(3) Effect of nuclear motion observed in high-order harmonic generation from D₂/H₂ molecules with intense multi-cycle 1300 nm and 800 nm pulses [3]

We investigate high-order harmonic generation from D₂/H₂ molecules with intense multi-cycle pulses centred both at 1300 nm (60 fs) and at 800 nm (50 fs) together with that from N₂/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 D₂ and H₂ 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 σ_g and 2p σ_u states in D₂⁺ and H₂⁺ molecular ions during the higher order returns of the electron wave packets.

- [1] Keita Oda, Masafumi Hita, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, Phys. Rev. Lett. **104**, 213901 (2010).
- [2] Yuichiro Oguchi, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 014301 (2011).
- [3] Hiroki Mizutani, Shinichirou Minemoto, Yuichiro Oguchi, and Hirofumi Sakai, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **44**, 081002 (2011).

28 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

Our new research activities have started within the Department of Physics. 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) Achievement of Bose-Einstein condensation phase of excitons in semiconductors[1][5]
 - (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) Control of circularly polarized spontaneous emission with artificial chiral periodic nanostructures [4]
 - (b) Magnetic THz radiation from NiO antiferromagnetic resonance [3]
 - (c) THz radiation from graphite thin films [2]
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, T. Ideguchi, Andre Mysyrowicz, and M. Kuwata-Gonokami: Quantum inelastic collisions between paraexcitons in Cu₂O, Phys. Rev. B **82**, 041201 (2010).
- [2] Reported in Nature Photonics **4**, 673 (2010).
- [3] T. Higuchi, N. Kanda, H. Tamari, M. Kuwata-Gonokami: Selection rules for light-induced magnetization of a crystal with threefold symmetry: The case of antiferromagnetic NiO, Phys. Rev. Lett. **106**, 047401 (2011).
- [4] K. Konishi, M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Arakawa, and M. Kuwata-Gonokami: Circularly Polarized Light Emission from Semiconductor Planar Chiral Nanostructures, Phys. Rev. Lett. **106**, 057402 (2011).
- [5] K. Yoshioka, E. Chae, and M. Kuwata-Gonokami: Transition to a Bose-Einstein condensate and relaxation explosion of excitons at sub-Kelvin temperatures, Nature Communications to be published.

29 Nose Group

Research Subjects:Molecular Mechanism of Neural Network Formation

Member:Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka and Etsuko Takasu

What is the physical basis of formation of the brain? The aim of our laboratory is to elucidate the molecular mechanism of neural development and function by using, as a model, the simple nervous system of the fruitfly, *Drosophila*. We focus on the synapses between motor neurons and their target muscles, and study the molecular mechanisms of how specific synaptic partners recognize each other and form synaptic connections. The following research plans are in progress.

1. Molecular mechanism of the neuromuscular target recognition

The proper functioning of the nervous system depends on precise interconnections of distinct types of neurons. Therefore, understanding how neurons specifically find and recognize their target cells is a central question in neuroscience. We have identified specific recognition molecules that are expressed in specific target cells and determine synaptic specificity.

1.1. Neural wiring by a negative signal: identification of a repulsive target cue that determines synaptic specificity.

The final matching of pre- and postsynaptic cells is thought to be mediated by specific molecular cues expressed on the target cells. While previous studies demonstrated essential roles of several target-derived attractive cues, less is known about the role of repulsion by non-target cells. In collaboration with Prof. Hiroyuki Aburatani (Research Center of Advanced Science and Technology, University of Tokyo), we conducted single-cell microarray analysis of two neighboring muscles (called M12 and M13) in *Drosophila*, which are innervated by distinct motor neurons, by directly isolating them from dissected embryos. We identified a number of potential target cues that are differentially expressed between the two muscles, including M13-enriched Wnt4, a secreted protein of the Wnt family. When the function of Wnt4 was inhibited, motor neurons that normally connect with M12 formed smaller synapses on M12 but instead, inappropriately connected with M13. Conversely, forced expression of Wnt4 in M12 inhibited synapse formation by these motor neurons. These results suggest that Wnt4 generates target specificity by preventing synapse formation on a non-target muscle.

2. Live-imaging of synapse formation in vivo

Synapses are specialized junctions through which neurons signal to each other and to other target cells such as muscles and are crucial to the functioning of the nervous system. However, the mechanism of how the synapses form during development remains poorly understood. We applied live imaging of fluorescent fusion proteins expressed in the target cells to visualize the process of synapse formation in developing embryos.

2.1 Bidirectional recognition for neuronal matchmaking

The mechanism of how specific neural connections are formed in living animals is one of the significant topics in neuroscience. A traditional view is one-sided: motile growth cones of the presynaptic neurons actively search for the target cell, whereas the target cells wait still to be selected by adequate partner

neurons. We found that not only presynaptic neurons but also postsynaptic target cells actively search for their partners during the formation of neural network. Such bidirectional recognition might be critical for the development of precise neural connections not only in *Drosophila* but also in other animals including humans.

30 Higuchi Group

Research Subjects: Motor proteins in in vitro, cells and mice

Member: Hideo Higuchi and Motoshi Kaya

We succeeded in measuring stiffness and step size of single-few myosin molecules at in vitro system and imaging the dynamics of GFP-EB1 molecules in mice, that is, in vivo. The detail are as following. Skeletal muscles are necessary not only for body segment movements, but also for our daily communications, such as speaking, writing and facial expressions. Skeletal myosins are an essential protein that interacts with actin filaments and generates forces by stretching the elastic portion of myosin heads during muscle contractions. It has been well known that the mechanical efficiency of muscle contraction can be up to 50 %, which is much higher than that of 15 % in automobile or of 1 % in micro-machines. Theoretically, the contribution of friction to the energy loss is more pronounced as the body size decreases. Thus, our question is why a nano-scale protein, skeletal myosin, can achieve such a high mechanical efficiency? In order to address this question, we measured the elasticity of single myosin molecules and the displacements generated by myosins by the combination of optical trapping and fluorescence imaging techniques with a few nanometer and pico-newton accuracy. We found that myosins become extremely stiff when they are stretched during the force generation period, while they becomes much more compliant when they are compressed after the force generation. In the presence of ATP, myosins generate the sliding movement of actin filament by 8 nm. The biphasic elastic response implies that single skeletal myosins are optimally designed to generate the contractile force efficiently by enhancing the ability of the force generation before the force generation while minimizing the resistance force after the force generation. Microtubules (MTs) are highly dynamic and polar structures that are involved in many important cellular processes including mitosis, migration, adhesion, cargo trafficking, in addition to tumor metastasis. Endbinding protein 1 (EB1) is a MT plus-end binding proteins that are specifically accumulated at the polymerizing end of MTs. In this study, we imaged GFP-EB1 to observed the real-time MT dynamics in living cells and mice. Using a spinning disc confocal microscopy the comet-like localizations of GFP-EB1 were observed in human breast cancer cell line. We analyzed the velocity of GFP-EB1 comets, indicating MT growing speed with the nanometer scale, by tracking the comet centers using an automated computer program. It was faster around centrosome in the central region of the cell than submembrane region. We also imaged successfully GFP-EB1 in three-dimensionally cultured cells in the extracellular matrix that mimics the three-dimensional structure of living tissue. To determine MT dynamics in living mice, breast cancer cells expressed GFP-EB1 were xenografted in nude mice. GFP-EB1 comets were observed under the confocal microscopy in vivo. These techniques have potential to enable quantitative analysis of MT dynamics in living mice, for example, under the presence of anticancer reagents.

