I

研究室別 2008年度 研究活動報告

目 次

I 研究室別 2008 年度 研究活動報告 **1**

1 原子核・素粒子理論 **9**
1.1 原子核理論研究室（大塚 · 初田 · 平野） . . . 9
1.2 素粒子論研究室（柳田・浜口・松尾） . . . 22
1.2.1 TeV スケールの標準模型、素粒子論的宇宙論 . . . 22
1.2.2 格子ゲージ理論 . . . 24
1.2.3 超紐理論 . . . 24

2 原子核・素粒子実験 **29**
2.1 原子核実験研究室 (酒井 · 早野 · 小沢) . . . 29
2.1.1 ICHOR プロジェクト (酒井研究室) . . . 29
2.1.2 反陽子ヘリウム原子 (早野研究室) . . . 30
2.1.3 反 K 中間子原子の精密分光 (早野研究室) . . . 30
2.1.4 反 K 中間子原子核の研究 (早野研究室) . . . 32
2.1.5 π 中間子原子の精密分光 (早野研究室) . . . 32
2.1.6 クォーク・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) . . . 32
2.1.7 ハドロンが動的な質量を獲得する機構の研究 (小沢研究室) . . . 33
2.1.8 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) . . . 33
2.1.9 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) . . . 34
2.2 駒宮研究室 . . . 39
2.2.1 電子・陽電子リニアコライダー ILC 計画 . . . 39
2.2.2 BES 実験 . . . 41
2.2.3 UCN 実験 . . . 42
2.2.4 LHC での物理解析 . . . 42
2.3 蓑輪 研究室 . . . 44
2.3.1 Sumico, アクシオンヘリオスコープ実験 . . . 44
2.3.2 Hidden photon 探索実験の検討 . . . 45
2.3.3 レーザー共鳴イオン化質量分析法を用いた半導体ウエハ表面汚染評価技術の開発 . . . 46
2.3.4 原子炉ニュートリノモニター . . . 47
2.3.5 暗黒物質検出器開発 . . . 48
2.3.6 量子ドットを用いた液体シンチレータの開発 . . . 48
2.4 相原研究室 . . . 49
2.4.1 B 中間子のフレーバー変換中性カレント崩壊の精密測定 . . . 49
2.4.2 Super-KEKB 計画のための衝突点近傍デザイン . . . 50
2.4.3 J-PARC ニュートリノ一次ビームライン用ビームモニターの開発 . . . 50
2.4.4 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 . . . 51
2.4.5 観測宇宙論によるダークエネルギーの研究 . . . 52
2.4.6 国際リニアコライダー用検出器の開発 . . . 53
2.5 浅井研究室 . . . 55
2.5.1 LHC・ATLAS 実験での研究 . . . 56
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 . . . 57

3 物性理論 61
3.1 青木研究室 . . . 61
3.1.1 超伝導 . . . 61
3.1.2 炭素系の物性 . . . 61
3.1.3 量子ホール系 . . . 62
3.1.4 非平衡・非線形現象 . . . 62
3.1.5 その他 . . . 64
3.2 宮下研究室 . . . 67
3.2.1 新奇な量子状態、励起状態、量子ダイナミックスの研究 . . . 67
3.2.2 非平衡ダイナミックス、輸送現象 . . . 68
3.2.3 スピンクロスオーバー錯体における協力現象の研究 . . . 68
3.2.4 大きなスピン模型での可解模型の研究 . . . 69
3.3 小形研究室 . . . 73
3.3.1 高温超伝導の理論 . . . 73
3.3.2 新超伝導体：鉄砒素系超伝導に対する理論 . . . 73
3.3.3 有機導体に関する理論 . . . 73
3.3.4 超伝導体の理論 . . . 74
3.3.5 ディラック電子系におけるバンド間磁場効果とホール効果 . . . 75
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 . . . 75
3.3.7 重い電子系に関する理論 . . . 76
3.3.8 ２次元 ^{3}He に関する理論 . . . 76
3.3.9 磁壁駆動の微視的理論 . . . 77
3.4 常行研究室 . . . 80
3.4.1 第一原理電子状態計算の応用 . . . 81
3.4.2 シミュレーション手法の開発 . . . 83

4 物性実験 88
4.1 藤森研究室 . . . 88
4.1.1 高温超伝導 . . . 88
4.1.2 スピントロニクス . . . 88
4.1.3 強相関 . . . 88
4.2 内田研究室 . . . 96
4.2.1 ２００８年度の研究その１ . . . 96
4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相 . . . 96
4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現 . . . 98
4.2.4 T_c は上がるか？ . . . 99
4.3 長谷川研究室 . . . 101
4.3.1 表面電子輸送 . . . 101
4.3.2 表面ナノ構造 . . . 103
4.3.3 新しい装置・手法の開発 . . . 104
4.4 福山研究室 . . . 107
4.4.1 2 次元フェルミ粒子系の強相関効果 . . . 107
4.4.2 グラフェンの電子物性 . . . 109
4.4.3 超薄膜超伝導体の物性研究 . . . 110
4.5 岡本 研究室 . . . 112
4.5.1 強相関２次元電子系 . . . 112
4.5.2 劈開表面に形成された２次元電子系 . . . 114
4.6 島野研究室 . . . 116
4.6.1 **半導体高密度電子正孔系** . . . 116
4.6.2 **擬 1 次元有機導体** . . . 116

4.6.3 **異常ホール効果、量子ホール効果** . . . 117
4.6.4 **高強度テラヘルツ波発生** . . . 118

5 一般物理理論 120
5.1 宇宙理論研究室 (佐藤・須藤) . . . 120
5.1.1 初期宇宙・相対論 . . . 121
5.1.2 観測的宇宙論 . . . 121
5.1.3 天体核・素粒子物理 . . . 124
5.1.4 その他 . . . 126
5.2 村尾研究室 . . . 132
5.2.1 エンタングルメント理論 . . . 133
5.2.2 量子参照座標系 . . . 134
5.2.3 量子トモグラフィ . . . 134
5.2.4 量子計算プロトコル . . . 134
5.3 上田研究室 . . . 136
5.3.1 スピノル BEC におけるノット励起 . . . 136
5.3.2 スピン自由度を持った異核フェルミ超流動 . . . 136
5.3.3 ダイポール BEC の d 波崩壊 . . . 137
5.3.4 情報処理に要するエネルギーコストの熱力学的下限 . . . 137

6 一般物理実験 141
6.1 牧島研究室＋中澤研究室 . . . 141
6.1.1 「すざく」衛星の運用と稼働状況 . . . 141
6.1.2 フェルミガンマ線宇宙望遠鏡 . . . 141
6.1.3 質量降着するブラックホール . . . 141
6.1.4 強磁場コンパクト天体 . . . 143
6.1.5 星間空間における高エネルギー現象 . . . 143
6.1.6 銀河団および銀河群の研究 . . . 144
6.1.7 雷雲における静電加速現象の研究 . . . 145
6.1.8 *ASTRO-H* 衛星計画およびその先 . . . 145
6.1.9 小型衛星計画への参加 . . . 147
6.2 高瀬研究室 . . . 152
6.2.1 TST-2 実験 . . . 153
6.2.2 UTST 実験 . . . 154
6.2.3 プラズマ乱流の研究 . . . 155
6.2.4 共同研究 . . . 156
6.3 坪野研究室 . . . 158
6.3.1 地上レーザー干渉計重力波検出器 . . . 159
6.3.2 宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO . . . 159
6.3.3 磁気浮上型重力波検出器の開発 . . . 160
6.3.4 精密計測の研究 . . . 161
6.4 佐野・原田研究室 . . . 166
6.4.1 非線形非平衡系の物理 . . . 167
6.4.2 非平衡ソフトマターの物理 . . . 169
6.4.3 生命現象の物理 . . . 170
6.4.4 細胞運動の力学的特性の解明 . . . 170
6.4.5 ゼブラフィッシュ黒色素胞におけるモーター分子の役割 . . . 171
6.4.6 バクテリアの分化により形成される周期的コロニーパターン . . . 171
6.4.7 細胞機能の揺らぎとパターン形成 . . . 171
6.5 山本研究室 . . . 176
6.5.1 星形成領域の観測研究 . . . 176

6.5.2 低質量星形成領域のラインサーベイ . . . 178
6.5.3 テラヘルツ帯観測技術の開拓 . . . 179
6.6 酒井広文 研究室 . . . 182
6.6.1 レーザー光を用いた分子配向制御技術の新展開 . . . 182
6.6.2 長波長レーザー電場の併用による高次の和・差周波発生 . . . 183
6.6.3 高次高調波スペクトルを用いた希ガス原子イオンの再結合断面積の評価 . . . 184
6.6.4 その他 . . . 184
6.7 能瀬研究室 . . . 186
6.7.1 シナプス形成の生物物理 . . . 186
6.7.2 シナプス特異性を決める分子の同定と機能解析 . . . 188
6.7.3 神経回路の形成と可塑性の研究 . . . 188
6.7.4 その他 . . . 190
6.8 樋口研究室 . . . 191
6.8.1 複数分子の研究：骨格筋モータータンパク質の自己組織化に伴う単一分子特性の向上 191
6.8.2 細胞観察装置：４焦点顕微鏡開発 . . . 192
6.8.3 細胞：量子ドットの細胞内導入 . . . 192
6.8.4 マウスから取り出した組織：マウス側脳室繊毛 (Extro Vivo) のナノメートル運動解析 192
6.8.5 マウス内：マウス In vivo イメージングで観えてきた癌転移の仕組み . . . 193

7 技術部門 195
7.1 技術部門 . . . 195
7.1.1 実験装置試作室（大塚、南城、阿部） . . . 195
7.1.2 安全衛生・薬品管理（佐伯、山本） . . . 195
7.1.3 IT 関連業務（藤代） . . . 195
7.1.4 学生実験（佐伯、藤代、山本、樫村） . . . 196
7.1.5 学生実習（佐伯） . . . 196
7.1.6 研究支援（佐伯） . . . 196

II Summary of group activities in 2008 197
1 Theoretical Nuclear Physics Group . . . 199
2 Theoretical Particle and High Energy Physics Group . . . 200
3 Sakai (Hideyuki) Group . . . 203
4 Hayano Group . . . 203
5 Ozawa Group . . . 205
6 Komamiya group . . . 206
7 Minowa-Group . . . 207
8 Aihara Group . . . 208
9 Asai group . . . 208
10 Aoki Group . . . 209
11 Miyashita Group . . . 210
12 Ogata Group . . . 212
13 Tsuneyuki Group . . . 213
14 Fujimori Group . . . 213
15 Uchida Group . . . 214
16 Hasegawa Group . . . 216
17 Fukuyama Group . . . 217
18 Okamoto Group . . . 218
19 Shimano Group . . . 219
20 Theoretical Astrophysics Group . . . 220
21 Murao Group . . . 222

22 Ueda Group . . . 224
22.1 Knots in a Spinor Bose-Einstein Condensate . . . 224
22.2 Heteronuclear Fermionic Superfluids with Spin Degrees of Freedom . . . 224
22.3 d-Wave Collapse and Explosion of a Dipolar Bose-Einstein Condensate . . . 224
22.4 Miminal Energy Cost for Thermodynamic Information Processing . . . 224
23 Makishima Group & Nakazawa Group . . . 225
24 Takase Group . . . 226
25 Tsubono Group . . . 227
26 Sano Harada Group . . . 228
27 Yamamoto Group . . . 229
28 Sakai (Hirofumi) Group . . . 230
29 Nose Group . . . 231
30 Higuchi Group . . . 233

III 2008 年度 物理学教室全般に関する報告 235

1 学部講義概要 237
1.1 2 年生 冬学期 . . . 237
1.1.1 電磁気学 I : 坪野 公夫 . . . 237
1.1.2 解析力学・量子力学 I : 常行 真司 . . . 237
1.1.3 物理数学 I : 青木 秀夫 . . . 238
1.1.4 物理実験学 : 早野 龍五、岡本 徹 . . . 239
1.2 3 年生 夏学期 . . . 239
1.2.1 電磁気学 II: 酒井広文 . . . 239
1.2.2 量子力学 II : 宮下精二 . . . 240
1.2.3 現代実験物理学 I : 長谷川修司, 溝川貴司 . . . 240
1.3 3 年生 夏学期 . . . 241
1.3.1 物理数学 2 : 松尾 泰 . . . 241
1.3.2 統計力学 I : 佐野 雅己 . . . 241
1.4 3 年生 冬学期 . . . 242
1.4.1 物理数学 III : 村尾 美緒 . . . 242
1.4.2 量子力学 III : 初田哲男 . . . 242
1.4.3 流体力学 : 高瀬 雄一 . . . 242
1.4.4 現代実験物理学 II : 蓑輪 眞、小沢 恭一郎 . . . 243
1.4.5 電磁気学 III : 内田 慎一 . . . 244
1.4.6 生物物理学 : 能瀬聡直、佐野雅己 . . . 244
1.4.7 統計力学 II : 小形正男 . . . 244
1.5 4 年生 夏学期 . . . 245
1.5.1 場の量子論 : 柳田 勉 . . . 245
1.5.2 プラズマ物理学 : 江尻 晶 . . . 245
1.5.3 一般相対論 : 須藤 靖 . . . 245
1.5.4 原子核物理学 : 大塚 孝治、平野 哲文 . . . 246
1.5.5 固体物理 I : 長谷川修司 . . . 246
1.5.6 量子光学 : 島野 亮 . . . 247
1.6 4 年生 冬学期 . . . 247
1.6.1 現代物理学入門 : 樋口秀男、上田 正仁 . . . 247
1.6.2 素粒子物理学 : 駒宮幸男、 浅井祥仁 . . . 248
1.6.3 場の量子論 II : 濱口 幸一 . . . 248
1.6.4 宇宙物理学 : 牧島一夫、中澤知洋 . . . 248
1.6.5 固体物理学 II : 福山 寛 . . . 249

1.6.6 化学物理学 ： 藤森 淳 249

2 各賞受賞者紹介 250
2.1 物理学教室出身の南部陽一郎氏がノーベル物理学賞受賞を受賞 250
2.2 霜田 光一 名誉教授：平成 20 年度文化功労者顕彰 250
2.3 江口 徹 名誉教授（現京都大学基礎物理学研究所所長）：2009 年 恩賜賞・日本学士院賞 250
2.4 上田 正仁 教授：平成 20 年度日本学術振興会賞 251
2.5 上田 正仁 教授、早野龍五教授：平成 20 年度仁科記念賞 251
2.5.1 上田 正仁 教授：2008 年度仁科記念賞 251
2.5.2 早野 龍五 教授：2008 年度仁科記念賞 251
2.6 平野 哲文 講師：平成 21 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞 252
2.7 岩崎 昌子 講師（相原研）：第 10 回（平成 19 年度）守田科学研究奨励賞 252
2.8 阿部 利徳 特任助教（相原研）：第 10 回財団法人高エネルギー加速器科学研究奨励会小柴賞 . 252
2.9 平原 徹 助教（長谷川研）：第 3 回日本物理学会若手奨励賞 252
2.10 大栗 正宗 博士（宇宙理論研究室：現国立天文台メンバー）：第 3 回日本物理学会若手奨励賞 . 253
2.11 稲田 直久 博士（宇宙理論研究室：現理化学研究所牧島宇宙放射線研究室メンバー）：第 20 回日本天文学会研究奨励賞 253
2.12 和達 大樹 博士（藤森研究室）：第 25 回井上研究奨励賞 253
2.13 西田 佑介 博士（初田研究室）：第 25 回井上研究奨励賞 254
2.14 中濱 優 君（相原研）：平成 20 年度理学系研究科研究奨励賞（博士） 254
2.15 出田 真一郎 君（藤森研）：第 22 回日本放射光学会学生口頭発表賞（修士） 254
2.16 大口 雄一郎 君（酒井広文研究室）：第 24 回 (2008 年春季) 応用物理学会「講演奨励賞」 . . 254
2.17 宮武 広直 君（相原研）：2008 IEEE-Nuclear Science Symposium, NPSS Student Paper Awards : NSS Poster Award (Second Place) 255
2.18 碁盤 晃久 君（酒井広文研究室）：平成 20 年度理学系研究科研究奨励賞（修士） 255
2.19 野村 昂亮 君（大塚研）：平成 20 年度理学系研究科研究奨励賞（修士） 255
2.20 穀山 渉 君（坪野研）：平成 20 年度理学系研究科研究奨励賞（修士） 255
2.21 宮武 広直 君（相原研）：平成 20 年度理学系研究科研究奨励賞（修士） 256
2.22 グエン タンフク 君、加藤 康作 君、飯山 悠太郎 君：平成 20 年度理学部修奨励賞 256

3 人事異動 257

4 役務分担 258

5 教室談話会 259

6 物理学教室コロキウム 260

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）

原子核研究室では、原子核とハドロンに関係した非常に広範囲の理論的研究を行っている。その活動は主に三つに分けられる。一つは多数の核子から成る量子多体系としての原子核の構造とそれを支配する動力学についての研究であり、ここでは「原子核構造」と呼んでいる分野である。二つ目は、多数のクォーク・グルオンから成る量子多体系としてのハドロンの構造や高温高密度核物質を、量子色力学に基づいて研究する分野で、「量子ハドロン物理学」と呼んでいる。三つ目は、特に高エネルギーハドロン・原子核衝突反応に注目した、高温クォーク・ハドロン物質の理論的研究であり、「高エネルギーハドロン物理学」と呼んでいる。

「核構造」は主に大塚孝治教授・清水助教及び博士研究員と大学院学生らにより行なわれた。「量子ハドロン物理学」は主に初田哲男教授・佐々木助教及び大学院学生らにより行なわれた。「高エネルギーハドロン物理学」は主に平野哲文講師及び大学院生らにより行われた。以下に先ずそれぞれの分野での研究内容の概要を述べ、後で各々のテーマについて個別に説明する。

原子核核構造

原子核構造と言われる分野には色々な問題が含まれるが、我々の研究室では

1) 不安定核の構造と核力
2) モンテカルロ殻模型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）
4) 他の量子系の多体問題、量子カオス

の４つ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、後で述べられていない研究についてはやや詳しく述べる。ここで参照される文献、講演も後で出て来ないものに限定されている。

安定核とは、我々の身のまわりの物質を構成している原子核で、陽子の数と中性子の数はほぼ等しいか、中性子の方が少し多い程度である。名前のとおり、無限に長いか、十分に長い寿命を持っている。一方、これから話題にする不安定核とは、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性質を示すことが分かってきたが、研究は始まったばかりで、未知の性質や現象に満ち溢れたフロンティアでもある。その例として、魔法数があげられる。原子の場合と同じように原子核でも（陽子或は中性子の数としての）魔法数があり、構造上決定的な役割を果たす。魔法数は１９４９年のメイヤー・イェンゼンの論文以来、安定核では 2, 8, 20, 50, 82, 126 という決まった数であった。しかし、不安定核の殻構造（一粒子軌道エネルギーのパターン）は陽子や中性子の数によって変わり（殻進化と言う）、不安定核での魔法数は安定核のそれとは異なることが最近判明しつつある。その原因は核力のスピン・アイソスピン依存性、特にテンソル力のそれによるものが大きい、ということも５年位前から分かってきた。実は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。。[5, 33, 95, 96, 97, 98, 100, 101, 102] 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。[7, 8, 9, 10, 9, 10, 31, 32]。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。[31, 32, 99]

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。藤田ー宮沢３体力は５０年前からその存在が知られている。バリオンの一つであるデルタ粒子に核子が転換されるプロセスに起因するものである。この３体力が多体系に及ぼす効果はほとんど研究されて来なかった。我々は、その力の効果の中に、強いモノポール斥力があることを発見した。その定量的な評価は伝統的なπ中間子ーデルタ粒子結合からもできるし、有効場の理論などの核力の最近の研究によっても調べられ、似た結果を出す。計算の詳細にはよらずに、極めて特徴的な効果を生むことが示せるので、不安定核の構造の（中性子数などの変化の関数としての）進化に新しいパラダイムを提供するものとして注目されつつある。このように、核力の果たす役割の重要性が「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。[95, 96, 97, 98, 100, 101]

不安定核では、安定核とは異なり、過剰な中性子が糊の役割を果たして、幾つかのアルファクラスターをつなげる事を示してきた。このようなクラスター構造の「結晶的安定化」メカニズムについて、糊の役目の中性子が１個の場合について研究してきた。[4]

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)」を提唱して研究している。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。

我々が１９９４年頃からオリジナルな理論手法として提唱・発展させてきたモンテカルロ殻模型を中心にした研究も展開している。[31, 32, 99] この方法は原子核に於ける量子多体系の解法における大きなブレークスルーとなり、不安定核攻略の重要な武器である。この手法により、多数の一粒子軌道からなるヒルベルト空間に多数の粒子を入れて相互作用させながら運動させる事が可能になった。殻構造がどんどん変わっていく不安定核では特に重要になっており、世界の１０箇所以上のグループと、それぞれの研究対象である原子核に関して理論計算を受け持って共同研究をしている。多くの新しい知見が得られており、最近は中性子数が１８や１９の原子核でも、不安定核であればN＝２０の魔法数構造が普遍的に壊れていることを示した。これは旧来の平均ポテンシャル描像や Warburton らの「Island of Inversion」模型では理解できないもので、重要なものである。さらに、通常の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も示した。[7, 8, 9, 10, 31, 32, 33, 34] また、モンテカルロ殻模型は多数の核子がコヒーレントに運動する集団運動の微視的な解明を、平均場理論の壁を越えて行うことも可能にしている。ごく最近、これについての数値計算手法においてのブレークスルーがあり、これからさらに大型の計算を開始して重い原子核の構造に迫る。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。さらに、ダブルベータ崩壊の核行列要素の計算を行い、ニュートリノ質量の測定に備えている。

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。

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。今年度の成果の例としては、エネルギーの高い反応での荷電平衡化の抑制現象を理論的に見つけ、その意義を議論した。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。

特に、４番目のテーマについては、第一原理的アプローチによる殻模型計算を提唱してきたが、モンテカルロ殻模型を使っての計算を行うべく準備している。量子カオスに関しては、カオスがある規則性の源になる、という新しい概念を導入して現在論文準備中である。これらと並行して、ボーズアインシュタイン凝縮でスピンが有限な場合について、その代数構造に注目した研究を進めている。これは原子核の相互作用するボゾン模型の応用にもなっており、解析的に見通しのいい方法論になっている。

中重核構造の微視的視点からのアプローチ

研究対象とする予定の 100Sn や 132Sn 周辺の領域の核構造計算は対相関の取扱が不可欠であるため、モンテカルロ殻模型の計算プログラムを改良し、得られる波動関数を Hartree-Fock-Bogoliubov 法で用いられるような準粒子真空基底の線形結合と粒子数射影を組み合わせた方法によって表現する方法を開発した。さらに、このような準粒子真空基底を用いることにより、モンテカルロ殻模型法において用いられる補助場の生成方法を密度分解型から対分解型へ変更することを可能とした。これにより、より少数の基底の線形結合によって求めるべき状態の波動関数を表現することに成功し、計算コードの効率化に寄与した。また、平均場＋粒子数、角運動量射影法を用いてサマリウムアイソトープの偶々核における中性子数増加に伴う形の相転移を変形度の大きな領域まで含めて計算することに成功した。これにより、1 主殻内の一粒子軌道と角運動量差が 2 となる対をもつ 1 主殻外一粒子軌道である π1g9/2,π2f7/2,ν1h11/2,ν2g9/2 の各軌道が四重極集団運動状態の記述に不可欠な役割を果たすことを示した。この研究対象は、従来の殻模型計算のような 1 主殻計算では変形度が大きすぎて取り扱うことができない ^{152}Sm 近傍を含んでいるため、平均場を超えた枠組みを適用するためにはモンテカルロ殻模型のような 1 主殻を超える模型空間を取り扱える手法を必要であり、そのベンチマーク計算をおこなった。[56, 115]

時間に依存するハートリーフォック理論による原子核の回転運動の研究

原子核の回転運動を時間に依存するハートリーフォック（Time-Dependent Hartree Fock、以下 TDHF と略称）理論により研究した。特に次の２つのテーマについての研究を行った。すなわち、１番目のものは TDHF 理論における保存則であり、２番目はエキゾチックな原子核の３次元回転についてである。

１番目は実際には、TDHF 理論での３次元デカルト座標上で定義された波動関数やポテンシャルにおける角運動量の保存についてである。比較的あらいグリッドで表しても、変形した原子核の回転は極めてよく現わされることが先ず示された。重イオン衝突は高励起の複合核を作り、かなりの核子放出を伴う。これら放出核子は計算上設定された数値的な箱の面に達し、計算からは消え、角運動量の見かけ上の減少を生じる。このような見かけの変化を見分ける方法を研究した。

原子核の形が、陽子数や中性子数とともに進化するメカニズムの微視的研究は原子核物理学の大きな興味の一つである。原子核の３次元回転運動の微視的、量子多体問題的観点から理解することを目的として、原子核の３次元回転運動を TDHF 理論の枠組みで議論するための数値計算コードを開発した。これにより「みそすり」運動や傾斜軸回転などの３軸非対称変形体の回転を研究し、ｒプロセス核や超重元素核などのエキゾチック原子核に応用する。それにより、第３世代の RI ビーム加速器の登場により大きな飛躍が期待されるエキゾチック原子核の物理の発展に貢献したい [57]。

不安定核におけるテンソル力の効果

本研究では、平均場近似を用いて、原子核構造に与えるテンソル力の効果を、核図表の広い範囲に渡って、特に不安定核領域において、系統的に研究することを目的としている。本年度においては、そのテンソル力の効果が顕著に現れるいくつかの現象について考察し、また強いアイソスピン依存性を持たせたスピン・軌道力についても同時に考察することで、より精緻な結果が得られる平均場計算を目指した。

まず、テンソル力についてだが、従来の平均場モデルを拡張しテンソル力を含めるように拡張している。テンソル力の効果は強いために、従来のモデルに摂動論的な修正では不十分で、新たにパラメータを大幅に調整した。このパラメータを利用して調べてみると、テンソル力の影響により原子核構造に変化がおきることを、これまでの研究で明らかにしてきた。さらに、このテンソル力に加えて、有限レンジのスピン・軌道力を導入している。これまで平均場計算で使われているスピン・軌道力はゼロレンジの形式であるために、アイソスピン依存性に柔軟性がなく、Ca(カルシウム) や Pb(鉛) の平均二乗半径の変化 (アイソトープシフト) を説明不可能であると問題点があった。より現実に即した形式である有限レンジ型のスピン・軌道力を導入することで、Ca や Pb のアイソトープシフトが実験値に近い値を再現することが可能であることも、本研究では明らかにし、学位論文として結果をまとめた。[53]

TDHF による低エネルギー重イオン衝突

低エネルギー重イオン衝突の初期段階について研究を行った。エキゾチックな原子核をより正確に扱うための処置が施されたもとで衝突する核子の荷電平衡化についてエネルギー上限公式を得た。同公式の正当性を三次元 TDHF 計算によって確かめた。これによって荷電平衡化のメカニズムが明かになり、さらにはエキゾチックな原子核を形成するための衝突エネルギー閾値が与えられた [11, 35, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 116, 117, 133, 142, 143, 144, 145] 。

α-cluster structure in RMF and from Unitary Correlation Operator Method to Shell Model calculation

In this year, the α-clustering phenomenon in light stable nuclei is studied within the shell- model-like approach in relativistic mean field theory. The result reproduces α-clustering phenomenon in light stable nuclei by calculating ^{8}Be, ^{12}C, ^{16}O, ^{20}Ne. Comparison of our result with RMF calculation indicates that the pairing correlation could change the properties of clear ground state and lead to different α-clustering structure.

The advent of realistic nucleon-nucleon (NN) potentials has created an opportunity to investigate nuclear structure starting from the first principle. In a simple approach, the many-body state is described in a subspace spanned by some trial states, e.g. Slater determinants. Those states cannot describe the strong short-range correlations induced by the realistic NN-potential. By using UCOM interaction, shell model calculation has been done with harmonic oscillator basis. Many shells should be mixed, in order to be ab-initio [64, 65, 118].

殻模型における連続状態の効果と有効相互作用

核子間の相互作用、すなわち核力は厳密には解明されておらず、低エネルギー核子散乱や重陽子の物理量を再現するように現象論的に決められ、現実的核力と呼ばれる。現実的核力は一般に、強い短距離斥力や強いテンソル力を持ち、少数系であっても極めて非摂動的であり、第一原理的な計算には制限が生じる。従って核子多体問題では模型空間とその空間で定義される有効相互作用が導入される。殻模型は代表的な模型であり、非常に有効であるが、連続状態との結合が考慮されていないため、不安定核の記述には十分でない。この点を拡張するために、実エネルギー空間で密な 1 粒子状態を用いる方法 [66, 67] と複素エネルギー空間拡張された完全系を用いる方法（Gamow 殻模型）[68, 69, 70, 71, 119] を適応した。現実的な核力の性質を考慮してドリップ線近傍の酸素同位体の低励起状態・基底状態を計算し、連続状態の寄与が 1 MeV 程度の補正を与えることを示した。また、核子が粒子崩壊に対して不安定な系においても、核力を考慮することが重要である事を明らかにした。
さらに、殻模型、あるいは一般の多体問題における有効相互作用を系統的に導く方法を考察し、Similarity Renormalization Group（SRG）を拡張した。従来の SRG は Flow パラメータ (s) で特徴付けられる連続的なユニタリー変換からなる。2 核子間の物理量を保存し、高運動量モードと低運動量モードの結合を抑制するため、変換されたハミルトニアンは摂動的であり、多体問題の収束性を非常に向上させるが、Flow 方程式に現れる３体力以上の相殺項を無視しているので、３体以上の物理量には s-依存性が現れる。

そこで Flow 方程式に現れる多体力の主要な部分を、密度依存性を持った０体、１体、２体力に書き直し、SRG を拡張した。解析的、数値的な計算により、核子多体問題への適応可能性を示唆した [72, 73, 120]。

スピノールＢＥＣにおける力学的対称性

光学トラップによるボース・アインシュタイン凝縮（ＢＥＣ）の実現により、スピン自由度を持ったＢＥＣであるスピノールＢＥＣの研究が可能となっている。このようなＢＥＣを記述するには、複数個の秩序変数が必要となるため、超流動ヘリウム３やＱＣＤのカラー超伝導などの物理と共通点があり、興味深い研究対象である。我々は、スピノールＢＥＣにおいて力学的対称性が重要な役割を果たしていることに気づき、スピン１及び２のＢＥＣでは任意の結合定数に対して、スピン３のＢＥＣでは特定の結合定数に対して、力学的対称性によりエネルギー固有値と固有状態が単モード近似の範囲内で厳密に求まることを示した。また、スピン１と２のＢＥＣの低エネルギー状態や相構造を調べ、反強磁性相とサイクリック相において擬縮退したエネルギースペクトルが表れることも示した。[12, 74, 75, 76, 121]

平均場模型から出発した IBM の導出とエキゾチック核への応用

原子核は多数の核子が関与する集団運動的な側面を持ち、表面変形の４重極集団運動は特に重要である。「相互作用するボゾン模型」（IBM）は、ボゾンを自由度として原子核の低励起状態をシミュレートする模型であり、実験事実をうまく説明するが、核子系から出発した物理的な裏付けを必要とする。また、パラメータを現象論的に決めることが多いため予言能力に欠ける。一方、Skyrme 模型に代表される平均場模型は、ほぼ全ての原子核の内部固有状態（原子核とともに回転する系）の性質を系統的に記述するが、実験室系の良い量子数を保存して励起状態の物理量を正確に計算するのは一般に難しい。

我々は平均場模型と IBM の相補的な関係に着目し、平均場から出発して IBM のハミルトニアンを決める方法を提案してきた。IBM のパラメータは、内部固有状態の全エネルギー期待値をフェルミオン系とボゾン系で比較することで得られるが、前者は Skyrme 型相互作用を用いたハートリー・フォック計算から、後者に関しては内部固有状態でのボゾンの凝縮を表す波動関数（コヒーレント状態）を導入して求めることができる。最終的にボゾン・ハミルトニアンの実験室系での対角化により、良い量子数をもつ励起状態のエネルギーと波動関数を計算できる。これとは別に、IBM のパラメータの一意性に関して、ウェーブレット解析を用いた検証も行った。

帰結として、サマリウム（Sm）同位体やバリウム（Ba）同位体における力学的対称性の３つの極限とそれらの間の遷移（形の相転移）、またそれに対応する臨界点対称性の典型的な場合を記述し、いずれも実験をほぼ再現することを示した。同時に、既存の IBM では到達不可能だった、質量数が 200 以上のオスミウム（Os）・タングステン（W）同位体、中性子過剰ルテニウム（Ru）同位体など実験的にも未到達な不安定核領域にまで計算の範囲を拡大することができ、安定核では見られない性質を理論的に予測した。その一例として、上記の Os-W 領域において E(5) 対称性が広範囲にわたって存在する事などが挙げられる。[13, 36, 37, 54, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 122, 123]

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、原子核中でのカイラル対称性、宇宙初期の高温プラズマの熱力学的性質やその動的構造、中性子星やクォーク星内部の高密度クォーク物質におけるカラー超伝導現象、相対論的重イオン衝突実験から得られるクォーク・グルーオン・プラズマ物性、冷却原子フェルミ気体やボース気体の物性など多岐にわたり、実験や観測と密接に関係した研究を展開している。

格子量子色力学による核力の研究

低エネルギーにおける核子-核子ポテンシャルや核子-ハイペロンポテンシャルを QCD から導出することは、原子核物理学の基礎を与えると同時に、今後のハイパー核物理学や中性子星構造論の進展に重要な理論的課題である。我々は、2007 年に格子上のバリオン間ベーテ・サルピーター振幅を数値シミュレーションで求め、そこからポテンシャルを導出するという新しい道を拓いた。今年度はその理論的基礎をより詳細に検討すると同時に、テンソル力の導出、$\Xi - N$ や $\Lambda - N$ 相互作用への拡張、クォークの真空偏極も考慮した核力・ハイペロン力の導出、核力の非局所性の定量的評価などについて研究をすすめた。[14, 15, 38, 39, 40, 103]

核媒質中でのハドロン

有限バリオン密度の核媒質中で、ハドロンのスペクトルがどのように変化するかという問題は、カイラル対称性の部分的回復と関連したハドロン物理学における重要課題である。我々は、媒質中での π 中間子に関する模型によらない新しい和則を導出した。さらに、ベクトル中間子やスカラー中間子の有限温度・有限バリオン密度でスペクトル変化について、最近の理論および実験の進展をまとめた総合報告を発表した。[16, 17]

格子 QCD で探る高温プラズマ

RHIC で観測され、LHC においても実験が行われる、クォーク・グルオン・プラズマの性質を第一原理格子 QCD 計算で研究した。特に、物理的長さスケールを固定し、虚時間方向の格子サイズを変化させることで熱力学量を引き出す fixed scale approach を詳細に検討し、その有効性を確かめた。さらに、有限温度での重いクォーク間のポテンシャルや、有限化学ポテンシャルの寄与についても、系統的な研究をおこなった。[18, 41, 42, 43]

現実的な 2+1 フレーバー格子 QCD 数値計算

理研 BNL 研究センター (RBRC)、コロンビア大学、ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の共同格子 QCD プロジェクトチーム (RBC) と英国 6 大学格子 QCD 研究共同体 (UKQCD) との国際的共同研究として RBC および UKQCD が保有する専用並列スーパーコンピューター QCDOC を用い、ストレンジクォークを含めた現実の世界により近い、３種類の動的クォークの自由度（アップ、ダウン、ストレンジ）を厳密に取り扱ったドメインウォールフェルミオン (DWF) による格子 QCD 数値計算を行った。奇数個の動的クォークを厳密に取り扱うために RHMC 法を採用し、HMC 法一般にあらわれるハミルトニアン方程式の積分の実装をより効率化するために Hasenbusch 法や Omelian 法などいった効率化を併用して、ストレンジクォーク質量を現実の値に固定した下で、アップ・ダウンクォークの質量が π 中間子の質量 330MeV, 390 MeV, 520 MeV, 620 MeV に相当する 4 つの異なるのアップ・ダウンクォークの質量に対応する QCD ゲージ配位を格子間隔 0.13 fm（格子間隔の逆数が 1.6 GeV 程度)、物理的格子サイズ 2 fm の規模で数値計算することに成功した。それぞれの π 中間子の質量に対応する格子 QCD ゲージ配位はそれぞれ約 4000-5000 程度蓄積され、この QCD ゲージ配位を用いて基本的な物理量：クォーク凝縮や π 中間子、K 中間子の質量およびその崩壊定数などの数値解析を行った。[19]

2+1 フレーバー格子 QCD 数値実験による中性子 β 崩壊定数の研究

中性子ベータ崩壊定数は、中性子の寿命とも関連し、実験でも高精度で測定されており、理論的にも非常に基礎的な物理量である。しかしながら、格子 QCD 数値計算によって実験値を長年再現することができなかった。本研究では、Domain Wall Fermion(DWF) の定式化を用いた格子 QCD 数値実験を用いてその長年の問題を解決した。問題を解決する糸口は格子上での厳密な軸性ベクトル対称性の維持と有限体積効果である。中性子ベータ崩壊定数は軸性カレントを核子状態で挟んだ行列要素として定義されることからも推察できるように、軸性ベクトル対称性によりこの行列要素は繰り込みを受けない。DWF は格子上で厳密に軸性ベクトル対称性を取り扱えるフェルミオン形式であり、厳密な対称性を持たない他のフェルミオン形式のときに直面する複雑な繰り込みの問題がなく、非常に精度の高い計算が系統的に行える。第二点目は中性子ベータ崩壊定数がカイラル対称性の自発的破れに伴う南部ゴールドストンボソン（パイオン）と直接結合する行列要素で定義されることからも想像が難くないが、数値実験がパイオンのコンプトン散乱長さよりも充分大きな物理的な空間サイズを用いて行われているかとという視点である。これらの点にいち早く着目し研究を行ってきたが、当初は、動的クォークの自由度を無視した、クェンチ近似の範囲内での研究であった。今回、３種類の動的クォークの自由度（アップ、ダウン、ストレンジ）を全て厳密に取り扱った 2+1 フレーバー格子 QCD 数値計算を完遂し、上記の２つの点が近似に依らず、重要であることを再確認した。最終的に我々の数値計算によって、実験値を数%の誤差の範囲内で再現することにも成功している。これら成功により、QCD 理論が確かに中性子の寿命を再現し得ることを確かめ、将来の格子 QCD によるクォーク・グルーオンの自由度からのボトムアップ的な原子核研究への道が拓かれたといえる。[20, 22]

格子 QCD 数値実験による核子構造の研究

核子の構造に関する格子 QCD 計算は近年着実に精度が上がりつつあるが、もっぱら核子の電磁形状因子や深非弾性散乱における核子構造関数に重きを置いている。本研究においては弱い相互作用の軸性ベクトルカレントに伴う形状因子に焦点を当てた。軸性ベクトルカレントに伴う核子行列要素は、軸性ベクトルタイプの形状因子と擬スカラータイプの形状因子の２つの形状因子よって特徴づけられる。前者の零運動量極限は中性子ベータ崩壊定数に対応するが、この研究においては、後者の擬スカラータイプの形状因子に着目した。擬スカラータイプの形状因子の零運動量近傍の値は、核子ミューオン吸収の実験で測られる核子擬スカラー電荷として知られるもので、その値については、仏国サクレー研究所で行われた実験 (OMC) と加連邦トライアンフ研究所で行われた実験 (RMC) での食い違いが長年の問題になっている。前者の OMC は後者の RMC の実験

に比べ、実験の過程で２つの陽子とミューオンとの分子状態が作られやすく、そのことによる系統誤差が大きい事が指摘されているが、RMC の実験値はカイラル摂動論などを使った理論的予想からは大きくはずれている。この理論を含む食い違いの問題に、強い相互作用の第一原理計算である格子 QCD を用いて研究を行った。実際の格子 QCD 数値実験には、中性子ベータ崩壊定数の研究のときと同様に、厳密に軸性ベクトル対称性を取り扱えるフェルミオン形式、DWF を用いたクェンチ近似の数値計算を行った。また、軸性ベクトルカレントに伴う核子行列要素に対する非常に大きな有限体積効果をコントロールするために、これまであまり行われたことのない非常に大きな物理体積 (空間方向の一辺が約 3.6 fm の大きさ) を用いた。運動学的に、零運動量の擬スカラータイプの形状因子には直接アクセスすることができないので、有限体積効果の問題から離れても、大きな物理体積の利点として、零運動量近傍の有限な運動量（最も小さな運動量の自乗は 0.1 GeV^2 程度）を取り扱える点が挙げらる。数値解析により、我々は、小さな運動量における擬スカラータイプの形状因子の振る舞いは、理論的に予想とされてきたパイオン極近似をよく見たしていることを確認し、最終的に核子ミューオン吸収の核子擬スカラー電荷としてカイラル摂動論による予言値に近い値を得た。我々の計算値は、最近スイスの PSI で行われた、MuCap collaboration による新しい OMC の実験値をよく再現し、これまで信じられてきた RMC の実験値の信憑性を問う結果となった。

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 崩壊とは、バリオン８重項（ハイペロン）の弱い相互作用による semi-leptonic 崩壊 ($B \to B' + l + \bar{\nu}_l$) のことで、中性子ベータ崩壊はその一部を成す。ハイペロン β 崩壊の情報は、核子スピンにおける各フレーバー・クォークの寄与を査定するときにインプットとして用いられる。しかしながら、その際、フレーバー $SU(3)$ 対称性を暗に仮定するために、核子スピンに対するストレンジクォークのスピン寄与に対する系統誤差は、実験的統計誤差と同程度と見積もられ、実際に核子内ストレンジクォークの核子スピンへの寄与が高い精度で決定できていない要因の一つになっている。本研究においては、実験的には難しい、ハイペロン β 崩壊におけるフレーバー $SU(3)$ の破れの存在を格子 QCD 数値解析により直接観測することを目的とした。複数あるハイペロン β 崩壊のうち、特に $\Xi^0 \to \Sigma^+$ 崩壊に着目した。この崩壊は、中性子ベータ崩壊（$n \to p$）と $SU(3)$ 対称性を仮定した場合に同一（ダウンクォークをストレンジクォークで置き換えたもの）と考えられるため、中性子ベータ崩壊と比較することにより直接的にフレーバー $SU(3)$ の破れを観測できる。現在、実験的にはこの崩壊が１グループ (KTeV collaboration@Fermilab) でしか測定に成功しておらず、その実験誤差も測定値に対して約 15%と大きいため、ハイペロン β 崩壊のフレーバー $SU(3)$ の破れの有無さえ確認できていないが、今回の研究では、$\Xi^0 \to \Sigma^+$ 崩壊のそれぞれベクトル、軸性ベクトルの両チャンネルに関与する計６つの異なる形状因子をそれぞれ独立に計測し、中性子 β 崩壊との違いを詳細に調べることによって、ハイペロン β 崩壊におけるフレーバー $SU(3)$ の破れを高い精度で観測することに成功した。特に特筆すべきは、それまで理論的予測がほぼ皆無だったセカンドクラス形状因子の存在を確認し、この無視できない大きさのためにその存在を無視した実験解析においてフレーバー $SU(3)$ の破れの過小評価につながることを指摘した。今回の研究をハイペロン β 崩壊の中で実験的に精度の高い、$\Sigma^- \to n$ 崩壊に応用することにより、カビボ-小林-益川行列要素 (CKM 行列要素）の一つである、V_{us} の決定にも大きな貢献することができると考えている。[124]

高密度 QCD におけるクォーク・ハドロン連続性

量子色力学（ＱＣＤ）において、低温・低密度ではハドロン相、低温・高密度ではクォークの超伝導状態であるカラー超伝導相が実現することが理論的に分かっている。我々は媒質中のＱＣＤ和則と呼ばれる手法を用いて、低密度から高密度におけるベクトル中間子に対する一般的な質量公式を与えた。これにより、高密度では１重項ベクトル中間子が存在し得ない一方、高密度では８重項ベクトル中間子はギャップ程度の質量をもつカラー８重項グルーオンと密接に関係していることを示した。この結果は、励起状態についてハドロン相からカラー超伝導相への連続性（クォーク・ハドロン連続性）があることを強く示唆している。[23, 44]

また、高密度 QCD のインスンタントン多体系が高密度では常にプラズマのように解離した状態として振舞い、密度を変えても相転移が起こらないことをくりこみ群の手法を用いて解析的に証明した。これは、QCD の高密度カイラル相転移がまさに凝縮系物理の 2 次元 O(2) スピン系で知られる Kosterlitz-Thouless 相転移の 4 次元版になっていることを意味し、クォーク・ハドロン連続性の動的な説明を与えている。[24, 45, 125, 138]

さらに、系の微視的な詳細には依らないユニバーサリティをもった有限体積の QCD を考えることによって、ハドロン相およびカラー超伝導相における QCD の分配関数が完全に同じ関数形に書けることを証明した。[25]

クォーク・グルーオン・プラズマ中での重いクォークの拡散現象

チャームクォークやボトムクォークは、その質量 (数 GeV) が温度に比べて十分に重いとき、媒質であるクォーク・グルーオン・プラズマ（QGP）における不純物とみなせる。本研究では、この不純物の拡散過程を現象論的に記述するランジュバン方程式を相対論的に拡張し、さらに相対論的重イオン衝突実験で生成された媒質の時空発展を記述する流体力学模

型と融合させることで、実験データとの比較を行った。具体的には、重いクォークからのセミレプトニック崩壊による電子や陽電子について、理論計算と実験データとを比較した。上記の相対論的ランジュバン方程式に含まれる基本的な物理量は、QGP 中で重いクォークに働く摩擦力であり、実験との比較から見積もることで、摂動論的 QCD の予言する値よりも大きいことを示した。さらに近年盛んに研究されているゲージ/重力対応からの予想値と誤差の範囲で一致することも分かり、相対論的重イオン衝突で作られたであろう QGP の性質のうち、ずり粘性以外でもゲージ/重力対応による定量的評価が有効であるかもしれない例を示したことになる。

また、さらなる実験的な拘束を得ることを目指し、対生成時にはあったはずの重いクォーク・反クォーク対の運動量相関が、拡散過程によっていかに消失するか調べた。具体的には、重いクォークからのセミレプトニック崩壊による電子や陽電子、ミューオンや反ミューオン、ハドロンの相関の計算を行った。[26, 46, 84, 85, 86]

クォーク閉じ込めとスピン系の質量ギャップの研究

我々の世界ではクォークやグルーオンは観測されず、メソンやバリオンなどカラーシングレットの状態しか観測されていない。カラーの閉じ込めと呼ばれるこの現象は強い相互作用の顕著な特徴であり、格子ゲージ理論の枠組ではウィルソン・ループの面積則として一般に理解される。これは数値シミュレーションで広くサポートされているものの現在も厳密な証明は与えられていない。2007 年 Tomboulis によって SU(2) 格子ゲージ理論における面積則の解析的証明が提出された。本研究ではこの証明を詳しく解析し、その結果、証明には 2 つの誤りがあることを明らかにした。また、従来 SU(2) の場合にしか証明されていなかった Tomboulis-Yaffe の不等式を SU(N) の場合へと拡張した。これは vortex free energy と Wilson loop という 2 つの基本的物理量の関係を厳密に示したものである。これをさらに一般の古典的スピン系の場合にも拡張した。これは直観的には mass gap（ゲージ理論の面積則に対応する）が存在するための一つの十分条件を与える。また、この不等式を三角イジング模型に具体的に適用し、知られていない off-axis mass gap に対する厳密な lower bound を与えた。さらに、この bound が厳密な mass gap に等しいという予想を与え、その test も行った。この予想の証明は今後の課題である。

[27, 28, 105, 126, 139]

クォークが重い時、有限温度の閉じ込め-非閉じ込め相転移はゲージ群 SU(3) の中心 Z(3) に本質的に支配される。しかし例外群 G(2) は中心が自明なので上の議論が適用できない。にも関らず、閉じ込め-非閉じ込め相転移が 3+1 次元の G(2) でも起きるという数値実験結果が報告されている。我々は揺らぎが一層強くなる 2+1 次元でも G(2) に相転移が存在するかどうか調べた。格子上でモンテカルロ計算を行った結果、強い一次相転移の兆候を得た。[127]

Heavy Quark Potential from a Spectral Decomposition of the Thermal Wilson Loop

A suppression of heavy quarks, especially J/ψ, that was predicted to be one of the prime signals of a high temperature phase transition in QCD has been observed recently in Heavy-Ion collisions at the RHIC facility . To understand the details of the underlying physics, a consistent picture of heavy quarkonia in a hot and dense medium is needed around the critical temperature. This research is therefore concerned with a first-principles derivation of a non-perturbative definition of the heavy quark potential from lattice QCD.
We base our approach on a spectral decomposition of the thermal Wilson loop, which allows us to connect the standard formulation at zero temperature and recent perturbative hard thermal loop calculations in the high temperature limit. This method differs qualitatively from the usual use of Polyakov line correlators, for it provides in particular a determination of both real and imaginary part of the potential at all temperatures.

The thermal Wilson loop with size $(\tau \times R)$ and its spectral representation reads

$$\mathcal{W}(\tau, R) \propto \int e^{-\bar{\omega}\tau} \rho(\bar{\omega}, R) d\bar{\omega}.$$

We deploy finite temperature quenched lattice QCD on an anisotropic $\xi = 4$ lattice to calculate the Wilson loop with sufficiently high resolution in imaginary time for $20^3 \times 32 - 20^3 \times 96$ with coupling parameter $6/g^2$=7.0. Then, by using the maximum entropy method (MEM), the spectral function for given $Q\bar{Q}$ distance R is extracted. The real and imaginary part of the potential can now be readily determined from the peak position and width of the spectral function since a fourier transform connects both quantities

$$\int d\bar{\omega} e^{-i\bar{\omega}t} \rho(\bar{\omega}, R) d\bar{\omega} \sim e^{-itV(R)} (t \to \infty).$$

[87, 88, 89, 90, 128]

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。本研究では、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相構造の解析を行った。相構造を決める制御パラメーターとして、温度とボソン・フェルミオン間の引力相互作用の強さを用い、これらは冷却原子

ガスにおいて実験的に制御可能なものである。我々は実験に先駆けて、弱結合領域ではボソンの超流動とフェルミオンの超伝導状態が共存し、強結合領域では複合フェルミオンの超流動状態が実現しうるという大域的な相構造を明らかにした。[55, 129, 130]。

高エネルギーハドロン物理学

我々の研究室では、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、測定結果を基にした理論的研究、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、重いクォークやクォーコニウムの伝播、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。この立場から、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講演を行った [106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 114]。

ハドロン物質の散逸的性質と ϕ 中間子

高エネルギー重イオン衝突反応の終状態の時空発展をハドロン輸送理論により記述を行い、ハドロン物質の散逸の影響が集団的な流れの一つである楕円型フローに与える影響を調べた。完全流体 QGP 描像によって得られる楕円型フローのハドロンの質量依存性は、むしろ、ハドロンの散逸により生じることが分かった。更に、ハドロン相内でほとんど相互作用しない ϕ 中間子に注目し、質量毎に楕円型フローが小さくなるという傾向から外れることを示した [29, 48]。

重いクォークとクォーコニウムを用いた QGP の探索

相対論的重イオン衝突反応を通して QGP の性質を調べるには、物質自身の振る舞いだけでなく、物質にプローブを通して調べることもできる。QGP 流体中を通過する重いクォークの確率過程を用いて、QGP が重いクォークに与える摩擦力の定量的な評価を行い、AdS/CFT 対応から予想されている値程度となることが分かった [26, 86]。また、J/ψ 粒子のような重いクォークの束縛状態が、QGP 流体中のとある温度以上で解離するという模型 (hydro+J/ψ model) を構築し、実験結果との詳細な比較からその解離温度が相転移温度の約 2 倍程度と見積もられた [49]。

相対論的粘性流体力学

高エネルギー重イオン衝突実験によって生成される高温 QCD 物質における時空発展の解析では、凍結温度において Cooper-Frye 公式を用い、相対論的流体描像から粒子描像に移る必要がある。このとき、粘性の影響は分布関数とフローを通して現れる。前者についてずれ粘性と体粘性を両方含めた場合の多粒子系における分布関数の歪みを一意的に求める方法を考案し、バリオン数がない場合のハドロン共鳴ガスの凍結時に粘性がどのように粒子スペクトルに影響を及ぼすのか、完全流体を含む幾つかのフローに対して定量的に見積もった。その結果、従来小さいと考えられていた体粘性の効果が重要であることを発見した [92, 94]。また後者について、流体模型の数値シミュレーションにずれ粘性と体粘性を両方取り入れた枠組みの検討を行った。相対論的流体力学の枠組みで素朴に散逸の効果を記述すると、因果律が破れることが指摘されている。その問題を回避する一つの方法が、エントロピーカレントに高次の補正を加え、散逸を表すカレントに対する構成方程式に緩和項を得ることである。その結果、散逸カレントは単なる熱力学的な力に対する応答から、独立な物理量に格上げされる。この効果を相対論的流体数値シミュレーションに取り入れる検討を行った。

また、相対論的粘性流体力学についての講義を行った [140, 141]。

QGP からの電磁放射

QGP 内部の情報を担う粒子として、光子やレプトン対などの強い相互作用をしない粒子が注目されている。高エネルギー重イオン衝突反応における光子生成を解析するためには、さまざまな寄与を考慮に入れる必要がある。我々は、衝突初期のハード過程により生成される光子、媒質の熱的輻射、ハードなパートンと QGP の相互作用による転化 (conversion) 過程、及び、ハードなパートンの破砕過程を系統的に評価した。最も興味のある QGP からの熱的輻射の寄与が主要になる運動領域は $1 < p_T < 3$ GeV/c と分かった [30, 113, 131]。

反応初期状態の揺らぎの影響

有限の衝突係数の反応では、重イオン同士が重なり合う楕円のような形の高温物質ができると考えら

れており、この描像は楕円型フローの観測で確かめられている。事象平均としてこのような描像は正しいものの、一方で、衝突する重イオン内の核子の位置は事象毎に揺らいでおり、結果として楕円形も揺らいでいると考えられている。この揺らぎの効果を、衝突初期を記述するグラウバー模型、及び、カラーグラス凝縮模型に取り入れ、流体数値シミュレーションの初期条件の計算を行った。特に銅イオンのような金イオンに比べてサイズの小さい反応系の場合、楕円型フローパラメータを、より良く再現することが分かった [93]。この補正は、今後、QGP の輸送係数を実験結果から引き出す上で重要になる。

QGP 阻止能の導出

大きな運動量を持ったパートンは媒質との相互作用により、エネルギー損失を起こす。この定量的な解析から、媒質自身の情報を引き出す手法はジェットトモグラフィーと呼ばれている。π^0 と半レプトン崩壊による電子の nuclear modification factor、ハドロンの 2 粒子相関の実験データを、最新のモデル計算を用いて大域的にフィッティングを行い、統計的手法を駆使して、エネルギー損失に関わる QGP の阻止能パラメータの最尤値を導出した [91]。その結果、物質が理想気体的に振舞うと想定される値から大きくずれていることが判明した。

リッジ構造の物理的解釈

大きな運動量を持ったハドロンはミニジェットに起因する方位角方向の相関を持って現れる。陽子同士の衝突の場合、トリガー粒子と同方向に出てくる粒子は、大きな運動量を持ったパートンの破砕によって説明されるが、重イオン同士の衝突の場合、それに加えてラピディティ方向に幅広く相関を持った粒子が多く作られる (リッジ構造, ridge)。この物理的解釈のため、我々は衝突直後に作られた大きな運動量を持つパートンとシャワーパートンが、ランダムな強いカラー電磁場によってラピディティ方向にキックを受けて、その後、ハドロン弦を作って崩壊するモデルを作成した [47]。妥当なモデル設定で、定性的にリッジ構造が現れることが確認できたが、定量的にはまだ改良の余地があることも判明した。

＜受賞＞

[1] 野村昂亮: 平成 20 年度理学系研究科研究奨励賞 (修士)、東京大学大学院理学系研究科、2009 年 3 月

[2] 西田佑介、 第 25 回井上研究奨励賞、井上科学財団、2009 年 2 月

[3] 平野哲文、 平成 21 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞、文部科学省、2009 年 4 月

＜報文＞

(原著論文)

[4] T. Yoshida, N. Itagaki, and T. Otsuka: “Appearance of cluster states in C-13”, Phys. Rev. C **79**, 034308 (2009)

[5] T. Suzuki and T. Otsuka: “Exotic Magnetic Properties in C-17”, Phys. Rev. C **78**, 061301 (2008)

[6] T.R. Saito *et al.*, “Yrast and non-yrast 2(+) states of Ce-134 and Nd-136 populated in relativistic Coulomb excitation”, Phys. Lett. B **669**, 19–23 (2008)

[7] V. Tripathi, *et al.*, “Intruder Configurations in the A=33 isobars: Mg-33 and Al-33”, Phys. Rev. Lett. **101**, 142504 (2008)

[8] M. Wiedeking, *et al.*, “Intruder excitations in P-35”, Phys. Rev. C **78**, 037302 (2008)

[9] L.A. Riley, *et al.*, “d(5/2) proton hole strength in neutron-rich P-43: Shell structure and nuclear shapes near N=28”, Phys. Rev. C **78**, 011303 (2008)

[10] S. Ettenauer, *et al.*, “Intermediate-energy Coulomb excitation of Na-30”, Phys. Rev. C **78**, 017302 (2008)

[11] Yoritaka Iwata, Naoyuki Itagaki, Joachim A. Maruhn, and Takaharu Otsuka, “The Competitive Reaction Mechanism in Exotic Nuclear Reactions”, Int. J. Mod. Phys. E **17**, 9 (2008) 1660.

[12] S. Uchino, T. Otsuka, and M. Ueda: “Dynamical symmetry in spinor Bose-Einstein condensates”, Phys. Rev. A **78**, 023609 (2008).

[13] K. Nomura, N. Shimizu, and T. Otsuka: “Mean-Field Derivation of the Interacting Boson Model Hamiltonian and Exotic Nuclei”, Phys. Rev. Lett. **101**, 142501 (2008)

[14] S. Aoki, T. Hatsuda and N. Ishii, ”Nuclear Force from Monte Carlo Simulations of Lattice Quantum Chromodynamics”, Computational Science & Discovery, **1** (2008) 015009.

[15] H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda, ”Hyperon-Nucleon Force from Lattice QCD”, Phys. Lett. **B673**(2009) 136.

[16] D. Jido, T. Hatsuda and T. Kunihiro, ”In-medium Pion and Partial Restoration of Chiral Symmetry”, Phys. Lett. **B670** (2008) 109.

[17] R. Hayano and T. Hatsuda, ”Hadron properties in the nuclear medium”, to appear in Rev. Mod. Phys. [arXive:0812.1702v1 [nucl-ex]].

[18] S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno, and T. Umeda (WHOT QCD Coll.), ”Fixed Scale Approach to Equation of State in Lattice QCD”, Phys. Rev. **D79** (2009) 051501.

[19] C. Allton, D. J. Antonio, T. Blum, P.A. Boyle, N.H. Christ, S.D. Cohen, M.A Clark, C. Dawson, M.A. Donnellan, J.M. Flynn, A. Hart, T. Izubuchi, A. Jüttner, C. Jung, A.D. Kennedy, R.D. Kenway,

M. Li, S. Li, M.-F. Lin, R.D. Mawhinney, C.M. Maynard, S. Ohta, B.J. Pendleton, C.T. Sachrajda, S. Sasaki, E.E. Sholz, A. Soni, R.J. Tweedie, J. Wennekers and T. Yamazaki, [RBC+UKQCD collaborations]
Physical Results from 2+1 flavor Domain Wall QCD and SU(2) Chiral Perturbation Theory,
Phys. Rev. **D78** (2008) 114509.

[20] T. Yamazaki, Y. Aoki, T. Blum, H.-W. Lin, M.-F. Lin, S. Ohta, S. Sasaki, R. J. Tweedie, and J. M. Zanotti
Nucleon axial charge in 2+1 flavor dynamical lattice QCD with domain wall fermions,
Phys. Rev. Lett **100** (2008) 171602.

[21] S. Sasaki and T. Yamazaki
Nucleon form factors from quenched lattice QCD with domain wall fermions,
Phys. Rev. **D78** (2008) 014510.

[22] H.-W. Lin, T. Blum, S. Ohta, S. Sasaki and T. Yamazaki
Nucleon Structure with Two flavors of Dynamical Domain Wall Fermions,
Phys. Rev. **D78** (2008) 014505.

[23] T. Hatsuda, M. Tachibana and N. Yamamoto : "Spectral Continuity in Dense QCD", Phys. Rev. **D78**, 011501 (R) (2008).

[24] N. Yamamoto : "Instanton-induced crossover in dense QCD", JHEP 0812, 060 (2008).

[25] N. Yamamoto and T. Kanazawa : "Dense QCD in a Finite Volume", arXiv:0902.4533 [hep-ph].

[26] Y. Akamatsu, T. Hatsuda and T. Hirano: "Heavy Quark Diffusion with Relativistic Langevin Dynamics in the Quark-Gluon Fluid", [arXiv:0809.1499[hep-ph]] (Phys. Rev. C, in press).

[27] T. Kanazawa: "A theorem concerning twisted and untwisted partition functions in U(N) and SU(N) lattice gauge theories",
Phys. Lett. **B670** (2009) 421 [arXiv:0805.2742]

[28] T. Kanazawa: "Generalizing the Tomboulis-Yaffe Inequality to SU(N) Lattice Gauge Theories and General Classical Spin Systems", to appear in Ann. Phys. [arXiv:0808.3442]

[29] T. Hirano, U. Heinz, D. Kharzeev, R. Lacey, and Y. Nara : "Mass ordering of differential elliptic flow and its violation for ϕ mesons", Phys. Rev. C **77**, 044909 (2008).

[30] F.-M. Liu, T. Hirano, K. Werner, and Y. Zhu : "Centrality-dependent Direct Photon $p_{\rm t}$ Spectra in Au+Au Collisions at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) energy $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV", Phys. Rev.C **79**, 014905 (2009).

(会議抄録)

[31] T. Otsuka, "Shell Structure of Exotic Nuclei", *The Euroschool Lctures on Physics with Exotic Beams*, **III**, 1–25, Ed. by J.S. Al-Khalili and E. Roeckl, The Lecture Notes in Physics **764**, (Springer, Berlin Heidelberg, 2009).

[32] T. Otsuka, "Shell Structure of Exotic Nuclei", *Proc. of The International School of Physics 'Enrico Fermi' Course CLXIX, Nuclear Structure far from Stability: New Physics and New Technology*, Ed. by A. Covello, F. Iachello, R.A. Ricci and G. Maino, (IOS, Amsterdam and Societa Italia di Fisica, Bologna, 2008), p. 1–25.

[33] T. Otsuka, T. Suzuki and Y. Utsuno, "Exotic nuclei and Yukawa's forces", Nucl. Phys. A **805** 127C–136C (2008)

[34] T. Otsuka, "Structure of Exotic Nuclei in the Medium Mass Region", *Proc. of The International Symposium on Physics of Unstable Nuclei*, Ed. by Dao Tien Khoa, P. Egelhof, S. Gales, Nguyen Van Giai and T. Motobayashi, (World Scientific, Singapore, 2008), p. 259–265.

[35] ıY. Iwata, T. Otsuka, J. A. Maruhn, and N. Itagaki, " Reduced Charge Equilibration in Heavy-Ion Collisions at Higher Energies", AIP conference proceedings **1098** (2009) 308.

[36] K. Nomura, N. Shimizu, and T. Otsuka, "New formulation of Interacting Boson Model and heavy exotic nuclei" Acta Physica Polonica **B40**, 603 (2009)

[37] K. Nomura, N. Shimizu, and T. Otsuka, "New microscopic foundation of Interacting Boson Model and collectivities in exotic nuclei", AIP Conference Proceedings, **1090** 313-317 (2009)

[38] N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda (for PACS-CS Coll.), "Nuclear forces from quenched and N_f=2+1 full lattice QCD using the PACS-CS gauge configurations", Proceedings of Lattice 2008 [arXiv:0903.5497v1 [hep-lat]].

[39] H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda (for PACS-CS Coll.), "Lambda-nucleon force from lattice QCD", Proceedings of Lattice 2008 [arXiv:0902.1251v1 [hep-lat]].

[40] S. Aoki, J. Balog, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Murano, H. Nemura, P. Weisz, "Energy dependence of nucleon-nucleon potentials", Proceedings of Lattice 2008 [arXiv:0812.0673v1 [hep-lat]].

[41] T. Umeda, S. Ejiri, S.Aoki, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno (WHOT-QCD Coll.), "Thermodynamics of SU(3) gauge theory at fixed lattice spacing", PoS **LAT2008** (2008) 174.

[42] Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, N. Ukita, T. Umeda (WHOT QCD Coll.), "Magnetic and electric screening masses from Polyakov-line correlations", PoS **LAT2008** (2008) 194.

[43] S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, Y. Maezawa, N. Ukita, T. Umeda (WHOT QCD

Coll.), "Equation of State at finite density in two-flavor QCD with improved Wilson quarks", Proceedings of Lattice 2008 [arXiv:0810.4742v1 [hep-lat]].

[44] N. Yamamoto, T. Hatsuda and M. Tachibana : "Spectral continuity of vector mesons in dense QCD", Prod. Theor. Phys. Suppl 174, 84 (2008).

[45] 山本直希 : "Instanton-induced crossover in dense QCD", 基研研究会「熱場の量子論とその応用」研究会報告、素粒子論研究 116-6, F93 (2009).

[46] Y. Akamatsu: "Heavy quark diffusion as a probe of sQGP", proceedings of YITP International Symposium : Fundamental Problems in Hot and/or Dense QCD, Prog. Theor. Phys. Suppl. 174 : 160-163, 2008.

[47] R. Mizukawa, T. Hirano, M. Isse, Y. Nara, and A. Ohnishi : "Search for a Ridge Structure Origin with Shower Broadening and Jet Quenching", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **35** (2008) 104083.

[48] T. Hirano, U. Heinz, D. Kharzeev, R. Lacey, and Y. Nara : "Hadronic dissipative effects on transverse dynamics at RHIC", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **35** (2008) 104124.

[49] T. Gunji, H. Hamagaki, T. Hatsuda, T. Hirano, and Y. Akamatsu : "Onset of J/ψ melting in quark-gluon fluid at RHIC", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **35** (2008) 104137.

(国内雑誌)

[50] 清水則孝 : 新著紹介 "Subatomic Physics", 日本物理学会学会誌 64 巻 3 号 22 番

[51] 初田哲男, "中性子の超流動・クォークの超伝導"、(科学、2008 年 78 巻 2 号、岩波書店)

[52] 初田哲男, "南部-小林-益川　もうひとつのつながり"、(科学、2008 年 79 巻 1 号、岩波書店)

(学位論文)

[53] 阿部大介: "New type of density-dependent effective interaction and its applications to exotic nuclei", 博士論文.

[54] K. Nomura, "Derivation of the Interacting Boson Model and Mean Field", Master's Thesis, University of Tokyo (2009)

[55] 前田賢志: "Phases of Boson-Fermion Mixture in Cold Atoms and Quark Matter", 修士論文.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[56] N. Shimizu, "Monte-Carlo Shell Model studies on Sm isotopes" Hokudai-TORIJIN-JUSTIPEN-EFES workshop "Perspectives in Resonances and Continua on Nuclei", Onuma, Hokkaido, Japan (2008)

[57] Lu Guo, "Boost-invariant TDHF theory and the nuclear Landau-Zener effect", EFES-JUSTIPEN workshop, 北海道大沼, 2008 年 7 月 24 日

[58] Yoritaka Iwata, "Reduced charge equilibration in heavy-ion collisions at higher energies and synthesis of exotic nuclei", Workshop on "Frontier in Unstable Nuclear Physics", Hokkaido, Japan, July 2008.

[59] Yoritaka Iwata, "Reduced charge equilibration in heavy-ion collisions at higher energies and synthesis of exotic nuclei" (Poster), ENAM '08, Ryn, Poland, Sep. 2008.

[60] Yoritaka Iwata "Reduced charge equilibration in heavy-ion collisions at higher energies and synthesis of exotic nuclei", Fusion 08, Chicago(IL), USA, Sep. 2008.

[61] Yoritaka Iwata, "Unique existence of global-in-time solution for TDHF equations", SCPDE 08, Hong Kong Baptist University, China, Dec. 2008.

[62] Yoritaka Iwata, "Dynamics of low-energy heavy-ion collisions and the synthesis of exotic nuclei", EENEN 09, GSI, Germany, Feb. 2009.

[63] Yoritaka Iwata, "Charge and mass distributions based on the time-dependent Hartree-Fock theory", The 3rd LACM-EFES-JUSTIPEN Workshop, Oakridge National Laboratory, USA, Feb. 2009.

[64] Lang Liu, "α-cluster structure in light nuclei with pairing correlations", JUSTIPEN-EFES-Hokudai-UNEDF meeting,18-19,July,2008

[65] Lang Liu, "from Unitary Correlation Operator Method to Shell Model calculation",2nd Tokyo-Yonsei Joint Workshop on Physics, 29-31,October,2008

[66] K. Tsukiyama, T. Otsuka, and R. Fujimoto: Gamma08, "Continuum effects for the low-lying states of drip-line oxygen isotopes" , ポスター, Gamma08, 理化学研究所, 2008 年 4 月 3 日

[67] K. Tsukiyama, T. Otsuka, R. Fujimoto, and Morten Hjorth-Jensen, "Continuum effects for low-lying states in drip-line oxygen isotopes", ポスター、From quarks to the nuclear many-body problem, オスロ大学, 2008 年 5 月 21 日

[68] K. Tsukiyama, T. Otsuka, R. Fujimoto, and Morten Hjorth-Jensen, "Continuum effects for drip-line oxygen isotopes", JUSTIPEN − EFES − Hokudai − UNEDF meeting, 北海道大沼, 2008 年 7 月 23 日

[69] K. Tsukiyama, T. Otsuka, and R. Fujimoto, Morten Hjorth-Jensen, "Continuum effects for low-lying states in drip-line oxygen isotopes", ポスター、TRIUMF Summer institute2008, カナダ、2008 年 8 月 14 日

[70] K. Tsukiyama, T. Otsuka, R. Fujimoto, and Morten Hjorth-Jensen, "Continuum effects for

drip-line oxygen isotopes", 7th CNS-EFES Summer school, 理化学研究所、2008 年 8 月 26 日

[71] K. Tsukiyama, T. Otsuka, R. Fujimoto, and Morten Hjorth-Jensen, " Continuum Effects for Exotic Nuclei", 2nd Yonsei-Tokyo Workshop on Physics, 延世大学、2008 年 10 月 30 日

[72] K. Tsukiyama, S. K. Bogner, A. Schwenk, "Similarity Renormalization Group to the Nuclear Shell Model" , ENNEN09, GSI 、2009 年 2 月 9 日

[73] K. Tsukiyama, S. K. Bogner, A. Schwenk, "Similarity Renormalization Group to the Nuclear Shell Model", The 3rd LACM-JUSTIPEN-EFES Workshop, ORNL、2009 年 2 月 25 日

[74] S. Uchino, T. Otsuka, and M .Ueda: "Algebraic aspect in spinor Bose-Einstein condensates" Frontiers of Degenerate Quantum Gases, Beijing, China, October 20-24, 2008.

[75] S. Uchino, T. Otsuka, and M .Ueda: "Dynamical symmetry in spinor Bose-Einstein condensates" The 2nd Tokyo-Yonsei Joint Workshop on Physics, Yonsei, Korea, October 30, 2008.

[76] S. Uchino, T. Otsuka, and M .Ueda: "Dynamical symmetry in spinor Bose-Einstein condensates" LIA-EFES Workshop, Caen, France, March 2-4, 2009.

[77] K. Nomura: "New formulation of Interacting Boson Model and the structure of exotic nuclei" (poster), CNS-RIKEN Joint International Symposium on Frontier of gamma-ray spectroscopy and Perspectives for Nuclear Structure Studies (Gamma08), CNS, Wako, Japan, Apr. 3-5, 2007

[78] K. Nomura: "Mean-field foundation of Interacting Boson Model and collectivities in exotic nuclei" (poster), 7th Summer School on Exotic Beam Physics, Argonne National Laboratory, Illinois, USA, Aug. 3 - 10, 2008

[79] K. Nomura: "New microscopic foundation of Interacting Boson Model and collectivities in exotic nuclei" (oral), 13th International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, University of Cologne, Cologne, Germany, Aug. 25 - 29, 2008

[80] K. Nomura: "New formulation of Interacting Boson Model and heavy exotic nuclei" (oral), Zakopane Conference on Nuclear Physics, Zakopane, Poland, Sep. 1 - 7, 2008

[81] K. Nomura: "Mean-field foundation of Interacting Boson Model and collectivities in exotic nuclei" (poster), 5th International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses (ENAM'08), Ryn, Poland, Sep. 7 - 13, 2008

[82] K. Nomura: "New microscopic foundation of the Interacting Boson Model and the structure of exotic nuclei" (oral), The 3rd LACM-EFES-JUSTIPEN Workshop, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA, Feb. 23-25, 2009

[83] K. Nomura: "Mean-field derivation of the IBM and exotic nuclei" (oral), LIA-EFES Workshop: Low-energy collective excitations in exotic nuclei, GANIL, Caen, France, Mar. 2-4, 2009

[84] Y. Akamatsu: "Heavy Quark Diffusion with Relativistic Langevin Dynamics in the Quark-Gluon Fluid", The 2nd Asian Triangle Heavy Ion Conference (ATHIC 2008), Tsukuba, Japan, October 12-14, 2008.

[85] Y. Akamatsu: "Heavy Quark Diffusion with Relativistic Langevin Dynamics in Quark-Gluon Fluid", Heavy Quark Physics in Nucleus-Nucleus Collisions, UCLA, Los Angeles, U.S.A., January 22-24, 2009.

[86] Y. Akamatsu, T. Hatsuda and T. Hirano: "Langevin + Hydrodynamics Approach to Heavy Quark Propagation and Correlation in QGP", the 21st International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2009), Knoxville, U.S.A., March 29-April 4, 2009.

[87] T. Hatsuda, A. Rothkopf, S. Sasaki, "Heavy QQbar potential from a spectral decomposition of the thermal Wilson loop" ,2nd Asian Triangle Heavy Ion Conference

[88] T. Hatsuda, A. Rothkopf, S. Sasaki, "Heavy QQbar potential from a spectral decomposition of the thermal Wilson loop" ,2nd TODAI-YONSEI Workshop on Physics

[89] J. Berges, A. Rothkopf, J. Schmidt, "Non-thermal fixed points in strongly correlated systems far from equilibrium" ,Yukawa Institute for Theoretical Physics Molecular Workshop "Non-equilibrium quantum field theories and dynamic critical phenomena"

[90] J. Berges, J. Pruschke,A. Rothkopf, "Fermion Production in Instabilities from 2PI" ,Yukawa Institute for Theoretical Physics Molecular Workshop "Non-equilibrium quantum field theories and dynamic critical phenomena"

[91] T. Hirano : "Determination of the energy loss parameter in hydrodynamically evolving matter", the 3rd International Conference on Hard and Electro-Magnetic Probes of High-Energy Nuclear Collisions (Hard Probes 2008), Illa da Toxa, Galicia, Spain, June 2008.

[92] A. Monnai : "Effects of Bulk Viscosity at Freeze-out", Nagoya Mini-Workshop "Photons and Leptons in Hot/Dense QCD", Nagoya, Japan, March 2009.

[93] T. Hirano : "Eccentricity fluctuation of initial conditions in hydrodynamics", the 21st International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2009) Knoxville, Tennessee, USA, March 2009.

[94] A. Monnai : "Effects of Bulk Viscosity on p_T-Spectra and Elliptic Flow Parameter", the

21st International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Quark Matter 2009, Knoxville, USA, March-April 2009.

招待講演

[95] T. Otsuka, “Perspectives of structure of exotic nuclei”, First LIA-EFES workshop “Low-energy collective excitations in exotic nuclei”, GANIL, Caen, フランス、2009 年 3 月 2 日

[96] T. Otsuka, “Why forces ? What forces ?”, First EMMI-EFES workshop on neutron-rich exotic nuclei (EENEN09) - Realistic effective nuclear forces for neutron-rich nuclei -, GSI, Darmstadt, ドイツ、2009 年 2 月 9 日

[97] T. Otsuka, “Hadronic Interaction and Structure of Exotic Nuclei”, Japanese French Symposium New Paradigms in Nuclear Physics, Institut Henri Poincare, Paris, フランス、2008 年 9 月 29 日

[98] T. Otsuka, “Shell-model of exotic nuclei”, Fifth International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses, Ryn, ポーランド、2008 年 9 月 7 日

[99] T. Otsuka, “Structure of exotic nuclei”, The 7th CNS-EFES Summer School, 東大原子核科学研究センター、和光，2008 年 8 月 27,28,31 日

[100] T. Otsuka, “Two- and three-body forces and the shell structure of exotic nuclei”, 410th WE-Heraeus-Seminar: Ab-Initio Nuclear Structure - Where do we stand ?, Physikzentrum Bad Honnef、ドイツ，2008 年 7 月 30 日

[101] T. Otsuka, “Structure of exotic nuclei and the nuclear force”, Carnegie 2008 Conference “Nuclear Structure at the Extremes”, Paisley (University of the West of Scotland), 英国，2008 年 5 月 8 日

[102] T. Otsuka, “Perspectives of the Shell Model”, CNS-RIKEN Joint International Symposium on Frontier of gamma-ray spectroscopy and Perspectives for Nuclear Structure Studies, 理研仁科センター、和光，2008 年 4 月 5 日

[103] T. Hatsuda, ”Lattice QCD and Nuclear Forces”, *A conference on recent advances in nuclear many-body physics On the occasion of Eivind Osnes' 70th birthday: From Quarks to the Nuclear Many-Body Problem*, (Univ. Oslo, Norway, May 21-24, 2008).

[104] T. Hatsuda, ”QCD”, *PANIC08: International Conference on Particles And Nuclei*, (Eilat, Israel, Nov. 9-14, 2008).

[105] T. Kanazawa: “Center vortices and Bloch walls”(invited), CSSM Workshop 2008 ”T(R)OPICAL QCD”, Port Douglas, Australia, 27 July-2 August 2008

[106] T. Hirano : “Current Status of a 3D hydro+cascade model”, the workshop on Hydrodynamics in Heavy Ion Collisions and QCD Equation of State, RIKEN BNL Research Center, BNL, NY, USA, April 2008.

[107] T. Hirano : “Relativistic Hydrodynamics at RHIC and LHC”, the international workshop on Heavy Ion Physics at LHC, Central China Normal University, Wuhan, China, May 2008.

[108] T. Hirano : “Dynamical modeling in relativistic heavy ion collisions”, Entropy production before QGP, International “Molecule” workshop, Yukawa Institute of Theoretical Physics, Kyoto, Japan August 2008.

[109] T. Hirano : “Hydrodynamic Analysis of Heavy Ion Collisions at RHIC”, Strangeness in Quark Matter 2008, Tsinghua University, Beijing, China, October 2008.

[110] T. Hirano : “Dynamical Modeling of Heavy Ion Collisions”, The 2nd Asian Triangle Heavy Ion Conference, Tsukuba University, Tsukuba, Japan, October 2008.

[111] T. Hirano : “Conference Summary –From a Hydrodynamic Point of View–”, The VIII International Workshop on Relativistic Aspects of Nuclear Physics (RANP08), Rio de Janeiro, Brazil, November 2008.

[112] T. Hirano : “Physics of relativistic heavy ion collisions at RHIC and LHC”, the 16th YKIS conference, Progress in Particle Physics 2008, Yukawa Institute of Theoretical Physics, Kyoto, Febuary 2009.

[113] T. Hirano : “Hydrodynamic model and its application to electromagnetic probes”, Photons and Leptons in Hot/Dense QCD, Nagoya University, Nagoya, March 2009.

[114] T. Hirano : “How perfect is the QGP soup?”, Colliding Nuclei from AMeV to ATeV in Search of New Forms of Matter, LBNL, Berkeley, Carifornia, USA, March 2009.

(国内会議)

一般講演

[115] 清水則孝、“大規模殻模型計算”、ワークショップ「計算科学による素粒子・原子核・宇宙の融合」、筑波大学計算科学研究センター、2008 年 12 月

[116] Yoritaka Iwata, “Fragment mass distribution by TDHF calculations for reactions involving deformed nuclei”, Fission Seminar (Workshop), JAEA, Dec. 2008.

[117] 岩田順敬, 大塚孝治, 板垣直之, 西尾勝久, “低エネルギー重イオン衝突における衝突方向依存性”, 日本物理学会年会, 立教大学, 2009 年 3 月.

[118] Lang Liu, ”from Unitary Correlation Operator Method to Shell Model calculation”,64th JPS meeting, 27-29, Tokyo

[119] 月山幸志郎, 大塚孝治, 藤本林太郎, Morten Hjorth-Jensen、” 中性子過剰核における連続状態の効果”、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 20 日

[120] 月山幸志郎, S. K. Bogner, A. Schwenk, ”Similarity Renormalization Group for the nuclear shell model”, 日本物理学会 2009 年春季大会、2009 年 3 月 27 日

[121] 内野瞬、大塚孝治、上田正仁:”Spinor BEC and IBM”, 日本物理学会 2008 年秋季大会（山形大学、2008 年 9 月 20 日）.

[122] 野村昂亮、清水則孝、大塚孝治: “平均場模型を用いた IBM の導出と不安定核の集団運動”, 日本物理学会秋季大会、山形大学、山形市、2008 年 9 月 21 日-24 日

[123] 野村昂亮、清水則孝、大塚孝治: “平均場理論を用いた IBM ハミルトニアンの導出と不安定核の構造”, 日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学、東京都豊島区、2009 年 3 月 27 日-30 日

[124] 佐々木勝一、山崎剛、
“ハイペロン β 崩壊における SU(3) フレーバー対称性の破れ”、
日本物理学会　秋季大会、山形大学、2008 年 9 月 20-23 日

[125] 山本直希：”Instanton-induced crossover in dense QCD”, 基研研究会「熱場の量子論とその応用」(京都大学 基研、2008 年 9 月 3-5 日)

[126] 金澤拓也: ”スピン系における Tomboulis-Yaffe の不等式”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学上田キャンパス, 2008 年 9 月

[127] 金澤拓也: ”Thermodynamics of exotic gauge theories on the lattice”, 日本物理学会第 64 回年次大会, 立教学院池袋キャンパス, 2009 年 3 月

[128] J. Berges, A. Rothkopf, J. Schmidt, ”Non-thermal fixed points, effective weak-coupling for strongly correlated systems” ,JPS Fall Meeting 2008

[129] 前田賢志、初田哲男、Gordon Baym：”強相関ボーズ・フェルミ混合系の相構造の解析”, 「熱場の量子論とその応用」 (京都大学基礎物理学研究所、2008 年 9 月 3 日-5 日).

[130] 前田賢志、Gordon Baym、初田哲男：”ボソン・フェルミオン混合系の相構造の解析”, 日本物理学会 (立教学院、2009 年 3 月 27 日-30 日).

[131] 平野哲文 : “A systematic study of photon emission from QGP fluid”, 日本物理学会秋季大会, 山形大学, 2008 年 9 月.

招待講演

[132] 大塚孝治, ” ハドロン間相互作用とエキゾチック原子核の殻構造・ドリップライン”、日本物理学会 2008 年秋季分科会企画講演、2008 年 9 月 21 日

[133] 岩田順敬, “低エネルギー核反応の TDHF 計算” , 京都大学基礎物理学研究所研究会, 京都大学, 2008 年 7 月.

[134] 初田哲男, ”素粒子に働くミクロのちから”, 「自然科学公開講座」(高知工科大学、2008 年 7 月 15 日)

[135] 初田哲男,”高密度核物質と QCD”, 「重力崩壊型超新星と高エネルギー天文学」(東京大学, 2009 年 2 月 2 日-4 日)

[136] 初田哲男,”シミュレーションで素粒子と原子核物理の未来は変わるか？”, 「シンポジウム: 大規模計算が切り拓く基礎科学の将来」(つくば国際会議場, 2009 年 2 月 23 日)

[137] 初田哲男,”クォークマター: 極限状態における物質の構造”, 「日本物理学会レビューセッション」(立教大学, 2009 年 3 月 29 日)

[138] 山本直希 : ”The instanton and the phases of QCD”, 九大若手研究会「量子色力学の相構造研究の現状と展望」(九州大学箱崎キャンパス、2008 年 12 月 25-26 日)

[139] 金澤拓也: ”提案されたクォーク閉じ込め証明およびその関連研究について” （招待講演）, 九大若手研究会「量子色力学の相構造研究の現状と展望」, 九州大学箱崎キャンパス, 2008 年 12 月

[140] 平野哲文 : “Relativistic Ideal and Viscous Hydrodynamics”, Heavy Ion Cafe, 東京大学, 2008 年 4 月.

[141] 平野哲文 : “Relativistic Ideal and Viscous Hydrodynamics”, 京都大学基礎物理学研究所, 2008 年 12 月.

(セミナー)

[142] 岩田順敬, “低エネルギー重イオン衝突における電荷平衡化過程”, 東北大学, 2008 年 4 月.

[143] 岩田順敬, “低エネルギー重イオン衝突における荷電平衡化過程”, 千葉大学, 2008 年 5 月.

[144] 岩田順敬, “低エネルギー重イオン衝突における荷電平衡化過程”, 筑波大学, 2008 年 6 月.

[145] Yoritaka Iwata, “Charge equilibration of heavy nuclear reactions”, RIKEN theoretical Seminar, 理化学研究所, 2008 年 7 月.