- [1] Hirota Y., A. Meunier, S. Huang, T. Shimozawa, O. Yamada, Y.S Kida, M. Inoue, T. Ito, H. Kato, M. Sakaguchi, T. Sunabori, M. Nakaya, S. Nonaka, T. Ogura, H. Higuchi, H. Okano, N. Spassky, and *K. Sawamoto. Planar polarity of multiciliated ependymal cells involves the anterior migration of basal bodies regulated by non-muscle myosin II. *Development* 137, 3037-3046 (2010)

- [2] Kaya M. and *H. Higuchi. Non-linear elasticity and an 8 nm working stroke of single myosin molecules in myofilaments. *Science* 329, 686-689 (2010)
- [3] Fujita H, H. Hatakeyama, TM. Watanabe, M. Sato, H. Higuchi and * M. Kanzaki. Identification of Three Distinct Functional Sites of Insulin-mediated GLUT4 Trafficking in Adipocytes Using Quantitative Single Molecule Imaging. *Mol. Biol. Cell* 21, 2721-2731 (2010)
- [4] Watanabe TM, H. Tokuo, K. Gonda, H. Higuchi and * M. Ikebe. Myosin-X induces filopodia by multiple elongation mechanism. *J. Biol. Chem.* 285, 19605-14 (2010)

III

2010年度 物理学教室全般に関する報告

1 学部講義概要

1 2年生 冬学期

1.1 電磁気学 I : 坪野 公夫

1. 相対論の背景

1.1 相対論はなぜ必要か

1.2 ニュートン力学とガリレイ変換

1.3 ベクトル演算子

1.4 マクスウェルの電磁気学とガリレイ変換

1.5 エーテルをめぐる実験

2. 特殊相対性理論

2.1 特殊相対性理論

2.2 ローレンツ変換

2.3 同時性の概念

2.4 ミンコフスキ一時空

2.5 共変性

3. 相対論的な時空間

3.1 時計の遅れ

3.2 ローレンツ収縮

3.3 速度の合成

3.4 ドップラー効果

4. 相対論的力学

4.1 相対論的質量

4.2 相対論的運動量、エネルギー

4.3 4元ベクトル

4.4 光子（フォトン）

4.5 粒子の生成、崩壊

4.6 散乱問題

4.7 相対論的運動方程式

4.8 一般ローレンツ変換

4.9 力の変換則

5. 相対論的電磁気学

5.1 クーロンの法則

5.2 磁気的な力

5.3 電場、磁場の変換則

5.4 ビオ・サバールの法則

5.5 静電場、静磁場に対する Maxwell eq.

5.6 不変な電磁場中での荷電粒子の運動

5.7 時間的に変化する電場、磁場に対する Maxwell eq.

5.8 4元ポテンシャルの導入

5.9 物質中の電場、磁場、Maxwell eq.

5.10 電磁場テンソルの導入

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

1.1 ニュートンの法則

1.2 ガリレイ変換

1.3 オイラー-ラグランジュ方程式

1.4 一般化座標と拘束条件

1.5 ダランベールの原理

2. 最小作用の原理**2.1 最小作用の原理****2.2 オイラー-ラグランジュ方程式の導出****2.3 自由粒子のラグランジアン****2.4 相互作用する質点からなる孤立系のラグランジアン****3. 対称性と保存則****3.1 時間の一様性 → エネルギー保存則****3.2 空間の一様性 → 運動量保存則****3.3 空間の等方性 → 角運動量保存則****3.4 循環座標****3.5 ネーターの定理****4. さまざまなラグランジアン：回転座標系、電磁場、摩擦のある系論****4.1 回転座標系とコリオリカ****4.2 ローレンツカ****4.3 摩擦のある系****5. ハミルトン形式と正準変換****5.1 ルジャンドル変換****5.2 ハミルトニアンと位相空間****5.3 正準方程式****5.4 正準変換と母関数****5.5 正準変換の例****5.6 ポアソン括弧式****5.7 ハミルトン-ヤコビの方程式****5.8 リウヴィルの定理****6. 量子力学の基礎****6.1 アインシュタインード・ブロイの関係式****6.2 シュレーディンガー方程式****6.3 重ね合わせの原理****6.4 オプザーバブル****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：長谷川 修司・溝川 貴司****1. X線****1.1 X線の発見、****1.2 特性X線と連続X線、Moseleyの法則****1.3 Thomson 散乱と Compton 散乱****1.4 X線回折****1.5 X線研究の拡がり****2. 電子****2.1 粒子性と波動性****2.2 電子回折と顕微鏡****2.3 Aharonov-Bohm 効果****2.4 トンネル効果と STM****3. 実験環境****3.1 低温の生成と低温物理****3.2 真空の生成と物理学の発展****3.3 気体分子運動論****4. 単位系と基礎物理定数**

- 4.1 単位系の定義
- 4.2 基礎物理定数の測定
- 5. 実験の基礎と各種の計測法
 - 5.1 電気の測定
 - 5.2 磁気の測定
 - 5.3 放射線の測定

- 5.4 光の測定
- 5.5 回路・コンピューターの利用
- 6. 誤差論
 - 6.1 誤差の分類
 - 6.2 誤差伝播の法則
 - 6.3 最小二乗法

1.4 物理数学I：青木 秀夫

- 1. 複素関数
 - 1.1 物理学における複素数
 - 1.2 複素関数と Riemann 面
 - 1.3 初等関数と収束半径
- 2. 複素関数の微分と正則性
 - 2.1 複素微分
 - 2.2 Cauchy-Riemann の関係式
 - 2.3 調和関数
- 3. Cauchy の積分公式とその応用
 - 3.1 複素積分の定義と Cauchy の積分定理
 - 3.2 主値積分
 - 3.3 Cauchy の積分公式と Taylor 展開
 - 3.4 Laurent 展開
 - 3.5 解析接続

- 4. 等角写像
 - 4.1 正則関数と等角(共形)写像
 - 4.2 共形変換の応用
- 5. Γ関数
 - 5.1 Γ関数
 - 5.2 鞍点法
 - 5.3 Γ関数の無限乗積表示と Hankel 表示
 - 5.4 Stirling の公式
 - 5.5 ζ関数
- 6. Fourier 級数と Sturm-Liouville 理論
 - 6.1 Fourier 級数と Fourier 変換
 - 6.2 固有関数展開
 - 6.3 δ関数の Fourier 変換
 - 6.4 Fourier 変換の微分方程式への応用

1.5 物理数学II：浜口幸一

- 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 涡電流****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****1.1 3次元のシュレーディンガー方程式, 動径運動量・角運動量****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グール多項式****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 ウイグナー・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 流体力学 I : 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 | 6. 粘性流体の運動 |
| 3. 流体力学の基礎方程式 | 7. 低レイノルズ数と高レイノルズ数の流れ |
| 4. 完全流体の運動 | 8. 流れの安定性 |
| 5. ポテンシャル流とその性質 | 9. 乱流 |

2.4 統計力学 I : 宮下 精二

- | | |
|-----------------|--------------|
| 1. 热力学（復習として行う） | 2.2 正準集団 |
| 1.1 热力学の基本概念 | 2.2 大正準集団 |
| 1.2 热力学第一法則 | 3. 量子統計力学 |
| 1.3 热力学第二法則 | 3.1 量子統計力学 |
| 1.4 热力学第三法則 | 3.2 黒体輻射 |
| 1.5 热力学関数 | 3.3 量子磁性体 |
| 2. 統計力学の手法 | 3.4 理想フェルミ気体 |
| 2.1 小正準集団 | 3.5 理想ボース気体 |

2.5 現代実験物理学 I : (前半) 江尻 晶 (後半) 福山 寛

- | | |
|-----------------------|-----------------------------------|
| 物理実験技術の基礎とその原理 (江尻担当) | 3.3 光束、立体角、レンズ |
| 1. 回路 | 3.4 PMT と Photo Diode |
| 1.1 アナログ回路の雑音、応答 | 物性実験技術とその物理 —物質の多様性を探る |
| 1.2 雑音との戦いの歴史 | (福山担当) |
| 2. 真空 | 4. 極限実験環境の実現と計測 |
| 2.1 真空の歴史 | 4.1 超高真空、極低温、強磁場など |
| 2.2 真空を作る、測る | 5. 物性測定法とその原理 |
| 2.3 真空容器、表面洗浄 | 5.2 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 |
| 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年生 冬学期

3.1 物理数学 III : 村尾 美緒

- | | |
|----------|----------|
| 1. 群論の基礎 | 1.1 群の定義 |
|----------|----------|

1.2 組みかえ定理	4. リー群とリーダ数
1.3 同型と準同型	4.1 リー群
1.4 剰余類	4.2 線形変換群
1.5 剰余類群・準同型定理	4.3 リーダ数
1.6 類演算子	4.4 群の大局的構造・連結コンパクト群・普遍被覆群
2. 対称群	4.5 リー群の例 $O(3)$, $SU(2)$, $SO(3)$
2.1 置換	4.6 リーダ数の表現 ($SO(3)$ を例として)
2.2 ケーリーの定理	5. 群論の応用: 量子力学への応用
2.3 分割と共役類・巡回構造	5.1 量子力学と対称性の群論的考察
3. 有限群の表現論	5.2 角運動量の合成
3.1 表現と既約表現	6. ユークリッド空間における微分形式
3.2 不変部分空間・シューアの補題・表現の直交性	6.1 外積
3.3 指標の第一種直交性・正則表現	6.2 微分形式
3.4 指標の第二種直交性・既約表現の個数	6.3 星印作用素
3.5 直積表現と対称性	6.4 Maxwell 方程式の微分形式での記述

3.2 量子力学 III : 大塚 孝治

1. 散乱問題	2.5 クーロン散乱
1.1 散乱断面積	3. 同種粒子系
1.2 ポテンシャルによる散乱	3.1 同種粒子とは
1.3 グリーン関数による散乱振幅の計算	3.2 多数の同種粒子から成る系
1.4 ボルン近似	3.3 スレーター行列式とパウリの排他律
1.5 量子論での断面積と光学定理	3.4 ボソンから成る系
1.6 ボルン近似の成り立つ場合	3.5 フェルミオンの第2量子化
1.7 拡がりのあるポテンシャル源による散乱	3.6 第2量子化による物理量の表現
1.8 量子論での断面積と光学定理	3.7 2体演算子の第2量子化による表現
2. 部分波展開による散乱問題	3.8 ハートリー・フォック法
2.1 部分波展開と位相のずれ	3.9 原子の中の電子系の構造
2.2 低いエネルギーでの散乱	4. 経路積分
2.3 部分波展開による断面積	4.1 経路積分の考え方
2.4 共鳴散乱	4.2 シュレーディンガーフォック法の導出

3.3 電磁気学 III : 蓑輪 真

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	3.1 遅延ポテンシャル
2.1 電磁波の反射・屈折・回折	3.2 双極子放射
2.2 Brewster 角	3.3 アンテナ
2.3 Evanescent 場	4. 荷電粒子の放射する電磁波
2.4 導波管	4.1 Lienard-Wiechert のポテンシャル
2.5 空洞共振器	4.2 シンクロトロン軌道放射
2.6 光ファイバー	4.3 チェレンコフ放射
2.7 プラズマ中の電磁波	4. 電磁気学と特殊相対論
3. 電磁波の放射	

3.4 生物物理学：樋口秀男、能瀬聰直

1. 生物物理学とは	5. 遺伝子操作技術
2. 遺伝情報の流れ	6. ゲノム科学とバイオインフォマティックス
3. 蛋白質の構造と機能	7. バイオイメージング、生体分子計測
4. 細胞内タンパク質のダイナミックス	8. 脳・神経系の生物物理

3.5 統計力学 II：小形 正男

1. 相転移現象	1.8 くりこみ群の基礎
1.0 イントロダクション	2. 非平衡統計力学
1.1 気体-液体相転移	2.1 応答関数とゆらぎ
1.2 相転移：対称性の自発的破れ	2.2 線形応答理論
1.3 スピン系の統計力学	2.3 種々の輸送係数
1.4 平均場近似	2.4 ブラウン運動とAINシュタインの関係式
1.5 イジングモデル	2.5 拡散方程式
1.6 ランダウの2次相転移理論	2.6 境界のある場合の拡散方程式
1.7 スケーリング理論	2.7 ランジュバン方程式

3.6 現代実験物理学 II：早野龍五、横山 将志

1. なぜ実験するのか	4. 粒子と物質の相互作用と粒子検出器
2. 素粒子標準理論に至る道	5. 加速器
3. 単位系、相対論的運動学、断面積、寿命	6. 誤差と統計処理