1.2 素粒子論研究室（柳田・浜口・松尾）

1.2.1 TeV スケールの標準模型、素粒子論的宇宙論

超対称性を持つ模型

素粒子標準模型を超える物理の有力な候補として超対称標準模型がある。この理論によってゲージ階層性問題が解決できるだけではなく、大統一理論や暗黒物質に対する示唆が与えられる。超対称性が現在の宇宙でも保たれているすると標準模型と同じ質量や電荷を持つが、スピンが 1/2 だけ違う粒子が数多く存在することになる。しかし現実にはそのような粒子は確認されていない。そのため、超対称性は現在の宇宙では破れていて、超対称性粒子は重くなっていると考えられている。そして、その超対称性粒子は大型ハドロン加速器 (LHC) によって発見される

と期待されている。どのようにして超対称性が破れたかということは非常に重要な研究テーマである。適当な超対称性の破れでなければ、現在の実験、観測と矛盾してしまう。たとえば、SUSY-FCNC 問題やグラビティーノ問題というのがその例である。そのような中、ゲージ伝達型の超対称性の破れの模型 (GMSB 模型) やアノーマリーによる超対称性の破れの模型 (AMSB 模型は) はこのような問題が少ない模型であることが知られている。前者の模型はグラビティーノが軽く ($m_{3/2} < \mathcal{O}(1)$ GeV)、後者は重い ($m_{3/2} = \mathcal{O}(100)$ TeV) という特徴がある。

GMSB 模型ではグラビティーノの質量が $\mathcal{O}(1)$ eV のように非常に軽くなりうる。濱口、白井、柳田はこのようにグラビティーノの質量が軽い場合でもグラビティーノの次に重い超対称性粒子の崩壊を見ることでグラビティーノの質量が LHC において測れる可能性があることを示した [3]。

グラビティーノの質量測定は現象論的に非常に重要な課題である。柳田、米倉は高橋氏 (IPMU) とともに、超対称 Yang-Mills 理論によるドメインウォールが初期宇宙において作られると、その崩壊によって生じる重力波の波長を測定する事でグラビティーノの質量が測定できる事を示した [8]。

濱口、中村、白井、柳田は強結合型 GMSB 模型について調べた。この模型では通常の GMSB 模型とは大きく異なる特徴を持つことを示し、LHC における物理を議論した [14]。中村は修士論文においては強結合型 GMSB 模型について議論した [53]。

多くの GMSB 模型では LHC において高エネルギーの光子がシグナルとなる。濱口、中村、白井はこのような状況で、模型に依存せずにグラビティーノの次に重いニュートラリーノの質量を測る方法を提案した [19]。

通常の GMSB 模型では、グラビティーノがもっとも軽い超対称性粒子になる。そのため、ニュートラリーノが安定でなくなり、暗黒物質になれないので、宇宙の暗黒物質に対する予言を失う。白井、柳田、米倉は高橋氏 (IPMU) とともに、超対称性を破る隠れたセクターが赤外固定点に入り超共形対称性を持つようなとき、ニュートラリーノが暗黒物質になることができるシナリオを提唱した [30]。米倉は修士論文で超共形場理論の現象論への応用を議論した [54]。

AMSB 模型においては荷電ゲージボソンの超対称性パートナーであるウィーノが比較的長寿命 ($c\tau \approx 5$ cm) になるという特徴がある。柳田は浅井氏 (東大)、諸井氏 (東北大) とともに LHC の ATLAS 検出器において、このウィーノの性質を調べる方法について議論した [7]。さらに、白井、柳田は東氏 (東大)、浅井氏 (東大)、陣内氏 (KEK)、諸井氏 (東北大) とともに長寿命のウィーノを利用して U(1) ゲージボソンの超対称パートナーであるビーノの質量を測る方法を示した [29]。

川野は、素粒子論の現象論的に耐え得る宇宙論的インフレーションモデルを超重力理論の枠組みで研究し，D-term を使った Chaotic インフレーションモデルが作れることを示した [2, 4, 25]。

栗山 (2007 年度まで在籍)、中島、渡利は、標準模型の超対称性を持つ拡張において、R-パリティが破れていることがごく自然にありえることを指摘した [5]。超弦理論のコンパクトがあるクラスの位相的構造をもつとき、連続パラメターの微調整を要せずして、低エネルギーでも効きかねない陽子崩壊の相互作用が消えてしまい、現実の理論として矛盾を生じないのである。超対称理論においては、R-パリティが破れているか否かは暗黒物質の性質を決定的に変える。論文 [5] では、このような R-パリティの破れの理論的枠組みでは、バリオン数とレプトン数の差を保たないような核子崩壊プロセスが予言されることを示した。また、R-パリティを破る質量次元 1 のパラメターが有効理論に現れるが、その大きさをヘテロティック超弦理論を用いて評価し、それが現象論から知られている制限を満たす程度には小さいが、宇宙論や加速器物理で見えうる程度には大きいことが自然であることも示した。

暗黒物質と宇宙線

2008 年に PAMELA、ATIC 実験による電子、陽電子の宇宙線の観測において、暗黒物質が原因と解釈できるような異常なシグナルが発見された。従来、このようなシグナルは暗黒物質同士の対消滅が宇宙線を作ると考えられていたが、理論的に予測される対消滅断面積では PAMELA、ATIC の両実験で見つかった異常を説明するにはまったく足りないことが判明した。しかし、通常は安定と考えられてきた暗黒物質がごくわずかに不安定だと仮定すると、これらのシグナルを説明することができることがわかった。このときに求められる暗黒物質の寿命はおよそ 10^{18} 年であり、宇宙の年齢がおよそ 10^{12} 年であることを考えれば非常に長い。このように長寿命な暗黒物質は宇宙の発展になんら障害を引き起こさないが、なぜこのように非常に長い寿命になったかというのが大きな謎であった。さらに、PAMELA、ATIC 実験によって電子、陽電子の異常は発見されたが、反陽子に関してはそのような異常は見つからなかった。これは暗黒物質が崩壊する際にクォークやゲージボソンではなくレプトンセクターに主に崩壊していることを示唆している。この事実もまた大きな謎であった。

暗黒物質が未知の U(1) ゲージボソンであると仮定すると、このゲージボソンが標準模型 U(1) ゲージボソンとわずかに混合しうる。この混合がごく小さければ、暗黒物質は非常に安定ではあるが、ごく僅かに崩壊するようになる。柳田は Chen 氏 (IPMU)、高橋氏 (IPMU) とともにこのゲージボソンの崩壊によって宇宙線の異常現象を説明できることを示した [33]。さらに柳田は Chen 氏 (IPMU)、高橋氏 (IPMU) とともに未知の U(1) ゲージボソンが別のブレーンに住んでいると仮定し、そのゲージボソンが $\mathrm{U(1)_{B-L}}$ ゲージボソンと混合することで、自然に暗黒物質の寿命が 10^{18} 年になり、その主な崩壊先がレプトンセクターになることを示した [36]。また超対称性が存在する場合にも同じように未知の U(1) ゲージーノが暗黒物質になり、その崩壊によって観測された異常現象が説明できることを示した [41]。

濱口、白井、柳田は暗黒物質が未知のフェルミオンだと仮定したときの一般論を解析し、この場合も

暗黒物質が一般に長寿命になりうることを示し、現在の実験を説明できることを示した [39]。

GMSB 模型は非常に魅力的な模型ではあるが、その暗黒物質に対する予言が非常に弱いという問題があった。しかし、メッセンジャーと呼ばれるセクターが未知の強いゲージ相互作用をしていると、その中のバリオンが暗黒物質の候補になる。濱口、白井、中村、柳田はそのバリオンは一般には完全には安定ではなく、10^{18} 年程度の寿命を持っていることを示し、PAMELA 実験を説明できることを明らかにした [37]。

弦理論を用いたモデルの構成

F-理論は超弦理論の定式化の１つである。Type II ストリング理論のカラビヤウオリエンティフォールドコンパクト化が SU(N) 群や SO(N) 群のゲージ理論しか実現できないのに対して、F-理論は $E_{6,7,8}$ 型のゲージ対称性とその破れを記述することができる。SU(5) 統一理論において、up-type クォークの湯川相互作用は、E_6 超対称ヤンーミルズ相互作用の一部から出すことができるので、F-理論は湯川相互作用を記述し、標準模型のフレーバー構造の理解を進める上で重要な役目を果たしうる理論的枠組みである。一方で、超弦理論のいくつかある定式化の中では、理論的な理解がもっとも不十分なままに、これまで放置されてきた。林、Tatar 氏 (Liverpool 大)、戸田氏 (東大 IPMU)、渡利、山崎は、この F-理論の中で、低エネルギー有効理論に現れる自由度が幾何の言葉でどのようにあらされるか、という過去１０年以上未解決であった問題に解決を与えた。ヘテロティック超弦理論と F-理論の間に知られている双対性をこの問題の解決に使う一方、この双対性を理論的に深める結果も得た [16]。また、Tatar 氏と渡利は、F-理論のコンパクト化において SU(5) 統一対称性を標準模型の SU(3) × SU(2) × U(1) に破る方法と、そこから従う物理を考察した。

渡利は L. Hall 氏 (Berkeley)、M. Salem 氏 (Tufts) との共同研究で、右巻きニュートリノの世代数がシーソー機構を通じて生成するニュートリノの質量の階層性に及ぼす影響を調べ、世代数が３よりもかなり多いのではないか、という示唆を得た。また、物質場の湯川相互作用のみでなく運動項のフレーバー構造まで取り入れた解析を行い、ニュートリノ振動の大角度混合は、レプトン２重項がコンパクト化空間での波動関数が局在化をまったくしていないことで理解できることを示した [35]。

弦理論をコンパクト化することで 4 次元の理論を構成した際には、内部空間の幾何からくる 4 次元の零質量スカラー場 (モジュライ) がしばしば生じる。理論の予言能力を失わせないためには、これらのモジュライに質量を与える機構が必要である。その機構のひとつとして、内部空間にフラックスを入れるフラックスコンパクト化におけるモジュライ固定がある。土屋はフラックスコンパクト化の基礎から、近年比較的研究されている LARGE Volume Scenario までを、修士論文にまとめた [52]。

柳田と山崎は、中山氏（UC Berkeley）とともに、準安定な真空を用いた超対称性の破れを利用した模型である ISS 模型を超弦理論を用いて実現し、そのモジュライ固定について論じた [1]。

1.2.2 格子ゲージ理論

近年、Ginsparg-Wilson 関係式を満たすゲージ不変な Dirac 演算子が構成されたことによって、格子上で厳密なカイラル対称性を保つ定式化が可能になった。この定式化に基づいた、厳密なカイラル対称性を持つ格子 QCD の構成法では、理論の局所性を保証するために、ゲージ場の配位を制限することが必要になる。この制限は admissibility condition と呼ばれ、Dirac 演算子の局所性を保証するだけでなく、ゲージ場の配位空間に topological な構造を与えるという役割もあるが、一方で、理論の unitary 性を破ってしまうことが知られている。

臼井は、修士論文 [49] においてこの問題についてまとめ、連続極限において unitary 性が回復しうる条件について議論した。

1.2.3 超紐理論

M２ブレーンの研究

M理論は様々な弦理論を統一的に扱うことのできる理論体系としてこれまで様々な研究がなされてきたが複数枚のM２ブレーンが重なったときにどのような場の理論で記述できるかについての理解はこれまであまり進んでいなかった．特に問題であったのは内部対称性がどのように記述されるかという点であった．2007 年 Bagger と Lambert は Lie 3-代数という拡張された対称性を用いてM２ブレーンが持つべき超対称性をもつ非自明な Chern-Simons 型ゲージ理論を提唱し大きな注目を浴びた．

Bagger と Lambert の提案にはいくつか不満足な点もあった．それは理論構成上必要な性質 (不変計量の存在，Jacobi 恒等式に相当する性質，正定値性) を持つ代数が A_4 と呼ばれる代数に限られていた点であった．松尾はの Ho 氏（台湾大学）らと共に代数が満たすべき性質を注意深く調べて実際に A_4 代数以外の代数が無いことを数値計算や Plčker 恒等式などとの関連を通じて予想した．この予想は他のグループにより最終的に証明された．また計量の正定値性をはずすと多くの 3-代数が可能であることも示した．[12]

次に 3-代数として以前南部氏らにより提唱されていた南部括弧式を用いる無限次元代数を用いると，もう一種類のM理論のブレーンであるM５ブレーン上の場の理論が実現できることを示した．M５ブレーンは６次元理論でありM２ブレーンは３次元理論であるので３次元コンパクト化を行う必要があるが，南部括弧式に現れる無限個の生成子が Kaluza-Klein モードを与えることを示した．[21] さらに今村，松

尾，柴は Ho 氏（台湾大学）とともにこの対応を非線形項も含めて完成させM５理論の作用を導いた．南部括弧式を対称性として用いることは背景の３次の反対称テンソル場が非常に大きな真空期待値を持つ場合に対応することを示した．[23] また松尾と柴は Chu 氏（Durham 大学)、Ho 氏（台湾大学）と共に南部括弧式を有限次元にカットオフすることにより有限次元の対称性を持つ理論で，M２ブレーンの場合に予想されているエントロピー則 (内部自由度がブレーンの枚数 N に対して $O(N^{3/2})$ のように振る舞う) を満たす模型が作れることを議論した．[27, 70]

また今村，松尾と Ho 氏は３代数の正定値性をはずした場合に負ノルムの状態がはずせる場合はどのようなものかを考察し，任意の Lie 代数を３代数に拡張できる場合があることを示した．特に Mukhi 達が考案した新しい Higgs 機構を適用すると Bagger-Lambert 型の理論からＤ２ブレーン上の超対称 Yang-Mills 理論を導くことができることを示した．また上記のM５ブレーン上の理論からもＤ２ブレーン上の理論が作れることも示した．[22] さらに松尾，柴と Ho 氏は負のノルムを持つ演算子を複数個導入した場合にどのような代数が可能であるのかを考察し，一般に無限次元の代数の導入が不可欠であることを示した．この場合にはそれぞれの負ノルムの生成子に対応して Higgs 機構を応用するとコンパクト化された次元に関連する Kaluza-Klein 質量が導けることを示した．[40, 77, 80]

山崎は寺嶋氏、藤氏（京大基研）とともに、BLG 理論のオービフォールドを議論した [18]。

Bagger と Lambert によって提案されたモデルは望ましい超対称性 $\mathcal{N} = 8$ を与えるという利点はあるものの、共形不変性を保ったままでは M2-ブレーンの枚数を任意に取ることができないという欠点があった。2008 年中ごろ、Aharony, Bergman, Jafferis, Maldacena らは、超対称性の個数に対する要請を緩めることにより、共形不変性を保ったままで任意の枚数のブレーンを与える理論（ABJM モデル）を提案した。ABJM 理論は $\mathcal{N} = 6$ の超対称性を持つ Chern-Simons 理論であり、$\mathbf{C}^4/\mathbf{Z}_k$ オービフォールド上の M2-ブレーンを記述している。その後、より一般の背景上の M2-ブレーンの有効理論を与える、超対称性の数がより小さい Chern-Simons 理論が多数提案された。

今村と木村は IIB 型弦理論のブレーン系の観点から ABJM モデルを拡張して $\mathcal{N} = 4$ Chern-Simons 理論を構成しその Higgs ブランチモジュライ空間を調べ、IIB ブレーン系と M2-ブレーンの双対性から期待される結果と完全に一致することを確認した [24]。また、そこで得られた理論はレベルが 0 であるようなゲージ群を一般には含むが、そのような理論の作用が実際に $\mathcal{N} = 4$ の超対称性のもとで不変であることを具体的に確認した [28]。

超対称性が $\mathcal{N} = 2$ のクイバー型 Chern-Simons 理論を用いると、複素 4 次元のカラビヤウ空間上の M2-ブレーンの有効理論を与えることができる。今村と木村 [32] および山崎と上田氏（阪大）[31] はカラビヤウがトーリックである場合に、ブレーンタイリングを用いてカラビヤウのトーリックデータとクイバー Chern-Simons 理論のデータを対応付ける方法を具体的に与えた。

木村はブレーン・タイリングを用いて構成した 3 次元超対称 Chern-Simons 理論とブレーン・クリスタルとの関係を調べた上記の成果を、3 次元超対称 Chern-Simons 理論、ABJM 模型のレビューとともに博士論文 [46] にまとめた。

山崎は Lie-3 代数の一般化である一般 Lie 3-代数の興味深い例を八元数を用いて構成した [34]。

M2-ブレーンを超重力理論の古典解として表すと一般に $AdS_4 \times X_7$ という構造をした 11 次元時空が現れる。この時空の上の M-理論と M2-ブレーン上の Chern-Simons 理論は互いに双対な理論となっていると考えられており、AdS/CFT 対応の例になっている。今村と横山は、$\mathcal{N} = 4$ クイバー Chern-Simons 理論と、AdS/CFT 対応により双対であると予想される重力理論との対応関係を調べた [38]。ゲージ群のランクと内部空間のホモロジー H_3 の関係や Chern-Simons 理論において現れるモノポール作用素やバリオン作用素が、重力理論ではそれぞれ、2 サイクルに巻き付いた M2 ブレーンや 5 サイクルに巻き付いた M5 ブレーンに対応することなどを議論した。

田中は ABJM モデルと $AdS_4 \times \mathbf{S}^7$ 上の 11 次元超重力理論の間の AdS/CFT 対応における可積分性を用いたスペクトラムの比較についての最近の発展をレビューし、修士論文 [51] にまとめた。

可積分性を用いた AdS/CFT 対応の解析

10 次元 $AdS_5 \times S^5$ 時空を背景とした IIB 型超弦理論と 4 次元 $\mathcal{N} = 4$ 超対称ゲージ理論はその高い対称性のために、両者とも planar レベルにおいて可解な理論と考えられており、両者の双対性は可積分系の手法を用いて定量的な解析が可能であると期待される。実際、弦の角運動量が大きいあるいはゲージ理論の演算子が長い極限における対応は非常に詳細に調べられている。近年、弦の角運動量/演算子の長さが有限の場合のスペクトラムの解析が非常に活発に行われている。

初田は鈴木氏（Trinity College, Dublin）との共同研究 [26] においてマグノン励起が複数ある場合の有限サイズ効果を調べた。特に場の理論で有限体積のエネルギー補正を与える Lüscher 公式を多粒子系の場合に拡張し、弦側の代数曲線を用いた解析結果と一致することを示した。さらに多粒子系の Lüscher 公式を弱結合領域に適用することを考え、ゲージ理論側の wrapping 効果によって新たに現れる超越数がどのように再現されうるかを議論した。

初田は AdS/CFT 対応における有限サイズ効果の近年の進展をレヴューしつつ、上記を含めた自身の研究成果を博士論文としてまとめた [45]。

弦理論と超対称ゲージ理論

山崎はブレーンタイリングについての最近の研究をまとめた修士論文をさらに修正、拡大して [9] とし

て出版した。また、太田氏（東北大学）、坂井氏（東京女子大学）、新田氏（慶応大学）、藤森氏（東工大）とともに、ブレーンタイリングの手法をインスタントン, 渦糸からなるソリトン系に応用した [17]。

弦の場の理論

川野は，ボソニックな開弦の場の理論における Schnabl 解についての研究を行った。特に，この弦の理論のゲージ不変な量として，open-closed transition vertex を通した閉弦の状態と開弦の状態の内積を作ることが出来るが，この物理量が Schnabl 解と Sen と Zwiebach によって数値的に与えられた解に対して同じ値を示すことがわかり，これらの解が同じものであることの状況証拠を与えた [11]。また，Schnabl 解を open-closed transition vertex を使って閉弦場に変換すると，通常の D-brane を表す boundary state が現れることを示した [15]。

＜**報文**＞

(原著論文)

[1] Y. Nakayama, M. Yamazaki and T. T. Yanagida, "Moduli Stabilization in Stringy ISS Models," Phys. Lett. B **663**, 281 (2008).

[2] T. Kawano, "Chaotic D-Term Inflation," Prog. Theor. Phys. **120**, 793 (2008).

[3] K. Hamaguchi, S. Shirai and T. T. Yanagida, "Determining the mass for an ultralight gravitino at LHC," Phys. Lett. B **663**, 86 (2008).

[4] K. Kadota, T. Kawano and M. Yamaguchi, "New D-Term Chaotic Inflation in Supergravity and Leptogenesis," Phys. Rev. D **77**, 123516 (2008).

[5] M. Kuriyama, H. Nakajima and T. Watari, "A Theoretical Framework for R-parity Violation," Phys. Rev. D, in press, [arXiv:0802.2584 [hep-ph]].

[6] M. Ibe, Y. Nakayama and T. T. Yanagida, "Conformal Supersymmetry Breaking and Dynamical Tuning of the Cosmological Constant," Phys. Lett. B **668**, 28 (2008).

[7] S. Asai, T. Moroi and T. T. Yanagida, "Test of Anomaly Mediation at the LHC," Phys. Lett. B **664**, 185 (2008).

[8] F. Takahashi, T. T. Yanagida and K. Yonekura, "Gravitational Waves as a Probe of the Gravitino Mass," Phys. Lett. B **664**, 194 (2008).

[9] M. Yamazaki, "Brane Tilings and Their Applications," Fortsch. Phys. **56**, 555 (2008).

[10] M. Ibe, Y. Nakayama and T. T. Yanagida, "Conformal Gauge Mediation and Light Gravitino of Mass $m_{3/2}O(10)$ eV," Phys. Lett. B **671**, 378 (2009).

[11] T. Kawano, I. Kishimoto and T. Takahashi, "Gauge Invariant Overlaps for Classical Solutions in Open String Field Theory," Nucl. Phys. B **803**, 135 (2008).

[12] P. M. Ho, R. C. Hou and Y. Matsuo, "Lie 3-Algebra and Multiple M2-branes," JHEP **0806**, 020 (2008).

[13] J. Hisano, M. Nagai, S. Sugiyama and T. T. Yanagida, "Upperbound on Squark Masses in Gauge-Mediation Model with Light Gravitino," Phys. Lett. B **665**, 237 (2008).

[14] K. Hamaguchi, E. Nakamura, S. Shirai and T. T. Yanagida, "Strongly Interacting Gauge Mediation at the LHC," JHEP **0807**, 107 (2008).

[15] T. Kawano, I. Kishimoto and T. Takahashi, "Schnabl's Solution and Boundary States in Open String Field Theory," Phys. Lett. B **669**, 357 (2008)

[16] H. Hayashi, R. Tatar, Y. Toda, T. Watari and M. Yamazaki, "New Aspects of Heterotic–F Theory Duality," Nucl. Phys. B **806**, 224 (2009).

[17] T. Fujimori, M. Nitta, K. Ohta, N. Sakai and M. Yamazaki, "Intersecting Solitons, Amoeba and Tropical Geometry," Phys. Rev. **D 78**, 105004 (2008).

[18] H. Fuji, S. Terashima and M. Yamazaki, "A New N=4 Membrane Action via Orbifold," Nucl. Phys. **B 810**, 354-368 (2009).

[19] K. Hamaguchi, E. Nakamura and S. Shirai, "A Measurement of Neutralino Mass at the LHC in Light Gravitino Scenarios," Phys. Lett. B **666**, 57 (2008).

[20] R. Tatar and T. Watari, "GUT Relations from String Theory Compactifications," Nucl. Phys. B **810**, 316 (2009).

[21] P. M. Ho and Y. Matsuo, "M5 from M2," JHEP **0806** (2008) 105.

[22] P. M. Ho, Y. Imamura and Y. Matsuo, "M2 to D2 revisited," JHEP **0807**, 003 (2008).

[23] P. M. Ho, Y. Imamura, Y. Matsuo and S. Shiba, "M5-brane in three-form flux and multiple M2-branes," JHEP **0808**, 014 (2008).

[24] "On the moduli space of elliptic Maxwell-Chern-Simons theories," Y. Imamura, K. Kimura, Prog. Theor. Phys. **120** (2008) 509,

[25] T. Kawano and M. Yamaguchi, "Reheating in Chaotic D-Term Inflation," Phys. Rev. D **78**, 123511 (2008).

[26] Y. Hatsuda and R. Suzuki, "Finite-Size Effects for Multi-Magnon States," JHEP **0809** (2008) 025.

[27] C. S. Chu, P. M. Ho, Y. Matsuo and S. Shiba, "Truncated Nambu-Poisson Bracket and Entropy Formula for Multiple Membranes," JHEP **0808**, 076 (2008).

[28] Y. Imamura, K. Kimura, "N=4 Chern-Simons theories with auxiliary vector multiplets," J. High Energy Phys. **10** (2008)040,

[29] S. Asai, Y. Azuma, O. Jinnouchi, T. Moroi, S. Shirai and T. T. Yanagida, “Mass Measurement of the Decaying Bino at the LHC,” Phys. Lett. B **672**, 339 (2009).

[30] S. Shirai, F. Takahashi, T. T. Yanagida and K. Yonekura, “Gauge Mediation with Sequestered Supersymmetry Breaking,” Phys. Rev. D **78**, 075003 (2008).

[31] K. Ueda and M. Yamazaki, “Toric Calabi-Yau four-folds dual to Chern-Simons-matter theories,”, JHEP12(2008)045.

[32] Y. Imamura, K. Kimura, “Quiver Chern-Simons theories and crystals,” J. High Energy Phys. JHEP10(2008)114.

[33] C. R. Chen, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “Gamma rays and positrons from a decaying hidden gauge boson,” Phys. Lett. B **671**, 71 (2009).

[34] M. Yamazaki, “Octonions, G_2 and generalized Lie 3-algebras,” Phys. Lett. **B 670**, 215-219 (2008).

[35] L. J. Hall, M. P. Salem and T. Watari, “Neutrino mixing and mass hierarchy in Gaussian landscapes,” Phys. Rev. D **79**, 025010 (2009).

[36] C. R. Chen, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “High-energy Cosmic-Ray Positrons from Hidden-Gauge-Boson Dark Matter,” Phys. Lett. B **673**, 255 (2009).

[37] K. Hamaguchi, E. Nakamura, S. Shirai and T. T. Yanagida, “Decaying Dark Matter Baryons in a Composite Messenger Model,” to appear in Phys. Lett. B, arXiv:0811.0737 [hep-ph].

[38] Y. Imamura and S. Yokoyama, “N=4 Chern-Simons theories and wrapped M5-branes in their gravity duals,” to appear in Prog. of Theor. Phys. arXiv:0812.1331 [hep-th].

[39] K. Hamaguchi, S. Shirai and T. T. Yanagida, “Cosmic Ray Positron and Electron Excess from Hidden-Fermion Dark Matter Decays,” Phys. Lett. B **673**, 247 (2009).

[40] P. M. Ho, Y. Matsuo and S. Shiba, “Lorentzian Lie (3-)algebra and toroidal compactification of M/string theory,” JHEP **0903**, 045 (2009).

[41] S. Shirai, F. Takahashi and T. T. Yanagida, “Decaying Hidden Gaugino as a Source of PAMELA/ATIC Anomalies,” to appear in Phys. Lett. B, arXiv:0902.4770 [hep-ph].

(会議抄録)

[42] Y. Imamura, H. Isono and Y. Matsuo, “Boundary state of superstring in open string channel,” Int. J. Mod. Phys. A **23** (2008) 2253.

[43] Y. Matsuo, “Long open string and non-singlet sector in matrix quantum mechanics,” Int. J. Mod. Phys. A **23** (2008) 2091.

(国内雑誌)

[44] 川野 輝彦, “準安定真空による超対称性の破れ, ” 日本物理学会誌 2009 年 第 64 巻第 1 号 29 頁

(学位論文)

博士論文

[45] Y. Hatsuda, “A Study of Finite-Size Effects in AdS/CFT Correspondence.”

[46] Keisuke Kimura, “Quiver Chern-Simons theories and M2-branes.”

[47] Hiroto Nakajima, “A Model for R-parity Violation and its Phenomenology.”

[48] Masato Taki, “Topological String Theory on Toric Calab-Yau Manifolds and Instanton Counting.”

修士論文

[49] 臼井耕太,「格子上の厳密なカイラル対称性と鏡映正値性」

[50] 古保 貴行,「M2-ブレーンと 3 次元 Chern-Simons 理論」

[51] 田中裕彬,「ABJM 理論と重力理論の双対性」

[52] 土屋陽一、「弦理論のフラックスコンパクト化」

[53] 中村栄太, 「超対称ゲージ理論と強結合ゲージ伝達模型」

[54] 米倉和也, 「超対称共形場理論とその応用」

＜**学術講演**＞

(国際会議)

一般講演

[55] K. Hamaguchi, ”Ultralight Gravitino at the LHC,” PASCOS 08, Perimeter Institute, カナダ, 2008 年 6 月

[56] K. Hamaguchi, ”A Measurement of Neutralino Mass at the LHC in Light Gravitino Scenarions,” Focus week on LHC Physics, IPMU, 東京大学, 2008 年 6 月

[57] Taizan Watari, “Theoretical Framework for R-parity Voilation,” Focus week on LHC physics, IPMU at U. Tokyo, June, 2008.

[58] S. Shirai, “Determining the Mass for an Ultralight Gravitino at the LHC,” SUSY08, 韓国, 2008 年 6 月

[59] H. Hayashi, “New Aspects of Heterotic - F theory Duality,” The 3rd Aisan Winter School on String Theory, Institute of Theoretical Physics Chinese Academy of Sciences, Jan 2009

招待講演

[60] K. Hamaguchi, “Long-lived Staus in the early Universe and at the LHC,” Big Bang Nucleosynthesis and Particle Physics, Perimeter Institute, カナダ, 2008 年 5 月

[61] Taizan Watari, “Heterotic–F theory duality revisited,” String Phenomenology 2008, U. Pennsylvania, May, 2008.

[62] 川野 輝彦, “Metastable Vacua,” Summer Institute 2008, 山梨県富士吉田, 2008 年 8 月 4 日

[63] 今村 洋介 “The BLG model and M-brane actions” Summer Institute 2008, 山梨県富士吉田, 2008 年 8 月 7 日

[64] K. Hamaguchi, “Long-live charged particle in the early universe and at the LHC,” Yonsei-Tokyo Workshop, Yonsei University, 韓国, 2008 年 10 月

[65] K. Hamaguchi, “Dark Matter and long-lived charged particle – what is there apart from standard SUSY?” LHC New Physics Forum, Heidelberg, ドイツ, 2009 年 2 月

(国内会議)

一般講演

[66] 木村 圭助, “Anomalies and O-plane charges in orientifolded brane tilings,” 「量子場理論と弦理論の発展」, 京都大学基礎物理学研究所, 2008 年 7 月.

[67] 山崎雅人, “A New N=4 Membrane Action via Orbifold,” 「量子場理論と弦理論の発展」, 京都大学基礎物理学研究所, 2008 年 7 月

[68] 渡利 泰山、“Heterotic–F theory duality revisited,” 「量子場理論と弦理論の発展」、京大基礎物理学研究所、2008 年 8 月。

[69] 林 博貴, “New Aspects of Heterotic - F theory Duality,” 原子核三者若手夏の学校, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2008 年 8 月

[70] 柴 正太郎, “Bagger-Lambert 理論と最近の発展,” 原子核三者若手夏の学校, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2008 年 8 月.

[71] 寺嶋靖治, 藤博之, 山崎雅人, “A New N=4 Membrane Action via Orbifold,” 日本物理学会, 山形大学, 2008 年 9 月

[72] 木村 圭助, “Anomalies and O-plane charges in orientifolded brane tilings,” 日本物理学会, 山形大学, 2008 年 9 月.

[73] 米倉和也, 「重力波によるグラビティーノ質量の決定」, 日本物理学会, 山形大学, 2008 年 9 月

[74] 中村栄太, 「LHC における strongly interacting gauge mediation 模型」, 日本物理学会, 山形大学, 2008 年 9 月

[75] 渡利 泰山、“R-パリティの破れの理論的枠組み,” 日本物理学会、山形大学、2008 年 9 月。

[76] 白井智, “Ultralight gravitino LSP at the LHC,” 日本物理学会, 山形大学, 2008 年 9 月

[77] 柴正太郎, “Some Generalization of Lorentzian BLG model,” 理研シンポジウム「場と弦の理論の新展開に向けて」, 理化学研究所, 2008 年 12 月.

[78] 横山修一, “ N=4 Chern-Simons Theories and Wrapped M-branes in Their Gravity Duals ”KEK 理論研究会 2009, 高エネルギー加速器研究機構, 2009 年 3 月

[79] 初田泰之, “ Finite-Size Effects for Classical Strings on AdS Background, ” KEK 理論 研究会 2008, 高エネルギー加速器研究機構, 2009 年 3 月.

[80] 柴正太郎, “Lorentzian Lie (3-)algebra and toroidal compactification of M/string theory,” KEK 理論研究会 2009, 高エネルギー加速器研究機構, 2009 年 3 月.

[81] 林 博貴, “Codimension-3 Singlarities and Yukawa Couplings in F-theory,” 日本物理学会 第 64 回年次大会, 立教大学, 2009 年 3 月

[82] 木村 圭助, “Quiver Chern-Simons theories and crystals,” 日本物理学会, 立教大学, 2009 年 3 月.

[83] 横山修一, “N=4 Chern-Simons 理論とその重力双対,” 日本物理学会, 立教大学, 2009 年 3 月

[84] 臼井耕太, “Reflection Positivity in Lattice QCD with Overlap Fermions,” 日本物理学会, 立教大学, 2009 年 3 月

[85] 植田一石, 山崎雅人, “Quiver Chern-Simons-matter 理論と AdS4/CFT3 対応,” 日本物理学会, 立教大学, 2009 年 3 月

招待講演

[86] Y. Matsuo, “Multiple M2-brane and Nambu bracket,” 研究会「量子場理論と弦理論の発展」京都大学基礎物理学研究所 (2008 年 7 月 28 日〜8 月 1 日)

[87] 川野 輝彦, “Meta-Stable Supersymmetry Breaking,” 三者若手夏の学校, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2008 年 8 月 23-24 日

[88] Y. Matsuo, “Nambu bracket as a new gauge symmetry in M theory” 秋の学会（山形大学, 2008 年 9 月 22 日）

[89] 渡利 泰山、“F-理論におけるカイラル物質場の記述について” 日本物理学会、山形大学、２００８年９月。

[90] 濱口幸一, “Supersymmetric Models with Gravitino LSP,” YKIS Symposium, 基研, 2009 年 3 月

[91] 濱口幸一, 「グラビティーノ LSP を持つ超対称性標準模型とその検証可能性」日本物理学会, 立教大学, 2009 年 3 月

(セミナー)

[92] 京都大学基礎物理学研究所における集中講義「M ブレーンについて」2008 年 10 月

[93] 東京工業大学における集中講義, 「M理論の新しい定式化と南部括弧式」(2008 年 11 月 21 日, 26 日, 12 月 3 日)

2 原子核・素粒子実験

2.1 原子核実験研究室 (酒井 · 早野 · 小沢)

原子核実験研究室は、酒井 (英) 研究室、早野研究室、小沢研究室で構成される。互いに密接に連絡を取りながら、原子核物理を中心とし、原子物理、素粒子物理との境界領域の実験研究、量子力学の基本的原理の検証などをおこなっている。

酒井研究室では、原子核のスピン · アイソスピン自由度に着目し、ハドロン多体系としての原子核の構造や、核子間の相互作用の研究を中心におこなっている。偏極イオン源、偏極標的、散乱粒子の偏極度を測定する偏極度計などの開発を進めて来た。2005 年度に開始したプロジェクト「発熱型荷電交換反応による時間領域でのスピン・アイソスピン応答 (ICHOR: Isospin-spin responses in CHarge-exchange exOthermic Reactions)」では、理化学研究所の不安定核 (RI) ビームファクトリーで得られる大強度 RI ビームの特質を生かして、未開拓領域の原子核励起状態を探索する。

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、クォーク・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。2007 年度は、米国ブルックヘブン国立研究所において QGP を探索する実験のデータ収集と解析を進めつつ、新たに東海村に建設中の加速器である 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実験の立案・準備を行った。J-PARC においては、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 種類の実験を提案している。

2.1.1 ICHOR プロジェクト (酒井研究室)

原子核のスピン · アイソスピン型応答 (スピン移行量 $\Delta S = 1$、アイソスピン移行量 $\Delta T = 1$) は基本的な励起モードであり、従来、安定核ビームを用いた (p, n)、$(d, {}^2\mathrm{He})$、$({}^3\mathrm{He}, t)$、$({}^{12}\mathrm{C}, {}^{12}\mathrm{B})$ などの反応によって研究されてきた。これらの手法では、標的粒子の基底状態近傍では無反跳条件 (運動量移行 $q \sim 0$) を近似的に満たすことができるが、励起エネルギーが 20 MeV 以上の高励起状態では、大きな運動量移行を伴い、標的核を効率よく励起できない。この点、不安定重イオンビームを用いた発熱型荷電交換反応は、高励起状態で $q \sim 0$ の条件を満たすため、原子核の高励起状態の強力なプローブとなりうる。この性質を最大限生かして原子核の励起状態を探索しようというのが ICHOR プロジェクトである。

理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) で得られる RI ビームは、核子あたり 200–350 MeV のエネルギーを持つが、このエネルギー領域では歪曲効果が最小になると同時にスピン・アイソスピン励起が支配的となる最適のエネルギーである。本研究の目標は、RIBF で、$({}^{12}\mathrm{N}, {}^{12}\mathrm{C})$、$({}^{12}\mathrm{B}, {}^{12}\mathrm{C})$、$({}^{20}\mathrm{Mg}, {}^{20}\mathrm{Ne})$ といった反応を用い、無反跳条件下でスピン単極子共鳴および二重ガモフ · テラー (GT) 共鳴状態を探索する [51, 63, 64]。また、同時に、従来の (p, n)、(n, p) 反応を用い、二重 GT 遷移である二重ベータ崩壊核の中間状態核の構造研究を進めている [2, 3, 48, 49, 50, 76]。

磁気スペクトロメータ SHARAQ の建設

RIBF の不安定核重イオンビームを用いた測定に特化した高分解能磁気スペクトロメータ (SHARAQ スペクトロメタ: Spectroscopy with High-resolution Analyzer and RadioActive Quantum beams) の建設を 2006 年から進めてきたが、その全系が完成した。SHARAQ は 2 つの双極電磁石と 3 つの四重極電磁石からなり、設計上のエネルギー分解能は相対値で 1/7000 である。また、重イオン反応において移行運動量を必要な精度で決定するために、縦方向・横方向とも、1 mrad 以内の角度分解能が出る予定である。

今年度はスペクトロメタの荷電粒子の軌道解析に必要な磁場分布測定を完了し、3 月、運動エネルギー 3.5 GeV の ^{14}N ビームを SHARAQ の焦点面にまで導いてコミッショニングを行った。予備的な解析により確認できていることは以下の通りである。

- すべての検出器とデータ取得系が動作し、重イオンビーム検出用の低圧多芯線検出器 (MWDC)、フランス GANIL 研究所で製作された焦点面検出器 (CRDC) がそれぞれチェンバーガス圧 10kPa、2kPa で正しく動作した。検出効率はほぼ 100%であった。
- 不安定核ビーム ^{12}N、^{12}B の生成をおこない、強度、純度の情報を得た。

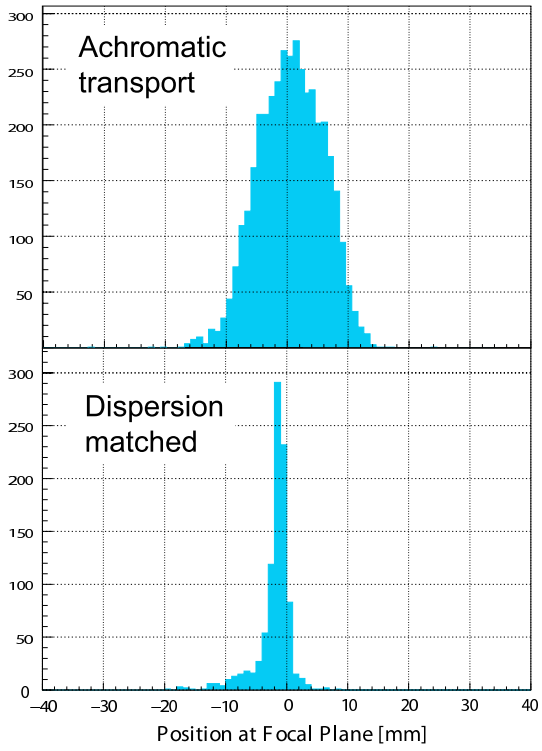

図 2.1.1: SHARAQ の分散整合で達成されたスペクトル。(上) アクロマティックビーム輸送時の SHARAQ 焦点面でのビーム像。ビームのもつ運動量広がりを反映して焦点面での像が広がっている。(下) 分散整合によりビームの運動量広がりを相殺したときのビーム像。

- SHARAQ スペクトロメタのイオン光学的性質を測定し、分散 (dispersion) がほぼ設計通り $(x|\delta) = 6.8$ m であることを確かめた。
- 分散整合が達成された。加速器からのビームの運動量相対広がりは $\delta p/p = \pm 0.2\%$ であったが、分散整合のビーム輸送により、この広がりを相殺することで、およそ 5 倍の分解能で測定ができることが分かった。図 2.1.1 に分散整合前、分散整合後の焦点面でのビーム像を示す。この分解能は、ビームエネルギー 3.6 GeV における $(^{12}\mathrm{N}, ^{12}\mathrm{C})$ 反応において、標的核の励起エネルギーが 2.5 MeV の分解能で測定できることに相当する。

来年度の 5 月、さらに運動量・入射角度の広がった二次ビームでの分散整合の開発をおこなう。将来的には、ビームライン検出器を用いて二次ビームの運動量を一粒子ごとに測定し、解析に用いることで、より高分解能の測定が可能になる見込みである [4, 5, 77, 78]。

荷電ベクトル型スピン単極子巨大共鳴の探索

原子核のスピン · アイソスピン型応答のうち、荷電ベクトル型スピン単極子共鳴状態 (IVSM) は、アイソスピン移行量 $\Delta T = 1$、スピン移行量 $\Delta S = 1$ の $2\hbar\omega$ 励起モードとして特徴づけられる。このモードはスピン・アイソスピン選択性を持つ breathing mode であり、核物質の非圧縮性とも関連する基本的なものである。$0\hbar\omega$ 励起であるガモフ・テラー遷移の研究が進んでいる反面、IVSM の研究は進んでおらず、巨大共鳴状態の数少ない観測例も (p, n) 型 $(\beta^-$ 型) 反応に限られる。我々は、(n, p) 型 $(\beta^+$ 型) 反応で IVSM 共鳴状態の初観測を目指し、RIBF-SHARAQ にて、不安定核ビームによる小発熱反応である $(t, ^3\mathrm{He})$ 反応を用いた研究を計画している。

測定にあたり、運動エネルギー 1.3 GeV の α 粒子ビームを ^{9}Be 標的に入射して 900 MeV の t ビームを生成する。これを二次標的 ^{90}Zr、^{208}Pb に照射し、荷電交換反応で生じた ^{3}He 粒子を SHARAQ 焦点面で測定する。今年度はビーム純度、収量の見積もりを行って、9 日間のビームタイムを申請し、承認された。来年度に測定をおこなう予定である。

2.1.2 反陽子ヘリウム原子 (早野研究室)

反陽子ヘリウム原子は、ヘリウム原子核のまわりを電子と反陽子が一個ずつ回っている奇妙な中性原子である。通常のレーザー分光は電子状態を遷移させるが、我々が開拓した反陽子ヘリウム原子のレーザー分光では、反陽子の軌道を変化させる。その遷移周波数を量子電磁力学計算と比較することで、反陽子・電子質量比が求まる。

CPT 定理によれば反陽子と陽子の質量は等しいので、我々の実験で陽子・電子質量比という、理科年表にも出ている重要な基礎物理定数を決定できるのである。我々は、この研究を CERN の反陽子減速器施設において 2000 年から行っており、最近では 10^{-9} の精度に達し、この結果が基礎物理定数の最新値（CODATA2006）に採択された。すなわち、水素原子のレーザー分光と並んで、反陽子ヘリウム原子のレーザー分光結果が、リュードベリ定数や陽子・電子質量比などの決定に用いられているのである。

現在、更なる高精度をめざした分光法の開拓を行っており、近日中に陽子・電子質量比の精度を凌駕できると期待している。

2.1.3 反 K 中間子原子の精密分光 (早野研究室)

早野研究室に於いては水素や重水素、ヘリウム等の軽い原子核における反 K 中間子原子の精密分光実験をイタリアの DAΦNE、KEK 及び J-PARC において精力的に進行中である。反 K 中間子原子の研究において我々は直接の測定が困難である 0 エネルギーでの反 K 中間子-核子あるいは原子核の間に働く強

い相互作用についての知見を得る事が出来る。これらの研究は後述する反 K 中間子原子核の問題とも密接な関連を持っている。

DAΦNE における反 K 中間子水素原子 X 線の精密測定

反 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 散乱の散乱長を導出でき、反 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。我々はイタリアの DAΦNE 電子陽電子衝突型加速器で行われる SIDDHARTA 実験で、K^- 中間子が基底状態への遷移過程で発生する X 線を精密に測定して、1s 状態のシフトと幅を数 eV の精度で決めることを目指している。

過去に実行された幾つかの反 K 中間子水素原子分光実験の中でも、特に高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行われた KpX 実験においては、K^- 中間子が陽子に吸収される反応点を再構築して、バックグラウンドの源となるガンマ線を発生しない K^-p 反応モードを選ぶ方法により高い S/N を実現し、反 K 中間子水素原子 1s 状態のシフトが斥力型であることを確立すると共に、それ以前の低エネルギー $\bar{K}N$ 散乱長データと矛盾した三つの実験結果が誤りであったことを示した (反 K 中間子水素原子パズルの解決)。また、DAΦNE の DEAR 実験は、高分解能 (6 keV で FWHM が 150 eV) の CCD を駆使し、DAΦNE の低エネルギー、運動量分散 $\Delta p/p$ が 0.1% の単色 K中間子源を利用することでエネルギー分解能と統計を向上し、シフトが斥力型であることを改めて証明した。しかしながら、KpX 実験における K_α X線の全統計は百数十イベントに過ぎず、DEAR 実験では DAΦNE ビームラインで生じる K^- 中間子と非同期なバックグラウンドによって S/N が 1/100 のオーダーとなっていた。この二つの要因は、KpX と DEAR の実験精度を決めている。

SIDDHARTA 実験では、6 keV での FWHM が 150 eV という高いエネルギー分解能に加えて、$< 1\mu s$ の時間分解能を持つシリコンドリフト検出器 (SDD) をX線検出器として使用する。実験セットアップは DEAR 実験と同様であり、DAΦNE で大量に生成した ϕ 中間子の $\phi \to K^+K^-$ 崩壊で生じる低エネルギー K^- 中間子を水素気体標的に静止させる。SDD の時間分解能を利用し、K^- 中間子の発生後の数マイクロ秒の時間窓でX線を検出することで K^- 中間子と非同期なバックグラウンドを除去し、DEAR と比較して S/N を二桁以上向上することが出来る。また、有効面積 1 cm^2 の SDD を 144 個使用することでX線の収量を増やし、高統計を狙う。このように、高エネルギー分解能、S/N と統計の向上を駆使し、高い精度を達成する。SIDDHARTA 実験の到達精度と過去の実験結果と比較すると、図 2.1.2 のようになる。

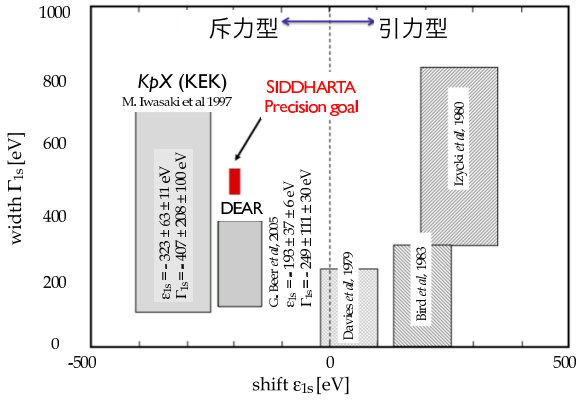

図 2.1.2: 過去の K 中間子水素原子 $1s$ 状態のシフトと幅の測定結果と SIDDHARTA により到達され得る精度の比較 (SIDDHARTA のシフトと幅の"中心値"は適当に仮定)。

2008 年の 10 月から 2009 年の 2 月にかけて、DAΦNE ビームラインに設置された本実験用のセットアップで、K 中間子X線の収量が多いヘリウム 4 気体標的を使用して、装置の最適化及び性能テストを行った。このテスト実験により、反 K 中間子ヘリウム 4 原子X線の測定精度は、統計誤差だけで見た場合同測定で現在一番高い精度を持つ E570 実験と同レベルに達していることが確認され、この結果は水素標的の測定においては当初の目標通りの精度を達成することが十分に可能であることを示している。最終的な目標である水素気体標的を使用した測定は、2009 年 3 月から始まり、2009 年中にデータ収集を終える予定である。

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

早野研究室においては 2005 年度に反 K 中間子ヘリウム 4 の精密分光実験 KEK-PS E570 を実行し、反 K 中間子ヘリウムパズルを解決した。これに加えて反 K 中間子ヘリウム 3 の分光を実行すれば反 K 中間子と原子核間のポテンシャルに関する知見がより完全なものになる事が期待される。我々が J-PARC に提案した K 中間子ヘリウム 3 原子の X 線測定実験 E17 は、J-PARC の 50 GeV 陽子シンクロトロン完成後、ハドロン実験施設における最初に実施される実験に選ばれている。2008 年度において 50 GeV 陽子シンクロトロンは 30 GeV までの加速に成功し、2009 年 2 月には E17 実験が遂行されるハドロン実験施設 K1.8BR ビームラインに初めての二次ビームが供給された。我々は E17 実験準備を 2008 年度中に着々と遂行し、特に主に担当したビームライン検出器においては"最初の実験グループ"の責任として

J-PARC における初の K^+ 中間子の同定に成功した (図 2.1.3 参照)。2009 年度においては K1.8BR ビームラインの調整を 2008 年度に引き続き遂行するのと平行して、SIDDHARTA におけるのと同様のシリコンドリフト検出器 SDD 及び液体ヘリウム 3 実験標的系の準備を進め、反 K 中間子ヘリウム 3 原子 X 線のデータ取得を開始する予定である。

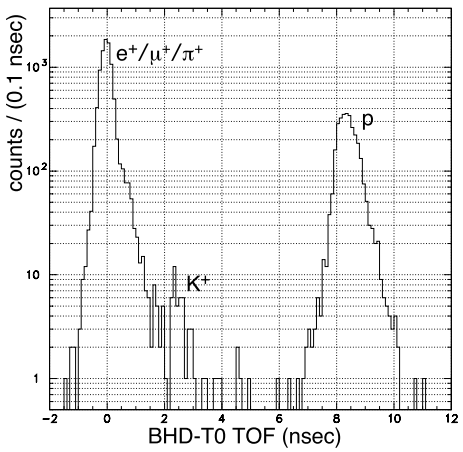

図 2.1.3: J-PARC において初めて同定された K^+(飛行時間測定法による)。K^+ は同じ運動量の π^+ 等と p の中間の飛行時間を持つ。

2.1.4 反 K 中間子原子核の研究 (早野研究室)

反 K 中間子と原子核の間の強い相互作用の問題に関連して、幅の狭い反 K 中間子原子核の議論が近年活発に成されている。もしもそのような状態が実在するならば、今迄立証が成されていない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、期待される超高密度から起こりえるカイラル対称性の部分回復等の得難い研究機会を与える事が期待される。

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 状態のエクスクルーシブ測定による同定を目指し、J-PARC K1.8BR ビームラインにおいて E15 実験を行う。実験においては先述の 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) 反応を用いて K^-pp/K^-pn 状態を形成し、同時に終状態のハイパロンを CDS(Cylindrical Drift-chamber System) を用いて再構成する。2008 年度においては E17 実験と共通のデバイスである液体ヘリウム 3 標的と CDS の構築及び K1.8BR のビームライン検出器の設置を行い、2009 年 2 月に供給された二次ビームで 1.0 GeV/c のビームライン調整を開始した。E15 実験に於いては大きなビーム強度を必要とするために本実験は E17 の終了後、J-PARC 50 GeV 加速器のビーム強度が設計値にまで向上することが期待される 2011 年度以降に行う。

2.1.5 π 中間子原子の精密分光 (早野研究室)

π 中間子原子の深い束縛状態、すなわち、π^- 中間子軌道と原子核の核子分布が重なった状態の分光は、陽子の質量起源を定量的に解明する有力な手段である。陽子質量が、その構成要素である u、d クォークより遥かに重いのは、真空中にクォーク・反クォーク対が凝縮し (カイラル凝縮)、u、d クォークが大きな有効質量を得たためであると考えられるが、π 中間子原子の分光によって、原子核中で中間子の状態 (質量や崩壊定数) を精密に測定すると、核内でのカイラル凝縮を定量的に知ることが出来る。

理研 RIBF 施設の BigRIPS 装置において分散整合という手法を用いると、$(d,{}^3\mathrm{He})$ 反応による π 中間子原子の分光精度を飛躍的に高めることが可能である。分散整合を実現させるため、ビームの光学軌道計算を行い、実際のビームの軌道が計算結果と一致するかを 2009 年 5 月のテスト実験で検証する。現在はこのテスト実験の準備を進めている。

2.1.6 クォーク・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、クォ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 200GeV の重心系エネルギーでのデータを中心に収集した。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

も含む共同研究者らによって続けられ、本年度にも様々な重要な結果が得られた。[25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34]

今年度は原子核研究センターの浜垣研究室と共同で QGP 中におけるチャームやボトム · クォークのふるまいを調べるため、基礎情報となる陽子陽子衝突の生成断面積の測定を行った。チャームの断面積に関して電子対生成の不変質量分布から $\sigma_{cc} = 544 \pm 39(\text{stat}) \pm 142(\text{syst}) \pm 200(\text{model})$ μb の結果を得た。また、電子とハドロンの質量相関を利用することで、この結果と矛盾しない $\sigma_{cc} = 567 \pm 57(\text{stat}) \pm 224(\text{syst})$ μb との独立な結果を得た。さらにボトムの断面積に関して、$\sigma_{bb} = 3.2 + 1.2\ -1.1\ (\text{stat}) +1.4-1.3\ (\text{syst})$ μb を得た。

また、2008 年の 12 月から 2 月にかけて、同様に浜垣研究室との協力で ERT トリガーボードの修理を行った。昨年のデータ収集で 20 %ほどのボードが故障しており、その修理を 2008 年のデータ収集が始まるまでに行うことは急務であった。修理の結果、正常なボードをすべての位置にインストールすることができた。

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) の解析に力を入れている。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。

2.1.7 ハドロンが動的な質量を獲得する機構の研究 (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ったとき、たとえば陽子では 1GeV、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対する実験的な研究である。この機構として南部先生により提唱されたのが、強い相互作用により真空中に反クォーク · 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破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。この測定は KEK の E325 実験や J-Lab の CLAS 実験などですでに行われ、原子核中での質量分布の変化が報告されている。特に、小沢が中心となって遂行した KEK の実験では、ω 中間子と ϕ 中間子の両方のピークの軽い質量領域側に、既存のハドロン質量分布では説明できない分布の変化を示唆する結果が得られた。実験的な効果は、Internal conversion や検出器の物質による Radiative tail まで含めて詳細に検討され、この分布の変化は実験的な効果を超えて有意であることが示された。モデル計算により ρ 中間子と ω 中間子は、原子核密度中で 9.2±0.2%の質量減少を起している事が分った。これは、カイラル対称性の回復による理論的予想 (16±6%) と矛盾しない。また、ϕ 中間子の場合にも同様の解析をして、4.2±0.8%の質量減少と 2.6±1.9 倍の質量巾の広がりを起しているという結果を得た。これらの結果をカイラル対称性の回復に結び付けていくためには、さらに多くの情報が必要であるため、J-PARC において二つの実験を企画している。

まず、質量変化の運動運動学的なパラーメータに対する依存性、よりクリアな質量変化を捉えるためのさらに大きな原子核標的の情報、さらに比較としての陽子標的の情報などを得るためには、飛躍的にベクトル中間子の収量の統計を上げることが必要となる。そのため、KEK 実験の 100 倍の収量を目標とする J-PARC での実験を準備中である。

次に、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。一つ目は私が KEK で遂行した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準位を詳細に調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。

2.1.8 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)

我々が理研との協力で計画している JPARC の E16 実験においては、高統計のデータで問題に原子核中の ϕ 中間子質量分布の決定的実験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 (30GeV, 50GeV) 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 標的に当てることで、10^7Hz 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効果（2 倍）も加え最終的に約 100 倍の収量を得る予定である。

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変質量を測定し、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。この検出器に求められる性能としては、

- $\sim 100\mu m$ 程度の分解能
- ハイレートな計数 (10^7Hz の衝突レート) への耐性

- 少ない物質量であること

などがある。以上の要求をみたす検出器として、近年盛んに研究されている Gas Electron Multiplier(GEM) を用いた位置検出器の開発を行っている。これは、COMPASS 実験や RCNP での実験も使用されており、25kHz/mm^2 までの動作が報告されている。読み出しにはストリップを用いることで、$\sim 100\mu m$ の分解能、質量分解能にして 5MeV/c^2（KEK 実験の半分）を達成する。10cm × 10cm, 20cm × 20cm,30cm × 30cm の 3 層の GEM 検出器でひとつのセグメントとし、これを組み合わせて全体のスペクトロメータを構成する予定である。また、大立体角をカバーする電子同定用検出器としては、CsI 蒸着した GEM を光検出器とする Gas Čerenkov Counter と lead glass EM calorimeter の組み合わせを考えている。前者は、鏡や PMT を必要としないため、低物質量で容易に大立体角をカバーすることができる。

この実験に使用するため、当研究室では、高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、東大原子核科学研究センター、理科科学研究所との協力で GEM を用いた検出器の開発を行ってきた。GEM は、CERN で開発された電子増幅機構を持つフォイルと穴構造を持つ検出器である。標準的な GEM 検出器のセットアップは、まず、一番上にドリフト電場形成用のカソードがあり、その下に電子増幅用の GEM が 3 枚続く。そして最下部に置かれた電極で GEM により増幅された電子を電気信号として読み出す。読み出し用の電極は、基板上に実装され、本実験に使用する GEM 検出器の場合、x、y 方向にストリップがあり、二次元読み出しが可能になっている。現在のテストに使用しているガスは Ar-CH4(10%混合) である。GEM の標準的なガスである Ar-CO2(30%混合) のテストも進行中である。本年度、テストおよび開発を行った項目は以下のとおりである。

- 国産の GEM と読み出し基板の性能評価
- 新しい読み出し基板の開発

国産の GEM と読み出し基板の性能を評価するため、2008 年 11 月に KEK の Fuji beamline で 10cm 角の GEM 検出器のビームテストを行った。ビームは 2GeV/c 程度の電子である。テストのセットアップは中心に GEM 検出器を置き、その前後にビームのトラック決定のための Silicon Strip Detector(SSD) を計 3 枚、さらにその前後にトリガー作成用のシンチレータを計 2 枚置いた。テスト項目は、xy 方向の分解能の測定、分解能のビーム入射角度に対する依存性、GEM とカソードのギャップの大きさや GEM と読み出しの間のギャップの大きさに対する分解能の依存性であった。

このビームテストによって上記のギャップを適当に選べば、正面入射の場合 $100\mu m$ という目標の分解能が得られることを確かめることができた。図 2.1.4 に結果を示す。一方で GEM の垂直軸に対して 15 度で入射させたとき $250\mu m$ 程度の分解能しか得られなかった。これに関しては、使用ガスの選択、GEM とカソードの間の距離を狭くすることなどで対策できることが分かっている。新たに対策した GEM 検出器のテストのために、プロポーザルを提出し認可されており、2009 年 6 月 29 日から 7 月 3 日まで東北大学の原子核理学実験施設で再びテスト実験を行う予定である。

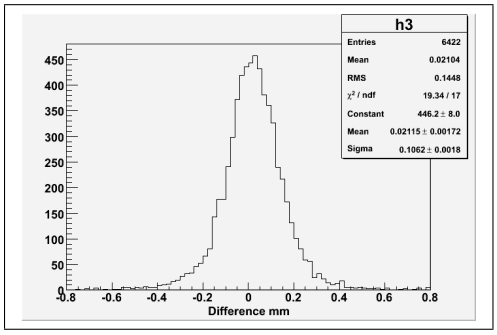

図 2.1.4: 正面入射のときのテスト実験の結果:横軸はビーム粒子の通過位置を GEM 検出器で決めた場合と SSD で決めた場合の差である。(単位は mm) 縦軸はイベント数。

また、読み出し基盤の製作工程を見直すことでコストの削減を行うことも考えている。これまで用いていた読み出しは下面のストリップ電極の上面の絶縁物を除去する工程が入っている。この絶縁物が存在しても信号を得ることが可能になれば、この作業を省略しコストを削減することができる。X線を用いたテストで絶縁物が存在する基板でもシグナルを確認することにはすでに成功している。

2.1.9 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)

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計画している。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 $\pi^0\gamma$ 崩壊を用いた不変質量法で測定する。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経変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 50MeV 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 1.8GeV/c であれ

ば、ω 中間子がほぼ運動量ゼロで生成されることが分かった。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った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。

図 2.1.5 は中性子検出器の完成イメージ図である。中性子検出器には両読みプラスチックシンチレーションカウンターを用いる。飛行時間測定（TOF）により中性子を識別しその運動量を測定する。そのために要求される性能は、束縛状態を測定するために最低限の Missing mass 分解能 (30MeV/c^2) を得るための高い時間分解能 (80ps 以下) と中性子に対する 30% 程度の検出効率である。より高い時間分解能を得るために、立ち上がりの早い光電子増倍管（PMT）・浜松ホトニクス H2431 を使用した。プラスチックシンチレータとしては SAINT-GOBAIN CRYSTALS の BC404, BC408, BC412, BC416, BC420 の 5 種類（50mm x 50mm x 300mm）を用意し、時間分解能を評価するとともに、中性子に対する反応の違いを評価した。時間分解能の評価のために、高エネルギー加速器研究機構（KEK）の Fuji test beamline におけるビームテストを行った。また、中性子源カリホルニウム (Cf)252 を用いた TOF 測定や、モンテカルロシミュレーションパッケージ FLUKA を用いて中性子に対する反応、検出効率を評価した。

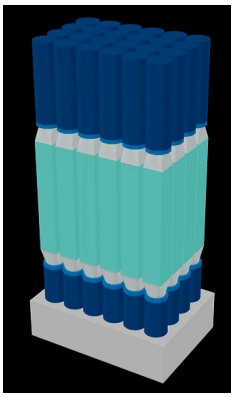

図 2.1.5: 中性子検出器のイメージ図。両読みのシンチレーションカウンター６列 × ４層で構成される。

時間分解能を評価するためのビームテストは１１月に２週間かけて、GEM のテストと同時に行った。本テストで、BC404、BC408 のプラスチックシンチレータを用いることで時間分解能として 50ps（10〜20ps の系統誤差）との結果を得られた。これは、十分な値である。ビームテストには、両読みシンチレーションカウンターを用いた。図 2.1.6 は、ビームテストで用いた両読みシンチレーションカウンターである。

中性子源を用いたＴＯＦ測定では、中性子の反応の rate からシンチレータの検出効率の違いを評価し

図 2.1.6: 実際に用いたシンチレーションカウンター

た。結果、BC408 のほうが BC404 よりも検出効率がよいことがわかり、BC408 を用いて実機の製作を進めている。また、実際に測定する中性子のエネルギー領域における反応と測定効率を評価するためハドロン輸送モデル FLUKA を用いたシミュレーションを行った。その結果、シンチレータのみでは数%の検出効率しか得られず十分ではないことがわかった。そのため、シンチレーションカウンターの直前に 1cm 程度の鉄板を置いた場合の計算などを行い、中性子と鉄原子核との反応を利用し、28%の検出効率を得られることが判明した。現在は、鉄を置く形の検出器のデザインを行っている。

γ 線検出器は KEK の E246 実験で開発されたものを使用する。現在、この検出器の立体角やエネルギー分解能によって、得られるヒストグラムがどのように変化するかをシミュレートしている。

また、これらの開発による性能評価やトリガー、バックグランドの評価などを定量的に行い本年度にプロポーザルを提出した。

＜受賞＞

[1] 早野龍五:第 54 回仁科記念賞、仁科記念財団、2008 年 12 月 5 日.

＜報文＞

(原著論文)

[2] M. Sasano, H. Sakai, K. Yako, T. Wakasa, S. Asaji, K. Fujita, Y. Fujita, M.B. Greenfield, Y. Hagihara, K. Hatanaka, T. Kawabata, H. Kuboki, Y. Maeda, H. Okamura, T. Saito, Y. Sakemi, K. Sekiguchi, Y. Shimizu, Y. Takahashi, Y. Tameshige, and A. Tamii: “Gamow-Teller unit cross sections of the (p,n) reaction at 198 and 297 MeV on medium-heavy nuclei”, Phys. Rev. C **79**, 024602 (2009).

[3] K. Yako, H. Sakai, M.B. Greenfield, K. Hatanaka, M. Hatano, J. Kamiya, Y. Maeda, K. Nagayama, H. Okamura, K. Sekiguchi, Y. Shimizu, K. Suda, A. Tamii, and T. Wakasa: “The RCNP (n,p) facility”, Nucl. Instrum. and Methods A **592**, 88–99 (2008).

[4] T. Kawabata, G.P.A. Berg, T. Kubo, H. Sakai, S. Shimoura, and T. Uesaka: “High resolution beam line for the SHARAQ spectrometer”, Nucl. Instrum. and Methods B **266**, 4201–4204 (2008).

[5] T. Uesaka, S. Shimoura, H. Sakai, G.P.A. Berg, K. Nakanishi, Y. Sasamoto, A. Saito, S. Michimasa, T. Kawabata, and T. Kubo: "The high resolution SHARAQ spectrometer", Nucl. Instrum. and Methods B **266**, 4218–4222 (2008).

[6] H. Sakai: "Discovery of New Isotopes", JPSJ Online–News and Comments [Aug. 11, 2008].

[7] H. Sakai, T. Saito, C. Rangacharyulu, and K. Yako: "Application of the ^{1}H(d,^{2}He)n reaction to the EPR paradox", Few Body Syst. **44**, 35–38 (2008).

[8] A.S. Kiselev, V.P. Ladygin, T. Uesaka, H. Sakai, *et al.*: "Analyzing powers in the ^{12}C($\vec{d}$, p)^{13}C reaction at the energy T_d = 270 MeV", Eur. Phys. J. **162**, 143–146 (2008).

[9] A.K. Kurilkin, T. Saito, V.P. Ladygin, H. Sakai, *et al.*: "Measurement of the vector A_y and tensor A_{yy}, A_{xx}, A_{xz}, analyzing powers for the $dd \rightarrow {}^3$Hp reaction at 200 MeV", Eur. Phys. J. **162**, 133–136 (2008).

[10] M. Janek, V.P. Ladygin, L.S. Azhgirey, H. Sakai, *et al.*: "Status of the investigation of the spin structure of d, ^{3}H, and ^{3}He at VBLHE using polarized and unpolarized deuteron beam", Phys. Atomic Nucl. **71**, 1495–1501 (2008).

[11] H. Mardanpour, H.R. Amir-Ahmadi, R. Benard, H. Sakai, *et al.*: "A systematic study of 3NF effects in p plus d break-up with BINA at 190 MeV", Few Body Syst. **44**, 49–52 (2008).

[12] T. Pask, T. Barna et al: "Improved study of the antiprotonic helium hyperfine structure", J. of Phys. B **4**, 081008 (2008).

[13] M. Iwasaki, H. Bhang, J. Chiba, et al: "Kaonic nuclear state search via K^- reaction at rest on He-4 target ", Nucl. Phys. A **804**, 186–196 (2008).

[14] L.V. Jorgensen, G. Andresen, W. Bertsche, et al (ALPHA collaboration): "Compression of antiproton clouds for antihydrogen trapping ", Phys. Rev. Lett. **100**, 203401 (2008).

[15] R.S. Hayano: "Experimental study of hadron properties in the nuclear medium" Nucl. Phys. A **805**, 295, (2008).

[16] A. Adare it et al. (PHENIX collaboration): "Quantitative constraints on the transport properties of hot partonic matter from semi-inclusive single high transverse momentum pion suppression in Au plus Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV", Phys. Rev. C **77**, 064907 (2008).

[17] M.C. Fujiwara, *et al.* (ATHENA collaboration): "Temporally controlled modulation of antihydrogen production and the temperature scaling of antiproton-positron recombination", Phys. Rev. Lett. **101**, 053401 (2008).

[18] Z. Elekes, Z. Dombradi, N. Aoi *et al.*: "The study of shell closures in light neutron-rich nuclei", J. of Phys. G **35**, 014038 (2008).

[19] Y. Satou, T. Nakamura, N. Fukuda *et al.*: "Unbound excited states in ^{19,17}C", Phys. Lett. B **660**, 320 (2008).

[20] D. Suzuki, H. Iwasaki, H.J. Ong *et al.*: "Lifetime measurements of excited states in ^{17}C: Possible interplay between collectivity and halo effects", Phys. Lett. B **666**, 222 (2008).

[21] H. Iwasaki, S. Michimasa, M. Niikura *et al.*: "Persistence of the $N = 50$ shell closure in the neutron-rich isotope ^{80}Ge", Phys. Rev. C **78**, 021304 (2008).

[22] N. Aoi, H. Suzuki, E. Takeshita *et al.*: "Shape transition observed in neutron-rich pf-shell isotopes studied via proton inelastic scattering", Nucl. Phys. A **805**, 400c (2008).

[23] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration): "Suppression Pattern of Neutral Pions at High Transverse Momentum in Au plus Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV and Constraints on Medium Transport Coefficients", Phys. Rev. Lett. **101**, 232301 (2008).

[24] N. Aoi, E. Takeshita, H. Suzuki *et al.*: "Development of Large Deformation in ^{62}Cr", Phys. Rev. Lett. **102**, 012502 (2009).

[25] S. Afanasiev *et al.* [PHENIX Collaboration]: "Source breakup dynamics in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}}$=200 GeV via three-dimensional two-pion source imaging", Phys. Rev. Lett. **100**, 232301 (2008).

[26] A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration]: "Quantitative Constraints on the Opacity of Hot Partonic Matter from Semi-Inclusive Single High Transverse Momentum Pion Suppression in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV", Phys. Rev. C **77**, 064907 (2008).

[27] A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration]: "Dihadron azimuthal correlations in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$=200 GeV", Phys. Rev. C **78**, 014901 (2008).

[28] S. Afanasiev *et al.* [PHENIX Collaboration]: "Particle-species dependent modification of jet-induced correlations in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV", Phys. Rev. Lett. **101**, 082301 (2008).

[29] A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration]: "J/psi Production in $\sqrt{s_{NN}}$= 200 GeV Cu+Cu Collisions", Phys. Rev. Lett. **101**, 122301 (2008).

[30] A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration]: "Charged hadron multiplicity fluctuations in Au+Au and Cu+Cu collisions from $\sqrt{s_{NN}}$ = 22.5 to 200 GeV", Phys. Rev. C **78**, 044902 (2008).

[31] A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration]: "Onset of pi0 Suppression Studied in Cu+Cu Collisions at $\sqrt{s_{NN}}$=22.4, 62.4, and 200 GeV", Phys. Rev. Lett. **101**, 162301 (2008).

[32] A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration]: "Suppression pattern of neutral pions at high transverse momentum in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and constraints on medium transport coefficients", Phys. Rev. Lett. **101**, 232301 (2008).

[33] A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration]: "Dilepton mass spectra in p+p collisions at $\sqrt{s}$= 200 GeV and the contribution from open charm", Phys. Lett. B **670**, 313 (2009).

[34] A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration]: "Inclusive cross section and double helicity asymmetry for π^0 production in p+p collisions at $\sqrt{s} = 62.4$ GeV", Phys. Rev. D **79**, 012003 (2009).

(会議抄録)

[35] L.V. Jorgensen, G. Andresen, W. Bertsche *et al.* (ALPHA collaboration): "Towards trapped antihydrogen", Nucl. Instrum. Methods B **266**, 357–362 (2008).

[36] G.B. Andresen *et al.* (ALPHA collaboration): "Antiproton compression and radial measurements", AIP conf. proc. **1037**, 96 (2008).

[37] N. Ono, M. Hori, R.S. Hayano *et al.*: "Determination of the antiproton-to-electron mass ratio by high precision laser spectroscopy of $\bar{p}\mathrm{He}^+$", AIP conf. proc. **1037**, 137 (2008).

[38] T. Pask, D. Barna, A. Dax *et al.*: "Collisional effects on the antiprotonic helium hyperfine structure measurement", AIP conf. proc. **1037**, 148 (2008).

[39] M.C. Fujiwara *et al.* (ALPHA collaboration): "Particle physics aspects of antihydrogen studies with ALPHA at CERN", AIP conf. proc. **1037**, 208 (2008).

[40] G.B. Andersen *et al.* (ALPHA collaboration): "First attempts at antihydrogen trapping in ALPHA", AIP conf. proc. **1037**, 241 (2008).

[41] R.S. Hayano: "Solving the kaonic-helium puzzle", Mod. Phys. Lett. A **23**, 2505–2511 (2008).

[42] T. Suzuki *et al.*: "Lambda N correlations from the stopped K^- reaction on ^{4}He", Mod. Phys. Lett. A **23**, 2520–2523 (2008)

[43] R.S. Hayano: "Kaonic helium atoms", Int. J. of Mod. Phys. A **24**, 183 (2009).

[44] J. Zmeskal *et al.* (SIDDHARTA collaboration): "Kaonic atoms at DAϕNE - the SIDDHARTA experiment", Int. J. of Mod. Phys. A **24**, 190 (2009).

[45] M. Sato (for the KEK-PS E549 collaboration): "Search for strange tribaryon states in the ^{4}He(stopped K^-,p) reaction", Int. J. of Mod. Phys. A **24**, 442 (2009).

(国内雑誌)

酒井英行、齋藤孝明: 「陽子対を用いたベルの不等式の検証実験と非局所量子相関」日本物理学会誌 64(1), 33–37 (2009).

(学位論文)

[46] 大能直哉: 「反陽子ヘリウム原子のオージェ崩壊率の研究」、 2009 年 3 月 博士取得.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[47] S. Noji: "Study of exothermic charge-exchange reactions at the S800 spectrograph", ICHOR-EFES international symposium on new facet of spin-isospin responses toward the commissioning of SHARAQ spectrometer, RIKEN, October 29–31, 2008.

[48] K. Yako: "Study of Nuclear matrix elements of two-neutriono double-beta-decay by (p, n) and (n, p) reactions", ICHOR-EFES international symposium on new facet of spin-isospin responses toward the commissioning of SHARAQ spectrometer, RIKEN, October 29–31, 2008.

[49] K. Yako: "Study of the 2-neutrino double-beta-decay process of ^{48}Ca and ^{116}Cd by (p, n) (n, p) reactions", Annual meeting of European network of theoretical astroparticle physics on physics of massive neutrinos, Milos, Greece, May 20–22, 2008.

[50] K. Yako: "Study of nuclear matrix elements of two-neutrino double-beta-decay by (p, n) and (n, p) reactions", The 6th Italy-Japan symposium on heavy ion physics, Tokai, Japan, November 11–15, 2008.

[51] H. Sakai: "Exothermic charge-exchange reactions by unstable beams with the magnetic spectrometer SHARAQ", Interfacing Structure and Reactions at the Center of the Atom, Queenstown, New Zealand, December 1–5, 2008.

[52] T. Suzuki for KEK-PS E549 collaboration: "The experimental search for strange multi-baryonic systems in ^{4}He(stopped K^-,YN) reaction", 10th International Workshop on Meson Production, Properties and Interaction, Krakow, Poland, June 6–10, 2008.

[53] M. Sato for KEK-PS E549 collaboration: "Search for strange tribaryons in the ^{4}He(stopped K^-, p) reaction", 10th International Workshop on Meson Production, Properties and Interaction, Krakow, Poland, June 6–10, 2008.

[54] H. Tatsuno for KEK-PS E570 collaboration: "Precision spectroscopy of kaonic helium X-rays", 10th International Workshop on Meson Production, Properties and Interaction, Krakow, Poland, June 6–10, 2008.

[55] S. Itoh: "Precision Spectroscopy of Pionic Atom in $(d, ^3\mathrm{He})$ reaction at RIKEN- RIBF", 2nd Yonsei-Tokyo Joint Workshop on Physics, Yonsei University, Korea, October, 2008.

[56] T. Suzuki for KEK-PS E549 collaboration: "Lambda N Correlations from the Negative Kaon Absorption on Helium 4", PANIC08, Eilat, Israel, November 9–14, 2008.

[57] K. Ozawa: "Mass modifications of vector mesons at normal density", Nuclear Medium Effects on the Quark and Gluon, ECT*, Villazzano, Italy, June 3–7, 2009.

[58] K. Ozawa: "Heavy Flavor and Light Vector Meson Measurements at PHENIX", 2008/7/17 PHENIX Collaboration Meeting, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, July 17–19, 2008.

[59] K. Ozawa: "Dense Matter at J-PARC", 2nd Asian Triangle Heavy Ion Conference (ATHIC 2008), University of Tsukuba, Japan, October 13–15, 2008.

[60] K. Ozawa: "Chiral Properties in Nuclear Medium ∼ Origin of mass", ASIA Science seminar on Frontier Science at High-Intensity Proton Accelerators, Beijing University, China, October 19–25, 2008.

[61] K. Ozawa: "Experimental study of hadron mass in QCD medium", Tokyo-Yonsei Workshop, Yonsei University, Korea, October 30, 2008.

招待講演

[62] H. Sakai: "GT$^{\pm}$ strength distributions in ^{48}Sc and ^{116}In measured by (p,n) and (n,p) reactions at 300 MeV and their implications for $2\nu2\beta$ decay", Franco-Japanese Symposium, Paris, France, September 29–October 2, 2008.

[63] H. Sakai: "From pre-equilibrium process to exothermic HICE reaction", Workshop on Physics with Heavy Ions, Seoul, Korea, February 20, 2009.

[64] H. Sakai: "The ICHOR project: spin-isospin study and magnetic spectrometer SHARAQ", The third LACM-EFES-JUSTIPEN Workshop, Oak Ridge, USA, February 23–25, 2009.

[65] R.S. Hayano: "Kaonic Helium Atoms", 10th International Workshop on Meson Production, Properties and Interaction, Krakow, Poland, June 6–10, 2008.

[66] T. Suzuki: "Lambda correlations from E549 at KEK", EXA08, Vienna, Austria, September 15–18, 2008.

[67] R.S. Hayano: "Antiprotonic and kaonic Helium Atoms", PSAS2008, Windsor, Canada, July 22–26, 2008.

[68] R.S. Hayano: "Kaonic helium atoms", EXA08, Vienna, Austria, September 15–18, 2008.

[69] R.S. Hayano: "Kaonic helium atoms", PANIC08, Eilat, Israel, November 9–14, 2008.

[70] R.S. Hayano: "Exotic helium atoms", SENDAI08, Sendai, Japan, December 15–17, 2008.

ポスター発表

[71] D. Suzuki, H. Iwasaki, H. J. Ong *et al.*: "Lifetime measurements of excited states in the weakly-bound nucleus ^{17}C", CNS-RIKEN Joint International Symposium on Frontier of Gamma-ray Spectroscopy and Perspectives for Nuclear Structure Studies (Gamma08), Wako, Japan, April, 2008.

[72] H. Shi: "Precision spectroscopy of kaonic hydrogen x ray with silicon drift detector in SIDDHARTA", CNS International Summer School 2008.

[73] H. Tatsuno (for KEK-PS E570 and J-PARC E17 collaborations): "Kaonic Atom Experiment at J-PARC", Asia Science Seminar on Frontier Science at Hi-Intensity Proton Accelerators, Beijin, China, October 19–25, 2008.

[74] H. Tatsuno (for KEK-PS E570 and J-PARC E17 collaborations): "Precision Spectroscopy of Kaonic Helium-4 X-rays", International Conference on Particle and Nuclei, Eilat, Israel, November 9–14, 2008.

[75] Y.Ichikawa, T.Kubo, N.Aoi *et al.*: "Beta-decay study of $T_z = -2$ proton-rich nucleus ^{24}Si", The Fifth International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses (ENAM08), Ryn, Poland, September, 2008.

(国内会議)

一般講演

[76] 矢向謙太郎:「$(p,n)/(n,p)$ 反応による 2ν 二重ベータ崩壊の核行列要素」日本物理学会 2008 年秋季大会、山形大学、2008 年 9 月.

[77] 宮裕之、酒井英行、他: 「低圧動作多芯線ドリフトチェンバーの性能評価」日本物理学会 第 64 回年次大会、立教大学、2009 年 3 月.

[78] 時枝紘史、酒井英行、他: 「SHARAQ 最終焦点面検出器 CRDC 開発」日本物理学会 第 64 回年次大会、立教大学、2009 年 3 月.

[79] 佐藤将春: 「K 中間子原子核探査実験のための液体ヘリウム 3 標的の開発 IV」, 日本物理学会 2008 年度秋季大会、山形大学、2008 年 9 月.

[80] 市川雄一、 久保敏幸、 青井考、 他: 「$T_z = -2$ 陽子過剰核 ^{24}Si の β 崩壊」, 日本物理学会 2008 年秋季大会、山形大学、2008 年 9 月.

[81] 竜野秀行、石川隆、鈴木隆敏、早野龍五、他: 「K 中間子ヘリウム 4 原子 X 線の精密測定 (VII)」、日本物理学会 2008 年秋季大会、山形大学、2008 年 9 月.

[82] 伊藤聖、大能直哉、竜野秀行、早野龍五、他: 「$(d,{}^3\mathrm{He})$ 反応を用いたπ中間子原子の精密分光 (3)」、日本物理学会 2008 年秋季大会、山形大学、2008 年 9 月.

[83] H. Shi, M. Bazzi, G. Beer *et al.*: "Precision spectroscopy of kaonic hydrogen x ray with silicon drift detector in SIDDHARTA", 日本物理学会 2008 年秋季大会、山形大学、2008 年 9 月.

[84] H. Shi, M. Bazzi, G. Beer *et al.*: " Precision spectroscopy of kaonic hydrogen x ray with silicon drift detector in SIDDHARTA-2", 日本物理学会第 64 回年会、 立教大学、 2009 年 3 月.

[85] 小沢恭一郎: 「J-PARC でありうる将来としての重イオン物理」、「J-PARC ハドロン物理の将来研究計画を考える」研究会、理化学研究所、2008 年 9 月 1–2 日.

[86] 小沢恭一郎: 「Detector R&D: J-PARC-E16」、「多彩なフレーバーで探る新しいハドロン存在形態」研究会、名古屋大学、2008 年 12 月 6–7 日.

[87] 渡辺陽介、小沢恭一郎、 宇都宮和樹、小松雄哉、井澗勇気、青木和也、 延與秀人、 四日市悟、 郡司卓、浜垣秀樹、 関本美智子、江角晋一、 竹内理将: 「原子核内でのΦ中間子質量測定実験のための GEM 検出器開発」、日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学、2009 年 3 月 27–30 日.

[88] 宇都宮和樹、 青木和也、 井澗勇気、 小沢恭一郎、 郡司卓、 小松雄哉、四日市悟、 渡辺陽介: 「ω 中間子原子核束縛状態探索のための TOF 中性子検出器の開発」、日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学、2009 年 3 月 27–30 日.

招待講演

[89] 早野龍五: 「反陽子ヘリウム原子」、日本物理学会第 64 回年会、 立教大学、 2009 年 3 月.

[90] 小沢恭一郎: 「加速器で探る核媒質中のハドロン」、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、2008 年 9 月 3–4 日.

ワークショップ

[91] 佐藤将春 (for J-PARC E15/E17 collaboration):「J-PARC E15/E17 実験のための液体ヘリウム 3 標的の開発」、特定領域研究「ストレンジネスで探るクォーク多体系」研究会、石川県加賀市、2008 年.

[92] 市川雄一、久保敏幸、青井考、他: 「ベータ核分光による陽子過剰核の核構造研究」、第 5 回「停止・低速不安定核ビームを用いた核分光研究会」、 大阪大学、2008 年 12 月.

[93] 鈴木隆敏 (for KEK-PS E549 collaboration): 「Kaon 核実験的研究の現状と今後の進展の可能性に関して」、特定領域研究「ストレンジネスで探るクォーク多体系」理論班主催「ストレンジネスを含むクォーク多体系分野の理論的将来を考える」研究会、KKR ホテル熱海、 2009 年 2 月.

[94] 鈴木隆敏 (for J-PARC E15/E17 collaboration): 「2008 年度の K1.8BR における二次粒子ビーム測定についての報告」、J-PARC ハドロン実験ホールへの最初のビームを記念するワークショップ、いばらき量子ビーム研究センター、 2009 年 3 月.

(セミナー)

[95] R.S. Hayano: “A tale of two exotic helium atoms”, Institute for Nuclear Physics, Jülich, Germany.

[96] 早野龍五: “Hadron properties in the nuclear medium”, 第 21 回北海道原子核理論グループ研究会（北大）.

[97] 小沢恭一郎: 「原子核衝突実験を用いたハドロン質量起源の探索」、「名古屋大学 EHQ 合同セミナー」、2008 年 5 月 20 日.

[98] 小沢恭一郎: 「原子核媒質中の中間子質量測定の現状と将来」、「J-PARC における高エネルギーハドロン物理」セミナー、2009 年 1 月 7 日.

2.2 駒宮研究室

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）における加速器実験がもっとも有効な手段である。 2000 年にデータ取得が終了した CERN の電子陽電子コライダー LEP-II での OPAL 実験のデータ解析は 2004 年度でほぼ終了し素粒子の世代数を 3 と決定し、 電弱相互作用と強い相互作用がゲージ原理を発現していること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-II の次世代加速器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。 特に加速器のナノスケールの精度を持つビームサイスモニターやビーム位置モニターの研究開発に参加し、 かつ ILC での実験の検討を行なっている。 また、 2009 年から世界最高エネルギーの陽子陽子衝突実験が始まる 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。 小実験では超冷中性子の重力での束縛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が進む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った。また、BES-II 実験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

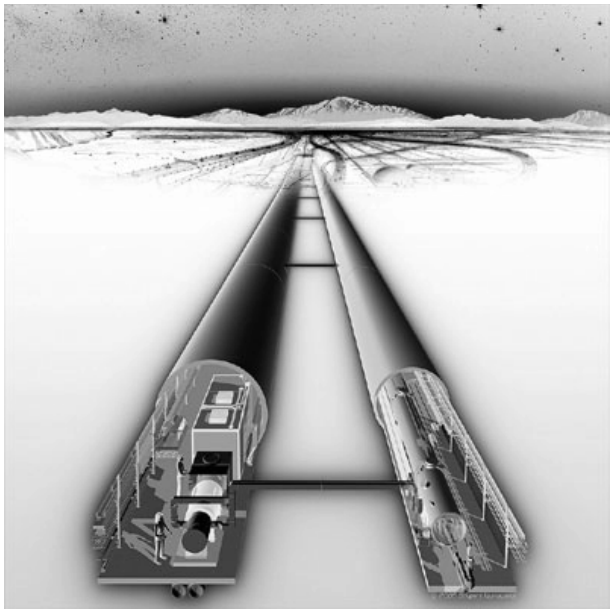

図 2.2.7: ILC 計画

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えた。 2004 年 8 月には国際的に主線形加速器の加速技術を超電導加速空洞を用いることを決定し、 2007 年 3 月には ICFA に基礎設計書が提出されプロジェクトは国際的に大きく進展した。 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詰めることを国際的に行なっている。 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 ATF において、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り、 佐貫は ILC 加速器の Working Group 4（最終収束と衝突点）のアジア代表である。

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.

2008 年度から、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最終収束原理の実証を初めて行なうプロジェクトで、 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。プロジェクトでは二段階に分けた目標を設定している。 初期の目標は、10^{10} 個の電子を縦 37nm の非常に狭い空間に閉じこめ、 極微のビームサイズを実現することである。 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になれば、 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。

ILC 衝突点ビームサイズモニタ (新竹モニタ) の開発研究

ILC の衝突点で必要とされるような極小のビームを測定するビームサイズモニタとして有望視されているものに、 レーザの干渉縞を用いた新竹モニタがある。 これは、 衝突点にレーザ光の干渉縞を作り、その干渉縞の位置 (位相) を動かすことで、 電子ビームと逆コンプトン散乱して生じる γ 線の量が変化することを利用して測定するモニタである。

この新竹モニタは、 米 SLAC の FFTB (Final Focus Test Beam) 実験にて 70 nm のビームサイズを測ることに成功している。 本研究室では今回 ATF2 で達成される予定の 37 nm のビームサイズを測定するため、 光学系を新規に設計し、 nm レベルの安定度を得るためレーザー干渉縞の安定化機構の開発など数々の改良を行ってきた。

ATF2 ビームラインへの装置の設置は 2008 年に終了し、 ビームとの衝突実験を開始した。2009 年 3 月のビームテストでは電子ビームとレーザー光の衝突によるコンプトン散乱光子の検出に成功しており、引き続きレーザー干渉縞での衝突を目指している。

新竹モニタに用いる γ 線検出器の性能評価

加速器のビームライン上には、加速された電子と加速管の壁との散乱による γ 線が大量に発生している。新竹モニタ用の γ 線検出器には、信号 γ 線とこれらのバックグラウンドを分離する能力が要求される。そのため、検出器のデザインとして多層構造の CsI(Tl) シンチレータが採用された。MeV 以上の高いエネルギーを持つ粒子はシンチレータ内で電磁シャワーを起こし、エネルギーを損失する。コンプトン散乱による信号 γ 線は、29MeV に鋭いエンドピークを

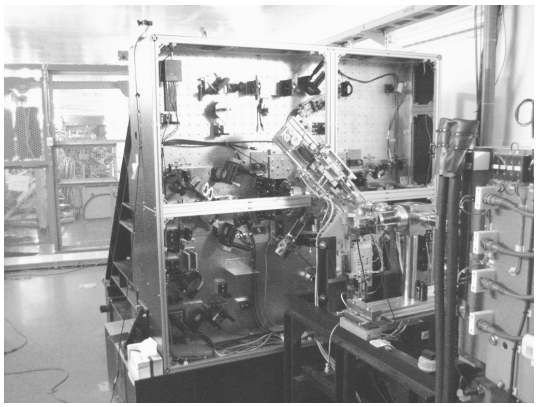

図 2.2.8: レーザー干渉光学系のための光学定盤

持つ。それに対して加速器からのバックグラウンドでは制動放射によるものが支配的になり、ATF2 電子ビームのエネルギー 1.28GeV まで広がった分布を持つ。エネルギー損失のピーク位置は粒子のエネルギーの対数に比例し、相対的に低いエネルギーを持つ信号 γ 線はバックグラウンドより小さなシャワー発展を起こすことになる。この性質を利用して、多層構造にすることで検出器内部でのシャワー発展をモニターし、各層でのエネルギー損失のヒストグラムを信号 γ 線とバックグラウンドの重ね合わせとしてフィットする。2009 年 3 月のビームテストでは、このようなフィッティングによる解析でレーザーコンプトン光子の検出に成功し、多層構造にしたことによる光子数分解能の向上が実証された。今後は干渉縞を使ったビームサイズ測定へ向けて、検出器の集光率の長期的な変化をモニターするキャリブレーションシステムなどをアップグレードする。

2.2.2 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 2.2.2) が行われた。BEPC のビームエネルギーは 1.5 GeV から 2.8 GeV である。

BEPC は c-クオークと 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 7.8×106、 BES-II 実験にて 5.77×107 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 $10^{33}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ 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 実験が計画されている。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と期待される。

本研究室では、 BES-III 実験に向け新たな TOF

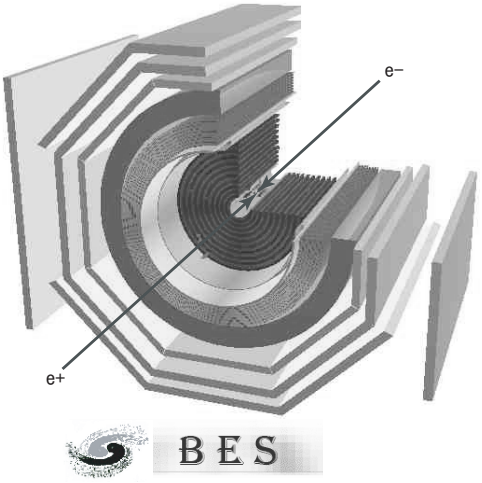

図 2.2.9: BES II detector

システムの構築を IHEP、USTC とともに担当してきた。 BES-III では、 $\tau \to \mu\gamma$ 稀崩壊の探索などを行う予定である。 当面は、 BES-III を用いての実験を行うとともに BES-II での J/ψ からのバリオン対の生成を研究している。

解析

Bell 不等式を検証する実験は、主に光子や非相対論的な電子に対して行われており、不安定な素粒子に対する実験はこれまでほとんど行われてこなかった。N.A.Törnqvist によって、$J/\psi \to \Lambda\overline{\Lambda}$ を用いて、$\Lambda\overline{\Lambda}$ 間のスピン相関に対する Bell 不等式を検証する実験のアイデアが提唱された。Λ は weakly decay によって、$\Lambda \to p\pi^-$ と崩壊する。崩壊によって生成された粒子の放出される方向は Λ のスピンの方向に依存するため、これらの粒子の角度を測定することで、$\Lambda\overline{\Lambda}$ 間のスピン相関を測定することができる。

この崩壊モードを用いた検証実験が DM2 Collaboration によって行われた。しかし、得られた $\Lambda\overline{\Lambda}$ の event 数が 1077 event と少なく、検証に十分な統計が得られていない。また、S.P.Baranov によって検証に使用された Bell 不等式に用いられている座標系の取り方に不備があることが指摘されている。検証に使用された不等式では、2 つの異なる粒子のスピンを同一のベクトルに射影することを仮定しており、2 粒子が異なる座標系に属している場合、同一という意味が明瞭ではない。

本研究では、以下の式で表される CHSH 不等式の評価を行う。

$$|\langle cos\theta_{1,a} cos\theta_{2,b}\rangle + \langle cos\theta_{1,c} cos\theta_{2,b}\rangle +$$

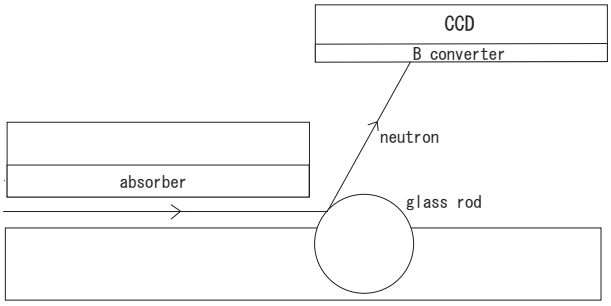

図 2.2.10: 実験セットアップ概念図

$$\langle cos\theta_{1,a} cos\theta_{2,d}\rangle - \langle cos\theta_{1,c} cos\theta_{2,d}\rangle| \leq \frac{\alpha_\Lambda \alpha_{\overline{\Lambda}}}{9}$$

$\theta_{1,a}$、$\theta_{1,c}$ は guide vector **a**、**c** と p(π^-) の運動量とのなす角度、$\theta_{2,b}$、$\theta_{2,d}$ は guide vector **b**、**d** と $\overline{p}(\pi^+)$ の運動量とのなす角度である。**a**、**c** は Λ の静止系、**b**、**d** は $\overline{\Lambda}$ の静止系で定義されたベクトルであるため、前述のような不明瞭さは無い。

物理解析に使用するデータは、BES-II 実験で得られた J/ψ から $\Lambda\overline{\Lambda}$ への崩壊モードを用いる。BES-II 実験で得られた J/ψ の event 数は、5.7 $\times 10^7$ event であり、DM2 で得られた event 数を大きく上回るため、DM2 より統計精度の高い検証を行うことが可能である。

2.2.3 UCN 実験

堅い床の上に超冷中性子を置いた系を考える。 超冷中性子は物質の表面で全反射し、また、 運動エネルギーが小さいので重力場に束縛される。 量子力学によれば、 このようにポテンシャル中に閉じこめられた物体のエネルギーは離散化する。 このとき超冷中性子の存在確率分布は非一様となり、 超冷中性子は局在する。 地表の重力ではその存在確率の濃淡のスケールは 10 μm 程度と計算できる。 この分布を精度よく測ることがこの実験の目標である。 実測された存在確率分布が量子力学の予言と食い違った場合、到達距離が 10 μm 程度の未知相互作用の存在を示唆している可能性がある。

この、 高さ方向に局在した超冷中性子の分布を精度良く測定する実験を進めている。10 μm 程度の分布を測定する必要があるので、 この分布を拡大する中性子光学系と、 位置分解能に優れる CCD 検出器を組み合わせた装置を考案した。2008 年度までに 装置は完成させ測定の準備を終えた。2009 年度に実際に超冷中性子の高さ分布を測る実験が実施される。

UCN 実験-装置開発-

超冷中性子の重力による量子化を検出するための測定器を開発している。

まず、上部に吸収体を付けたスリットに超冷中性子を通す。高さ方向に大きなエネルギーを持つ中性子はスリット上部の吸収体で吸収され、スリットを通り抜けるのは十分に小さなエネルギーを持つ中性子のみである。この中性子は高さ方向に束縛状態を形成する。その典型的な高さは 10μm 程である。この分布を精確に測定するため以下のような装置の研究を進めている。

高さ方向の分布を拡大する中性子光学系として円筒を凸面鏡として利用した拡大装置を考案した。超冷中性子の固体表面上で全反射するという特性を利用して円筒の曲率を利用し、中性子の分布を拡大する。

超冷中性子の観測装置としては位置分解能に優れる CCD を用いる。中性子は電荷を持たないのでこのままでは CCD で検出できない。そこで CCD 上に ^{10}B の中性子コンバータ膜を CCD 表面に蒸着し、中性子とコンバータとの核反応によって生成される荷電粒子を CCD で検出することにより中性子の位置を知ることができる。これまでの研究により、このコンバータ膜つき CCD の開発に成功した。開発した中性子検出器の位置分解能は約 3μm であることが確かめられた。

この拡大機構と CCD 検出器を組合わせることにより、スリット端部での中性子の高さ方向の分布を 1μm 以下の精度で測定できるような装置を開発した。

2.2.4 LHC での物理解析

我々が長年探索し続けてきたヒッグス粒子や超対称性粒子を発見出来る時代が迫っている。LHC は CERN の世界最高エネルギーの陽子陽子衝突の加速器である。 2009 年に重心系エネルギー 10 TeV での実験が開始される。 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 検出器におけるカロリメータのコミッショニング及び Missing E_T の研究