3.7 流体力学 I : 佐野 雅己

- | | |
|------------------|-----------------------|
| 1. 連続体の力学 | 6. 粘性流体の運動 |
| 2. 様々の流れと流体運動の記述 | 7. 低レイノルズ数と高レイノルズ数の流れ |
| 3. 流体力学の基礎方程式 | 8. 流れの安定性 |
| 4. 完全流体の運動 | 9. 乱流 |
| 5. ポテンシャル流とその性質 | |

4 4年生 夏学期

4.1 場の量子論 I : 柳田 勉 諸井 健夫

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Relativistic Quantum Mechanics | 2. Quantum Field Theory |
| 1.1 Relativistic Quantum Theory | 2.1 Canonical Quantization of Fields |
| 1.2 Dirac Equation | 2.2 Real Spinless Fields |
| 1.3 Lorentz Covariance | 2.3 Meaning of Field Quantization |
| 1.4 Solutions to the Dirac Equation | 2.4 Dirac Fields |
| 1.5 Hole Theory | 2.5 Electromagnetic Fields |

4.2 素粒子原子核物理学 I : 浅井祥仁、小澤恭一郎

- | | |
|-----------------------|------------------|
| 1. 標準モデルの登場人物・クオークモデル | 8. 原子核概論 |
| 2. DIrac 方程式 | 9. 核子反応 |
| 3. DIrac 方程式とスピン | 10. クオークモデル |
| 4. 対称性 不連続対称性 | 11. クオークモデルと核子 |
| 5. 連続対称性とゲージ理論 | 12. クオークグルオンプラズマ |
| 6. 弱い相互作用 | 13. 核子の構造 |
| 7. ヒッグス機構 | |

4.3 一般相対論 : 須藤 靖

- | | |
|---------------------|--------------------|
| 1. 4次元時空とシュワルツシルド計量 | 2. 一般相対論の基礎 |
| 1.1 線素と計量 | 2.1 物理量の表現: ベクトル |
| 1.2 シュワルツシルド時空の性質 | 2.2 物理量の表現: 双対ベクトル |
| 1.3 GPS とシュワルツシルド時空 | 2.3 物理量の表現: テンソル |

- 2.4 重力場のもとでの粒子の運動方程式**
- 2.5 ニュートン理論との対応**
- 2.6 接続係数とゲージ相互作用 : $\Gamma^{\mu}_{\alpha\beta}$ と A^{μ}**
- 3. 重力場の方程式**
- 3.1 マッハの原理**
- 3.2 エネルギー運動量テンソル**
- 3.3 アインシュタイン方程式への道**
- 3.4 ニュートン理論との対応**
- 3.5 宇宙定数**
- 3.6 変分原理による定式化**
- 4. 球対称時空**
- 4.1 球対称時空に対する計量とアインシュタイン方程式**
- 4.2 完全流体に対するエネルギー運動量保存則**
- 4.3 球対称時空における完全流体の運動方程式**
- 4.4 圧力が無視できる物質の球対称重力収縮**
- 4.5 球対称定常時空とトールマン・オッペンハイマー・ボルコフ方程式**
- 4.6 シュワルツシルド解**
- 4.7 重力質量と固有質量**

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

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 プロッホ電子、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

- 4.8 球対称真空解とバーコフの定理**
- 5. 相対論的宇宙モデル**
- 5.1 宇宙原理と宇宙の一様等方性**
- 5.2 ロバートソン-ウォーカー計量の幾何学的性質**
- 5.3 アインシュタイン方程式からフリードマン方程式へ**
- 5.4 宇宙の状態方程式と宇宙定数**
- 5.5 アインシュタイン-ドジッター宇宙モデル**
- 5.6 フリードマン宇宙モデル**
- 6. 重力波**
- 6.1 アインシュタイン方程式の弱場近似**
- 6.2 重力波の平面波解**
- 6.3 測地線偏差の方程式**
- 6.3 重力波検出原理**
- 6.4 大局的保存則と重力場のエネルギー運動量擬テソル**
- 6.5 重力波のエネルギー運動量擬テソルに対するアイザックソンの式**
- 6.5 重力波輻射の四重極公式**

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

- 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：酒井 広文

1. 原子と放射の相互作用

- 1.1 時間に依存する Schrödinger 方程式
- 1.2 相互作用ハミルトニアン
- 1.3 遷移速度
- 1.4 B 係数の表式
- 1.5 光学 Bloch 方程式
- 1.6 Rabi 振動
- 1.7 放射広がり
- 1.8 飽和広がり
- 1.9 放射減衰を伴う Rabi 振動
- 1.10 衝突広がり
- 1.11 Doppler 広がり
- 1.12 合成吸収線の形状

2. 電磁場の量子化

- 2.1 古典電磁場のポテンシャル論
- 2.2 Coulomb ゲージ
- 2.3 自由古典場
- 2.4 量子力学的調和振動子
- 2.5 場の量子化
- 2.6 場の交換の性質
- 2.7 零点エネルギー
- 2.8 モード位相演算子
- 2.9 単一モード個数状態の物理的性質
- 2.10 コヒーレント光子状態

2.11 単一モードコヒーレント状態の物理的性質

- 2.12 放射密度演算子
- 2.13 純粹状態に対する密度演算子
- 2.14 放射場の統計的混合状態

3. 量子化した場と原子との相互作用

- 3.1 原子の多極モーメント
- 3.2 多極相互作用ハミルトニアン
- 3.3 電気双極子近似
- 3.4 原子ハミルトニアンの第2量子化
- 3.5 光子の吸収速度と放出速度
- 3.6 光電効果による電子の放出速度
- 3.7 光子強度演算子

4. レーザーの基礎

- 4.1 光共振器のモード
- 4.2 光共振器の安定性
- 4.3 発振条件
- 4.4 波動方程式に基づくレーザー理論
- 4.5 定常状態におけるレーザー発振
- 4.6 各種のレーザー
 - 4.6.1 3準位レーザーと4準位レーザー
 - 4.6.2 固体レーザー
 - 4.6.3 気体レーザー
 - 4.6.4 色素レーザー
 - 4.6.5 半導体レーザー