宇宙線データとシングルビームのデータを用いた、ATLAS カロリメータのコミッショニングに参加した。液体アルゴンカロリメータ（電磁カロリメータとエンドキャップ部のハドロンカロリメータ）とタイルカロリメータ（バレル部のハドロンカロリメータ）の両グループに参加し、コントロールルームシフトからコミッショニングデータの解析など幅広く貢献した。超対称性粒子や余剰次元などの新物理探索の鍵となる、消失横運動量やジェットは、カロリメータのホットチャンネルや、宇宙線、ビームハローミューオンからも影響を受け得る。これらのバックグラウンドは、新物理現象の探索の妨げとなるため、その影響を理解し、除去することが必要不可欠である。そのために、実データを用いて、電子ノイズを測定、ホットチャンネルの影響の評価を行い、各チャンネル・カロリメータセル、カロリメータクラスタ、ジェット、消失横運動量の再構成に至る一連の流れを、コミッショニングデータを用いて研究した。電磁カロリメータとハドロンカロリメータのエネルギー比や、ジェットを構成するカロリメータクラスターの数、ジェットに対応するトラックの情報、カロリメータの時間情報などを用いて、上述したビーム衝突に由来しないバックグラウンドを除去する方法を開発した。これらの成果を、国際会議で発表した。

＜報文＞

(原著論文)

[1] OPAL Collaboration, G.Abbiendi *et al.* : “Search for Charged Higgs Boson in e+e- Collisions at $\sqrt{s} = 189$-209 GeV” , The European Physical Journal C (2008), arXiv:0812.0267

[2] OPAL Collaboration, G.Abbiendi *et al.* : “Measurement of α_s with Radiative Hadronic Events” , The European Physical Journal C 53 (2008) 21

[3] OPAL Collaboration, G.Abbiendi *et al.* : “Search for Dirac Magnetic Monopole in e+e- Collisions with the OPAL detector at LEP2” , The European Physical Journal C 53 (2008) 21

[4] The ATLAS Collaboration : “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider” , Journal of Instrumentation (2008) 3 S08003

[5] The ATLAS Collaboration : “Expected Performance of the ATLAS Experiment - Detector, Trigger and Physics” , CERN Report, CERN-OPEN-2009-020 (2009) 1

[6] T. Sanuki, S. Komamiya, S. Kawasaki, S. Sonoda : “Proposal for measuring the quantum states of neutrons in the gravitational field with CCD-based pixel sensor” , Nuclear Instruments and methods in Physics Research A 600 (2009) 657

(会議抄録)

[7] M.Oroku *et al.* : “Gamma Detector for the Shintake Monitor at ATF2, the ILC Test Beam Facility” , IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (2008) 2330

[8] T.Yamanaka *et al.* : “Expected Performance of Shintake Monitor (IP Beam SizeMonitor at ATF2)” , IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (2008) 3308

[9] Hideki Okawa on behalf of the ATLAS Collaboration : “Commissioning of the ATLAS Tile Calorimeter with Cosmic Ray and Single Beam Data” , IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (2008) 3394

(国内雑誌)

(学位論文)

[10] 大録誠広：「レーザー干渉型ビームサイズモニターのためのコンプトンガンマ線検出器の性能評価」修士論文 (東京大学大学院理学系研究科)、 2009 年 3 月

[11] 山中隆志：「レーザー干渉型ビームサイズモニタの光学系の開発」修士論文 (東京大学大学院理学系研究科)、 2009 年 3 月

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[12] T. Yamanaka : “Updates on Shintake monitor Status” , Nanobeam 2008 Workshop/6th ATF2 project meeting, Novosivirsk, Russia, May 2008

[13] H. Okawa : “Calorimeter Commissioning with Cosmic Rays Cells, Cluster, Jets & Missing E_T ” , ATLAS Performance and Physics Workshop, CERN, Switzerland, Aug. 2008

[14] H. Okawa : “Jets & Missing ET Studies with Cosmic Ray & Single Beam Data” , ATLAS Jet/EtMiss Reconstruction Performance Workshop, CERN, Switzerland, Sep. 2008

[15] H. Okawa : “Jets & Missing ET in Cosmic Ray and Single Beam Data” , ATLAS Performance and Physics Workshop, CERN, Switzerland, Oct. 2008

[16] T.Yamanaka : “Expected Performance of Shintake Monitor (IP Beam Size Monitor at ATF2)” , N58-7, IEEE NSS/MIC/RTSD 2008, Dresden, Germany, Oct. 2008

[17] M.Oroku : “Gamma Detector for the Shintake Monitor at ATF2, the ILC Test Beam Facility” , IEEE NSS/MIC/RTSD 2008, Dresden, Germany ,Oct. 2008

[18] H. Okawa on behalf of the ATLAS Collaboration : “Commissioning of the ATLAS Tile Calorimeter with Cosmic Ray and Single Beam Data” , IEEE Nuclear Science Symposium, Dresden, Germany, Oct. 2008

[19] H. Okawa : “Jets & Missing ET Quality Studies with Cosmic Ray & Single Beam Data” , ATLAS Performance and Physics Workshop, CERN, Switzerland, Nov. 2008

[20] Y. Kamiya, M. Oroku, T. Yamanaka, S. Komamiya, T. Tauchi, N. Terunuma, Y. Honda, T. Kume : “Current Status of the Shintake-Monitor” , 7th ATF2 Project Meeting, KEK, Japan, Dec. 2008

[21] H. Okawa on behalf of the ATLAS Collaboration : “Determination of background from W/Z and top. What do we need to find SUSY?” , The LHC and Dark Matter Workshop, Ann Arbor, USA, Jan. 2009

招待講演

(国内会議)

一般講演

[22] 川崎　真介：「重力場による超冷中性子の量子化状態観測 -ILL での超冷中性子照射試験について-」、日本物理学会 (2008 年 9 月) 、 山形大学 、 山形

[23] 市川豪：「重力場による超冷中性子の量子状態観測 - 冷中性子を用いた測定器の性能評価」、日本物理学会 (2008 年 9 月) 、 山形大学 、 山形

[24] 川崎　真介：「重力による量子力学的効果の検証実験計画」、中性子制御デバイスとその応用　(2009 年 2 月) 、 京都大学原子炉実験所 、 大阪

[25] 山中隆志：「新竹モニタによる ATF2 衝突点ビームサイズ測定：レーザー干渉光学系」、日本物理学会 (2009 年 3 月) 、 立教大学 、 東京

[26] 大録誠広：「ATF2 による ATF2 衝突点ビームサイズ測定: - 多層構造 γ 線検出器を用いたバックグラウンド分離 - 」、日本物理学会 (2009 年 3 月) 、 立教大学 、 東京

[27] 市川豪：「重力に束縛された超冷中性子の量子状態観測実験 - ILL での実験に向けて」、日本物理学会 (2009 年 3 月) 、 立教大学 、 東京

招待講演

[28] 駒宮幸男：「素粒子物理学の展開」、日本のノーベル賞科学者展 (2008 年 10 月) 、科学技術館 、 東京

[29] 駒宮幸男：「素粒子物理の謎の扉を開く国際リニアコライダー」、先端加速器科学技術推進シンポジウム (2009 年 2 月) 、 赤坂プリンスホテル 、東京

[30] 駒宮幸男：「ヒッグス粒子と超対称粒子の実験的な話」、日本物理学会・レビューセッション (2009 年 3 月) 、 立教大学 、 東京

(セミナー)

[31] 駒宮幸男：「素粒子と宇宙」、(2008 年 4 月) 、 静岡県立静岡北高等学校 、 静岡

[32] 駒宮幸男：「ILC を巡る素粒子物理学実験の展望」、(2008 年 6 月) 、 大阪大学理学研究科 、 大阪

[33] 駒宮幸男：「素粒子実験で解明する宇宙の謎」、(2008 年 10 月) 、 大阪大学理学研究科 、 大阪

2.3 蓑輪 研究室

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

2.3.1 Sumico, 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。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。

我々は太陽由来のアクシオンを捉えるために、高エネルギー加速器研究機構の山本明教授と共同で中心磁場 4 T、長さ 2.3 m の超伝導コイルと PIN フォトダイオード X 線検出器を備え、仰角 $\pm 28°$、方位角はほぼ全域において天体を追尾することのできるアクシオンヘリオスコープ (Tokyo Axion Helioscope) を開発した。Sumico と名づけられたこの装置は、太陽起源のアクシオンを磁場領域で光子へと変換 (逆プリマコフ変換) し、その光子を PIN フォトダイオードで捉えるものである。これまでの観測ではアクシオン由来と考えられる有意な事象は捉えられていないが、アクシオンの質量として $m_a < 0.27$ eV、0.84 eV $< m_a < 1.00$ eV という範囲でアクシオンと光子の結合定数に対して $g_{a\gamma\gamma} < 5.6$–13.4×10^{-10} GeV^{-1} という上限値を得ることに成功している (図 2.3.11)。

昨年はまず、2007 年末から始めた質量 1 eV 付近の太陽アクシオン探索を 2008 年 4 月まで行った。この実験で得られた結合定数に対する上限値は、現在この質量領域において直接検出実験で得られる値としては最も小さく、また様々に予想されているアクシオン模型の一部に対して世界で初めて制限をつけたものとなっている。その後は実験装置の向く角度

を読み取るロータリーエンコーダーや、超伝導磁石を冷却する GM 冷凍機など、様々な装置の故障が相次いだ為、実験の中断を余儀なくされた。これら装置の修理は完了し、現在は不具合を起こした PIN フォトダイオードの交換と動作試験を行っている。その他、質量 1 eV 以上の太陽アクシオン探索を行うべく、超伝導磁石クエンチ時の安全対策を目的とした安全弁の配管改修を行っており、まもなく探索実験を再開する予定である。

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(CERN Axion Solar Telescope) グループも 2002 年より探索実験を始めており、我々の後にアクシオ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 1.1 eV 以上の質量を持つ太陽アクシオ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オン探索を計画しており、Sumico 実験の強みとなっている。

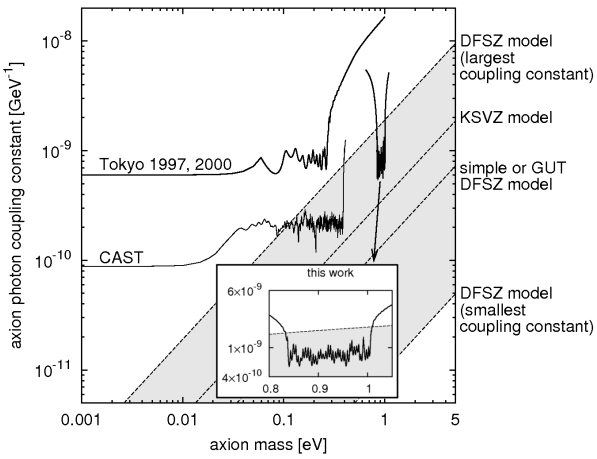

図 2.3.11: 太陽アクシオンに対する制限

2.3.2 Hidden photon 探索実験の検討

Hidden photon は素粒子物理学の諸問題を解決するための標準模型の拡張において存在が予言されている粒子である。Hidden photon は通常の物質とは直接相互作用しないが、真空領域の長さ (l)、hidden photon の質量 ($m_{\gamma'}$)、hidden photon と光子の混合角 (χ)、エネルギー (ω) に依存したある確率で光子に転換される性質を持つ。Hidden photon は存在すればクーロン力の逆二乗則、星の進化、初期宇宙の進化等に対して修正が加えられることになるが、観測結果と矛盾しないことを要請することにより χ - $m_{\gamma'}$ plot に対して制限がつけられてきた。また、光子が hidden photon に転換し、壁を通過した後光子に再転換されるイベントを探索する実験、CERN の CAST グループによる太陽由来の keV 領域のエネルギーの hidden photon 探索実験等により、χ - $m_{\gamma'}$ plot に対して制限がつけられてきた (図 2.3.12 参照)。

我々は、太陽由来のエネルギー数 eV の hidden photon の探索実験を検討している。測定を行うには太陽を追尾する必要があるが、既存の太陽アクシオン探索用の装置に新たに開発する hidden photon 探索用装置を取り付けて測定する予定である (図 2.3.13 参照)。Hidden photon 探索用装置は hidden photon が光子に転換する真空領域を形成するチェンバー、転換光子を集光する鏡、そして光検出器等の部品から成る。これらの部品の仕様は測定結果として描かれる χ - $m_{\gamma'}$ exclusion plot に大きく影響するので、装置の設計を行うにあたり実験によって得られる結果を見積っておく必要がある。そこで、装置の仕様を様々に変えて、現在製作可能な装置の最適な見積りを行った (図 2.3.12 参照)。今後、この見積りを元に実験装置を開発し、測定を行う予定である。

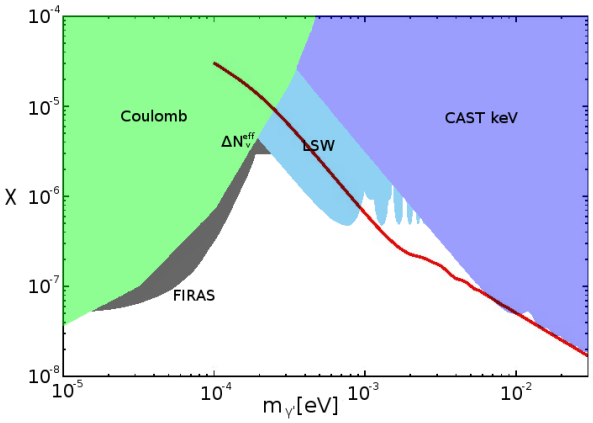

図 2.3.12: Exclusion plot の見積り結果 (太実線)。長さ $L = 1$m, 直径 $D = 50$cm の円筒状の真空領域、光検出器に R329-02(Hamamatsu) 使用, 測定時間 $t = 10^6$s を仮定している。

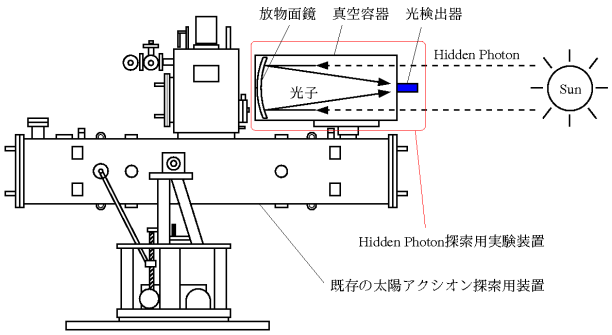

図 2.3.13: Hidden photon 探索の実験装置の概略図。

2.3.3 レーザー共鳴イオン化質量分析法を用いた半導体ウエハ表面汚染評価技術の開発

ここ近年の産業技術の発展と並行して、生体・材料分析や環境科学など幅広い分野で微量物質の評価技術の重要性が注目されてきている。この中で、半導体デバイスの高密度化・微細化とともに必要性が増してきている半導体ウエハ表面の極微量な不純物に対する汚染評価に着目し、レーザー共鳴イオン化質量分析法 (RIMS: Resonance Ionization Mass Spectrometry) を用いた新しい汚染評価手法を提案し、技術開発を行っている。RIMS はレーザー共鳴イオン化による元素の選択と質量分析による同位体識別をセットにした微量元素分析手法であり、原子番号 Z と質量数 A を決定することで特定の原子のみを検出するものである。

既存のウエハ表面汚染評価手法として、主に全反射蛍光 X 線分析 (TXRF) と誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) が挙げられ、微量物質の検出限界という点では後者の ICP-MS が優れている。しかし、典型的な ICP-MS 分析計では質量分析しか行わないため、同量体や等質量の分子による干渉が検出限界に大きな影響を与えていると考えられる。

RIMS による汚染評価はウエハ表面から汚染物質を回収する前処理、得られた試料の真空中への導入、RIMS による検出の 3 段階に分けられる。前処理及び質量分析を行う点で ICP-MS と共通点も多いが、試料のイオン化にレーザーを用いて元素の選択を行うとともに測定系の真空度を低く抑えることでバックグラウンドを大幅に減らし、検出限界改善につながると考えている。

本年度は RIMS の有用性を実証するため、代表的な金属不純物としてカリウムを取り上げて RIMS による微量分析を行った。レーザー共鳴励起用の波長 405 nm 外部共振器型半導体レーザーと励起準位からのイオン化効率改善のための波長 808 nm 高出力レーザー (ファイバー出力で約 50W) を用いて共鳴イオン化を行い、質量分析には四重極質量分析計 (QMS) を用いた。試料に炭酸カリウム (K_2CO_3) を使い、700−900 度程度まで加熱して得られるカリウム原子ビームに対して、(図 2.3.14) に示す測定セットアップのもと RIMS 検出を行い、検出効率 $\sim 10^{-6}$ を得た。RIMS の特徴としてバックグラウンドを大幅に低減できているため、既存の手法と比較して半導体ウエハの表面汚染評価への有用性が大きいと判断した。分析対象によって外部共振器型半導体レーザーの波長、もしくは波長可変幅の広い OPO レーザー等を使い分けることで、あらゆる元素の汚染評価に対応できると考えられる。RIMS を用いた表面汚染評価は、国際リニアコライダー (ILC) 用ニオブ超伝導空洞の加速電場向上のための表面不純物分析にも有効と考えられる。

また、半導体レーザーの持つ線幅の狭い特徴を利用して、共鳴励起用の 405 nm レーザー周波数をスキャンさせることで、カリウム各同位体 $4s_{1/2}$ 基底状態の超微細構造を観測した (図 2.3.15)。図 2.3.15 で

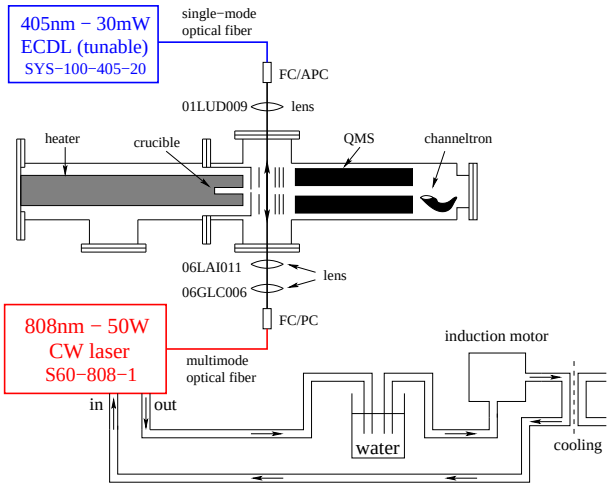

図 2.3.14: RIMS による微量カリウム原子検出の測定セットアップ

各同位体の共鳴イオン化シグナルの相対的な周波数のずれが 405 nm 線における同位体シフトを示している。超微細構造の分裂幅に文献値を用いて、405 nm 線における ^{40}K, ^{41}K, 同位体シフト 207 ± 13 MHz, 451 ± 10 MHz が得られた。

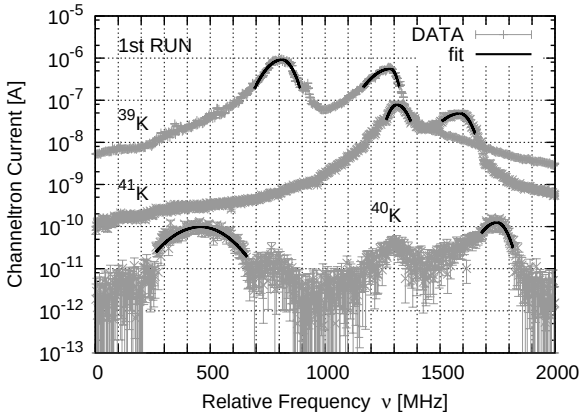

図 2.3.15: 405 nm レーザー周波数スキャンによるカリウム各同位体 $4s_{1/2}$ 基底状態の超微細構造の観測 (一例)

今後は、今回製作したレーザー共鳴イオン化質量分析器をもとにして、前処理からの一連の流れにより RIMS による汚染評価の有効性をさらに検証していく予定である。この開発研究は、将来的には微量元素分析によるニュートリノ検出器としての使用を目指したものである。

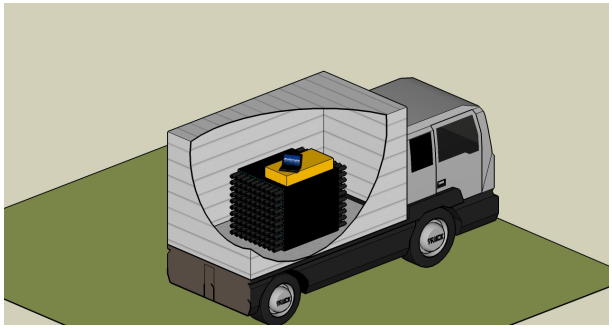

図 2.3.16: 可搬型ニュートリノ検出器。トラックで移動し、原子炉建屋の外に駐車してそのまま計測する。

2.3.4 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を開発している。このニュートリノ検出器は原子炉中で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ーすることを目的としている（図 2.3.16）。

現在、世界中に 430 以上の発電用原子炉が点在しており、主に ^{235}U の核分裂反応の連鎖によってエネルギーを得ている。この核分裂反応によって生じた娘核の多くは不安定核であり β 崩壊により崩壊するが、β 崩壊は反電子ニュートリノの放出を伴うため、結果として原子炉から大量の反電子ニュートリノが放出されることになる。この放出される反電子ニュートリノの量を測定することにより、原子炉の出力をモニターすることができると考えられる。また、^{235}U の燃焼と ^{239}Pu の燃焼によるニュートリノのエネルギースペクトルが異なることを利用すれば、原子炉の燃料構成比を原子炉に干渉することなく測定できると考えている。

この結果期待される応用の一つとして、IAEA(国際原子力機関) による原子力活動の監視が挙げられる。一例として、原子炉の運転によりプルトニウムが生成されるが、プルトニウムは核兵器の原料となりうるため、原子炉中でどの程度の量のプルトニウムが生成されたかというのは核査察活動における大きな関心事の一つである。現在、IAEA は原子炉内部に測定装置を設置し、原子炉に大きく干渉する形でその量を測定しているが、ニュートリノ検出器を用いると、原子炉の外部から熱出力や燃料構成比を見積り、そこからプルトニウム生成量を見積もることができると考えられる。ニュートリノは遮蔽がほぼ不可能であり、原子炉以外の代用ニュートリノ源を用意する事が困難であるため、破壊等のあからさまな方法以外で監視活動を妨害できないという点も小型反電子ニュートリノ検出器が、原子力活動の監視手法として有力視されている理由の一つでもある。

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、ガドリニウム含有膜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、シンチレータ中を最大 200μs 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できる。

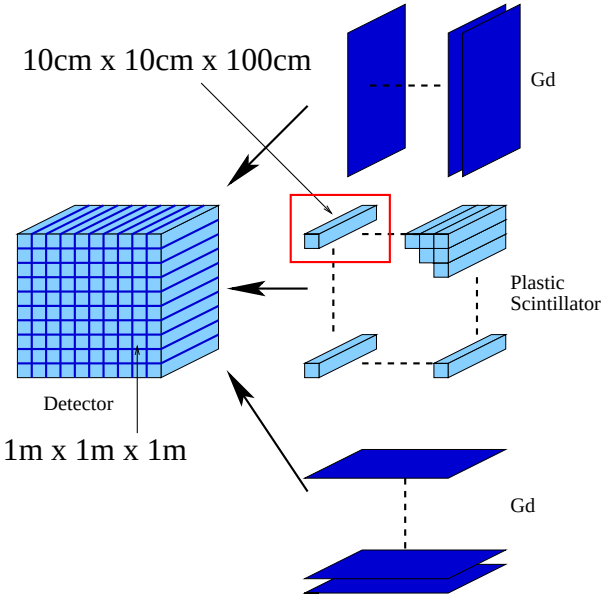

図 2.3.17: 検出器のおおまかな構造

検出器は、おおまかには図 2.3.17 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 トンと比較的小型であり、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。通常、ニュートリノ検出器はニュートリノの反応断面積の小ささから、かなり大型のものが作られるが、上述の様に原子力発電所敷地内に持ち込み、原子炉炉心近傍 (数十 m) に設置することにより、小型のニュートリノ検出器でも十分な量のニュートリノが検出できると見積もっている。我々の計画している検出器では熱出力 3GWth の原子炉炉心から 25m の地点で、1 日当たり約 300 イベントが検出できると考えている。

しかし、この検出器を遮蔽なしで地上に設置した場合、宇宙線 μ 粒子、環境中性子線、環境 γ 線等のバックグラウンド信号も検出されてしまうため、約 6 桁の精度でのイベントセレクションが必要となる。本年度は、これらバックグラウンドの見積り、および、原子核反応シミュレータ Geant4 を用いた検出

器シミュレーションとイベントセレクション方式の検討を行った。

また、検出器に使用するガドリニウムの形態に関しても考察し、酸化ガドリニウム含有塗料塗布済みシートという製品が市販されていたので、このシートが実験に利用できるかどうかを確認するために、ガドリニウムシートを用いた中性子検出実験を行い、市販のガドリニウム含有シートを我々の検出器に使用できるという結論を得た。

2.3.5 暗黒物質検出器開発

以前我々は、CaF_2 シンチレータを用いたニュートラリーノ探索実験を行っていた。このシンチレータは、ニュートラリーノと相互作用する核子として、原子核中最大のスピンを持つフッ素-19 を含んでおり、スピンに依存した (SD、spin dependent) 相互作用に大きな感度を持つ。我々が 2005 年に出した散乱断面積に対する制限は、当時の世界最高水準であり、今後の性能向上の結果次第で、さらに高感度の探索を狙える可能性を持っている。

現在研究しているのは、検出器の識別によるバックグラウンド除去である。ニュートラリーノ由来のシグナルの見えない現状では、バックグラウンドを一桁下げることは、制限を一桁きつくすることを意味している。我々は、2005 年の実験のバックグラウンドは、検出器内外からの γ 線であると推測し、γ 線による電子反跳現象と、ニュートラリーノなどによる原子核反跳現象を識別する方法を、模索している。

識別手法として考えているのは、波形識別と波長識別の二つである。波形識別はシンチレーション光の減衰時間を用いて識別する方法であり、他のグループでも、さかんに行われている手法である。一方、波長識別はシンチレーションの波長によって識別する方法であり、他のグループでは、まだほとんど研究されていない。

これらの識別手法を検証するためには、シンチレータに γ 線と中性子線を別々に入射させて比較しなければならない。しかし、通常の中性子線源は同時に γ 線も発生させているため、検証する識別法以外の方法でイベントセレクションを行う必要がある。我々の研究室では、TOF を用いたイベントセレクションの方法を確立した。これにより、実験室レベルでの実験で中性子によるシンチレーションの研究が可能となった。現在この手法を用いて、低エネルギー領域 (数十 keVee) での波形識別と波長識別の検証作業を進めている。

2.3.6 量子ドットを用いた液体シンチレータの開発

三次元井戸型ポテンシャルに電子を閉じ込めたものを量子ドットと呼び、近年、物性分野や生物・化学分野で盛んに研究・利用されている。これを応用した CdSe/ZnS 半導体ナノ結晶は、蛍光物質の役割を持っており、液体シンチレータへの応用が期待される。

蛍光物質としての半導体ナノ結晶はすでに一般的に市販されている。本研究で用いているものは、Evident Technologies 社から販売されている Core-Shell Evidots という商品である。Cd と Se から構成された核に、Zn と S の殻をつけたようなもので、一つ一つは直径数 nm の擬似原子核のような恰好をしている。この内部の電子は、井戸型ポテンシャルにより離散的なエネルギー準位を持っているため、励起後、脱励起時に単色の光を出す。放出する光子の波長は、半導体ナノ結晶の直径に依存しており、Core-Shell Evidots では 490〜620nm で 20nm おきに販売されている。

我々は、この半導体ナノ結晶をトルエンに溶解させ、放射線検出器 (液体シンチレータ) としての利用を考えた。発光の原理は通常の液体シンチレータと同様で、まず入射した荷電粒子によりベンゼン環を持つトルエンが励起され、その励起エネルギーが半導体ナノ結晶に伝播し、半導体ナノ結晶が脱励起するときにシンチレーション光が発生する。実験では、^{60}Co の γ 線による発光が観測でき、半導体ナノ結晶の濃度を濃くすることによって発光量が増大する現象も確認できた。

今後は、現在問題となっている自己吸収を低減させるために、二次蛍光物質の使用を考えている。最終的には既存の液体シンチレータと発光量を比較し、さらに発光量の多いシンチレータの開発を目標としている。

＜報文＞

(原著論文)

[1] M. Minowa, Y. Inoue, Y. Akimoto, R. Ohta, T. Mizumoto, A. Yamamoto: Tokyo Axion Helioscope, RESCEU-53/08, arXiv:0809.0596v1 [astro-ph]

[2] Y. Inoue, Y. Akimoto, R. Ohta, T. Mizumoto, A. Yamamoto, M. Minowa: Search for solar axions with mass around 1 eV using coherent conversion of axions into photons, RESCEU-55/08, arXiv:0806.2230v2 [astro-ph], Physics Letters B 668 (2008) 93–97.

[3] Yoshihiro Iwata, Yoshizumi Inoue, Makoto Minowa: Trace Element Analysis of Potassium by Resonance Ionization Mass Spectrometry, RESCEU-56/08, arXiv:0808.4020v2 [physics.atom-ph]

(会議抄録)

[4] Y. Inoue, M. Minowa, Y. Akimoto, R. Ota, T. Mizumoto, A. Yamamoto: Status report of the Tokyo axion helioscope experiment, Tenth International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2007), RECEU-54/08, arXiv:0806.1471 [astro-ph], J. Phys.: Conf. Ser. 120 (2008) 042014.

(学位論文)

[5] 岩田圭弘: Resonance Ionization Mass Spectrometry and Its Application to Related Fields、平成 21 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.

[6] 小栗秀悟: 暗黒物質直接探索に向けてのシンチレータの研究、平成 21 年 3 月修士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[7] M. Minowa, Y. Inoue, Y. Akimoto, R. Ohta, T. Mizumoto, A. Yamamoto: Tokyo axion helioscope, 4th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs, DESY, Hamburg Site /Germany on 18–21 June 2008.

[8] Y. Inoue, M. Minowa, Y. Akimoto, R. Ohta, T. Mizumoto, A. Yamamoto: Tokyo axion helioscope, idm2008 — Identification of Dark Matter 2008, Stockholm, Sweden, 18–22 August 2008.

(国内会議)

一般講演

[9] 蓑輪 眞: 暗黒物質・太陽アクシオン実験、「第 8 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、浅虫温泉 2008 年 8 月 31 日.

[10] 小栗秀悟: CaF_2 シンチレータでの波長識別の暗黒物質探索への応用、日本物理学会秋季大会、山形大学 2008 年 9 月 20 日.

[11] 太田良介: 第三期太陽アクシオン探索、日本物理学会 2008 年秋季大会、山形大学 2008 年 9 月 20 日.

[12] 水本哲矢: アクシオン探索実験について 2、日本物理学会 2008 年秋季大会、山形大学 2008 年 9 月 20 日.

[13] 黒田康浩: 小型反電子ニュートリノ検出器のためのガドリニウムを用いた中性子検出の評価、日本物理学会 2008 年秋季大会、山形大学 2008 年 9 月 21 日.

[14] 中田量子: 小型反電子ニュートリノ検出器のための回路系の設計、日本物理学会 2008 年秋季大会、山形大学 2008 年 9 月 21 日.

[15] 岩田圭弘: レーザー共鳴イオン化質量分析法による半導体ウエハ表面の新しい汚染評価手法の開発、日本物理学会 2008 年秋季大会、岩手大学 2008 年 9 月 22 日.

[16] 黒田康浩: 小型反電子ニュートリノ検出器のためのシミュレーション研究とセレクションクライテリアの検討、日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学 2009 年 3 月 27 日.

[17] 小栗秀悟: 量子ドットによる発光を用いた素粒子放射線検出器の開発、日本物理学会年次大会、立教大学 2009 年 3 月 27 日.

[18] 岩田圭弘: レーザー共鳴イオン化質量分析法を用いたカリウム微量分析とその応用、日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学 2009 年 3 月 30 日.

[19] 水本哲矢: Hidden photon 探索実験検出器の開発、日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学 2009 年 3 月 30 日.

[20] 太田良介: 2eV 太陽アクシオン探索に向けてのアクシオン望遠鏡改修、日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学 2009 年 3 月 30 日.

2.4 相原研究室

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)、茨城県東海村で建設中の 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)、新型光検出器 (HPD) の開発、さらに、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、などを行っている。本年度は、岩崎昌子講師が、"高エネルギー素粒子物理学実験によるフレーバー物理の研究 "により、第 10 回 (平成 19 年度) 守田科学研究奨励賞を、修士課程 2 年生の宮武広直君が、IEEE-NSS シンポジウムの学生・ポスター セッション で、"Prototype Readout Module for Hyper Suprime Cam "により 2008 NPSS Student Paper Awards : NSS Poster Award (Second Place) を、阿部利徳特任助教が、浜松ホトニクス河合克彦博士と共同で、"大口径ハイブリット光検出器の開発 "により第 10 回 (平成 20 年度) 小柴賞を、さらに博士課程 3 年生中浜優さんと宮武広直君が、平成 20 年度理学系研究科研究奨励賞 (博士、修士) を受賞した。

2.4.1 B 中間子のフレーバー変換中性カレント崩壊の精密測定

小林・益川理論がクォークに働く弱い相互作用の CP 非対称の起源であることが明らかになった今、B ファクトリーにおける研究の主題は、CP 非対称現象をプローブとする新しい物理、すなわち小林・益川理論を含む素粒子の標準理論の枠組みに収まらない、より根源的な物理の探索に移りつつある。当研究室は、この新しい物理の探索を、B 中間子崩壊のうち、Flavor Changing Neutral Currents (FCNCs) によって引き起こされる崩壊の精密測定によって行っている。ここで、FCNCs とは、$b \to s\gamma$、$b \to sl^+l^-$(l は e または μ) $b \to sg$(g はグルーオン)、$b \to dg$ などの素過程で表される、クォークの種類 (flavor, フレーバー) が b から s あるいは d に変換する中性カレント反応 (反応の始状態の電荷と、終状態の粒子の電荷の総和が等しく、電荷のネットな流れがない反応)、すなわち、フレーバー変換中性カレントの総称である。

中性カレント崩壊 $b \to sg$ は $B^0 \to \phi K^0_S$ 崩壊を調べることで、その CP 対称性を測定することが出来る。この崩壊モード含む 終状態崩壊過程において、同じ終状態をもつ他の崩壊モードとの干渉効果を正しく取り扱うために、新たに運動学的な量 (ダリッツプロット分布) を組み合わせ、時間依存性を測定し

た。$B^0 \to K^+K^-K^0_S$ 信号モデルのダリッツプロット分布は、中間状態の違いで分布の様子が異なる。この分布の崩壊時間依存性のデータから、各中間状態の CP 非対称性、各崩壊モードの相対的な大きさをあらわすダリッツ振幅、および干渉をあらわすダリッツ位相を含む全 18 パラメータを最尤関数法で同時に決定した。４つの解の可能性があるが、他の物理解析から解の可能性を絞り込み、$b \to sg$ 崩壊の CP 位相を、$\phi_1^{\rm eff} = (32.0^{+8.8}_{-8.3} \pm 1.8 \pm 0.8)^\circ$ と決定することに世界で初めて成功した（1 番目の誤差は統計誤差、2 番目の誤差は 3 番目の誤差を除く系統誤差、3 番目の誤差は、系統誤差のうちダリッツ分布のモデル化の不定性に起因する誤差である）。この結果は標準理論と無矛盾な結果ではあるが、方法論を確立し、今後統計誤差が小さくなるに従い新しい物理現象を探ることが出来ることを示した学術的に非常に重要な結果である。

第 3 世代の b クォークが第 1 世代の d クォークを含む終状態へ崩壊する過程である $b \to dg$ 過程は、b クォークが第 2 世代の s クォークを含む終状態へ崩壊する過程である $b \to sg$ 過程とは異なる CP 位相を持ち、新しい角度から標準理論を超える物理の探索を行うことができる。この $b \to dg$ FCNC プロセスによって引き起こされる崩壊モードである $B^+ \to \bar{K}^{*0}K^+$ 過程の解析を行った。6 億 5 千 7 百万の $B \cdot \bar{B}$ 中間子対を用いて、崩壊過程 $B^+ \to \bar{K}^{*0}(\to K^-\pi^+)K^+$ の解析、つまり B 中間子が 2 つの荷電 K 中間子と π 中間子に崩壊する反応の分岐比を測定した。選別された 48±11 事象 ($B^+ \to \bar{K}^*(892)^0(\to K^-\pi^+)K^+$ と、23±12 事象 ($B^+ \to \bar{K}^*(1430)^0(\to K^-\pi^+)K^+$ を用いて、分岐比を決定した：$Br(B^+ \to \bar{K}^*(892)^0K^+) = [0.68 \pm 0.16(\text{統計誤差}) \pm 0.10(\text{系統誤差})] \times 10^{-5}(4.4\sigma)$、$Br(B^+ \to \bar{K}^*_2(1430)^0K^+) = [0.63 \pm 0.33(\text{統計誤差}) \pm 0.12(\text{系統誤差})(< 1.10)] \times 10^{-5}(1.5\sigma)$。(図 2.4.18)。この結果は標準理論と矛盾しない結果であり、測定精度は世界最高精度である。また、世界で初めて $B^+ \to \bar{K}^*(892)^0K^+$ 事象の evidence を観測した。現在、この崩壊事象での、直接的 CP 非対称度を測定中である。

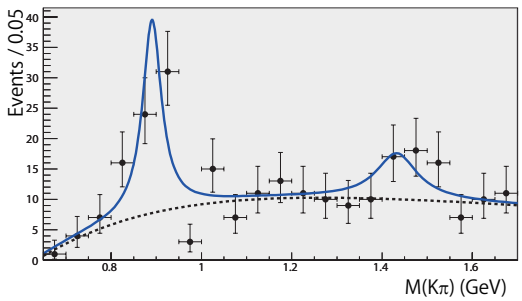

図 2.4.18: $B^+ \to \bar{K}^{*0}(\to K^-\pi^+)K^+$ 信号事象の、$K\pi$ 静止質量分布。

2.4.2 Super-KEKB 計画のための衝突点近傍デザイン

Belle 実験のアップグレード計画として、Super-KEKB 実験計画が推進されている。Super-KEKB では、これまでのルミノシティーをさらに一桁以上増加させて、大量統計による超高精密実験を目指している。このアップグレード計画のような大電流ビームの実験下における、安定した測定器動作を保証するためには、衝突点近傍のデザインが重要である。我々の研究室では、衝突点近傍デザインのために、以下の研究を行っている。

加速器からのバックグランドを理解し、抑制するために、GEANT4 によるビームラインシミュレーションを構築し、Super-KEKB 実験における加速器からのバックグランド研究を行っている。特に、シンクロトロン（SR) 光放射によるバックグランドの影響を見積もり、SR 光の影響から測定器を保護できるように、ビームパイプの形状を最適化した。現在、他のバックグランド源（ビーム・ガス散乱、radiative-BhaBha 散乱、ビームバンチ内散乱）について、シミュレーションを構築中である。

SR 光によるビームイプの発熱計算を行い、当初考えられていた光学では、大量の発熱（4mm の領域に約 1kW) が起こることを示した。この結果をもとに、加速器グループによって、発熱を抑えるための新しい光学パラメータが再構築された。また、ビーム電流通過による、ビームパイプの発熱計算（Higher Order Mode 計算）も進めている。

Super-KEKB では、衝突点でのビームサイズをより小さく絞り込むために、最終 Q 磁石の位置を衝突点近傍へ近づけ、さらに磁石の磁場の強さも、これまで以上に強くする必要がある。従って、加速器コンポーネントが測定器領域へ侵入するため、衝突点近傍にあるビームパイプ、崩壊点検出器と加速器コンポーネントとの組み立て・サポート方法を新たに開発する必要がある。また、最終磁石の磁場が非常に強いため、磁石が生成する電磁力による磁石コンポーネントの反跳の影響を測定器とその構造体で抑え込み、磁石のアライメントを保証し、ビームを衝突点まで正確に輸送させることが重要になる。現在、これらのデザインの検討を行っている。

2.4.3 J-PARC ニュートリノ一次ビームライン用ビームモニターの開発

次世代長基線ニュートリノ振動実験である T2K 実験では、茨城県東海村に新たに建設した J-PARC 実験施設で大強度のミューニュートリノビームを生成し、岐阜県神岡町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、ミューニュートリノ消滅現象の精密測定及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、J－PARC ニュートリノ一次ビームラインで、で 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

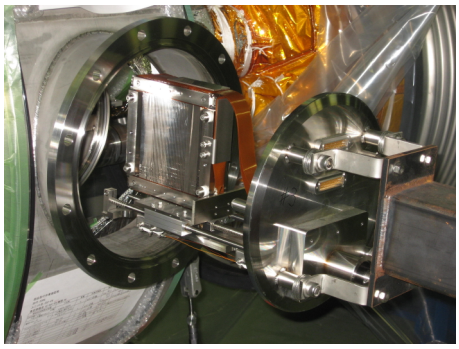

図 2.4.19: 超電導ビームライン部に用いる SSEM

モニター、の製作及び設置を行ってきた。T2K 実験は、2008 年度に各機器の製作・インストール及び各機器間の最終調整を終え、2009 年 4 月よりニュートリノビームのコミッショニングを開始した。

ビームプロファイルモニターはセグメント化した厚さ 5μm のチタン箔を配置し、ビームの通過によって放出される二次電子量のセグメント間の違いを測定することによってビームの拡がりを再構成する Segmented Secondary Emission Monitor (SSEM) を用いる。このモニターはビームと直接接触するため、大きなビームロスおよびモニター自身の劣化をを引き起こす。従って、必要時にのみビーム中心へと移動させるさせるための駆動機構を持たせる必要がある。特に超電導電磁石を用いてビームを神岡方向に約 80 度曲げるビームライン部に用いる SSEM は約 90K 程度まで冷却されるため、駆動機構を低温環境下で動作させる必要がある。この駆動機構の開発を高エネルギー加速器研究機構・機械工作センターおよび低温工学センターと共同でを行い、低温工学センターにて J-PARC 超電導ビームライン部を模擬した装置を用いて低温駆動試験を行った。改良を重ねた結果、78K の低温下における駆動機構の動作に成功し実機製作を行った。この超電導電磁石を用いたビームライン部に用いる 4 台の SSEM を含む全 19 台の SSEM の製作及びインストールを行った。(図 2.4.19) 2009 年 1 月より超電導磁石の冷却が開始され、冷却完了後に駆動機構を遠隔操作で問題無く駆動出来ることを確認した。

一次ビームラインのビーム中心位置の測定のためのビーム位置モニターとして、4 極静電型モニター (ESM) を用いる。このビームモニターはビームダクトの内側に 4 枚の電極板を配置し、ビーム通過時に 4 つそれぞれの電極に誘起される電荷量を違いからビーム中心位置を見積もる。本年度は昨年度に引き続きビーム位置モニターを製作及びインストールを行い、全 21 台のビーム位置モニターのインストールを完了した。ビーム位置モニターのワイヤーを用いた校正および、ケーブルおよび読み出しエレクトロニクスの校正結果から、0.3mm の位置精度でビーム中心位置を測定できることを確認した。

2009 年 4 月 26 日に J-PARC ビームラインメインリングよりニュートリノビームラインへ初めてビームが取り出され、ビームラインのコミッショングが開

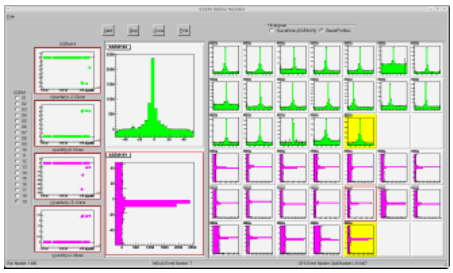

図 2.4.20: 19 台の SSEM で測定されたビームプロファイル

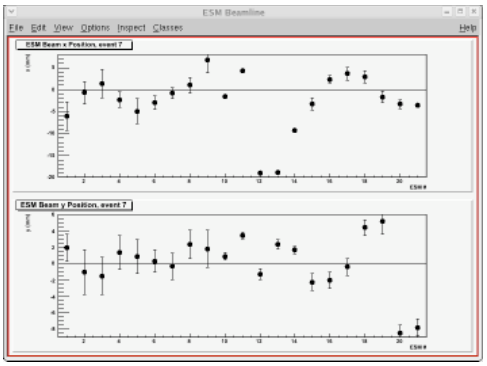

図 2.4.21: 21 台の ESM で測定されたビーム中心位置の理想軌道からのずれ

始された。上記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 を用いてビームプロファイル及びビーム中心位置を観測することに成功した。(図 2.4.20 および図 2.4.21) これらのビームモニター情報を用いてビーム軌道の調整が行われ、4 月 27 日にターゲット中心へのビーム軌道調整が完了した。電磁ホーンの励磁を開始し下流 110m に設置されたミューオンモニターによってミューオンプロファイルおよびその電磁ホーンによる収束を確認し、間接的なニュートリノビームの生成を確認した。

2.4.4 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、日本、アメリカ、ヨーロッパなどでさかんに検討されている次世代メガトン級水チェレンコフ検出器用において、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。当研究室は、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、基本性能を確認した。

HPD は光電面とアバランチェダイオード (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、10〜20keV の高印加電圧をかけることにより、AD 内に光電子あたり数千の二次電子が生成される。さらに、個々の二次電子は、AD のアバランシェ増幅により数十倍の電子に増幅される。この二段の増幅機構により、最終的に約 O(10^5) の増幅が得られ、一光電子が検出可能となる。その結果、HPD には、i) 第一段の電子増倍過程における増幅率が大きく、かつ増幅率のばらつきが小さいため、波高分解能が PMT に比べてよくなる、ii) 電子増幅過程に PMT のようなダイノードを含んでいないため、電子走行時間のばらつきが存在せず、優れた時間分解能が達成できる、iii) 部品数が PMT の 1/10 ですみ安価である、などの特長がある。われわれは、13 インチ HPD の試作器を 20kV の印加電圧で動作させることにより、1 光電子で 24%のエネルギー分解能、全照射で 190ps の時間分解能を測定し、HPD の PMT に対する優位性を確認した。表 2.4.1 に、HPD と PMT の性能評価の結果をまとめる。

HPD は PMT に比べて優れた性能を持っているが、実用化にあたっては、解決しなくてはならない問題が残っている。そのひとつに、PMT に比べて約 1/100 という低い電子増幅がある。この問題を解決するためには、HPD 用低ノイズ読み出し回路の開発が必要である。われわれは、最新のデジタル信号処理技術をもちいた、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、からなる読み出し回路の開発を行っている。昨年度までに、5 光電子までのクリアな波高分離、200ps 以下の時間分解能を確認した。今年度は、読み出し回路、高圧電源の小型化に成功し (図 2.4.22)、これらの装置の HPD バックエンド実装化へ向けて進展した。また、1 3インチより小型な 8 インチ HPD の開発も行っている (図 2.4.23)。

表 2.4.1: HPD と PMT の性能比較表: どちらも口径は 13 インチ

Parameters	HPD	通常 PMT
電子増幅	O(10^5)	O(10^7)
時間分解能@1p.e.	190ps	1400ps
波高分解能@1p.e.	24%	70%
立ち上がり時間	1ns	6ns
パルス幅	2.2ns	10ns
ダイナミックレンジ (p.e.=光電子)	3000 p.e.	2000 p.e.

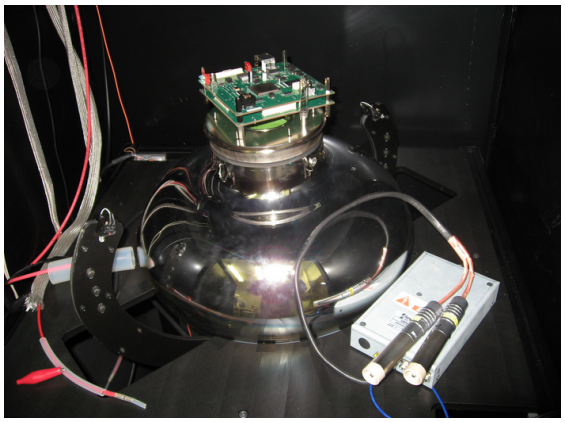

図 2.4.22: 1 3インチ HPD、小型読み出し回路と小型高圧電源

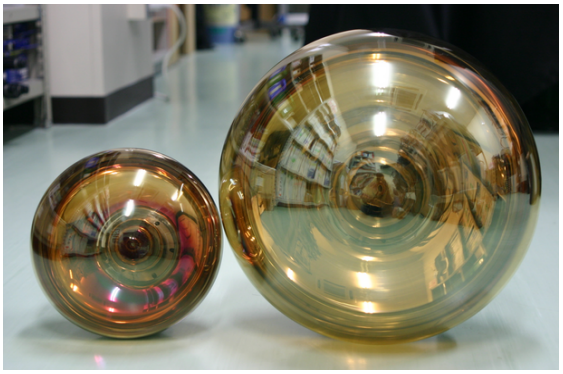

図 2.4.23: 8インチ HPD（左）と 1 3インチ HPD（右）

2.4.5 観測宇宙論によるダークエネルギーの研究

WMAP による宇宙背景輻射の観測などによって、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た。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) を製作している。この新装置を用いて、最低 1000 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。

過去に小型読みだしモジュールなどの要素技術を開発してきたが、本年度はこれらの開発した要素技術を集約しプロトタイプ・システムを組み上げテストを行った。開発したシステムは疑似回路による CCD からデータを読み出し、そのデータを PC へ転送する。CCD を読み出すためには、その制御回路、大規模データを一時的に蓄積するメモリ制御、高速ネットワーク制御が必要である。通常これらの回路を実装すると回路規模が大きくなるが実験用に最適化し開発することで 1 チップに搭載することができた。高品質画像を得るためには読み出す雑音が小さい必要がある。テストシステムを使用して雑音、データ読み出し性能などを測定した。その結果、試作システムは HSC 要求を十分に満たすデータ転送速度、雑音特性を満たしている事を確認した。また、広視野にわたる収差を補正するための補正光学レンズ系の設計を完了し、大口径レンズの製作を開始した（図 2.4.24）。

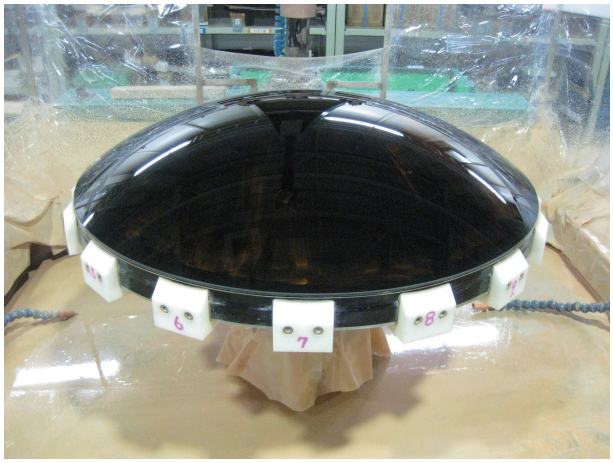

図 2.4.24: Hyper Suprime-Cam 補正光学系第一レンズ

2.4.6 国際リニアコライダー用検出器の開発

現在、世界では超高エネルギー（500GeV 以上）の電子・陽電子リニアコライダー (International Linear Collider) を用いた実験将来計画のための研究開発が行われている。当研究室では、シリコン技術を駆使した検出器 Silicon Detector (SiD)（図 2.4.25）を SLAC、 Fermilab、 ANL などと共同で提案している。これまでの検討にもとづいて、3 月末に Letter of Intent を提出した。

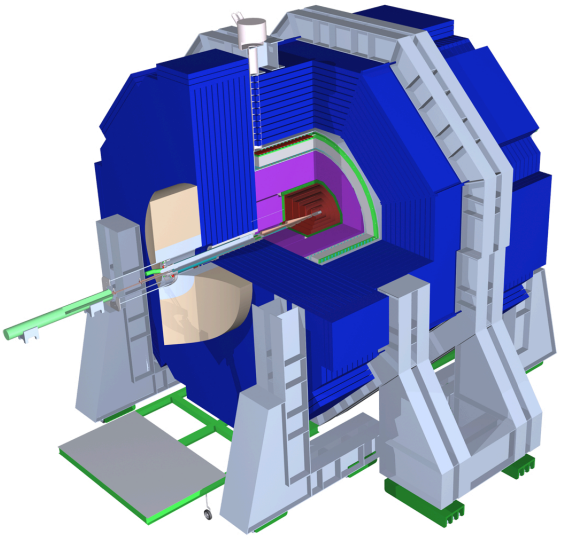

図 2.4.25: リニアコライダー用検出器 SiD

＜報文＞

(原著論文)

[1] Y. Nishio *et al.* [Belle Collaboration], "Search for lepton-flavor-violating $\tau \to \ell V^0$ decays at Belle," Phys. Lett. B **664**, 35 (2008) [arXiv:0801.2475 [hep-ex]].

[2] J. H. Chen *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of B0 to p pbar K*0 with a large K*0 polarization," Phys. Rev. Lett. **100**, 251801 (2008) [arXiv:0802.0336 [hep-ex]].

[3] U. Bitenc *et al.* [BELLE Collaboration], "Improved search for D^0 mixing using semileptonic decays at Belle," Phys. Rev. D **77**, 112003 (2008) [arXiv:0802.2952 [hep-ex]].

[4] I. Adachi *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the branching fraction and charge asymmetry of the decay $B^+ \to D^+\overline{D^0}$ and search for B^0 to D0 D0bar," Phys. Rev. D **77**, 091101 (2008) [arXiv:0802.2988 [hep-ex]].

[5] T. Lesiak *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of masses of the $\Xi_c(2645)$ and $\Xi_c(2815)$ baryons and observation of $\Xi_c(2980) \to \Xi_c(2645)\pi$ $\Xi_c(2980)$ and observation of $\Xi_c(2980) \to \Xi_c(2645)\pi$," Phys. Lett. B **665**, 9 (2008) [arXiv:0802.3968 [hep-ex]].

[6] C. Schwanda *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the Moments of the Photon Energy Spectrum in $B \to X_s$ gamma Decays and Determination of $|V_{cb}|$ and m_b at Belle," Phys. Rev. D **78**, 032016 (2008) [arXiv:0803.2158 [hep-ex]].

[7] M. Iwabuchi *et al.* [Belle Collaboration], "Search for$B^+ \to D^{\star +}\pi^0$ decay," Phys. Rev. Lett. **101**, 041601 (2008) [arXiv:0804.0831 [hep-ex]].

[8] Y. Horii *et al.* [Belle Collaboration], "Study of the Suppressed B meson Decay $B^- \to DK^-$, $D \to K^+\pi^-$," Phys. Rev. D **78**, 071901 (2008) [arXiv:0804.2063 [hep-ex]].

[9] J. T. Wei *et al.* [Belle Collaboration], "Search for $B \to \pi\ell^+\ell^-$ Decays at Belle," Phys. Rev. D **78**, 011101 (2008) [arXiv:0804.3656 [hep-ex]].

[10] N. Taniguchi *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of branching fractions, isospin and CP-violating asymmetries for exclusive $b \to d\gamma$ modes," Phys. Rev. Lett. **101**, 111801 (2008) [Erratum-ibid. **101**, 129904 (2008)] [arXiv:0804.4770 [hep-ex]].

[11] R. Seidl *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of Azimuthal Asymmetries in Inclusive Production of Hadron Pairs in e+e- Annihilation at $\sqrt{s} = 10.58$ GeV," Phys. Rev. D **78**, 032011 (2008) [arXiv:0805.2975 [hep-ex]].

[12] Y. Liu *et al.* [Belle Collaboration], "Search for $B^0 \to J/\psi\phi$," Phys. Rev. D **78**, 011106 (2008) [arXiv:0805.3225 [hep-ex]].

[13] M. Fujikawa *et al.* [Belle Collaboration], "High-Statistics Study of the $\tau^- \to \pi^-\pi^0\nu_\tau$ Decay," Phys. Rev. D **78**, 072006 (2008) [arXiv:0805.3773 [hep-ex]].

[14] R. Mizuk *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of two resonance-like structures in the$\pi^+\chi_{c1}$ mass distribution in exclusive $\overline{B}^0 \to K^-\pi^+\chi_{c1}$ decays," Phys. Rev. D **78**, 072004 (2008) [arXiv:0806.4098 [hep-ex]].

[15] M. Staric *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of CP asymmetry in Cabibbo suppressed D^0 decays," Phys. Lett. B **670**, 190 (2008) [arXiv:0807.0148 [hep-ex]].

[16] V. Bhardwaj *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of $B^\pm \to \psi(2S)\pi^\pm$ and search for direct CP-violation," Phys. Rev. D **78**, 051104 (2008) [arXiv:0807.2170 [hep-ex]].

[17] P. Goldenzweig *et al.* [Belle Collaboration], "Evidence for Neutral B Meson Decays to wK*0," Phys. Rev. Lett. **101**, 231801 (2008) [arXiv:0807.4271 [hep-ex]].

[18] G. Pakhlova *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of a near-threshold enhancement in the $e^+e^- \to \Lambda_c^+\Lambda_c^-$ cross section using initial-state radiation," Phys. Rev. Lett. **101**, 172001 (2008) [arXiv:0807.4458 [hep-ex]].

[19] C. C. Chiang *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of $B^0 \to \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ Decays and Search for $B^0 \to \rho^0\rho^0$," Phys. Rev. D **78**, 111102 (2008) [arXiv:0808.2576 [hep-ex]].

[20] H. O. Kim *et al.* [Belle collaboration], "Study of intermediate two-body decays in $\bar{B}^0 \to \Sigma_c(2455)^0\bar{p}\pi^+$," Phys. Lett. B **669**, 287 (2008) [arXiv:0808.3650 [hep-ex]].

[21] R. Kumar *et al.* [Belle Collaboration], "Evidence for $B^0 \to \chi_{c1}\pi^0$ at Belle," Phys. Rev. D **78**, 091104 (2008) [arXiv:0809.1778 [hep-ex]].

[22] R. Louvot *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the Decay $B_s0 \to D_s - \pi^+$ and Evidence for $B_s0 \to D_s \pm K^\pm$ in e^+e_- Annihilation at $\sqrt{s}$ 10.87-GeV," Phys. Rev. Lett. **102**, 021801 (2009) [arXiv:0809.2526 [hep-ex]].

[23] S. Uehara *et al.* [for the Belle Collaboration and for the Belle Collaboration], "High-statistics measurement of neutral-pion pair production in two-photon collisions," Phys. Rev. D **78**, 052004 (2008) [arXiv:0810.0655 [hep-ex]].

[24] Y. Miyazaki *et al.* [Belle Collaboration], "Search for Lepton-Flavor-Violating tau Decays into Lepton and f0(980) Meson," Phys. Lett. B **672**, 317 (2009) [arXiv:0810.3519 [hep-ex]].

[25] K. Inami *et al.* [Belle Collaboration], "Precise measurement of hadronic tau-decays with an eta meson," Phys. Lett. B **672**, 209 (2009) [arXiv:0811.0088 [hep-ex]].

[26] A. Sokolov *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the branching fraction for the decay Υ(4S) $\to \Upsilon$(1S)$\pi^+\pi^-$," Phys. Rev. D **79**, 051103 (2009) [arXiv:0901.1431 [hep-ex]].

(会議抄録)

[27] H. Miyatake, T. Uchida, H. Fujimori, S. Mineo, H. Nakaya, H. Aihara, S. Miyazaki, "Prototype Readout Module for Hyper Suprime-Cam" ' 2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record ', IEEE, 737-741, 2008.

(学位論文)

[28] 中浜優：博士論文："Measurement of CP -Violating Asymmetries in the Flavor-Changing Neutral Current Decays of the B Meson"（2009 年 3 月）

[29] 宮武広直：修士論文："Research and Development of Readout System for New Wide-Field CCD Camera of Subaru Telescope"（2009 年 3 月）

(その他)

[30] 相原博昭：「振り返ることのたやすさ」岩波科学、2009 年 1 月号

[31] 相原博昭：「フレーバー物理研究の成功と課題」高エネルギーニュース、2009 年 3 月号

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[32] H. Aihara, "Summary talk," 9-th International Workshop on Heavy Quarks and Leptons (HQL2008), June 5-9, 2008, Melbourne, Australia

[33] H. Aihara, "R& D of Large Aperture Hybrid Photodetector," NNN08 InternaOonal Workshop on Next Nucleon decay and Neutrino detectors, Paris, 1 - 13 September

[34] M. Iwasaki, "Rare Hadronic B-meson decays," 9-th International Workshop on Heavy Quarks and Leptons (HQL 2008), 2008 June, Melbourne, Australia.

[35] M. Iwasaki, "Measurements of charmless B-decays at Belle," 34th International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2008), 2008 July, Philadelphia, PA, USA.

[36] H. Kakuno, "Exclusive Vub and Vcb," Flavor Physics and CP Violation 2008, Taipei, Taiwan

[37] H. Kakuno, "Neutrino oscillations at T2K," Neutrino Oscillation Workshop, Conca Specchiulla, Italy

[38] N. Hastings, "The T2K Neutrino Oscillation Experiment, and Possible Future Projects," 9-th International Workshop on Heavy Quarks and Leptons (HQL2008), June 5-9, 2008, Melbourne, Australia

一般講演

[39] T. Abe, "R&D status of large aperture Hybrid Avalanche Photo Detector," The 1st international conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP09), March 12-17, 2009, Tsukuba

[40] H. Miyatake, T. Uchida, H. Fujimori, S. Mineo, H. Nakaya, H. Aihara, S. Miyazaki "Prototype Readout Module for Hyper Suprime-Cam" '2008 IEEE Nuclear Science Symposium Medical Imaging Conference and 16th Room Temperature Semiconductor Detector Workshop', N02-25, Dresden, October 2008

(国内会議)

招待講演

[41] H. Aihara, "The Status of SiD,"「ILC 測定器研究会」、KEK、平成 20 年 12 月 15 日

一般講演

[42] 岩崎昌子："Belle 実験における B 中間子の $b \to d$ フレーバー変換中性カレント事象（$B \to K^* K$）の研究," 日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月、山形大学

[43] 宮武広直："Hyper Suprime-Cam: CCD 読み出し回路デジタル部の開発 I," 同上

[44] 阿部利徳:"大口径 HAPD の開発, "同上

[45] 岩崎昌子："Super-KEKB 実験のための GEANT4 を用いた beam line simulation," 日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月、立教大学

[46] 阿部利徳:"大口径 HAPD の開発, "同上

[47] 藤森裕輝："Hyper Suprime-Cam: CCD 読み出し回路デジタル部の開発 III DDR2 コントローラの開発," 同上

その他

[48] 相原博昭、"ハイブリッド型フォトン検出器の開発ーニュートリノから環境科学までー、"JST 先端計測分析技術・機器開発事業成果発表会、平成 20 年 9 月 4 日、幕張メッセ国際会議場

[49] H. Aihara, "2008 Nobel Prize in Physics & the Belle Experiment," The second Tokyo-Yonsei Joint Workshop on Physics, Yonsei, Korea, October 30, 2008

[50] 相原博昭："B ファクトリー実験とその将来" 小林・益川両先生ノーベル物理学賞受賞記念シンポジウム 日比谷公会堂 2009 年 2 月 21 日

[51] 宮武広直："Hyper Suprime-Cam のための読み出しシステムデジタル部の研究開発," 『特定領域研究「広視野深宇宙探査によるダークエネルギーの研究」第 3 回研究会』, 国立天文台, 2009 年 3 月

[52] 峯尾聡吾："ROOBASF フレームワークによる SC 用データ解析パイプラインの構築," 同上

[53] M. Iwasaki, "Evaluation of Detector Background" The 14th KEKB Accelerator Review Committee, 2009 Feb., KEK

受賞

[54] 岩崎昌子：第 10 回大学婦人協会守田科学研究奨励賞, 2008 年 5 月「高エネルギー素粒子物理学実験によるフレーバー物理の研究」

[55] 阿部利徳：第 10 回財団法人高エネルギー加速器科学研究奨励会小柴賞受賞、2009 年 3 月「大口径ハイブリッド光検出器の開発」

[56] 宮武広直：2008 IEEE-Nuclear Science Symposium, 2008 NPSS Student Paper Awards : NSS Poster Award (Second Place)

[57] 宮武広直:平成 20 年度理学系研究科研究奨励賞（修士）

[58] 中浜優：平成 20 年度理学系研究科研究奨励賞（博士）

2.5 浅井研究室

本研究室は、「真空の構造の解明」、「力の統一の実現」等を目指して、エネルギーフロンティア加速器実験と非加速器実験の両面から研究を行っている。素粒子物理国際研究センターと共同で LHC・ATLAS 実験でのヒッグス粒子や超対称性粒子や余剰次元の探索で主導的な役割を果たしている。これと並んで小規模な非加速器実験を複数行い、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。

2.5.1 LHC・ATLAS 実験での研究

LHC 加速器は 2008 年に運転を開始したが、ヘリウム漏れ事故が発生したため運転を停止し、2009 年秋からの実験開始を目指して現在修理・調整等を行っている。実験初期で重要となる 3 つの課題、ヒッグス粒子、超対称性粒子、余剰次元（ブラックホール）の発見に向けての研究と、発見で重要となる検出器のパフォーマンス評価、及びバックグラウンド研究を中心に行っている。(文献 1)

図 2.5.26: 完成した LHC 加速器

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、ヒッグス粒子は 140GeV より軽い領域にあると思われている。この場合、ヒッグス粒子の崩壊パターンで $H \to \gamma\gamma$ $\tau\tau$ と $W^+W^- \to l\nu l\nu$ の 3 つのモードが重要な発見モードである。この 3 つのモードに絞って研究を行い、高い発見能力があることが示した。L=10fb^{-1} の初期データで 3 − 4 σ程度の確度のそれぞれのモードで発見可能であることが分かった。(文献 1)

$\gamma\gamma$ モードは、ヒッグス粒子がスピン 0 であることの重要な示唆を与え、$\tau\tau$ モードは、フェルミオンの質量起源もヒッグス粒子であることの証明になる。この様に同時に複数の重要なモードを研究することでヒッグス粒子の性質や質量の起源に迫ることが可能となる。また、レプトン（電子、ミューオン、タウの崩壊で出てきたハドロン）やガンマ線を正しく検出することである。その検出効率や間違える確率などが実験起源のバックグラウンドを評価する上でが大切である。これらを実験データを用いて評価する研究も行い実験準備を整えている。

超対称性粒子発見へ向けてのバックグラウンド研究

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。

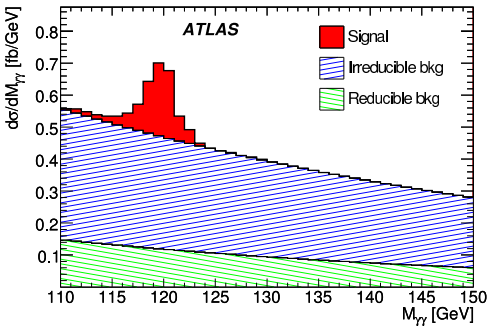

図 2.5.27: VBF 過程で生成したヒッグス粒子が $\gamma\gamma$ に崩壊した時の質量分布

LHC での超対称性粒子事象の特徴は観測されない横方向運動量 (mET と呼ぶ）であり、信号、バックグラウンド共に、ピークを作らず比較的似た形の連続分布である。従ってバックグランドの正しい理解なくしては、超対称性粒子の発見は不可能である。一方 LHC はハドロンコライダーであるため、モンテカルロシュミレーションを用いたバックグラウンド評価は不定生が著しく大きく、実験データを用いた評価が不可欠である。

実験データを用いて、バックグラウンドを評価する方法の開発を行い、超対称性粒子発見の 3 つの主要なモード（レプトンを含まないモード、一つ含むモード、二つ含むモード）の全てで、実験データから 10–30%程度の精度でバックグラウンドを評価する方法を開発した。この研究は、手法の提案から論文執筆 (文献 1) にいたるまで、我々が主体となって行った。この方法は、mET の小さな領域（コントロールサンプル）で、主要なバックグラウンド過程（トップクォーク生成過程、$W \to \ell\nu$, $Z \to \nu\nu$, QCD 過程）をそれぞれ選択的に選び、mET と無相関な物理量で外挿して信号領域での mET 分布を評価するものである。下図は、レプトンを一個含む探索モードでm ET 分布を示す。赤点が我々の考案した方法で評価したバックバックグラウンド分布であり、斜線で示す真のバックグラウンド分布を正しく再現している。この方法は MC の情報を用いずに、実験初期 (L=0.1-1fb^{-1}) のデータからバックグラウンドを評価することが可能となった。(文献 1)

長寿命粒子の発見能力の研究

超対称性モデルのうち、Anomaly-Medaited 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。長寿命荷電粒子の寿命が O(1m) 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

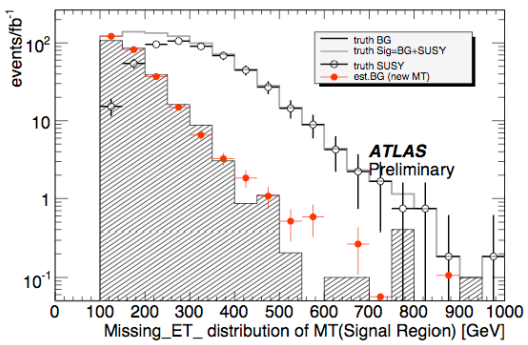

図 2.5.28: レプトンを 1 つ含む超対称性探索モードで期待されるバックグラウンドと評価した分布

るので発見は容易でありこれまで多くの研究がなされてきた。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及び崩壊点の同定も可能であることを初めて示した。(文献 3,4)

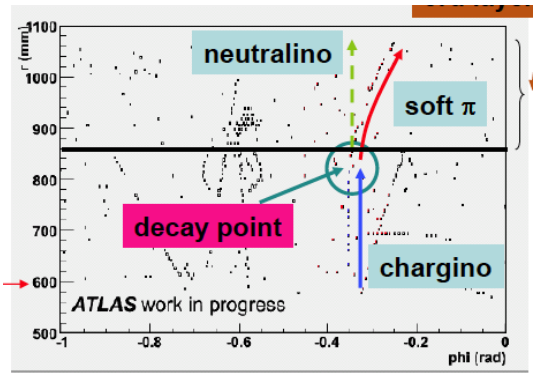

図 2.5.29: 長寿命 chargino が検出器内で崩壊事象 (シミュレーション)

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

エネルギーフロンティア加速器実験 LHC/ATLAS 実験は、標準理論を超えた新しい素粒子現象を直接生成する王道の手法である。これとは対照的に、加速器実験では到達出来ない超高精度測定や超高感度な探索によって、標準理論を超えた新しい素粒子現象を間接的に探る研究も同時に行っている。例えば、超高エネルギーで対称性が破れると、そのエネルギースケールに反比例して軽く、結合が弱くなる粒子が期待される。（擬・南部ゴールドストーン粒子）この様な粒子は、結合が極めて弱い為観測が難しいが、標準理論からのずれを高精度で検出したり、標準理論では禁止されている希現象を超高感度で探索することで間接的に観測することが可能となる。これらの小規模実験は、数名の学生が主体となって、実験の企画、設計、実験装置の製作、解析から論文執筆まで全ての過程を主体的に行うことが出来、大規模実験とは違う醍醐味がある。

レプトン系の CP の破れ探索

宇宙の物質・反物質の非対称性の起源を探ることは、この宇宙の成り立ちを探る上で重要である。小林・益川行列でクォーク系の CP の破れが理解され、2008 年のノーベル賞となったが、クォーク系の CP の破れだけでは、この宇宙の物質・反物質の非対称性が説明出来ないことも判明した。新しい CP の破れが必要である。この問題を解明するため我々はレプトン系の CP の破れを探索している。電気的に中性なレプトン系は、ニュートリノ、ポジトロニウム (電子・陽電子系)、又はミューオニウム（ミューオンと陽電子）などであり、現在ポジトロニウムを用いて探索実験を行っている。ポジトロニウム (Ps) が CP を破っていると、Ps のスピンと崩壊で放出される γ 線とに偏りが生じる。下図に示す様に、Ps のスピンを磁場で揃えて、崩壊で放出される γ 線を YLSO シンチレーターで捕らえる。高速で検出効率が高いシンチレーターを用いることで高い統計の実験を行った。４つの YLSO シンチレーターの個体差（検出効率や分解能の違い）が大きな系統誤差になるため、検出器をステッピングモーターで回転させながら、磁場に対して相対的な位置を変えてこれらの系統誤差を相殺した。

現在データを蓄積している途中であるが、CP の破れで約 2×10^{-3} の感度 (暫定値）での探索を行った。この感度は、クォーク系 K 中間子の CP の破れに相当するものである。次のステップとして第 2 世代を含むレプトン系（ミューオニウム）への応用を考えている。

ポジトロニウム超微細構造の精密測定

ポジトロニウム (Ps) のうち、スピン 1 の状態はオルソ-ポジトロニウム (o-Ps)、スピン 0 の状態はパラ-ポジトロニウム (p-Ps) と呼ばれている。この二つの状態は、スピンースピン相互作用によりエネルギー準位に差 HFS（Hyper Fine Structure) が生じる。電子・陽電子は磁気モーメントが大きいので、HFS は、水素と較べ約 2 桁大きく、束縛系 QED を精密検証する上で重要な測定量である。また、o-Ps は光子と同じ量子数である為、仮想光子と量子的な振動を繰り返している。未知の弱い結合をする粒子はこの仮想光子を通して HFS の値に効果を及ぼすため、HFS の精密測定は標準理論を超えた新しい素粒子現象を探る上でも重要である。(文献 7,9)

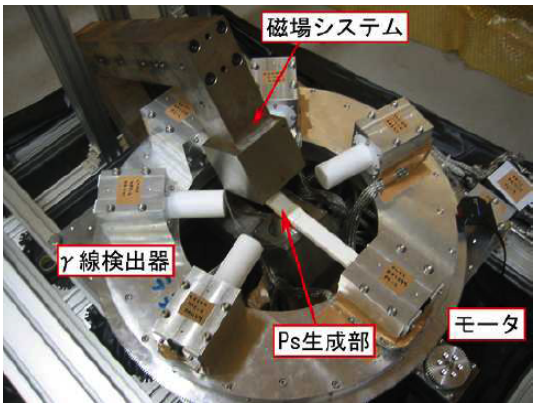

図 2.5.30: CP の破れ実験装置

このふたつの効果で Ps-HFS は 203GHz と大きい。近年理論計算の精度が向上し、実験値と理論値に 10ppm(3.5σ) のズレがあることが判明した。過去の実験で考慮されていない系統誤差があるか、新しい素粒子現象が寄与している可能性がある。このズレの理解を行うために、過去の実験と全くことなる２つの方法で、HFS の精密測定を行っている。

- o-Ps ３重項状態は磁場中で Zeeman 効果で分離する。磁場方向 (Z 軸）にスピンを量子化したとき、$m_Z = \pm 1$ の成分は磁場と結合しないが、m_Z=0 の状態は磁場と結合しエネルギーが高くなる。このエネルギー変化分は磁場と HFS の値に依存する。過去のすべての実験はこの方法を用いているが、それぞれの Ps が生成されてからの時間情報は測定していない。我々の新しい実験は、Ps が生成されてから崩壊で放出されるガンマ線検出までの時間情報 (t) を記録し、二つの大きな系統誤差を抑える新しい方法である。(A) t=0 付近の対消滅事象を抑え、Ps 事象を選択的に選ぶことが可能になり、S/N の高い測定が可能になる。(B)2γ と 3γ に崩壊する比率を t の関数として測定することで、物質の効果と Ps の熱化過程を直接測定することが可能となる。この方法は、１０年前に寿命測定実験の為に我々が開発し、当時問題だった「オルソ-ポジトロニウム寿命問題」を解決するに至った方法である。写真（上）はテスト実験の様子であり、0.8T の磁場の中で 2.8GHz(50W) の高周波（RF) を印加して 1.5%の遷移を確認した。磁場の一様性を O(1ppm) まで高め、RF のパワーを 500W にあげて測定を 2009 年に行う。
- 強力な 203GHz のミリ波源を開発している。これにより、Zeeman 効果を用いた間接測定 (1) と異なり、直接 HFS を測定することが可能となる。二つの鏡面の間隔をピエゾ駆動装置で制御して高い Q を持つファブリ・ペロー型の共鳴装置を開発した。写真 (下) に示すジャイロトロンをベースにした、高出力（＞１００ W)、高精度（ppm) のミリ波源の開発を現在行っている。ミリ波は電波と光の中間的な性質であるため、これまで理学応用はじめあまり開拓されてこなかった領域である。新しいミリ波源の開発は、o-Ps/p-Ps の直接遷移を初めての観測のみならず、他の理学応用も期待されている。

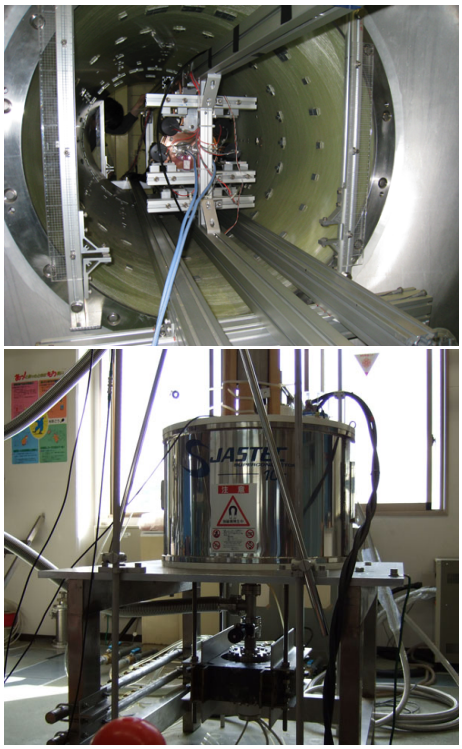

図 2.5.31: 上：Zeeman 効果を用いた HFS 測定実験
下：ジャイロトロンミリ波生成装置

ポジトロニウム・スピンローテションの精密測定

磁場の方向とポジトロニウム (Ps) のスピン方向がずれていると、スピンは歳差運動する。Ps の崩壊で放出されるガンマ線の方向は、スピンの向きと相関をもっている為、スピンが磁場中で回転している様子を直接観測することが出来る。この周期が上記の HFS に比例するため、HFS を測定することも出来る。またスピン偏極の強度変化から Ps を用いたスピン緩和の測定が可能になる。ミューオンに較べて約１００倍軽い Ps を用いたスピン緩和の測定は、より高感度での Ps と物質との相互作用を探ることが出来ると期待されている。

$^{68}Ge - Ga$ 線源から放出された陽電子は強く偏極しており、密度 0.1g/cc のシリカエアロジェル中で Ps を生成する。偏極陽電子で生成されたオルソ-ポジトロニウム (o-Ps) も陽電子放出方向に偏極している。この軸に垂直に磁場をかけるとスピンは磁場と

垂直な平面内で回転する。崩壊で放射されるガンマ線は、スピンと ±45 度の方向に高いエネルギーを出しやすく反対方向には出にくい。0.135T の磁場中で測定した結果を下図に示す。逆位相の計数を引くことで歳差に起因する振動が観測された。３つの異なる磁場強度で測定した結果は互いに無矛盾で、HFS 値 203. 348 ± 180ppm(stat.) ±160ppm(sys.) GHz が得られた。磁場の非一様性が最大の系統誤差である。スピン緩和が観測されたか否かの解析を現在おこなっている。

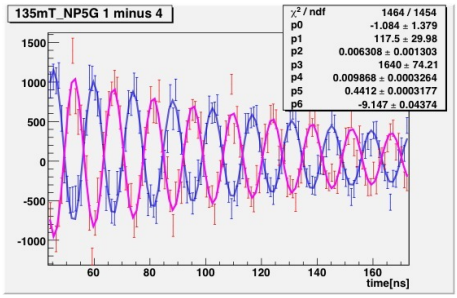

図 2.5.32: B=0.135T でのガンマ線の検出量：位相が逆の検出器の計数を引いて振動成分だけをとりだしている。点が測定結果、曲線がフィット結果である

＜報文＞

(原著論文)

[1] The ATLAS Collaboration, G. Aad et al. , "Expected Performance of the ATLAS Experiment-Detector,Trigger and Physics", CERN-OPEN-2008-020 (2008)

[2] The ATLAS Collaboration, G. Aad et al. , "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider", JINST **3 S08003 (2008)**

[3] S.Asai, T.Moroi and T.T. Yanagida, "Test of Anomaly Mediation at the LHC", Phys. Lett. B, 664 185-189,(2008)

[4] S.Asai, Y.Azuma, O,Jinnouchi, T.Moroi, S.Shirai and T.T. Yanagida, "Mass Measurement of the Decaying Bino at the LHC", Phys. Lett. B, 672 339-343,(2009)

[5] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. , "Measurement of alpha(s) with radiative hadronic events", Euro. Phys. J. C, 53 21-39,(2008)

[6] Y.Kataoka, S.Asai and T.Kobayashi, "First test of O(α^2) correction of the orthopositronium decay rate", Phys. Lett. B, 671, 219-223 (2009)

(会議抄録)

[7] S.Asai et al., "Precision measurements of positronium decay rate and energy level", AIP Conf. Proc., 1037, 43-55 (2008)

[8] T.Namba, K.Nishihara, T.Yamazaki, S.Asai and T.Kobayashi, "Tests of CP and CPT symmetry with positronium", AIP Conf. Proc., 1037, 56-65 (2008)

(国内雑誌)

[9] 浅井祥仁, "ポジトロニウムの新たな謎", パリティー 2009 年３月号 4-11 (2009)

[10] 浅井祥仁, "サブテラヘルツ波を用いた束縛系 QED の精密検証", プラズマ・核融合学会誌 84 巻 902-905

[11] 石田明, "CERN Summer Students Program 報告書", 高エネルギーニュース 27 No.3 (2008)

(学位論文)

[12] 秋元銀河, "ポジトロニウムの超微細構造の精密測定実験", 修士論文 (2009 年 3 月)

[13] 東裕也, "ATLAS 実験における TRT を用いた長寿命荷電粒子の探索能力の研究", 修士論文 (2009 年 3 月)

[14] 鈴木拓也, "実験初期データを用いた ATLAS 検出器カロリーメータの性能評価", 修士論文 (2009 年 3 月)

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[15] S.Asai, "Signature-base searches how realistic and useful are they? ", LHC New Physics Forum, Heidelberg Germany, February (2009)

一般講演

(国内会議)

[16] 石田明, "ポジトロニウムの HFS 精密測定 II Zeeman を用いた方法のテスト実験の報告 ", 「陽電子科学とその理工学への応用」京都大学 2008 年 12 月

日本物理学会:秋季大会:山形大学

[17] 山崎高幸, "荷電レプトンを用いた CP の破れの探索"

[18] 秋元銀河, "ポジトロニウム 超微細構造の精密測定 I (全体と RF-Cavity)"

[19] Mark.M.Hashimoto, "Positronium assembly system for the precise measurement of the Positronium hyper-fine splitting"

[20] 石田明, "ポジトロニウム 超微細構造の精密測定 III (ガンマ線検出器)"

[21] 末原大幹, "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"

日本物理学会:春季大会:立教大学

[22] 東裕也, "ATLAS 実験における TRT を用いた長寿命荷電粒子の探索"

[23] Mark.M.Hashimoto, "Exclusive study of the mSUGRA co-annihilation region using a new soft tau identification method"

[24] 岡村淳一, "ATLAS 実験における UED 模型及び縮退した SUSY 模型の研究"

[25] 武市祥史, "ATLAS 検出器を用いた di-jet および mono-jet の研究"

[26] 鈴木拓也, "ATLAS 実験におけるミニマムバイアス事象を用いたカロリーメータ性能の評価"

[27] 石田明, "ポジトロニウム 超微細構造の精密測定 I (全体と本測定の準備)"

[28] 秋元銀河, "ポジトロニウム 超微細構造の精密測定 II (テスト測定での RF システム)"

[29] 難波俊雄, "ポジトロニウム 超微細構造の精密測定 III (ミリ波を用いた直接遷移実験) "

[30] 佐々木雄一, "ポジトロニウム超微細構造の量子振動を用いた測定 I (概要, セットアップ)"

[31] 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 II (解析, 考察) "

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

電子間斥力からの超伝導と物質設計

高温超伝導銅酸化物の模型と考えられる斥力 Hubbard 模型は、スピン揺らぎ媒介により $O(0.01t)$ の転移温度 T_C (t はバンド幅 $\sim$ 10000 K) を持つ超伝導をもつと考えられ、銅酸化物の $T_C \sim$ 100K と整合するが、T_C が t から二桁落ちるという意味では「低温超伝導」である。この主因の一つは、斥力からの超伝導では Cooper 対は異方的になり、ギャップ関数が node をもつためである。これを、フェルミ面形状やバンド分散を上手くとることにより、特に「非連結フェルミ面」において克服する可能性について様々な検討を行っている [29, 34]。

鉄化合物における新高温超伝導体

2008 年に、細野（東工大）により、鉄の砒化物において 30K 級の T_C をもつ超伝導が発見され、その後 T_C も 55K まで上昇している。銅酸化物に対比されるべき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の化合物における高温超伝導という点が興味深い。黒木（電通大）、大成（名大）、有田 (東大工)、臼井（電通大）、田仲（名大）、紺谷（名大）と青木は、この理論の最初となるものの一つを提出した。第一原理電子状態計算から出発し、downfolding と呼ばれる方法により、多体の tight-binding 模型を構築し、Eliashberg 方程式を解析することにより、超伝導のペアリング対称性を決定した [1, 3, 4, 14, 16]。結果は、(a) フェルミ面は二組のポケットからなる非連結フェルミ面である、(b) downfold された模型は鉄の 5 個の d 軌道全てを含む 5-band model となる、(c) 複数組ポケットの間に、複数の nesting があり、これに伴いペアリング対称性は、基本的にポケット間の非連結性を利用した拡張 s (通称 $s\pm$; Fig.3.1.1) であることが示唆される。また、Malaeb, 吉田、片岡、藤森、臼井、黒木、有田、青木および久保田, 小野 (以上 KEK)、神原、平野、細野 (以上東工大) は、鉄系化合物の電子構造を、光電子分光の実験と電子状態計算を組み合わせることにより解析し、質量繰り込み因子が約 2 という値をとることを示した [2, 15]。鉄系に関しては、JST-TRIP プロジェクトが立ち上がった。

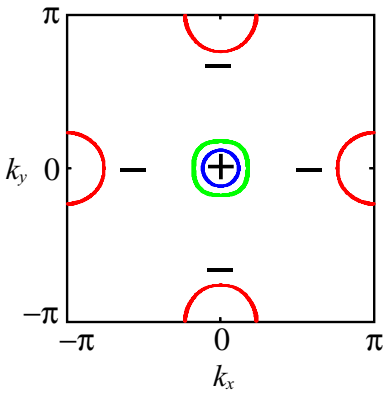

図 3.1.1: The Fermi surface of the iron-based superconductor ($LaO_{1-x}F_xFeAs$). Signs of the superconducting gap function are indicated. (after [1])

汎関数繰り込み群法

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、有田（東大工）、黒木 (電通大)、青木は汎関数繰り込み群法 (fRG) に着目した。特に、温度汎関数繰り込み群は、相関関数の温度依存性を計算できるが、従来は松原周波数依存性を無視する近似が行われ、そのため、電子相関で本質的な自己エネルギーが無視された。そこで我々は、自己エネルギーの松原周波数空間を取り入れながら計算量を爆発させないアルゴリズムを提案した。この方法を、2 次元斥力 Hubbard 模型に適用し、さまざまな相関関数や質量繰り込み因子を計算することに成功した [17, 41, 42, 54, 55, 56, 57]。高島は以上の成果を博士論文にまとめた [71]。多バンド系への拡張も考えている。

3.1.2　炭素系の物性

グラフェン (単原子層グラファイト) の物理

最近、原子一層のグラファイト (グラフェン) における特異な整数量子ホール効果が実験的に観測され興味を集めているが、蜂の巣格子は massless Dirac

粒子のバンド分散をもつために、興味深い物理現象が期待される [38, 39]。初貝（筑波大）、福井（茨城大）、青木は、グラフェン量子ホール効果のトポロジカルな性質を明らかにしている [18]。トポロジカルな性質の一つはエッジ状態に現われるが、有川（筑波大）、初貝、青木は、グラフェンのエッジ状態を数値計算により求め、トポロジカルな観点や STM 観察の観点から議論した [6, 21]。

グラフェン量子ホール効果において、massless Dirac 粒子特有の $N = 0$ ランダウ準位は特異であるが、不規則性を入れたときにこれがどうなるかは、トポロジカルな観点からも興味深い。河原林（東邦大）、初貝、青木は、不規則性が炭素間の結合に入る場合は、カイラル対称性が保存される等の理由で、殆どスケーリングの固定点のような異常な振る舞いをすることを見出した [58, 59]。

一方、中島（東北大）と青木は、原子ポテンシャルを蜂の巣状に置いた厳密に解けるモデルを用いて、ベクトル・ポテンシャルの 2 次の効果 (反磁性シフトと波動関数収縮) を取り入れた電子状態を求めた [22]。これにより、tight-binding 模型に依らなくとも質量ゼロの Dirac 的な分散が生じること、強磁場中でのランダウ準位が分裂することを示した。

グラフェンにおけるランダウ準位レーザー

量子ホール系では非平衡状態下での発光が観測されており、また青木により 1980 年代に非平衡における「ランダウ準位レーザー」の可能性が提案されたが、等間隔ランダウ準位のために実現が困難であった。森本、初貝、青木は、グラフェンにおいては Dirac 的分散を反映して、ランダウ準位が非等間隔 ($\propto \sqrt{N}$) となるために、反転分布を作るのに有利であろうというアイディア (図 3.1.2) の元に、磁場中の massless Dirac 粒子の光学的性質を、発光の議論に重要な緩和過程も考慮して調べた [5, 19]。適当な不純物濃度では、$N = 0, \pm 1$ 間のランダウ・ギャップ間で反転分布が実現し発光が観測され易くなることが期待される。

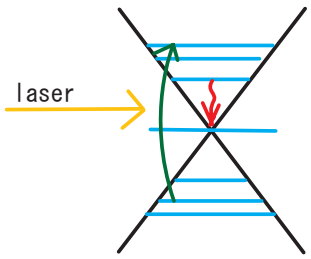

図 3.1.2: Cyclotron absorption and emission processes schematically depicted for the graphene quantum Hall systems with k-linear dispersion and Landau levels (horizontal lines) (after [5]).