5 4年生 冬学期

5.1 現代物理学入門：島野 亮、諸井健夫

1. 光と量子物性（島野）

- 1.1 物質中の電磁気学
 - 屈折率とは？表面インピーダンス、フレネル反射係数、透過係数、誘電関数
- 1.2 誘電関数の一般論

ローレンツモデル、ドルーデモデル、ポラリトン、線形応答理論、久保公式、クラマースクローニッヒ変換、総和則

- 1.3 固体の素励起と光
エキシトン、ポラリトン、マグノン

1.4 先端レーザー分光法
超高速分光、テラヘルツ時間領域分光、磁気光学分光

1.5 最近の話題から
素励起のボースアインシュタイン凝縮など

2. 初期宇宙論（諸井）

- 2.1 ビッグバン宇宙**
- 2.2 宇宙初期元素合成**
- 2.3 インフレーション**
- 2.4 暗黒物質**

5.2 素粒子・原子核物理学 II : 駒宮幸男 初田哲男

- | | |
|--------------------------------|-------------------------|
| 1. 強い相互作用（摂動論的 QCD） | 7. 中性子星物理学 II |
| 2. 核子の内部構造 | 8. 素粒子と物質との反応 I |
| 3. 原子核の崩壊 | 9. 素粒子と物質との反応 II |
| 4. 中間子交換による核力の導出 | 10. 素粒子の標準理論 I |
| 5. ハドロンガスとクォークグルーオンプラズマ | 11. 素粒子の標準理論 II |
| 6. 宇宙初期におけるクォークハドロン相転移 | 12. 標準理論を越えて |

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 | 1.5 生体膜の構造と機能 |
| 1.1 蛋白質及び膜の生物物理学とは | 1.6 膜曲面の熱力学 |
| 1.2 蛋白質立体構造決定の方法 | 1.7 膜の相転移 |
| 1.3 蛋白質のダイナミクスと折れ畳み | 1.8 赤血球のダイナミクス |
| 1.4 蛋白質のシミュレーションとデザイン | |

5.4 場の量子論 II : 松尾 泰

- | | |
|--------------------------------|---|
| 1. 弦の古典論 | 2.1 Lightcone coordinate |
| 1.1 相対論的な粒子 | 2.2 弦の Lightcone 量子化 |
| 1.2 南部・後藤作用 | 2.3 弦から導かれる素粒子 |
| 1.3 Virasoro constraint | 2.4 gauge theory in light cone gauge |
| 1.4 弦の古典的運動 | 2.5 Virasoro algebra と臨海次元 |
| 2. 弦の量子論 | 2.6 Superstring |

5.5 宇宙物理学 : 中澤知洋

- | | |
|--------------------|-------------------|
| 1. 重力と自己重力系 | 2. 電磁放射の基礎 |
|--------------------|-------------------|

3. 星の物理学

4. 星の終末と高密度天体

5. ビッグバン宇宙論・導入

5.6 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 热電効果と热伝導

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 メゾクコピック伝導

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

5.7 化学物理学 : 藤森 淳

1. 原子の電子状態

1.1 一電子状態

1.2 多電子原子

1.3 周期律

2. 分子の電子状態

2.1 水素分子・二原子分子

2.2 ベンゼン等の分子

2.3 金属錯体

2 各賞受賞者紹介

1 有馬朗人 名誉教授：文化勲章

有馬先生は1953年東京大学理学部を卒業、1958年に本学より理学博士の学位を授与されました。その間、本学原子核研究所助手を務められ、その後、本学理学部物理学教室講師、助教授を経て1975年に教授になりました。本学の大型計算機センター長、理学部長をなさり、1989年から1993年には東京大学総長を歴任されました。その後も、理化学研究所理事長、参議院議員、文部大臣などの学術教育にかかわる要職につかれてきました。現在も武蔵学園長、静岡文化芸術大学理事長をなさっています。

先生の専門は原子核物理学ですが、研究を始められた頃は原子核物理学が誕生した時期でもあり、さまざまな課題において分野を立ち上げる研究をされました。中でも有名なのは、当時メイヤー (Maria Goeppert-Mayer) とイエンゼン (J. Hans D. Jensen) によって提案されたばかりの殻模型において、実際の核力がいかに働くかを示す有馬一堀江の配位混合理論です。これは今日に至るまで多くの研究者によって発展を続いている有効相互作用、有効電荷の研究の端緒であり、いっぽう、基本概念は変わっていません。さらに、原子核のクラスター模型を始められ、また、原子核の表面を球から楕円体に変形させ回転や振動を起こす集団運動に関して、相互作用するボソン模型をヤケロ博士 (Francesco Iachello) とともに提唱され、その統一的記述に成功しました。現在も、研究活動を続けられ論文を毎年出版しています。このような貢献に対し、仁科記念賞、フンボルト賞、フランクリン財団ジョン・プライス・ウェザリル・メダル、アメリカ物理学会ボナー賞、日本学士院賞などを受賞されています。いっぽう、俳人としても著名で「天為」という会を主宰しています。

2 山崎敏光 名誉教授：瑞宝重光章

山崎敏光名誉教授が2010年秋の叙勲で「瑞宝重光章」を受章され、11月5日に皇居で伝達式が行われました。

山崎先生は1957年に本学理学部物理学科を卒業なされ、本学原子核研究所助手、カリフォルニア大学およびニールス・ボーア研究所研究員、本学理学部講師、助教授、教授を経て、1986年より本学原子核研究所所長を務められました。退官後は日本学術振興会監事などを歴任され、現在は財団法人仁科記念財団理事長および日本学士院会員として活躍されるとともに、自ら科研費を獲得され、研究に励んでおられます。

山崎先生は中間子などの粒子ビームを原子核物理・原子分子・物性科学に至る広い分野の研究に応用して新しい学問分野を拓かれ、2009年にこれらの業績により文化功労者として顕彰されていますが、再び栄えある受章となりました。

3 佐藤勝彦 名誉教授：学士院賞

佐藤勝彦名誉教授が「加速的宇宙膨張理論の研究」に対して第100回（平成22年）学士院賞を受賞されました。

2. 各賞受賞者紹介

佐藤先生は1980年代初頭素粒子の大統一理論を初期宇宙に応用することにより、相互作用の分化に伴う相転移が起こる際に宇宙が指数関数的加速膨張を引き起こすことを示しました。現在これは、米国で独立にこの理論を発見したアラン・グース氏が名付けたインフレーション宇宙モデルとして広く知られ、現代宇宙論のパラダイムとなっています。

このモデルは、相互作用の大統一理論が予言する宇宙の相転移が起こるとき、空間的に一様で時間的にも変化しない場のエネルギーによって満たされ、それによって指数関数的宇宙膨張が起こる、という理論です。それによって「現在の宇宙はなぜその空間曲率が観測できないほど平坦に近いのか?」、「本来、因果関係を持ち得ないはずの広大な領域にわたってなぜ宇宙は極めて一様等方に近いのか?」、「銀河・銀河団などの宇宙の多様な天体諸階層を誕生させた空間的な非一様性の起源は何か?」、といった、従来の理論の枠内では全く手がつけられず、哲学の範疇と考えるしかなかったような諸問題に、科学的に答えることを可能とする枠組みを提供してくれました。いまや、インフレーション宇宙論は、単に優れた理論的アイディアというレベルにとどまらず、観測的な強い支持を持つとともに、素粒子論的宇宙論モデル構築における最も重要な枠組みとして完全に定着しています。