ゼオライト鋳型炭素構造

炭素がとる新奇な構造として、ゼオライト的な構造をもつ炭素（ナノチューブの 3 次元的ネットワーク等）をゼオライトを鋳型にして作成することが京谷等により試みられている。これは、青木研で考えてきた周期的曲面上の電子構造をグラフェンにより構成したともいえ、興味深い配列ナノ空間である。鈴木、東野、岡、青木は、京谷、西原（以上東北大）と共に、ゼオライト鋳型炭素構造のバンド構造を求めた [61]。結果は金属的であり、炭素の他の構造が半導体、半金属であるのと対照的である。この原因は、周期曲面を構成するために炭素間ボンドは sp2 と sp3 の中間を強いられるためである。

3.1.3 量子ホール系

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、数 T の磁場下では THz 域）がどうなるかに着目し、通常の量子ホール系およびグラフェンに対して光学ホール伝導度を計算し、ホール・プラトーが意外にも ac 領域でも残ることを見出した [20, 43, 60]。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る。

強磁場中の量子ドット

分数量子ホール系を電子が数個しか含まない程小さな領域に閉じこめると、電子は磁気長 (10 T の磁場で ∼ 80 Å) 程度の量子零点振動を行いながら斥力で避け合い、「電子分子」構造をとり、「魔法数」角運動量をもつことを Maksym(Leicester 大)、青木等は提案してきた。電子相関効果は量子ドット模型の詳細に敏感であるため、Maksym、青木は、西、羽田野 (JST)、樽茶（本学工）、Austing（カナダ National Research Council)、Kouwenhoven（Delft 工大）という実験家との共同研究として、電子分子理論の予言する魔法数構造が、精密な理論的モデルを用いるとスピン自由度まで含めて実験結果と一致することを示した [7]。

3.1.4 非平衡・非線形現象

モット絶縁体のような強相関電子系における非平衡・非線形現象は、開拓の余地の大きい興味深い問題である。強電場中でのモット絶縁破壊に対して岡、青木は、多体状態の間の非断熱的量子遷移に対する描像を与えた [28]。本年度は、強相関電子系以外に、グラフェンも含めて、非平衡現象を研究した。また、非平衡下での超伝導の研究にも着手した [62]。

強レーザー光下のモット絶縁体 — 朝永-Luttinger 液体的モード

一次元モット絶縁体に対して強いレーザー光を照射すると金属状態が生じることが、ポンプ・プローブ実験によって知られている。岡、青木はこの金属状態の特性を調べるために、密度行列繰り込み群を用いて非平衡定常状態における光学相関関数を計算した。その結果、金属状態は電子相関によって繰り込まれた線形分散を持つ集団励起を示し、朝永-Luttinger 液体に似ることが分かった [8, 24, 44, 65]。

光誘起絶縁体・金属転移の理論 — Keldysh + Floquet 法

マンガン系などにおける光誘起絶縁体・金属転移を理解することを目的として、辻、岡、青木は、強いレーザー光のもとでの非平衡定常強相関系の電子状態を計算する新方法を、非平衡動的平均場理論を Floquet 法と組み合わせることにより提案した。この手法を Falicov-Kimball モデルに適用したところ、電子状態がモット絶縁体と Wannier-Stark 格子の間を転移する様子が見られた (図 3.1.3)。さらに、散逸を取り込むことにより強相関電子系の光誘起非平衡定常状態の分布関数を決定し、これを非線形光学応答関数の計算に応用し、場合によっては負の光学伝導度 (gain) が生じることを示した [11, 25, 26, 47, 49, 67, 68, 69, 70]。

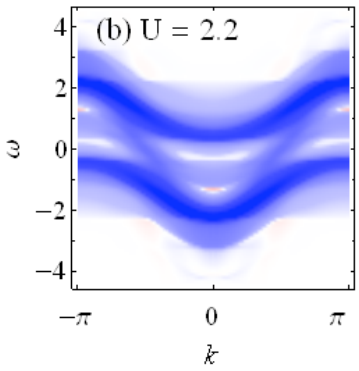

図 3.1.3: The local spectral function for the Falicov-Kimball model irradiated by an intense ac field (with $\Omega = 1$) at half filling for $U = 2.2$. (after Ref.[11])

光誘起されたゼロ磁場中グラフェン・ホール効果

岡、青木は、強い円偏光を照射するとグラフェン中の Dirac 粒子が光誘起 dc ホール効果を発現する可能性を発見した [10, 23, 45, 46, 63, 66]。光誘起ホール効果は既存のホール効果とは異なり無磁場で生じるものであり、円偏光の非線形効果に伴って電子の獲得する非断熱ベリー位相 (Aharonov-Anandan 位相) によって発生する。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。

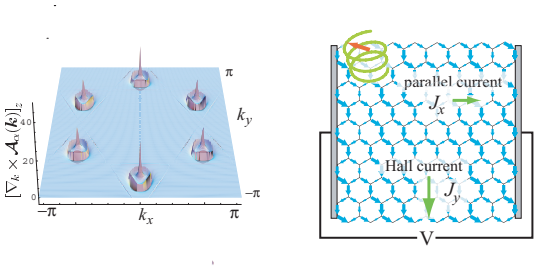

図 3.1.4: Right: DC current distribution in graphene subject to a circularly polarised light with a bias voltage applied across the electrodes. Left: Aharonov-Anandan curvature in k space. (after [10]).

実時間量子モンテカルロ法の非平衡への拡張

岡、Werner(ETH)、Millis (Columbia 大) は強相関系の非平衡相転移現象を調べる方法である非平衡動的平均場理論の構築に必要な実時間量子モンテカルロ法を調べ、特に Hirsch-Fye 法および連続時間モンテカルロ法が非平衡下でも扱えるように Keldysh グリーン関数を用いて拡張した。負符号問題をある程度緩和することに成功し、バイアス下の非平衡量子ドットの非線形伝導について解析した [9]。

モット絶縁破壊とベーテ仮説励起状態の非エルミート拡張

岡、青木は「多体 Landau-Zener 遷移」によってモット絶縁体の絶縁破壊現象を説明してきたが、Landau-Zener の公式を単純にハバードモデルに適用すると熱力学極限で敷居電場が発散してしまう。そこで、これを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することによって解決した [64]。敷居電場の計算過程で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、ハバード模型厳密 (Bethe) 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。

光格子中の冷却原子の超流動・Mott 絶縁体相転移ダイナミックス

光格子にトラップされた冷却原子系では超流動・Mott 絶縁体 (SF-MI) 転移が観測さるが、堀口 (現在

NEC)、岡、青木は、2 次元正方格子 Bose-Hubbard 模型に対し、時間依存 Schrödinger 方程式を数値的に解くことによって、SF-MI 相転移ダイナミックスを調べた [27]。これにより、相互作用 U/t を急変 (クエンチ) させた際、超流動振幅は指数関数的に成長しながら位相が空間的なドメイン構造を作り、Josephson 電流によりドメインが融合する過程で Kibble-Zurek 機構により位相欠陥 (渦) が発生する様子が示された。

3.1.5 その他

総合報告として、青木は、強相関電子系における物質設計 [34]、超伝導 [29]、高温超伝導 [30]、鉄系新超伝導体 [12, 13, 31, 35, 36, 50, 51, 52]、グラフェン [38, 39]、量子ホール効果 [37]、非平衡 BEC[40]、南部理論と物性物理学 [32, 33]、また岡、青木は強相関電子系における非平衡現象 [28, 53] 等のテーマで講演、解説、執筆を行った。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Kazuhiko Kuroki, Seiichiro Onari, Ryotaro Arita, Hidetomo Usui, Yukio Tanaka, Hiroshi Kontani, Hideo Aoki: Unconventional pairing originating from disconnected Fermi surfaces in superconducting $LaFeAsO_{1-x}F_x$, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 087004 (2008) [erratum: *ibid* **102**, 109902(E) (2009)].

[2] Walid Malaeb, Teppei Yoshida, Takashi Kataoka, Atsushi Fujimori, Masato Kubota, Kanta Ono, Hidetomo Usui, Kazuhiko Kuroki, Ryotaro Arita, Hideo Aoki, Yoichi Kamihara, Masahiro Hirano, Hideo Hosono: Electronic Structure and Electron Correlation in $LaFeAsO_{1-x}F_x$ and $LaFePO_{1-x}F_x$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77**, 093714 (2008).

[3] Kazuhiko Kuroki, Seiichiro Onari, Ryotaro Arita, Hidetomo Usui, Yukio Tanaka, Hiroshi Kontani and Hideo Aoki: Unconventional pairing originating from disconnected Fermi surfaces in the iron-based superconductor, *New J. Phys.* **11**, 025017 (2009).

[4] Kazuhiko Kuroki and Hideo Aoki: Unconventional pairing originating from disconnected Fermi surfaces in the iron-based superconductor, *Physica C, special edition on superconducting pnictides* (2009), in press.

[5] T. Morimoto, Y. Hatsugai, and H. Aoki: Cyclotron emission and radiation in graphene, *Phys. Rev. B* **78**, 073406 (2008).

[6] Mitsuhiro Arikawa, Yasuhiro Hatsugai, Hideo Aoki: Edge states in graphene in magnetic fields – a speciality of the edge mode embedded in the $n = 0$ Landau band, *Phys. Rev. B* **78**, 205401 (2008).

[7] P.A. Maksym, Y. Nishi, D.G. Austing, T. Hatano, L.P. Kouwenhoven, H. Aoki, S. Tarucha: Accurate model of a vertical pillar quantum dot, *Phys. Rev. B* **79**, 115314 (2009).

[8] Takashi Oka and Hideo Aoki: Photo-induced Tomonaga-Luttinger-like liquid in a Mott insulator, *Phys. Rev. B* **78**, 241104(R) (2008).

[9] P. Werner, T. Oka, and A. J. Millis: Diagrammatic Monte Carlo simulation of non-equilibrium systems, *Phys. Rev. B* **79**, 035320 (2009).

[10] Takashi Oka and Hideo Aoki: Photovoltaic Hall effect in graphene, *Phys. Rev. B* **79**, 081406(R) (2009) [erratum: *ibid* **79**, 169901(E) (2009)].

[11] Naoto Tsuji, Takashi Oka, and Hideo Aoki: Correlated electron systems periodically driven out of equilibrium — Floquet + DMFT formalism, *Phys. Rev. B* **78**, 235124 (2008).

(国際会議録（招待講演）)

[12] Hideo Aoki: Unconventional superconductivity originating from disconnected Fermi surfaces in the iron-based compound, *Proc μSR2008*, Tsukuba, 2008 [*Physica B* **404**, 700 (2009)].

[13] Hideo Aoki: Model construction and pairing symmetry for the iron-based oxypnictides, *Proc. 21st Int. Symposium. on Superconductivity*, Tsukuba, Oct. 2008, in press.

(国際会議録（一般発表）)

[14] Kazuhiko Kuroki, Seiichiro Onari, Ryotaro Arita, Hidetomo Usui, Yukio Tanaka, Hiroshi Kontani, and Hideo Aoki: Unconventional superconductivity originating from disconnected Fermi surfaces in the iron-based oxypnictide, *Proc. Int. Symp. Fe-Pnictide Superconductors*, Tokyo, 2008 [*J. Phys. Soc. Jpn* **77**, Suppl. C, 96 (2008)].

[15] Walid Malaeb, Teppei Yoshida, Takashi Kataoka, Atsushi Fujimori, Masato Kubota, Kanta Ono, Hidetomo Usui, Kazuhiko Kuroki, Ryotaro Arita, Hideo Aoki, Yoichi Kamihara, Masahiro Hirano, and Hideo Hosono: Photoemission study of the electronic structure of $LaFeAsO_{1-x}F_x$ and $LaFePO_{1-x}F_x$, *Proc. Int. Symp. Fe-Pnictide Superconductors*, Tokyo, 2008 [*J. Phys. Soc. Jpn* **77**, Suppl. C, 69 (2008)].

[16] Ryotaro Arita, Seiichiro Onari, Hidetomo Usui, Kazuhiko Kuroki, Yukio Tanaka, Hiroshi Kontani, and Hideo Aoki: Minimal model for study on superconductivity in $LaFeAsO_{1-x}F_x$ based on *ab-initio* downfolding, *Proc. LT25*, Amsterdam 2008 [*J. Phys.: Conf. Series* **150**, 052010 (2009)].

[17] Hirokazu Takashima, Ryotaro Arita, Kazuhiko Kuroki, and Hideo Aoki: An improved algorithm for the functional renormalization group and its application to the 2D Hubbard model, *Proc. LT25*, Amsterdam 2008 [*J. Phys.: Conf. Ser.* **150**, 052261 (2009)].

[18] Yasuhiro Hatsugai, Takahiro Fukui, Hideo Aoki: Topological low-energy modes in $N = 0$ Landau levels of graphene — a possibility of a quantum-liquid ground state, *Physica E* **40**, 1530 (2008).

[19] Takahiro Morimoto, Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Cyclotron radiation and emission in graphene — a possibility of Landau-level laser, *Proc. LT25*, Amsterdam 2008 [*J. Phys.: Conf. Series* **150**, 022059 (2009)].

[20] Takahiro Morimoto, Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Optical Hall conductivity in QHE systems, *Proc. LT25*, Amsterdam 2008 [*J. Phys.: Conf. Series* **150**, 022060 (2009)].

[21] Mitsuhiro Arikawa, Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Edge states for the $n = 0$ Laudau level in graphene, *Proc. LT25*, Amsterdam 2008 [*J. Phys.: Conf. Series* **150**, 022003 (2009)].

[22] Tatsuya Nakajima and Hideo Aoki: Landau quantization of graphene including diamagnetic shift and shrinkage of wave function, *Physica E* **40**, 1354 (2008).

[23] Takashi Oka and Hideo Aoki: Photo-induced Hall effect in graphene — effect of boundary types, *J. Phys.: Conf. Ser.* **148**, 012061 (2009).

[24] Takashi Oka and Hideo Aoki: Photo-induced metallic liquid in a one-dimensional Mott insulator in AC fields, *Proc. LT25*, Amsterdam 2008 [*J. Phys.: Conf. Ser.* **150**, 042152 (2009)].

[25] Naoto Tsuji, Takashi Oka, and Hideo Aoki: Photoinduced insulator-metal transition and nonlinear optical response of correlated electrons — a DMFT analysis, *J. Phys.: Conf. Ser.* **148**, 012058 (2009).

[26] Naoto Tsuji, Takashi Oka, and Hideo Aoki: Photoinduced insulator-metal transition in correlated electrons — a Floquet analysis with the dynamical mean-field theory, *Proc. LT25*, Amsterdam 2008 [*J. Phys.: Conf. Ser.* **150**, 042216 (2009)].

[27] N. Horiguchi, Takashi Oka, and Hideo Aoki: Nonequilibrium dynamics in Mott-to-superfluid transition in Bose-Einstein condensation in optical lattices, *Proc. LT25*, Amsterdam 2008 [*J. Phys.: Conf. Ser.* **150**, 032007 (2009)].

(編著書)

[28] Takashi Oka and Hideo Aoki: Nonequilibrium quantum breakdown in a strongly correlated electron system, in *Quantum Percolation and Breakdown* [*Lecture Notes in Physics* **762**, 251 (Springer Verlag, 2009)].

[29] 青木秀夫：「超伝導入門」（裳華房）、印刷中。

(国内雑誌)

[30] 青木秀夫：銅酸化物は超えられるか — 理論の立場から、パリティ、2008 年 5 月号、p.30。

[31] 青木秀夫：鉄系超伝導体、化学、**63**, No.12, p.26 (2008)。

[32] 青木秀夫：南部理論と物性物理学、日本物理学会誌、**64**, 80 (2009)。

[33] 青木秀夫：南部理論と物性物理学 — 超伝導を中心に、原子核研究（南部先生ノーベル賞受賞記念特集号）**53**, Suppl. 3 (2009)。

＜学術発表＞

(国際会議)

招待講演 (会議録掲載以外)

[34] Hideo Aoki: Materials design for correlated electron systems, *Int. Symposium on anomalous quantum materials*, Tokyo, 8 Nov 2008.

[35] Hideo Aoki: Mechanism of unconventional pairing in the iron-based superconductor, *Int. Workshop on inelastic neutron and x-ray scattering in strongly correlated electron systems*, Sendai, Oct 2008.

[36] Hideo Aoki: The iron-based superconductors — an introduction and outlook, *Int. Workshop on iron related high-Tc superconductors*, Ueno, Jan 2009.

[37] Hideo Aoki: Quantum Hall effect and real-space wavefunctions — multifractality in 2DEG and lattice systems, *Newton Institute Workshop on delocalization transitions and multifractality*, Wales, Nov 2008.

[38] Hideo Aoki: Novel optical properties predicted for graphene: Landau-level laser and photovoltaic Hall effect, *Okazaki Conf. "From aromatic molecules to graphene"*, Feb 2009.

[39] Hideo Aoki: Photo-induced Hall effects in graphene: optical Hall effect and photovoltaic Hall effect, *Int. Conf. "Graphene Week"*, Obergurgl, Mar 2009.

[40] Hideo Aoki: Non-equilibrium dynamics of Mott-to-superfluid transition in BEC in optical lattices, *Int. Workshop on dynamics and manipulation of quantum systems*, Tokyo, Oct 2008.

一般発表（会議録掲載以外）

[41] Hirokazu Takashima, Ryotaro Arita, Kazuhiko Kuroki, Hideo Aoki: An efficient algorithm for functional renormalization group and its application to 2D Hubbard model, *Int. Symposium on Anomalous Quantum Materials*, Tokyo, Nov 2008.

[42] Hirokazu Takashima, Ryotaro Arita, Kazuhiko Kuroki, Hideo Aoki, Functional renormalization group beyond the static approximation and its application to two-dimensional Hubbard model, *APS March Meeting*, Pittsburg, March 2009.

[43] Takahiro Morimoto, Yasuhiro Hatsugai, Hideo Aoki: Optical Hall conductivity in the THz region in the quantum Hall regime *Int. Symposium on Anomalous Quantum Materials*, Tokyo, Nov 2008.

[44] Takashi Oka and Hideo Aoki: Photo-induced Tomonaga-Luttinger-like liquid in a one-dimensional Mott insulator, *Workshop on Topological Aspects of Solid State Physics*, Kyoto, June 2008.

[45] Takashi Oka and Hideo Aoki: Photovoltaic Hall effect in Dirac systems — application to graphene, *APS March Meeting*, Pittsburgh, March 2009.

[46] Takashi Oka and Hideo Aoki: Anomalous quantum materials in strong electric fields — Mott insulator and graphene, *Int. Symposium on Anomalous Quantum Materials*, Tokyo, Nov 2008.

[47] Naoto Tsuji, Oka Takashi and Hideo Aoki: Dynamical mean-field analysis of the photo-induced insulator-metal transition in correlated electron systems — pump-probe spectroscopy, *APS March Meeting*, Pittsburgh, March 2009.

[48] Naoto Tsuji, Oka Takashi and Hideo Aoki: Floquet analysis for photoinduced phanomena in a correlated electron system, *Int. Symposium on Anomalous Quantum Materials*, Tokyo, Nov 2008.

[49] Naoto Tsuji, Oka Takashi and Hideo Aoki: Photoinduced insulator-to-metal transition in correlated electron systems — a Floquet + DMFT study, *Workshop "Novel aspects of phase transitions with long-range interactions"*, Tokyo, Oct 2008.

(Colloquia)

[50] Hideo Aoki: Unconventional pairing originating from disconnected Fermi surfaces in the iron-based pnictides, Technical Univ. Vienna seminar, Aug 2008.

[51] Hideo Aoki: Unconventional superconductivity originating from disconnected Fermi surfaces in the iron-based compounds, Quantum Matter group seminar, Univ. Cambridge, Oct 2008.

(国内会議)

招待講演

[52] 青木秀夫:「鉄化合物新超伝導体の物理」 シンポジウム — はじめに (日本物理学会、盛岡、 Sept 2008)。

[53] 岡 隆史:強相関電子系における非平衡現象 (密度行列繰り込み群法を用いた物性研究の新展開、京都、Dec 2008)。

一般発表

[54] 高島宏和、有田亮太郎、黒木和彦、青木秀夫、静的近似を超えた汎関数繰り込み群法と 2 次元 Hubbard 模型への適用 (日本物理学会、盛岡、Sept 2008)。

[55] 高島宏和、有田亮太郎、黒木和彦、青木秀夫:静的近似を超えた汎関数繰り込み群法の開発と 2 次元斥力 Hubbard 模型 (「新しい物質と新しい物理 —若い世代からの提案」、箱根、Nov 2008)。

[56] 高島宏和、有田亮太郎、黒木和彦、青木秀夫:静的近似を超えた汎関数繰り込み群と 2 次元斥力 Hubbard 模型 (「スピンが開く物質科学の最前線」、東大, Nov 2008)。

[57] 高島宏和、有田亮太郎、黒木和彦、青木秀夫:静的近似を超えた汎関数繰り込み群と 2 次元斥力 Hubbard 模型への方法 (「異常量子物質の創製」成果報告会、東大、Jan 2009)。

[58] 河原林透、初貝安弘、青木秀夫:グラフェンランダウ準位におけるランダムネスの効果 (日本物理学会、盛岡、Sept 2008)。

[59] 河原林透、初貝安弘、青木秀夫:強磁場中のグラフェン量子ホール効果におけるランダムネスのレンジの効果 (日本物理学会, 東京, Mar 2009)。

[60] 森本高裕, 初貝安弘, 青木秀夫: グラフェン量子ホール不規則系における光学ホール伝導度とプラトー構造 (日本物理学会, 東京, Mar 2009)。

[61] 青木秀夫:ゼオライト鋳型炭素の電子構造 (「配列ナノ空間を利用した新物質科学 — ユビキタス元素戦略」報告会、東京、Jan 2009)。

[62] 岡 隆史、青木秀夫:バイアス電圧下の強相関電子系における非平衡超伝導の理論 (日本物理学会、東京、Mar 2009)。

[63] 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その幾何学的起源 (日本物理学会、盛岡、Sept 2008)。

[64] 岡 隆史:一次元モット絶縁体の絶縁破壊について — Bethe 仮説, マスター方程式 (日本物理学会、盛岡、Sept 2008)。

[65] 岡 隆史、青木秀夫:Photo-induced Tomonaga-Luttinger liquid in a one-dimensional Mott insulator in AC fields (「異常量子物質の創製」成果報告会、東京、Jan 2009)。

[66] 岡 隆史、青木秀夫:グラフェンにおける光誘起ホール効果 (「スピンが拓く物性科学の最前線」、東京、Nov 2008)。

[67] 辻 直人、岡 隆史、青木秀夫:光誘起絶縁体・金属転移における光学伝導度の動的平均場解析 (日本物理学会、盛岡、Sept 2008)。

[68] 辻 直人、岡 隆史、青木秀夫:強相関系の強い光励起状態における光学伝導度スペクトルの理論 (「異常量子物質の創製」成果報告会、東京、Jan 2009)。

[69] 辻 直人、岡 隆史、青木秀夫:光誘起絶縁体・金属転移における光学伝導度の理論 (「スピンが拓く物性科学の最前線」、東京、Nov 2008)。

[70] 辻 直人、岡 隆史、青木秀夫:強相関電子系における光強励起状態とその光学応答の動的平均場理論 (日本物理学会、東京、Mar 2009)。

(学位論文)

[71] Hirokazu Takashima: New algorithm of numerical functional renormalization group method (博士論文, 2008 年 12 月)。

3.2 宮下研究室

統計力学・物性基礎論を理論的に研究している。特に、(1) 相転移・臨界現象や、秩序形成に伴う非平衡現象、(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ックス、などについて研究を進めている。

平成２０年度は、量子状態、ダイナミックスに関して、遍歴性のある量子粒子系での磁性・非磁性相転移やそのダイナミックス、速い外場掃引のもとでの秩序状態の量子応答、非自明なエネルギー固有値の縮退と系の対称性や異方性の関係、量子固体など新奇な量子状態、量子アニーリング、さらには伝導、輸送現象に関する一般的理論構築、などに関して研究を進めた。

また、協力現象の統計力学に関しては、昨年度我々のグループが提案した構成要素が体積変化をする場合の新しいタイプの相転移・臨界現象に関して光励起など動的側面について研究を進めた。

さらに、非平衡現象に関する基礎的な定式化や応答関数の一般的な表式に関する研究も行った。

3.2.1 新奇な量子状態、励起状態、量子ダイナミックスの研究

強く相互作用する量子系では、系のパラメターによって異なる巨視的状態が現れ、その変化は量子相転移と呼ばれている。そこでは、古典系では見られない新奇な状態が見られる。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、古典的にはないいろいろ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。[12, 44, 46, 47, 54] 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 のクレストプロジェクトとして「量子多体協力現象の解明と制御」を進めている。

超固体

相互作用の強い系は、低温で秩序化を示すが、その際の秩序パラメターとして空間的な位置の対称性が壊れる「対角秩序」と超伝導や超流動など位相の対称性が壊れる「非対角秩序」がある。ヘリウムの場合、前者は固化であり、後者は超流動状態である。古くから、これら２つの秩序状態が共存するかどうかが興味の対象になっており、超固体 (super-solid) の問題として多くの研究がなされた来た。我々は、この問題を格子状のボース粒子からなる softcore Bose Hubbard model を用いて研究し、温度とともに起こる逐次相転移の様子や基底状態での相図を求めた。[59] 特に、３次元系（単純立方格子）における、量子モンテカルロ法（確率的級数展開法）を初めて行い、低濃度での新しい領域での超固体実現を発見した。[13] また、光格子を用いて softcore Bose Hubbard model を実現する際に、原子間の相互作用によって系の温度を断熱的に変化させる機構についても研究した。[24]

遍歴電子系での磁性・非磁性相転移

格子上での遍歴電子系での磁性に関しては、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。この転移を電子の数を実効的に変化させることで断熱的に行う過程を示し、対応する光格子にトラップされた粒子系や分子磁性などでの興味深い現象の候補として提案した。また、この転移によって作られるスピン状態は、全スピン最大で、磁化が 0 のいわゆる Dicke 状態であり、その特徴が ESR などによって顕著に現れることを論じた。[2] さらに、光格子上では、スピン 1/2 の粒子のみならず、これまで議論されていなかった大きなスピンを持つ粒子系、フェルミ粒子系やボーズ粒子系も実現し、それらの遍歴磁性の性質についても明らかにし、光格子系における新しい現象として提案した。[32, 77]

量子スピン系：励起、ギャップ

外場による状態操作を考える場合、パラメターの関数としてのエネルギー準位の縮退が重要な役割を果たす。これまで、単分子磁性体をモデル化した異方的な大きな単独スピン系で、横磁場と系の異方性の関係で非自明なエネルギー準位の縮退が起こることが知られており、ベリー位相の干渉の観点から説明されてきた。我々はその機構を異方性相互作用に由来するパリティ対称性の観点から明らかにした。また、高次の異方性によってエネルギー準位の縮退の位置がパラメター空間上どのように変化するかについても明らかにした。[6] また、ハミルトニアンではなく周期的な外場のもとでの運動を記述するフロケ演算子の準位における非自明な縮退である coherent destruction of tunneling と呼ばれる現象に関しても、縮退の機構を明らかにし、外場の変化が時間に関して非対称の場合縮退が解けることを示した。[33, 80]

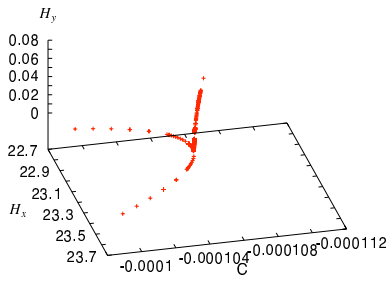

図 3.2.5: 異方性とエネルギー準位縮退点の関係

横磁場イジング模型の秩序状態の量子ダイナミックス

これまで、エネルギー準位の構造をもとに比較的遅い磁場掃引のもとでの非断熱遷移（ランダウ・ゼナー遷移）の効果を調べてきたが、協力現象によって量子相転移を引き起こす１次元横磁場イジング模型において、秩序変数がどのようなダイナミックスを示すかについて研究を進めた。そこで明らかになったのは、ある程度速い掃引の場合、系の大きさによらず似た磁化過程が現れることが明らかになった。我々は、その現象を量子スピノーダル現象と呼び、その

機構を調べた。そこで、速い外場の変化を取り扱うため、速度の逆数をパラメターとする新しい摂動展開の方法を提案した。[14, 78] この研究は、オランダのグローニンゲン大学のドラーツ博士、フランスのグルノーブル、ルイネール研究所のバーバラ博士との共同研究である。

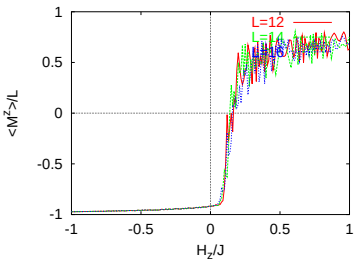

図 3.2.6: 横磁場イジング模型での掃引磁場下での磁化の運動

横磁場の効果は、量子アニーリングとして基底状態の探索にも用いられる。特に、フラストレートした系での量子アニーリングの特徴を研究した。[28, 35, 36, 37, 56] この方法の応用に関して、量子ゆらぎと古典ゆらぎの関係などについても研究を進めている。[12]

量子粒子移送

粒子をポテンシャルで捕捉し移送する際の量子効果についても研究を進めている。特に、加速が粒子に与える効果は、ある種のトンネル効果として捉えることができ、加速による散逸率がトンネル率で表されることを明らかにし、トンネル率を複素固有値をもつ共鳴状態と関連づけ特徴を明らかにした。また、加速のスムーズさと加速の最大値の関係から散逸率の最小化問題を調べている。[29]

キャビティ光子状態の非破壊測定と操作

キャビティ内の光子状態と原子の相互作用を利用して光子状態を非破壊測定し、また制御する機構について研究した。キャビティ内の光子状態と原子の相互作用は Jaynes-Cummings 模型で取り扱い、粒子がキャビティを通り抜けていく際の相互作用を、断熱的なパラメター変化として捉えるモデルを用いて、非破壊測定の機構を明らかにし、さらに原子の状態を観測することによってキャビティ光子状態がどのような変化を受けるかについて調べた。さらに観測のあり方と量子状態の変化の全体像についての研究を進めている。[34, 69, 74]

3.2.2 非平衡ダイナミックス、輸送現象

熱浴と相互作用している系のダイナミックスは熱浴の自由度を捨象する射影演算子の方法で定式化されるが、その定式化と散逸がある系での量子ダイナミックスを取り扱う量子マスター方程式の関係について詳しく調べた。[5, 22, 71] また、散逸がある系での線形応答の理論を展開し、ESR や NMR の線形の線幅に関する具体的な表式を求めた。[48, 15, 72]

また、かごめ格子など強くフラストレートした系での、エントロピーに起因する緩和現象についても研究した。[25, 30, 31]

熱伝導現象の研究として、典型的なモデルであるフェルミ・ウラム・パスタ (FPU) モデルを考え、局在現象と非線形効果の競合に関する研究を行った。よく知られているように質量がランダムである完全調和格子では局在現象が起こり、熱力学極限で熱流が消えてしまう。非線形格子を考えたときでも、ナイーブに考えれば非線形項は低温ではきかず、高温だけできいてくる可能性がある。局在効果と非線形項の効果の競合にどのような特徴があるかを考えることは、興味深い。大規模な数値計算により、どのような温度領域でも熱力学極限では非線形項が無視できず、局在がとけることが見出された。[3, 9, 40, 43, 57, 79]

また、メゾスコピック系の電気伝導の研究も行った。「完全計数統計」と統計力学の「揺らぎの定理」を結び付け、実験で観測できるオンサーガー関係を超えた輸送係数間の関係式を見出した。非線形輸送係数とは、温度一定のもとで、２つの粒子浴（リード線）の間に伝導体を介して電流が流れる場合を考え、電流の任意のキュミュラントを電位差で展開した時の係数として定義される。現在この普遍関係式はアハラノフ・ボーム干渉系で実験で確かめる試みがなされている。[4, 45, 81]

3.2.3 スピンクロスオーバー錯体における協力現象の研究

最近、磁場や光、あるいは圧力、温度などのパラメターによって複合的に系の状態（特に相）を制御できる物質が、機能材料と呼ばれ注目されている。[1, 10, 11, 50] このテーマについての実験面の研究は、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。[21, 37, 75, 53, 76] その中で、我々が取り組んでいる物質として局所的な電子状態が２値をもつスピンクロスオーバー物質（ハイスピン（HS）状態、ロースピン（LS）状態）やまた、電荷移動による電子状態変化がある電荷移動などがある。これらの相転移は、その２値性から Ising モデルを用いて解析されてきたが、昨年、我々はその２値に応じて構成ユニットの大きさが異なることで、格子の弾性エネルギーのため、従来の短距離相互作用だけでなく、実効的な長距離力がある系になっていることを指摘し、そのために相転移の性質が、いわゆる分子場ユニヴァーサリティに属することを発見した。そのため、秩序化の際の多くの性質が変更されることになる。[38, 39, 41, 26, 27, 51]

今年度は、秩序化のダイナミックスの中で、低温での光照射による LS 状態から HS 状態への遷移過程の研究を行った。一般に相互作用がある系では、光照射の強さに関してある種の閾値現象があることが知られている。この現象は、ヒステリシスループの端点でのスピノーダル現象に対応したものである。短距離相互作用の系では、準安定状態から臨界核形成と呼ばれる過程によって緩和が起き、そのため分子場近似で現れるスピノーダル現象の特異性はなくなる。そのため、スピノーダル現象の特異性の研究は詳しく行われて来なかった。しかし、上で述べた相転

移の場合と同様、動的な性質に関しても今のモデルは分子場理論と同様の真に特異な臨界現象を示すことを発見した。[49, 52, 55] その特異性を解析するため、長距離相互作用のモデルでのダイナミックスをマスター方程式を用いて明らかにした。[16, 68, 73]

3.2.4 大きなスピン模型での可解模型の研究

大きなスピンを持つ場合の転送行列の性質を研究し、異方性がある場合にまで一般化した場合の可解条件を求め、相関関数などの具体的計算法について研究した。[23, 8, 64, 65, 66] また、box-ball（箱玉）系の Rigged 配位や、Kirilov-Schilling-Shimozono 全単射について crystal(結晶) 基底を用いた定式化などを行った。[7, 18, 19, 20, 58]

＜報文＞

(原著論文)

[1] K. Boukheddaden, M. Nishino, and S. Miyashita, Molecular Dynamics and Transfer Integral Investigations of an Elastic Anharmonic Model for Phonon-Induced Spin Crossover, Phys. Rev. Lett. 100, 177206 (2008).

[2] S. Miyashita, Adiabatic Change from Mott Insulator to Nagaoka Ferromagnetic State, Prog. Theor. Phys. 120, 785 (2008).

[3] K. Saito and Y. Utsumi, Symmetry in Full-Counting Statistics, Fluctuation Theorem, and Relations among Nonlinear Transport coefficients in the presence of a Magnetic field, Phys. Rev. B 78, 115429 (2008).

[4] K. Saito, Energy Dissipation and Fluctuation-Response in Driven Quantum Langevin Dynamics, Europhys Letters 83, 50006 (2008).

[5] T. Mori and S. Miyashita, Dynamics of the Density Matrix in Contact with a Thermal Bath and the Quantum Master Equation, J. Phys. Soc. Jpn. 77, 124005 (2008).

[6] K. Hijii and S. Miyahsita, Structure of energy-level degeneracy of a single-spin model from a viewpoint of symmetry of the spin anisotropy and its nontrivial spin dependence on the higher-order anisotropy, Phys. Rev. B 78, 214434 (2008).

[7] R. Sakamoto, A crystal theoretic method for finding rigged configurations from paths,J. Phys. A: Math. Theor. 41, 355208 (2008).

[8] E.D. Loutete-Dangui, E. Codjovi, H. Tokoro, P. R. Dahoo, S. Ohkoshi, K. Boukheddaden, Spectroscopic ellipsometry investigations of the thermally-induced first-order transition of RbMnFe(CN)6, Phys. Rev. B, 78, 014303 (2008).

[9] A. Dhar and K. Saito,Heat conduction in the disordered Fermi-Pasta-Ulam chain, Phys. Rev. E 78, 061136 (2008).

[10] M. Nishino, K. Boukheddaden, and S. Miyashita, Molecular dynamics study on thermal expansion and compression of spin-crossover solids by a microscopic model of elastic interactions, Phys. Rev. B 79, 012409 (2009).

[11] M. Nishino, K. Boukheddaden, S. Miyashita, and F. Varret, Dynamical property of nucleation in spin crossover depending on the system boundary, J. Phys. Conf. Ser. 148, 012034 (2009).

[12] S. Miyashita, S. Tanaka, H. de Raedt, and B. Barbara, Quantum response to time-dependent external field, J. Phys.Conf. Ser. 143, 012005 (2009).

[13] K. Yamamoto, S. Todo and S. Miyashita, Successive phase transitions at finite Temperatures towards the supersolid state in a three-dimensional extended Bose-Hubbard model, Phys. Rev. B79, 094503 (2009).

[14] S. Miyashita, H. De Raedt and B. Barbara, Quantum spinodal phenomena, Phys. Rev. B 79, 104422 (2009).

[15] M. Saeki, Transverse Susceptibilities of Ferromagnetic Spin Wave Interacting with Photon Reservoir, Prog. Theor. Phys. 121, 165 (2009).

[16] S. Miyashita,M. Nishino, Y. Konishi, H. Tokoro, K. Boukheddaden, F. Varret and P. A. Rikvold, New type of ordering process with volume change of molecules in the spin-crossover transition, and its new aspects of dynamical processes, J. Phys. Conf. Ser. 148, 012027 (2009).

[17] S. Muratsugu, K. Sodeyama, F. Kitamura, M. Sugimoto, S. Tsuneyuki, S. Miyashita, T. Kato and H. Nishihara, Two-Electron Reduction of a Rh-Mo-Rh Dithiolato Complex to Form a Triplet Ground State Assosiated eith a Change in CO Coordination Mode, J. Am. Chem. Soc., 131, 1388 (2009).

[18] R. Sakamoto, Kirillov–Schilling–Shimozono bijection as energy functions of crystals,Inter. Math. Res. Notices 2009, 579 (2009).

[19] R. Sakamoto, Finding rigged configurations from paths, RIMS Kokyuroku Bessatsu B11, 1-17 (2009).

[20] A. N. Kirillov, R. Sakamoto, Relationships Between Two Approaches: Rigged Configurations and 10-Eliminations, Lett. Math. Phys. (in press).

[21] (Tokoro in experiments)
S. Ohkoshi, Y. Hamada, T. Matsuda, Y. Tsunobuchi, H. Tokoro, Crystal structure, charge-transfer-induced spin transition, and photoreversible magnetism in a cyano-bridged cobalt-tungstate bimetallic assembly, Chem. Mater. 20, 3048 (2008). S. Ohkoshi, T. Matsuda, S. Saito, T. Nuida, H. Tokoro: Fine tuning of second order nonlinear activity with rubidium manganese hexacyanoferrates, J. Phys. Chem. C 112, 13095 (2008). K. Nakagawa, H. Tokoro, S. Ohkoshi, Observation of Ferroelectricity in Paramagnetic Copper Octacyanomolybdate, Inorg. Chem. 47, 10810 (2008). Evidence for

complex multistability in photomagnetic cobalt hexacyanoferrates from combined magnetic and synchrotron x-ray diffraction measurements, Phys. Rev. B 79, 064420 (2009). X.J. Liu, Y. Moritomo, T. Matsuda, H. Kamioka, H. Tokoro, S. Ohkoshi, Pressure-induced octahedral rotation in RbMn[Fe(CN)6], J. Phys. Soc. Jpn., 78, 013602 (2009). H. Tokoro, K. Nakagawa, K. Nakabayashi, T. Kashiwagi, K. Hashimoto, S. Ohkoshi, Photo-reversible Switching of Magnetic Coupling in a Two-dimensional Copper Octacyanomolybdate, Chem. Lett., 38, 338 (2009). K. Takeda, H. Tokoro, F. Hakoe, A. Yamaguchi, H. Mori, H. Ishimoto, Nakamura, S. Kuriki, S. Ohkoshi, High Temperature Superconductor Micro-SQUID Magnetometer for Molecular-based Magnets, Polyhedron, (in press).

(国内雑誌)

[22] 宮下精二,「線形応答理論の成立と発展」 日本物理学会誌 63, 748-754 (2008).

(学位論文)

[23] Chihiro Matsui, Correlation Functions of Higher Spin XXZ Model, 松井千尋, 高次スピン XXZ 模型における相関関数, (修士論文、2007 年 12 月)

[24] Shingo Yoshimura, Adiabatic Temperature Changes of Cold Bosons in an Optical Lattice, 吉村真悟, 光格子中の冷却ボゾンにおける断熱温度変化, (修士士論文、2007 年 12 月)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[25] S. Tanaka and S. Miyashita, Slow Relaxation in Ising like Heisenberg Kagome Antiferromagnets, 1st International Conference of the Grand Challenge to Next-Generation Integrated Nanoscience,Miraikan, 2008 Jun.

[26] S. Miyashita, Y. Konishi, H. Tokoro, M. Nishino, K. Boukheddaden, F. Varret and P. A. Rikvold, Effect of volume change of molecule in the spin-crossover transition and new aspects of dymamical processes of the phase transition, ICMM 2008, Florence,Italy, 2008/09/21-24.

[27] M. Nishino, K. Boukheddaden, Y. Konishi , S.Miyashita, F. Varret, Static and dynamical features of thermal expansion and compression of spin-crossover systems, ICMM 2008, Florence,Italy, 2008/09/21-24.

[28] S. Tanaka, M. Hirano and S. Miyashita, Quantum Annealing Effect in Highly Frustrated Systems, Dynamics and Manipulation of Quantum Systems, University of Tokyo, 2008 Oct.

[29] Z. Bertalan, Accelerated Potential Well, University of Tokyo, 2008 Oct.

[30] S. Tanaka and S. Miyashita, Phase Transition and Ordering Process in Kagome Antiferromagnets, International Workshop on "Novel Aspects of Phase Transitions with Long-range Interactions"University of Tokyo, 2008 Oct.

[31] S. Tanaka and S. Miyashita, Slow Relaxation in Anisotropic Kagome Heisenberg Antiferromagnets in theExotic Ferromagnetic Ordered State, JSPS Japan-France Bilateral Joint Seminar 2008, Frontiers of GlassyPhysics, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, 2008 Nov.

[32] S. Miyashita, Control of quantum itinerant magnetic state by particle manipulation in a local lattice. - dynamical aspects of the Nagaoka ferromagnetisim and its extention to the higher spin systems - 2008 International Symposium on Physics of Quantum Technology. Nara Nov.

[33] K. Hijii, An additional symmetry in nontrivial degeneracy and effects of forth order anisotropy in single molecular magnets. 2008 International Symposium on Physics of Quantum Technology. Nara Nov.

[34] S. Fujisawa, Feedback control of photon number state. 2008 International Symposium on Physics of Quantum Technology. Nara Nov.

[35] S. Tanaka, M. Hirano and S. Miyashita, Quantum Annealing for Fully Frustrated Systems, Supercomputing in Solid State Physics 2009, Institute for Solid State Physics, 2009 Feb.

[36] S. Tanaka, M. Hirano and S. Miyashita, Quantum Field Induced Orderings in Fully Frustrated Ising Spin Systems, International Symposium on Nanoscience and Quantum Physics nanoPHYS'09, International House of Japan, 2009 Feb.

[37] (Tokoro in experiments) K. Nakagawa, T. Matsuda, H. Tokoro, S. Ohkoshi, Photo-induced charge transfer phase transition in cesium manganese hexacyanoferrate magnetic material, Novel aspects of phase transitions with long-range interactions 2008, The University of Tokyo, October 2008. K. Nakagawa, T. Matsuda, H. Tokoro, S. Ohkoshi, Photo-induced charge transfer phase transition in cesium manganese hexacyanoferrate magnetic material, Novel aspects of phase transitions with long-range interactions 2008, The University of Tokyo, October 2008. K. Nakagawa, T. Matsuda, H. Tokoro, S. Ohkoshi, Light-induced charge transfer phase transition in cesium manganese hexacyanoferrate magnetic material, The 11th International Conference on Molecule-based Magnets 2008, Florence (Italy), September 2008. K. Nakagawa, T. Matsuda, H. Tokoro, S. Ohkoshi, Light-induced charge transfer phase transition in cesium manganese hexacyanoferrate magnetic material, International Conference Recent Optical Materials 2008, The University of Tokyo, 3-4th, April 2008. R. Fukaya, K. Ohki, M. Nakajima, H. Tokoro, S. Ohkoshi, T. Suemoto, Observation of photo-induced valence change by Raman spectroscopy

in rubidium manganese hexacyanoferrate, International Conference Recent Optical Materials 2008, The University of Tokyo, 3-4th, April 2008. T. Matsuda, K. Nakagawa, H. Tokoro, S. Ohkosh, Light-induced charge transfer phase transition in cesium manganese hexacyanoferrate magnetic material, International Conference Recent Optical Materials 2008, The University of Tokyo, 3-4th, April 2008. S. Saito, T. Matsuda, T. Nuida, H. Tokoro, S. Ohkoshi, A control of second harmonic generation with rubidium manganese hexacyanoferrates, International Conference Recent Optical Materials 2008, The University of Tokyo, 3-4th, April 2008.

招待講演

[38] S. Miyashita, Realization of the mean-field universality class in spin-crossover Material and its response to the light-irradiation pumping, ICROM2008 (International Conference of Recent Optical Materials) , Tokyo,2008/4/3-4.

[39] H. Tokoro, S. Miyashita, S. Ohkoshi, Reversible photomagnetic effect in rubidium manganese hexacyanoferrate, ICROM2008 (International Conference of Recent Optical Materials) , Tokyo,2008/4/3-4.

[40] K. Saito, Heat controlling in Magnetic systems and heat fluctuations in photonic systems, TIENCS (Transmission of Information and Energy in Nonlinear and Complex Systems – Focus on heat transfer and heat control in micro and nano scale), Singapore, 2008/6/4-5.

[41] S. Miyashita, Y. Konishi, H. Tokoro, M. Nishino, K. Boukheddaden, F. Varret, and Per A. Rikvold, Realization of the mean-field universality class in spin-crossover materials, and its new aspects in dynamical processes, MOLMAT 2008 (The 3rd International Symposium on Molecular Materials), Toulouse, France, 2008/7/8-11.

[42] S. Miyashita, Physics on molecular magnetism ", The 57th Fujihara Seminer: New Prospects on Molecular Magnetism, Tomakomai, 2008/7/28-31.

[43] K. Saito, Quantum Heat Conduction: Average Current and Fluctuations,Complexity of classical simulations of many body quantum dynamics,Cuernavaca, Mexico, 2008/7/27-8/9.

[44] S. Miyashita,, Quantum response to time-dependent field ", IW-SMI2008 (International Workshop on Statistical-Mechanical Informatics 2008), Sendai, 2008/9/14-17.

[45] K. Saito, Symmetry in Full counting statistics, Fluctuation Theorem, and Relation among transport coefficients, DDAP5 (The 5th International Conference on NonlinearScience, Dynamics Days Asia Pacific 5), Nara, 2008 September.

[46] S. Miyashita, Dynamical magnetization processes in molecular magnets, International workshop " Noise in complex systems : From molecular dynamics to stochastic modeling ", Daejeon, Korea, 2008/10/6-11.

[47] S. Miyashita, Quantum dynamics under time-dependent external fields, DMQS2008 (Dynamics and Manipulation Quantum Systems), Tokyo, 2008/10/20-22.

[48] C. Uchiyama, M. Aihara, M. Saeki and S. Miyashita, A Master equation approach to line shape in dissipative systems, DMQS2008 (Dynamics and Manipulation Quantum Systems), Tokyo, 2008/10/20-22.

[49] S. Miyashita, Realization of the mean-field universality class in spin-crossover materials, International Workshop on Novel Aspects of Phase Transitions with Long-range Interactions, Tokyo, 2008/10/28-30.

[50] H. Tokoro, and S. Ohkoshi, Phase transition in rubidium manganese hexacyanoferrate, International workshop on Novel Aspects of Phase Transitions with Long-range Interactions, Tokyo, 2008/10/28-30.