佐藤先生は、日本学術会議会員および自然科学研究機構・機構長として、現在も引き続き、わが国の学術全般のさらなる発展に大きな貢献をされています。

4 小林孝嘉 名誉教授(現電気通信大学 特任教授)：文部科学大臣表彰 科学技術賞・研究部門

極限性能超短パルスレーザーと超高速分光法の開発

本研究は、パルス幅を制限する困難を解決したパラメトリック增幅法を考案し、新奇なパルス圧縮技術を開発して世界最短可視光パルスレーザーを完成した。また、(i) 小林研究室で開発した世界最短の光パルス(当時)を使って、分子・高分子・生体高分子の化学反応で過渡状態における幾何学的構造の観測に初めて成功し、視覚関連分子の光受容における構造変化を可視化した。(ii) 超短パルスを使った動的過程の観測に必須であるパルス波形と光電場の位相関係を自動安定化する新奇方法を開発した。既存法の問題を全て解消し軟X線・アト秒パルス発生に重要な增幅法に採用された。(iii) 多重波長同時高感度観測装置を開発し測定時間を1/100に短縮した。本研究により、レーザーの不安定性や、生体試料の脆弱性の問題を解決し、超短光パルス分光法が実用的な化学変化のダイナミクス研究手段として確立する道を開いた。本成果は、将来蛋白質のフォールディング機構の解明などに応用される事が期待されアルツハイマー病や狂牛病の病理機構解明に寄与することが期待される。

5 五神真 教授：第14回松尾学術賞

五神教授は「レーザ一分光法による固体における光量子物理学の研究」により、第14回松尾学術賞を受賞されました。松尾学術賞は、原子分子物理学と光量子物理学・量子エレクトロニクスの研究で業績の顕著な研究者を対象として毎年1名の方に授与されています。五神教授は原子分子系の分野で培われた高感度高精度のレーザ一分光を固体の電子励起状態を探る新しい分光法として展開し、電子励起状態の量子物性と光制御機能の解明を行いました。また、共振器ボラリトンにおける励起子巨大非線形光学応答の起源の解明やばら励起子を用いた励起子ボース・アインシュタイン凝縮の実現のための定量的評価法の確立に大きな貢献をされました。

6 長谷川修司 教授：日本表面科学会第 15 回学会賞

長谷川研究室で長年続けられてきた「表面電気伝導と表面構造・電子状態との相関の研究」の成果によって、(社)日本表面科学会の第 15 回（平成 22 年度）学会賞が長谷川教授に授与された。結晶表面 1 原子層の電気伝導を世界で初めて検出し、表面科学の研究に新しい道を開拓した成果が評価された。

7 平原徹 助教（長谷川研究室）：日本表面科学会奨励賞

表面科学誌に掲載された平原助教の論文「ビスマス量子薄膜における表面状態による電気伝導」（表面科学 30 卷, pp. 374-379 (2009 年 7 月号).）が、(社)日本表面科学会の第 20 回（平成 22 年度）奨励賞に選ばれた。この賞は、第一著者が、原稿受理日において 35 歳未満であり、その論文が注目され、表面科学への貢献が大いに期待されると認められる個人会員に贈られるものである。

8 吉田鉄平助教（藤森研究室）：第 5 回日本物理学会若手奨励賞

吉田鉄平氏は、角度分解光電子分光を用いた強相関電子系の物性研究が専門。受賞対象となった La 系高温超伝導体の研究では、不足ドープ領域の途切れたフェルミ面（フェルミ・アーク）の観測、超伝導相における 2 成分ギャップの観測など、高温超伝導機構の解明の鍵になると思われる重要な知見を得た。

9 阿部喬博士（大塚研究室）：第 5 回日本物理学会若手奨励賞

阿部喬氏は、密度が低い中性子物質の第一原理計算を QCD（量子色力学）に基づいた大規模格子計算により世界で初めて行った。その結果、1S0 超流動ペアリングギャップが、伝統的な BCS 計算の 70 %程度しかないことや、短距離の対相間に起因する擬ギャップの存在を示し、通常の原子核の密度の 10 分の 1 から 1 万分の 1 程度の低密度領域でさえ中性子物質では量子多体効果が重要であることを示した。

10 Dr. Simone De Liberato (Ueda group): Prix Jeune Chercheur Daniel Guinier

Simone De Liberato 氏は共鳴電磁場照射下における 2 次元電子ガスのサブバンド間遷移の問題を理論的に研究し、顕著な業績を上げられた。特に、半導体構造においてダイナミカルカシミール効果が現実的な状況において存在することを明らかにし、また、この系がテラヘルツ領域における量子カスケードレーザーに応用できることを指摘した。

Dr. Simone De Liberato theoretically studied the physics of intersubband transitions in two dimensional electron gases in presence of an electromagnetic field resonant with the transition. The system is thus in the so-called ultrastrong coupling regime and the intersubband polaritons are observable. Simone De Liberato also studied the dynamical Casimir effect and he modeled quantum transport and electroluminescence in such semiconductor structures. His work has both a fundamental and an applied aspect, in fact his results can be applied in the field of quantum cascade lasers in the THz range.

11 金澤拓也氏 (初田研): 第5回日本物理学会若手奨励賞 (素粒子論領域) および平成22年度 理学系研究科研究奨励賞 (博士)

金澤氏は、共同研究者らとともに、高密度 2-color QCD の対称性の破れ方を特定して低エネルギー有効理論を導き、無限自由度のダイナミクスが有限自由度に落ちる「イプシロン領域」が高密度でも存在することを示した。次に、高密度 2-color QCD と同じ対称性の破れ方を示すランダム行列模型を構成し、実際に後者の分配関数が前者の（イプシロン領域における）分配関数と一致することを示した。さらにそこで考案したランダム行列模型を一般のフレーバー数に対して解くことにより、高密度におけるディラック固有値の密度関数のあらわな表式を導き、固有値が複素平面全体に分布すること、密度関数がクォーク質量に対して敏感に依存することを示した。これらの結果は、これまでの高密度物質の研究にない新しい方向性を示すとともに、カラーが 3 の QCDにおいて同様な考察を進める上での今後の足がかりを築いたものとして高く評価されている。

12 沙川貴大氏 (上田研): 第5回(2011年)日本物理学会若手奨励賞 (領域11) および平成22年度理学系研究科研究奨励賞 (博士)

沙川氏は、近年発展してきた非平衡統計力学の手法と、量子および古典の情報・測定理論を融合させることで、主に以下の三つの成果を得た。(1)Maxwell のデーモンがフィードバック制御によって熱浴から取り出せる仕事量の上限を一般的に決定し、それが相互情報量に比例する項で与えられることを明らかにした。(2)測定および情報の消去の際にメモリに必要なエネルギーコストの原理的な下限をそれぞれ明らかにした。(3)デーモンがフィードバック制御を行う状況に、Jarzynski 等式を拡張した。ここから、情報を含む形に一般化された揺動散逸定理を得ることができる。これらの成果は、微小非平衡系における情報処理に要するエネルギーコストなどに関する定量的予測を与えただけでなく、Maxwell のデーモンのパラドックスという原理的な問題の解決にも貢献した。さらに、宗行研究室（中央大学）および佐野研究室（東京大学）の共同研究によって、上記(3)の一般化 Jarzynski 等式が実験的に検証された。

13 湯浅孝行氏 (牧島・中澤研): 平成22年度理学系研究科研究奨励賞 (博士)

湯浅孝行君（牧島・中澤研究室）が、“Suzaku Studies of White Dwarf Stars and the Galactic X-ray Background Emission（「すざく」衛星による白色矮星および銀河X線背景放射の研究）”と題する博士論文の研究業績にもとづき、2010 年度の理学系研究科・研究奨励賞 (博士) を受賞しました。湯浅君はこの研究で、X線衛星「すざく」の世界に誇る広帯域特性を活かし、銀河面に沿って淡く広がるX線放射の正体が、質量降着する多数の強磁場白色矮星の重ね合わせであることを観測的に証明し、30 年にわたるこの謎の現象に、みごと終止符を打つことに成功しました。これらの天体では、連星の相手の星から強磁場の白色矮星めがけて重力的に落下するガスが、白色矮星の磁極に立つ定在衝撃波面を通過すると、温度 10^{8-9} K の高温プラズマとなって、熱的制動放射によりX線を放射します（口絵カラー図2を参照）。

14 正田亜八香氏 (坪野研) : Best Student Poster Award

University of Wisconsin-Milwaukee で開催された重力波に関する物理天文国際会議 Gravitational-wave Physics and Astronomy Workshopにおいて、正田 亜八香さんが Best Student Poster Award を受賞しました。

た。ポスター発表“Search for a Stochastic Gravitational Wave Background with Torsion-bar Antennas”に対して、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 加藤康作氏(酒井広文研)：平成22年度理学系研究科研究奨励賞(修士)

加藤康作氏は、修士論文“High-order harmonic generation from aligned molecules with 800-nm and 1300-nm femtosecond pulses (波長 800 nm 及び 1300 nm のフェムト秒パルスを用いた配列分子中からの高次高調波発生)”を中心とする研究業績が高く評価され、平成22年度理学系研究科研究奨励賞(修士)を受賞しました。加藤君は、配列した分子中からの高次高調波発生実験で使用されるプローブ光の波長の違いが高調波発生の3つの過程、即ち、トンネルイオン化、高強度レーザー電場中の電子波束の運動、再結合過程の全てに影響を及ぼすことに着目し、2中心干渉モデルと多チャンネル干渉モデルのどちらがより支配的かを調べる実験を注意深く行い、2中心干渉モデルによる解釈がより妥当であることを強く示唆する結果を得ました。この成果は長年の論争の決着につながる重要なものです。

16 遠藤晋平氏(上田研)：平成22年度理学系研究科研究奨励賞(修士)

遠藤氏は冷却原子気体における BEC-BCS クロスオーバーとよばれる超流動状態における多体効果の研究を行った。この問題はこれまでには2体相関を取り入れる範囲で議論されてきたが、遠藤氏はモンテカルロ計算との分析を通じて3体および4体の相関の効果が重要であることを指摘し、これらを3体および4体のT行列をグリーン関数を用いて分析することに成功した。これは BEC-BCS クロスオーバー理論を拡張する上の重要な基礎を与えた。

17 西一郎氏(藤森研)：平成22年度理学系研究科研究奨励賞(修士)

西一郎氏は、角度分解光電子分光法を用いた鉄化合物高温超伝導体の研究で顕著な業績を挙げ、それをまとめた修士論文が高く評価されて理学系研究科研究奨励賞を受賞しました。西君が取り組んだ研究課題は、鉄化合物超伝導体のなかでも最も超伝導転移温度が高い通称「1111系」と呼ばれる物質の電子状態の解明です。この物質特有の表面状態のため、これまで抽出が不可能と考えられてきた本質的なバルクの電子状態の情報を実験データから抽出することに成功し、理論的に高温超伝導に必要と考えられてきた特徴的な電子状態を実験的に検証しました。また、化学圧力で超伝導を示す「ヒ素-リン系」鉄化合物超伝導体についても、化学圧力に依存した電子状態の変化を初めて明らかにしました。これらの成果は、今後の超伝導機構解明に大きく寄与するものと考えられます。

3 人事異動

[物理学教室に来られた方々]

井上 奈保	物理教務	2010年4月1日	採用
菅原 美和	第1事務分室	2010年4月1日	採用
柏葉 朋子	技術職員	2010年4月1日	採用
小野田 恵子	第3事務分室	2010年6月1日	採用
吉岡 孝高	助教	2010年7月1日	配置換（東京大学工学系研究科・助教）
田中 明子	物理教務	2010年7月1日	復帰（独立行政法人大学入試センター総務課庶務係）
尾澤 あや	物理教務	2010年7月1日	採用
松浦 弘泰	助教	2010年7月16日	採用（大阪大学・特任研究員）
五神 真	教授	2010年10月1日	配置換（東京大学工学系研究科・教授）
伊部 昌宏	助教	2010年10月1日	採用（カリフォルニア大学・リサーチアソシエイト）
和田 由美子	第2事務分室	2010年11月1日	採用
伊藤 彩美	物理事務	2011年2月1日	採用
半田 奈央美	第1事務分室	2011年3月1日	採用
北村 星子	物理教務	2011年3月2日	採用（派遣）

[物理学教室から移られた方々]

岩井 桂	第1事務分室	2010年4月30日	辞職
徳永 恭子	第3事務分室	2010年5月31日	任期満了（派遣）
井上 奈保	物理教務	2010年6月30日	辞職
和田 由美子	物理教務	2010年6月30日	辞職（任期満了）
管波 明子	物理事務	2010年7月1日	昇任（理学部経理課研究支援・外部資金チーム・係長）
藤代 知子	技術職員	2010年9月30日	辞職
藤原 可南子	第3事務分室	2010年10月31日	辞職（任期満了）
原 真美	第2事務分室	2011年2月21日	辞職
伊部 昌宏	助教	2011年3月16日	昇任（東京大学宇宙線研究所・准教授）
姥原 いつ子	物理事務	2011年3月31日	辞職（任期満了・定年退職）
平野 哲文	講師	2011年3月31日	辞職（上智大学・准教授）
小沢 恭一郎	講師	2011年3月31日	辞職（高エネルギー加速器研究機構・准教授）
清水 則孝	助教	2011年3月31日	辞職（理学部・原子核科学研究センター・特任准教授）
渡邊 紳一	助教	2011年3月31日	辞職（慶應義塾大学・准教授）
新井 烈	物理事務	2011年4月1日	配置換（法学部・研究室総務・係長）
森 恭子	物理図書	2011年4月1日	配置換（理学部・総務課図書チーム・係長）

4 役務分担

役務	担当教員	技術職員・事務職員
専攻長・学科長	早野	新井、田中、菅波、 丸屋、佐々木
幹事	相原、宮下	新井、田中、菅波、 丸屋、佐々木
専攻主任	小形	佐々木、難波、井上、高野
専攻副主任	初田	佐々木、難波、井上、高野
常置委員	蓑輪、佐野	佐々木、難波、井上、高野
優先配置	福山	佐々木、難波、井上、高野
教務係	長谷川 、藤森（大学院）、宮下、（坪野）	佐々木、難波、井上、高野
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
会計係	(専攻長と事務主任で行う)	新井、菅波、丸屋
G-COE	島野	菅波、佐藤
部屋割	駒宮	新井
安全衛生	福山、(岡本)	佐伯、柏葉
放射線管理	蓑輪	丸屋
技術室	坪野 （総括）、相原（幹事）	大塚(茂)
(技術室会議メンバー)	坪野（試作室）	大塚(茂)
	山本（学生実験）	八幡
	福山（安全管理）、岡本（低温・安全）	佐伯、柏葉
	須藤（IT関連）	藤代
図書係	上田 、樋口、村尾、小澤、浜口	森、南、森村
コロキューム	初田 、佐野、福山、青木、須藤	田中、蝦原
年次報告	諸井	八幡、横山
記録係	横山、中澤、小澤	
物品供用官	内田	新井
物理事務室	宮下	新井
事務分室	第1：佐野	河野、上田、菅原
,	第2：大塚	原、今堀
	第3：内田	藤原、徳永

*太字は責任者

4. 役務分担

役務	担当教員	技術職員・事務職員
理交会	中澤	新井
教職員親睦会	酒井	
進学指導	福山、牧島、諸井、上田	佐々木
進振委員	酒井	佐々木
ホームページ	松尾	藤代
オープンキャンパス	牧島	新井
物理オリンピック	長谷川	

*太字は責任者

5 教室談話会

- 2010年7月16日（金） 15:00-16:30

佐藤 勝彦 氏

「宇宙はいかに始まったか？－インフレーション理論の展開－」

- 2010年12月6日（月） 16:00-17:30

小林 誠 氏, 西村 純 氏, 池田 長生 氏

「仁科芳雄博士生誕120周年記念講演会 - 仁科芳雄博士の輝かしき業績」

- 2011年3月11日（金） 16:00～17:30

立川 裕二 氏（数物連携宇宙研究機構）

「二次元の物理と四次元の物理の不思議な関係」

6 物理学教室コロキウム

- 2010年4月16日（金） 16:30-18:00

長谷川 修司 氏（東京大学）

「表面物理の最前線－トポジカル絶縁体は本当か－」

- 2010年5月21日（金） 16:30-18:00

諸井 健夫 氏（東京大学）

「宇宙と素粒子」

- 2010年6月25日（金） 16:30-18:00

釜江 常好 氏（スタンフォード大学）

「宇宙線はどこで生まれ、どのように地球に届くのか－フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡による銀河系観測－」

- 2010年7月2日（金） 16:30-18:00

五神 真 氏（東京大学）

「光物理学の展開－光による物質相の量子制御と光科学－」

- 2010年10月1日（金） 16:30-18:00

P. Sikivie 氏（フロリダ大学）

「The Dark Matter Puzzle」

- 2010年11月26日（金） 16:30-18:00

永江 知文 氏（京都大学）

「ストレンジネスと原子核」

- 2010年12月3日（金） 16:00-17:30

田中 肇 氏（東京大学）

「ソフトマターの物理」

7 金曜ランチトーク

- 2010年4月23日（金） 12:15-12:30
浅井 祥仁 氏 「動き出したLHC」
- 2010年5月14日（金） 12:15-12:30
青木 秀夫 氏 「超伝導の最前線」
- 2010年5月14日（金） 12:15-12:30
小沢 恭一郎 氏 「4兆度のクオータ・スープ」
- 2010年5月28日（金） 12:15-12:30
佐野 雅己 氏 「非平衡系におけるスケール不変法則の実験検証」
- 2010年6月11日（金） 12:15-12:30
須藤 靖 氏 「太陽系外惑星とバイオマーカー」
- 2010年7月2日（金） 12:15-12:30
藤森 淳 氏 「フェルミ・アークと超伝導」
- 2010年7月16日（金） 12:15-12:30
松尾 泰 氏 「M理論の新しい定式化と南部括弧式」
- 2010年9月10日（金） 12:15-12:30
酒井 広文 氏 「気体分子の配向制御とその応用」
- 2010年10月1日（金） 12:15-12:30
島野 亮 氏 「テラヘルツ波で探る半導体電子正孔系の量子凝縮相」
- 2010年10月15日（金） 12:15-12:30
大塚 孝治 氏 「3体核力と原子核の存在限界・魔法数」
- 2010年10月29日（金） 12:15-12:30
樋口 秀男 氏 「階層を上る1分子生物物理学」
- 2010年11月5日（金） 12:15-12:30
常行 真司 氏 「次世代スパコンプロジェクトの動向と『新物質・エネルギー創成』戦略機関」
- 2010年11月19日（金） 12:15-12:30
山本 智 氏 「動き出すALMA -星・惑星形成における物質進化の探究-」

7. 金曜ランチトーク

- 2010年12月3日（金） 12:15-12:30
福山 寛 氏 「量子液体・固体研究をめぐる最近の話題」
- 2010年12月10日（金） 12:15-12:30
高瀬 雄一 氏 「核融合研究の現状と今後の展望」
- 2011年1月7日（金） 12:15-12:30
早野 龍五 氏 「Antihydrogen」
- 2011年1月28日（金） 12:15-12:30
横山 将志 氏 「Shooting neutrinos across Japan」
- 2011年2月4日（金） 12:15-12:30
上田 正仁 氏 「冷却原子におけるトポロジカル励起」
- 2011年2月25日（金） 12:15-12:30
蓑輪 真 氏 「原子炉ニュートリノモニター」
- 2011年3月11日（金） 12:15-12:30
岡本 徹 氏 「イジング量子ホール強磁性」
- 2011年3月18日（金） 12:15-12:30
平野 哲文 氏 「クォークグルーオンプラズマ流体」