[51] M. Nishino, K. Boukheddaden, Y. Konishi, S. Miyashita, F. Varret, Phase transitions caused by long-range interactions in spin-crossover systems, International Workshop on "Novel Aspects of Phase Transitions with Long-range Interactions, Tokyo, 2008/10/28-30.

[52] S. Miyashita, New type of ordering process with volume change of molecules in the spin-crossover transition and its new aspects of dynamical processes, PIPT2008 (3rd International Conference on Photo-Induced Phase Transitions and Cooperative Phenomena, Yamada Conference LXIII), Osaka, 2008/11/11-15.

[53] H. Tokoro and S. Ohkoshi, Light-induced phase collapse in a rubidium manganese hexacyanoferrate, International conference on Photo-Induced Phase Transitions PIPT2008 (3rd International Conference on Photo-Induced Phase Transitions and Cooperative Phenomena, Yamada Conference LXIII), Osaka, 2008/11/11-15.

[54] S. Miyashita: Quantum dynamics under time-dependent extermal fields, International Workshop on Quantum Critical Phenomena and Novel Phases in Superclean Materials (PSM2009WS), Hawaii, USA, 2009/01/10-13.

[55] S. Miyashita, Dynamical properties of spin-crossover phase transition, Supercomputing in Solid State Physics 2009, Kashiwa, 2009/02/18.

[56] S. Tanaka, Quantum Annealing for Frustrated Systems, International Workshop on Quantum Phase Transition and Dynamics: Quenching, Annealing and Quantum Computation, Kolkata India, 2009/02/3-7.

[57] K. Saito, On heat fluctuations in heat transports and some aspects of average currents in higher dimension., International Workshop on Heat Transport in low dimensional system, Bangalore India, 2009/03-15-19.

(国内会議)

一般講演

[58] 坂本玲峰, Rigged configurations and box-ball systems, 第１１回代数群と量子群の表現論研究集会, 岡山, 25/5/2008.

[59] 宮下精二, Supersolid, 特定領域「新量子相の物理」A02 研究会 (「低次元ヘリウムの創製と新量子物性探索」), 電気通信大学, 2008/6/7.

[60] R. Sakamoto, Kirillov-Schilling–Shimozono bijection as energyfunctions of crystals, Mathematics Department of Tsukuba University, 筑波大学数学科セミナー, 10/6/2008.

[61] 内山智香子, 佐伯瑞彦, 相原正樹, 宮下精二, A Master Equation Approach to line shape in dissipative sytems, 日本物理学会 2008 秋季大会, 岩手大学, 2008/9/20-23.

[62] 西野正理, K. Boukheddaden, 宮下精二, F. Varret, 光相転移現象を示すスピンクロスオーバー系の弾性相互作用モデルによるダイナミクスの解析, 日本物理学会 2008 秋季大会, 岩手大学, 2008/9/20-23.

[63] 齊藤圭司, 量子輸送系での大偏差解析と揺らぎの定理, 日本物理学会 2008 秋季大会, 岩手大学, 2008/9/20-23.

[64] 松井千尋, 出口哲生, 可解高次スピン XXZ 鎖の相関関数, 日本物理学会 2008 秋季大会, 岩手大学, 2008/9/20-23.

[65] 松井千尋, 出口哲生, 可積分高次スピン XXZ 鎖における量子逆散乱, 日本物理学会 2008 秋季大会, 岩手大学, 2008/9/20-23.

[66] 松井千尋, 出口哲生, Correlation functions of integrable higher-spin XXZ chains and the quantum inverse scattering problem, 日本数学会, 東京工業大学, 2008/9.

[67] 西野正理, 宮下精二, 齊藤圭司, 藤堂眞治, Spin-crossover phenomena in macro and nanoscale systems / Spin-crossover phenomena in macro and nanoscale systems, 次世代ナノ情報機能・材料グループ成果報告会, 仙台、2008/12/10-11.

[68] 森 貴司: スピノーダル点からの緩和時間のサイズ依存性、古典および量子ダイナミックス・非平衡統計力学に関するワークショップ, 東京 2009/03/1-3.

[69] 藤澤慎介, 量子フィードバックによる光子数制御, 古典および量子ダイナミックス・非平衡統計力学に関するワークショップ, 東京 2009/03/1-3.

[70] 西野正理, Kamel Boukheddaden, 宮下精二, Francois Varret, 光誘起相転移現象を示すスピンクロスオーバー系の境界条件によるドメイン形成ダイナミクスの相違, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 立教大, 2009 /3/27-31.

[71] 森貴司, 宮下精二, 量子マスター方程式における定常状態への熱浴と相互作用の効果, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 立教大, 2009 /3/27-31.

[72] 内山智香子, 佐伯瑞彦, 相原正樹, 宮下精二, 熱浴と相互作用する複数スピン系の line shape - スピン間相互作用の効果-, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 立教大, 2009 /3/27-31.

[73] 宮下精二, 西野正理, P. A. Rikvold, 所 裕子, 森 貴司, 長距離相互作用のもとでのスピノーダル分解, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 立教大, 2009 /3/27-31.

[74] 藤澤慎介, 沙川貴大, 宮下精二, 上田正仁, 量子フィードバックによる光子数制御, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 立教大, 2009 /3/27-31.

[75] (Tokoro in experiments) 深谷亮, 中嶋誠, 所裕子, 大越慎一, 末元徹: RbMnFe シアノ錯体における光誘起価数変化のラマン分光による観測 II, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学、2008 年 9 月 20 － 23 日北島義典, 石地耕太朗, 松田智行, 所裕子, 大越慎一, 岩住俊明, 軟 X 線吸収スペクトルによる RbMn[Fe(CN)6] 錯体の相転移現象の観察 (2), 日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学、2008 年 9 月 20 － 23 日中川幸祐, 所裕子, 大越慎一, CuMo オクタシアノ錯体における強誘電性の観測, 日本化学会第 89 春季年会, 日本大学船橋キャンパス、2009 年 3 月. 所裕子, 大越慎一, RbMnFe シアノ錯体における光誘起相崩壊, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 立教大学、2009 年 3 月 27 － 30 日. 大越慎一, 濱田芳穂, 所裕子, Co-W 系シアノ錯体における可逆的な光磁性現象, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 立教大学、2009 年 3 月 27 － 30 日. 野澤俊介, 佐藤篤志, 一柳光平, 富田文菜, 所裕子, 大越慎一, 足立伸一, 腰原伸也, 時間分解 XAFS 測定を用いたプルシアンブルー類似体における光誘起相転移ダイナミクスの研究, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 立教大学, 2009 年 3 月 27 － 30 日.

招待講演

[76] 所裕子, 大越慎一, 集積型シアノ架橋型金属錯体における電荷移動相転移および光相転移現象, ナノフォトニクス総合的展開 オープンセミナー, 東京大学, 2008/5/29.

[77] 宮下精二, Adiabatic change from Mott state to Nagaoka Ferromagnetism, Super Clean 特定：研究成果報告会, 奈良、2008/12/19-20.

[78] 宮下精二, Quantum Dynamics of Magnetization under Time-Dependent Field」, 第２回研究会「金属錯体の固体物性科学最前線ー錯体化学と固体物性物理の連携 新領域創成をめざしてー」, 仙台, 2008/12/20-21.

[79] 齊藤圭司, 熱輸送現象におけるいくつかの問題, 古典および量子ダイナミックス・非平衡統計力学に関するワークショップ, 東京, 2009/03/1-3.

[80] 肘井敬吾, Quantum dynamics of nanomagnets under asymmetrically periodic field 古典および量子ダイナミックス・非平衡統計力学に関するワークショップ, 東京, 2009/03/1-3.

(セミナー)

[81] 齊藤圭司, 非平衡輸送論-完全計数統計と輸送現象-, 京都大学基礎物理学研究所, 2008 年 7 月.

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、従来と異なった新しい超伝導現象、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

強相関電子系としての高温超伝導

典型的な高温超伝導体のモデルである t-J モデルについて、その導出と正当化、様々な数値的手法による高温超伝導発現のメカニズムの研究、および RVB 平均場などによる研究についてレビューをまとめた。超伝導発現のメカニズムを解明するための数値的手法として、変分モンテカルロ法、少数系での厳密対角化、高温展開の手法などがある。これらの数値計算の結果はすべて、高温超伝導体の実験と一致するパラメータ領域において、$\mathrm{d}_{x^2-y^2}$-波超伝導が実現するということを示している。しかし残された課題も多い。最近の実験における異常の報告とともに、今後の課題や展望についても現時点での総括をした。[1]

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。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２つの異常物性を微視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。その結果、実空間でのギャップの不均一性と同時に、運動量空間でのギャップの性質を調べると、不均一性にも関わらず単純な d-波超伝導とほぼ同じ振舞いをすることがわかった。しかし、実空間においてギャップが大きくなっている領域に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。この考え方で、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。[62]

3.3.2 新超伝導体：鉄砒素系超伝導に対する理論

2008 年の発見以来注目を集めている鉄砒素系超伝導体に関して、超伝導発現のメカニズム、および特徴のある磁性に関しての理論的研究を行った。

鉄砒素系超伝導における非遮蔽効果の理論

鉄砒素系（鉄ニクタイド）超伝導の微視的機構として、従来のスピンゆらぎによるメカニズムに加え、新たにクーロン相互作用のスクリーニング効果を考慮した理論を構築した。今までの実験結果によると、電子をドープすることによって、系の状態密度が減少するにも関わらず超伝導転移温度はあまり変化しない。この結果は、単純な BCS 理論では理解できない。しかしクーロン相互作用の “非遮蔽効果” というものを考慮すれば、この効果のために超伝導転移温度が上昇するということがわかった。これに対し、磁気的な長距離秩序に関しては、同様の電子ドープによってネスティングが破れるために、スピン密度波の転移温度が下降するということもわかった。これらの結果は、鉄ニクタイド超伝導体で観測されている、光電子分光と核磁気緩和率の不思議な振舞いに対して、明確な説明を与えたといえる。[8, 43, 47, 57, 87]

鉄砒素系超伝導での遍歴電子による磁気特性

鉄砒素系超伝導体における磁性については、超伝導発現メカニズムとの関連で非常に興味が持たれている。そこで、スピン揺らぎのドーピング依存性および、磁性の起源が遍歴電子によるものか局在モーメントの発現を伴うのかなどについて調べた。具体的には、NMR や非弾性中性子散乱の実験と比較できる物理量である、核磁気緩和率や磁気構造因子を、遍歴電子を出発点としたモデルを用いて計算を行った。その結果、核磁気緩和率のドーピング依存性について、バンド構造として現実的なものを用いれば、実験結果を定性的に再現できるということを見いだした。[10, 61] また、多くの場合、局在スピンによって解析されている非弾性中性子散乱に関しても、現実的なバンド構造を持つ遍歴電子によるモデルに基づいて磁気構造因子を計算すれば、実験結果をよく説明することができることを示した。[10, 29, 48, 71]

3.3.3 有機導体に関する理論

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

擬一次元超伝導のモンテカルロシミュレーション

擬一次元電子系に対するくりこみ群による研究は基本的に摂動論的な議論であり、また一部の揺らぎだけをとくに強調して考慮している可能性がある。この可能性を排除し、さまざまな揺らぎをすべて同時に取り扱うことのできる手法として、補助場量子モンテカルロ法という数値計算を用いて擬一次元電子系の超伝導を調べた。その結果、次元性の増加とともに超伝導相関が増大することが明らかとなり、これまでの解析的な手法（くりこみ群）と矛盾なく相

補的な結果が得られた。さらにこれまで考慮されていなかった長距離斥力の効果も取り入れ、有機導体に特有の電荷秩序と超伝導との関係を調べた。その結果、長距離斥力のために電荷ゆらぎが強くなる場合には $d_{x^2-y^2}$-波超伝導状態よりも d_{xy}-波超伝導状態の方が安定であることを見出した。[3]

三角格子の一次元化によるスピン液体状態の研究

擬二次元三角格子を有する κ-$(ET)_2Cu_2(CN)_3$ や $EtMe_3Sb[Pd(dmit)_2]_2$ という物質では、絶縁体相の NMR や磁化率測定から、極低温まで磁気秩序を持たず、さらにスピンギャップも生じないという「ギャップレススピン液体」という新しい状態が生じていると考えられ、非常に注目されている。我々はこの系がもつ一次元的異方性に着目し、一次元スピン鎖がフラストレートしたジグザグボンドで結合したものと見なすモデルを用いてこの問題を研究した。もしフラストレーションの効果で鎖間相互作用が実効的に小さくなり、ほぼ独立な一次元スピン鎖のように振舞うならば、ギャップレススピン液体が説明できる。実際、RVB 平均場近似による解析を行った結果、絶対零度でかなり広いパラメータ領域において、ほぼ一次元的な一粒子励起スペクトルが現れることがわかった。さらに、この結果を有限温度まで拡張すると、鎖間の相関が低温で消失し、それより高温側では純粋に一次元的なスピン液体状態が実現された。この場合、磁化率は低温まで有限値を取り、比熱は温度に比例することが分かった。[18, 22, 38, 40]

また、「ギャップレススピン液体」状態を示すと考えられる擬１次元のモデルに対して、平均場近似ではなく、もっと厳密な数値的手法を用いてスピン液体状態を調べた。まず厳密対角化の手法を用いて少数系での基底状態を求め、その波動関数と純粋な１次元波動関数との重なり積分を計算することによって、系の“ 一次元度 ”の評価を行った。その結果、RVB 平均場近似より広いパラメータ領域で１次元的な波動関数が実現していることが明らかになった。[49, 54, 83] さらに、平均場近似を越えて量子ゆらぎを取り込むことができる変分モンテカルロ法による解析も行っている。試行波動関数として、異方性を取り入れた複素ギャップ関数をもつ BCS 波動関数を用いて変分パラメータの最適化を行ったところ、完全な三角格子に非常に近いパラメータ領域まで１次元化が生じる領域が拡大することがわかった。また、系が正三角格子の場合であっても、等方的なギャップ関数が安定にならないという非自明な結果を得た。[69, 89] これらの結果は、κ-$(ET)_2Cu_2(CN)_3$ や $EtMe_3Sb[Pd(dmit)_2]_2$ で見られている、微小なスピンギャップを持つスピン液体状態を説明できるのではないかと考えている。

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-$(BEDT\text{-}TTF)_2X$ 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生じている。これまでの研究から、２種類の電荷秩序状態がエネルギー的に拮抗していると考えられている。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非常に興味が持たれている。この現象を理解するために、非平衡グリーン関数理論を基礎に、定常非平衡 Hartree 近似法というものを定式化して調べた。その結果、金属状態である３倍周期の電荷秩序は電場によって安定化され、絶縁体状態であるストライプ型の電荷秩序は影響を受けないということが示された。一方、３倍周期の強度は電場によって減少する。これらの結果は、今まで解釈が難しいとされている実験をうまく説明すると考えられる。[4, 33, 96]

保存近似を考慮した Hatree-Fock 近似での電荷秩序相転移

θ-$(BEDT\text{-}TTF)_2X$ の有機導体を念頭に、低次元分子性導体でみられる電荷秩序現象の機構について新たな観点からの研究を行った。分子性導体における電荷秩序化現象は、これまで主に Hartree 近似や Hartree-Fock 近似を用いた平均場計算を用いて研究されてきた。Hartree 近似を用いた場合と Fock 項まで考慮した場合とを比較すると、得られる電荷秩序のパターンや電荷秩序転移の相図が異なることがわかる。このことは分子性導体において Fock 項の考慮が必要であることを示している。しかし、これまでの有限温度での金属-電荷秩序状態間の相転移の研究は乱雑位相近似（RPA）を用いて主に研究されている。この近似は Baym-Kadanoff 流の保存近似に基づけば Hartree 近似を行っていることに対応するので、Fock 項はあまり考慮されていないといえる。そこで、Hartree-Fock 近似が Baym-Kadanoff の保存則を満たすことに着目し、感受率を全ての波数で計算するという手法を用いることによって、有限温度での金属相から電荷秩序相への２次相転移を調べた。その結果、Fock 項を考慮することによって、電荷秩序転移が抑制されること、および、低温の電荷秩序相の波数は、Fock 項によるフェルミ面の変形のために乱雑位相近似の結果からずれることなどがわかった。[70, 90]

3.3.4 超伝導体の理論

空間反転対称性が破れた系の磁性と超伝導

$CePt_3Si$ という空間反転対称性の破れた系で超伝導が発見され、注目を集めている。このような系では偶パリティと奇パリティの対が混じることが知られている。この系を調べるためにまず、$CePt_3Si$ の電子構造とスピン軌道相互作用を記述する周期アンダーソンモデルおよびハバードモデルを構成し、乱雑位相近似による解析を行なった。その結果、$s+p$-波という状態と、$p+d+f$-波という２つの超伝導状態が安定であることがわかった。また、$CePt_3Si$ では

超伝導と反強磁性が共存するが、この物質が示す多くの異常物性の原因は、この反強磁性との共存にあることを示した。$s+p$-波を仮定し状態密度、比熱、$1/T_1T$、H_{c2}、非線型磁化率を計算した結果は実験結果を矛盾なく説明できることがわかった。[11, 24]

反強磁性量子臨界点近傍の FFLO 超伝導

FFLO 超伝導とは、並進対称性が自発的に破れた超伝導状態である。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ことである。その候補となる重い電子系超伝導体や有機超伝導超伝導体に共通する特徴は反強磁性量子臨界点近傍にあることである。そこで、FLEX 近似を磁場中かつ並進対称性が破れた系に拡張することによって、量子臨界点近傍での FFLO 超伝導の相図を調べた。その結果、それまでの予想に反して FFLO 超伝導が安定化されることが分かった。また、平均場近似では得られないような相図の特徴が、量子臨界揺らぎの寄与を取り入れることで説明できることも示された。さらに、FFLO 超伝導と磁気秩序が共存する可能性を示した。[5, 16]

不純物バンド超伝導におけるアンダーソン局在と超伝導揺らぎ

ボロンを添加したダイヤモンドにおける超伝導が発見され、不純物バンドでの超伝導が注目を集めている。一方、アンダーソン局在と超伝導の競合による超伝導絶縁体転移は長年の理論的課題である。これまでに長距離クーロン相互作用の効果を調べた研究が成功を収めてきたが、不純物バンドにおける超伝導を記述するためにはそれだけでは不十分であると考えられる。そこでランダムネスを厳密に取り扱うことができる微視的モデルを用いてこの問題を調べた。その結果、超伝導のメゾスコピック揺らぎと熱揺らぎが増強されることによって、擬ギャップを伴った超伝導絶縁体転移が起こるメカニズムを提唱した。[12, 15, 21, 26]

磁場中のランダム電子系における FFLO 超伝導・超流動

ランダムネスがある環境下における FFLO 超伝導・超流動の実空間構造を Bogoliubov-de Gennes 方程式に基づいて調べ、その結果がランダムネスの種類によって定性的に異なることを示した。ボルン極限では、通常のストライプ型構造の歪みとして理解される。一方、ユニタリー極限では、秩序変数の強いピニングにより多数の空間構造が縮退したエネルギーの多谷構造が生じる。ボルテックスグラス相との類似性から、この結果は「FFLO グラス相」の存在を示唆しているといえる。

レーザー冷却中性原子気体における Angular-FFLO 超流動

レーザー冷却中性原子気体で実現される低温量子凝縮相は、強相関電子系から高濃度クォーク物質までを含む凝縮系物理学の新たな可能性を提供している。この問題に関して、インバランスなフェルミ原子系における FFLO 超流動と、BCS-BEC クロスオーバーについて調べた。これまでの研究から、通常の調和型トラップでは対称性の破れを伴う FFLO 超流動は実現されないことが知られているが、トロイダル型トラップならば、回転対称性の破れを伴う新しい形の FFLO 超流動（Angular-FFLO 超流動）が実現することを示した。また不均一系での超流動揺らぎを計算し、BCS-BEC クロスオーバーとそれに伴う擬ギャップの存在を示した。FFLO 超伝導は一般に揺らぎに対して不安定だということが知られているが、この FFLO 超流動は揺らぎに対して安定であることを示し、その原因が擬ギャップにあることを指摘した。[35, 63, 98]

3.3.5 ディラック電子系におけるバンド間磁場効果とホール効果

最近見出されたある種の有機物質や、グラファイトの 2 次元系、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、電子の分散関係が相対論的量子力学におけるディラック電子と全く同じになる場合が見出されている。このような電子系は、通常の金属状態と全く異なる振舞いを示すと予想され、新たな電子状態として非常に興味が持たれている。とくに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、ホール効果に現れるバンド間磁場効果を調べた。解析の結果、磁場によるバンド間の効果が、これまで知られていなかった新たな寄与をホール伝導度に与えることがわかった。この現象はバンド端で特に顕著に現れ、急峻なピーク構造を示す。このような振舞いは、従来の直感的な予測からは想像し得ない結果であり、新奇ホール電流が反磁性電流と起源が同じであることを強く示唆している。さらに、スピン-軌道相互作用を伴うディラック電子系の典型物質であるビスマスに対して、この理論を適用することによって、長らく混乱していたビスマスでのホール効果の測定結果を整理する指針を提案した。[2, 19, 23, 25, 39]

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のある 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「ラットリ

ング」という現象が見られている。この系では、超伝導転移のほかに「ラットリング転移」と呼ばれる相転移を起こすことが実験的に知られている。このラットリ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、単純な強磁性状態とは異なる新奇な基底状態に 1 次相転移することを見出した。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、残留エントロピーは K 原子 1 個当り約 $k_{\mathrm{B}} \log 1.3$ もある。この基底状態は Potts 変数の空間配置が等方的でなくなっているという意味で、結晶の対称性を破っており、実験において顕な対称性の破れが観測されていないということとは矛盾する。このため、β 型パイロクロア酸化物の説明には結果的に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。[28, 31, 46, 66, 91, 94]

幾何学的フラストレーションを持つハバードモデルの基底状態

フラストレーションを持つハバードモデルの基底状態では、強い量子効果によって新奇な量子状態が実現し得ることが様々な研究によって明らかになってきている。このような系では短距離相関が重要であると思われるが、それを厳密に取り扱うことができる量子クラスターの方法 (variational cluster approach) を用いて調べた。具体的には、正方格子上の t-t' ハバードモデルが三次元方向に重なったモデルを用い、幾何学的フラストレーションの効果と次元性の効果の競合関係を調べた。その結果、3 次元性を導入していくと磁気的秩序を持たない絶縁体相は消滅し、反強磁性相からコリニアーな磁気的秩序相への直接的な一次転移が起こることがわかった。[13, 44]

バンド絶縁体効果とモット絶縁体効果の共存・競合

バンド絶縁体効果とモット絶縁体効果が共存・競合した系では、量子揺らぎの増大によって新奇な量子相が現れる可能性がある。このことを明らかにするために、2 次元イオン性ハバードモデルと、2 層を持つハバードモデルについて量子クラスターの方法を適用して電子状態を調べた。その結果、反強磁性モット絶縁体相とバンド絶縁体相の間に新たな別の相が現れることが分かった。[34, 45, 59, 76]

3.3.7 重い電子系に関する理論

重い電子系の量子臨界点における反強磁性転移とフェルミ面のトポロジカル転移

近年、de Haas-van Alphen 効果をはじめとした重い電子系のフェルミ面に関する実験が詳細に行われるようになり、大きな注目を集めている。特に反強磁性転移点を境にフェルミ面トポロジーの変化が起きていることが、いくつかの実験から明らかになってきた。これは、従来の反強磁性転移に関する量子臨界点の理論では理解できない点も多く、新たな描像の必要性が議論されている。我々はこの現象に着目し、近藤格子模型と周期的アンダーソン模型に変分モンテカルロ法を適用し、基底状態における反強磁性転移とフェルミ面の変化を解析した。その結果、従来の反強磁性転移の他に、フェルミ面トポロジーの変化を伴うという新しいタイプの相転移（フェルミ面再構成）が存在することを明らかにした。相図中では反強磁性転移とフェルミ面再構成が同時に起こるパラメータ領域も存在し、実験結果を説明し得ると考えられる。[7, 14, 17, 36, 75]

ランダムネスを持つ重い電子系におけるクロスオーヴァー

f 電子がランダムに置換された重い電子系の物質においては、f 電子数の変化に伴って、局所的フェルミ液体状態から重い電子系へのクロスオーヴァーが起きると期待され、実際に多くの実験で確認されている。しかし理論的には未だ不明な点が多い。この問題に関して、変分モンテカルロ法を実空間でランダムな系に拡張するという手法を開発し、f 電子がランダムにドープされた場合の近藤格子模型の基底状態を調べた。その結果、交換相互作用のドーピング依存性を調べることにより、f 電子のコヒーレンスが成長し始める電子密度と、近藤スクリーニングに必要な伝導電子が不足し始める電子密度という、特徴的な 2 種類の電子密度が存在することを見出した。これらの電子密度は上述のクロスオーヴァーに深く関わっていると考えられる。[65, 93]

3.3.8 2 次元 ^{3}He に関する理論

グラファイト上に吸着された三角格子をなす ^{3}He の系は、非常によくコントロールされた純粋 2 次元のフェルミオン系である。さらに、He 間の強い斥力相互作用のために、低次元強相関フェルミオン系の典型的な例となっている。これに関していくつかの研究を行った。

2 次元 ^{3}He における新量子液体の発見：多体スピン交換相互作用の効果

グラファイト上の He の密度をコントロールして、ちょうど 2 次元面上に稠密に He が並ぶ状況を作ることができる（4/7 相と呼ばれている）。この 4/7 相（モット絶縁体）からわずかに粒子数を減らした領域では、比熱における二重ピーク構造など、通常のフェルミ液体としては理解しがたい特異な振舞いが報告されている。この異常液体の理論的解明のために、

２次元 ^{3}He のモデル化を行い基底状態の解析を行った。まず有効模型として、^{3}He 特有のハード・コアを考慮して He 粒子の二重占有を禁止し、さらに従来のハイゼンベルグ型の交換相互作用以外に、高密度 ^{3}He で顕著になるリング状の多スピン交換相互作用（リング交換）K を取り入れた三角格子 t-J-K モデルを考案した。これは今までの t-J モデルを拡張したものになっている。このモデルの基底状態を数値的厳密対角化によって調べ、相図を決定した。いくつかの大きさの系での結果を総合すると、ドープしたモット絶縁体領域において、強磁性的な二体交換と反強磁性的な四体交換相互作用が競合することによって、新しい量子相が出現し得ることを見出した。さらに、エネルギー分布の解析から、この新しい量子液体相ではスピン・質量（電荷）分離的振舞いが見られることを明らかにした。これは測定されている２次元 ^{3}He の新奇な状態を説明することができると考えられる。[6, 50, 72, 79, 106]

3.3.9 磁壁駆動の微視的理論

近年、強磁性体中に形成させた磁壁を電流で駆動・制御する試みがなされており、不揮発性メモリへの応用に向けて盛んに研究されている。しかし、その駆動機構の微視的な理解は未だ不十分であるといえる。これは、既存の理論において電流を担う伝導電子のダイナミクスが過小評価されてきたからである。そこで、磁壁のみならず伝導電子のダイナミクスも完全に考慮することにより、磁壁の駆動機構の微視的な解析を行った。[9, 37, 41, 68] 具体的な手法としては、伝導電子系と局在古典スピン系とが結合した系に電場を印加し、伝導電子が従う時間依存 Schrödinger 方程式と、磁壁をなす局在古典スピンが従う Laudau-Lifshitz-Gilbert 方程式の２つを連立して数値的に解くことにより、実時間シミュレーションを行った。解析の結果、磁壁の容易面からの立ち上がりを制御する困難軸異方性定数の大きさに依存して、磁壁の駆動機構が既存の理論で支配的と考えられていたスピン移行から、運動量移行に移り変わることを見出した。また、この運動量移行による磁壁運動は、摩擦が関わる現象で現れるスティック・スリップ運動として理解できることが分かった。

＜報文＞

(原著論文)

[1] M. Ogata and H. Fukuyama: Rep. Prog. Phys. **71**, 036501 (2008). “The t-J model for the oxide high-T_c superconductors”

[2] Y. Fuseya, M. Ogata and H. Fukuyama: Phys. Rev. Lett. **102**, 066601 (2009). “Interband Contributions from Magnetic Field on Hall Effects for Dirac Electrons in Bismuth”

[3] T. Aonuma, Y. Fuseya and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 034722 (2009). “Quantum Monte Carlo Study of the Quasi-One-Dimensional Superconductivity”

[4] E. Yukawa and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn.. “Mean-Field Analysis of Electric Field Effect on Charge Orders in Organic Conductors”

[5] Y. Yanase: J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 063705 (2008). “FFLO Superconductivity near the Antiferromagnetic Quantum Critical Point”

[6] Y. Fuseya and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 013601 (2009). “Phase Diagram of the Triangular t-J Model with Multiple Spin Exchange in the Doped-Mott Region”

[7] H. Watanabe and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 024715 (2009). “Fermi-Surface Reconstruction in the Periodic Anderson Model”

[8] Y. Fuseya, T. Kariyado, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 023703 (2009). ““Unscreening” Effect of Coulomb Interaction on Fe-Pnictide Superconductor”

[9] D. Matsubayashi, M. Udagawa and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 033703 (2009). “Numerical Study of Current-Induced Domain-Wall Dynamics: Crossover from Spin Transfer to Momentum Transfer”

[10] T. Kariyado and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 043708 (2009). “Normal-State Spin Dynamics of Five-Band Model for Iron Pnictides”

[11] Y. Yanase and M. Sigrist: J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 124711 (2008). “Superconductivity and Magnetism in Non-centrosymmetric System: Application to $CePt_3Si$”

[12] Y. Yanase and N. Yorozu: J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 034715 (2009). “Localization and Superconductivity in Doped Semiconductors”

[13] T. Yoshikawa and M. Ogata: Phys. Rev. B **79**, (2009). “Role of frustration and dimensionality in the Hubbard model on the stacked square lattice: Variational cluster approach”

(会議抄録)

[14] H. Watanabe and M. Ogata: Proceeding of The Int. Conference on Strongly Correlated Electron Systems (Houston, May 2007) Physica B **403**, 1390 (2008). “Anomalous changes of Fermi surface and Hall coefficient at quantum critical point”

[15] Y. Yanase and N. Yorozu: Proc. of IWSDRM (Tsukuba July 2008) Sci. Technol. Adv. Mater. **9**, 044201 (2008). “Superconductivity in compensated and uncompensated superconductors”

[16] Y. Yanase: Proceeding of 25th Int. Conf. on Low Temperature Physics (LT25) (Amsterdam, August 2008) J. Phys.: Conf. Ser. **150**, 052287 (2009). “Antiferromagnetic order in the FFLO state”

[17] H. Watanabe and M. Ogata: Proceeding of LT25 J. Phys.: Conf. Ser. **150**, 042227 (2009). “Fermi surface reconstruction in the Kondo lattice model and the periodic Anderson model”

[18] Y. Hayashi and M. Ogata: Proceeding of LT25 J. Phys.: Conf. Ser. **150**, 042227 (2009). “Finite Temperature RVB Mean-field Analysis of the Anisotropic Triangular Lattice Spin System”

[19] Y. Fuseya and M. Ogata and H. Fukuyama: J. Phys.: Conf. Series **132**, 012004 (2008). “Hall effect and orbital magnetism of Dirac electrons with spin-orbit interactions”

[20] H. Yokoyama and M. Ogata: Proceeding of the 8th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2007) (Sendai, August 2007) J. Phys. Chem. Solids **69**, 3356 (2008). “Doublon-holon binding effects on Mott transitions in two-dimensional Bose Hubbard model”

[21] Y. Yanase: Proceeding of SNS2007 J. Phys. Chem. Solids **69**, 3327 (2008). “Superconductor-Insulator Transition in Impurity Band Systems”

[22] Y. Hayashi and M. Ogata: Proceeding of SNS2007 J. Phys. Chem. Solids **69**, 3392 (2008). “RVB mean-field analysis of the Heisenberg model on the quasi-one-dimensional triangular lattice”

[23] Y. Fuseya, M. Ogata and H. Fukuyama: Proceedings of the 9th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-TOKYO ’08) “Hall effect and diamagnetism of bismuth”

[24] Y. Yanase and M. Sigrist: Proceeding of Int. Conf. on “New Quantum Phenomena in Skutterudite and Related Systems” (Kobe, September 2007) J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. **77**, 342 (2008). “Helical Superconductivity in Non-centrosymmetric Superconductors with dominantly Spin Triplet Pairing”

(国内雑誌)

[25] 伏屋雄紀: 物性研究 **90**, 537 (2008)「ビスマス研究温故知新—固体中ディラック電子とバンド間磁場効果」

[26] 柳瀬 陽一、萬 直行: 固体物理 **43**, 637 (2008)「ドープされた半導体の局在と超伝導」

(学位論文)

[27] 渡部 洋： “Novel Quantum Phase Transition with Fermi Surface Reconstruction in Heavy Fermion System” （重い電子系におけるフェルミ面再構成を伴う新奇な量子相転移）(東京大学大学院理学系研究科・博士論文)

[28] 五十嵐 亮： “Unconventional Phase Transitions in Classical Systems with Geometrical Frustration” (東京大学大学院理学系研究科・博士論文)

[29] 苅宿俊風： “Magnetic properties of multi-orbital systems in normal and superconducting states” (常伝導・超伝導状態における多軌道系の磁気的性質) (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)

(著書)

[30] 生井澤寛、小形正男：『量子物理』（放送大学教育振興会 2008 年）

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[31] R. Igarashi and M. Ogata: 1st International Conference of The Grand Challenge to Next-Generation Integrated Nanoscience Project, MEXT (Tokyo, June 2008). “Understanding frustration effect of rattling motion in KOs_2O_6”

[32] Masao Ogata: International Symposium on Molecular Conductors 2008 (ISMC2008) (Okazaki, July 23-25, 2008). “Melting of charge orders in extended Hubbard model with frustration”

[33] Emi Yukawa and Masao Ogata: ISMC2008 “Mean Field Analysis of Electric Field Effect on Charge Order in Organic Conductors”

[34] T. Yoshikawa and M. Ogata: ISMC2008 “Quantum phase transition between band and Mott insulating phases in the two-dimensional ionic Hubbard model”

[35] Y. Yanase: 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25) (Amsterdam, August 2008) “FFLO superconductivity near antiferromagnetic quantum critical point”

[36] H. Watanabe and M. Ogata: LT25 “Fermi surface reconstruction in the Kondo lattice model and the periodic Anderson model”

[37] D. Matsubayashi, M. Udagawa, and M. Ogata: LT25 “Stationary current-driven domain wall motion due to the momentum transfer”

[38] Y. Hayashi and M. Ogata: LT25 “Finite Temperature RVB Mean-field Analysis of the Anisotropic Triangular Lattice Spin System”

[39] Y. Fuseya, M. Ogata and H. Fukuyama: ISQM-TOKYO ’08, (Saitama, August 2008). “Interband effects of magnetic field on Hall effects for Dirac electrons in bismuth”

[40] Y. Hayashi and M. Ogata: The 2nd International Symposium on Anomalous Quantum Materials (ISAQM2008) (Tokyo, November 2008) “Analysis of the Anomalous Spin Liquid State on the Anisotropic Triangular Lattice”

[41] D. Matsubayashi, M. Udagawa, and M. Ogata: ISAQM2008 “Numerical study on current-induced domain wall motion by time-dependent Schrödinger equation”

[42] Y. Yanase: ISAQM2008 “FFLO state near antiferromagnetic quantum critical point with and without inversion symmetry”

[43] Y. Fuseya, Y. Kariyado, and M. Ogata: ISAQM2008 “Unscreening effects on the Fe-pnictide superconductor”

[44] T. Yoshikawa and M. Ogata: ISAQM2008 “Phase diagram of the ground state of the Hubbard model on a stacked square lattice with diagonal transfer”

[45] T. Yoshikawa and M. Ogata: ISAQM2008 “Anomalous quantum phase between band and Mott insulating phases in the two-dimensional ionic Hubbard model”

[46] R. Igarashi and M. Ogata : Supercomputing in Solid State Physics 2009 (Chiba, February 2009) “Partial order of frustrated Potts model”

[47] Y. Fuseya, T. Kariyado, and M. Ogata: American Physical Society 2009 March Meeting, (Pittsburgh, March 2009). “‘Unscreening’ effect on Fe-pnictide superconductor”

[48] T. Kariyado and M. Ogata: American Physical Society 2009 March Meeting, “Normal State Spin Dynamics of Five-band Model for Iron-pnictide”

招待講演

[49] M. Ogata: 10th German-Japanse Symposium “Collective Quantum-Phenomena in Correlated Condensed Matter Systems” (Ringberg, Germany, 9.28-10.1, 2008) “Possibility of Gapless Spin Liquid State by One-Dimensionalization in Anisotropic Triangular Lattice”

[50] M. Ogata: Int. Workshop on Quantum Critical Phenomena and Novel Phases in Superclean Materials (PSM2009ws) (Honolulu, Hawaii, January 10-13, 2009) “Effects of ring exchange interactions in Heisenberg and t-J models on a triangular lattice”

[51] Y. Yanase and M. Sigrist: Int. Workshop on Noncentrosymmetric Superconductors (Zurich, May 2008). “Magnetism and superconductivity in heavy fermion superconductors: $CePt_3Si$ and $CeCoIn_5$”

[52] Y. Yanase and N. Yorozu: International Workshop on Superconductivity in Diamond and Related Materials (Tsukuba, July 2008). “Superconductivity and Localization in Hole-doped Semiconductors”

[53] Y. Yanase and M. Sigrist: IUCr-XXI Congress and General Assembly of Int. Union of Crystallography (Osaka, August 2008). “Non-centrosymmetric Superconductivity and FFLO Superconductivity”

(国内会議)

一般講演

[54] 小形正男、林 勇太、伏屋雄紀：日本物理学会、岩手大学 2008, 9.20-9.23 (秋季大会) “1 次元化によるギャップレス・スピン液体状態の厳密対角化による研究”

[55] 柳瀬陽一：日本物理学会 (岩手大学) “乱れがある系の FFLO 超伝導状態とその磁気的性質”

[56] 土浦宏紀、小形正男：日本物理学会 (岩手大学) “t-J モデルにおける位相反転型 d 波ドメイン構造”

[57] 伏屋雄紀、苅宿俊風、小形正男：日本物理学会 (岩手大学) “オキシニクタイドと半金属超伝導”

[58] 五十嵐 亮、小形 正男：日本物理学会 (岩手大学) “ラットリング転移の古典 Potts 模型による解析 II”

[59] 吉川俊彦、小形正男：日本物理学会 (岩手大学) “二次元イオン型ハバード模型の基底状態の研究”

[60] 林 勇太、小形正男：日本物理学会 (岩手大学) “異方的三角格子スピン系の変分モンテカルロ計算”

[61] 苅宿俊風、小形正男: 日本物理学会 (岩手大学) “オキシニクタイド超伝導体の電子的性質のタイトバインディング模型による考察”

[62] 小形正男、土浦宏紀：日本物理学会、立教大学 2009, 3.27-3.30 (年次大会) “乱れを持つ t-J モデルにおける擬ギャップ”

[63] 柳瀬陽一：日本物理学会 (立教大学) “フェルミ原子気体における対称性の破れた FFLO 状態と BCS-BEC クロスオーバー”

[64] 柳瀬陽一、M. Sigrist：日本物理学会 (立教大学) “FFLO 超伝導状態における反強磁性秩序”

[65] 渡部洋、小形正男：日本物理学会 (立教大学) “ランダムにドープされた近藤格子模型の基底状態：heavy Fermi liquid から local Fermi liquid へ”

[66] 五十嵐 亮、小形 正男：日本物理学会 (立教大学) “ラットリング転移の古典 Potts 模型による解析 III”

[67] 吉川俊彦、小形正男:日本物理学会 (立教大学) “Bilayer Hubbard model の磁気的性質”

[68] 松林大介、宇田川将文、小形正男: 日本物理学会 (立教大学) “磁壁の電流駆動における運動量移行の寄与”

[69] 林勇太、小形正男：日本物理学会 (立教大学) “異方的三角格子スピン系の変分モンテカルロ計算 II”

[70] 湯川英美、吉見一慶、前橋英明、加藤岳生、小形正男：日本物理学会 (立教大学) “Hartree-Fock 保存近似に基づく電荷秩序不安定性の研究”

[71] 苅宿俊風、小形正男: 日本物理学会 (立教大学) “５バンドハバード模型による鉄砒素超伝導体に対する非弾性中性子散乱実験の解析”

[72] 小形正男、伏屋雄紀：特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子状態」A01 & A05 班合同研究会、東京大学小柴ホール、2008, May 9-10 “三角格子 t-J-K 模型における新しい量子液体相— 二次元液体 ^{3}He の有効模型として —”

[73] 柳瀬陽一: 物性研究所研究会「重い電子系研究の新展開」、物性研究所、2008, 7 “量子臨界点近傍における空間反転対称性および並進対称性が破れた超伝導: CePt3Si, CeCoIn5”

[74] 柳瀬陽一: 琉球物性研究会、琉球大学、2008, 11 “スピン三重項超伝導の観点からみた空間反転対称性の破れた系の超伝導”

[75] 渡部洋、小形正男：新しい物理を生む新物質若手の会、箱根 2008, 11.17-18. “重い電子系における f 電子の遍歴・局在とフェルミ面再構成の理論”

[76] 吉川俊彦、小形正男:物性科学領域横断研究会 “スピンが拓く物性科学の最前線” 東京大学、2008, 11.29-12.1 “二次元 ionic Hubbard 模型の基底状態の相図”

[77] 小形正男：次世代ナノ情報機能・材料グループ成果報告会、東北大学金属材料研究所、2008, 12.10-11 “Possibility of gapless spin liquid state by one-dimensionalization in anisotropic triangular lattice”

[78] 柳瀬陽一：第 16 回渦糸物理国内会議、東京工業大学、2008, 12.10 “ドープされた半導体の局在と超伝導”

[79] 伏屋雄紀：特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子状態」研究成果報告会、奈良県新公会堂、2008, December 19-21 “Triangular t-J-K model and the spin-charge separation”

[80] 伏屋雄紀:特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子状態」研究成果報告会、“A Theory for Iron-pnictide and Semimetal Superconductivity”

[81] 吉川俊彦、小形正男：特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子状態」研究成果報告会、“Bond order wave in the two-dimensional ionic Hubbard model”

[82] 柳瀬陽一：特定領域「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」奈良県商工会議所、2008, 12 “スピン三重項超伝導の観点から見た空間反転対称性の破れた超伝導”

[83] 林勇太、小形正男：特定領域研究「フラストレーションが創新しい物性」第 3 回トピカルミーティング、神戸大学、 2008, December 22-23 “フラストレーションによる一次元化とスピン液体”

[84] 小形正男：特定領域研究「異常量子物質の創製 ― 新しい物理を生む新物質 ―」成果報告会、東京大学生産技術研究所、Jan 5-7, 2009 “‘Unscreening’ effect on Fe-pnictide superconductor”

[85] 吉川俊彦、小形正男：特定領域研究「異常量子物質の創製 - 新しい物理を生む新物質 -」成果報告会 “Bond order wave in the two-dimensional ionic Hubbard model”

[86] 小形 正男：新学術領域研究「分子自由度が拓く新物質科学」キックオフミーティング、東京大学本郷キャンパス、2009, Jan 7-8 “電荷自由度のダイナミクスとスピンとの関係”

[87] 伏屋雄紀、苅宿俊風、小形正男：「第 1 回 TRIP 全体会議」湘南国際村センター、2008, February 14-15 “鉄砒素超伝導と半金属の理論”

[88] 小形正男：新学術領域研究「分子自由度が拓く新物質科学」A03 班会議（熱海温泉 志ほみや旅館 2009 2.27-2.28）“リング型多スピン交換相互作用による 2 次元系での新しいスピン電荷分離現象”

[89] 林勇太、小形正男：新学術領域研究「分子自由度が拓く新物質科学」A03 班班会議 “一次元型スピン液体の探索”

[90] 湯川英美、吉見一慶、前橋英明、加藤岳生、小形正男：新学術領域研究「分子自由度が拓く新物質科学」A03 班班会議 “Hartree-Fock 保存近似に基づく電荷秩序不安定性の研究 ”

[91] 五十嵐 亮、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 3 回公開シンポジウム, 岡崎コンファレンスセンター 2009, 3.4 “Partial order of frustrated Potts model”

[92] 柳瀬陽一、M. Sigrist：新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」第 1 回研究会、東京大学、2009, 3 “反強磁性量子臨界点近傍の FFLO 超伝導”

[93] 渡部洋、小形正男：新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」第 1 回研究会 “Ground state phase diagram of randomly-doped Kondo lattice”

[94] 五十嵐 亮、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次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェア説明会, 学士会館 2009, 3.11 “ALPS を用いた Potts 模型の解析”

招待講演

[95] 柳瀬陽一：特定領域「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」戦略会議、京都大学、2008, 5 “対称性の破れに伴う新奇超伝導相の理論”

[96] 湯川英美、小形正男：ISSP ワークショップ「分子性導体の電荷揺らぎと非線形伝導」東大物性研、 2008, 5.21 “θ-$(ET)_2CsM'(SCN)_4$(M'=Zn, Co) の電荷秩序に対する電場の効果の平均場計算 ”

[97] 柳瀬陽一：京都大学基研短期研究会「不均一超伝導・超流動の物理」京都大学、2008, 7 “空間反転対称性が破れた超伝導、FFLO 超伝導、乱れた系の超伝導の微視的理論”

[98] 柳瀬陽一：特定領域「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」成果報告会 “FFLO superconductivity near the antiferromagnetic quantum critical point”

[99] 小形正男：有機固体若手の会、冬の学校 2008、伊豆伊東温泉山喜旅館、2008 December 5-6 “鉄系超伝導の理論について”

(セミナー)

[100] 小形 正男：第５３回物性若手夏の学校、那須オオシマフォーラム、2008 年 8 月 7-11 日 “モット転移、スピン液体、電荷秩序、超伝導”

[101] 柳瀬陽一：特定領域「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」夏の学校 “スピン三重項超伝導の d-vector を決めるのは何か?”

[102] 柳瀬陽一:岡山大学 2008, 10 “FFLO 超伝導と反強磁性”

[103] 伏屋雄紀：青山大学 2008, 10.17 “ゆらぎ・密度波・超伝導—そのくりこみ群的理解”

[104] 小形正男：大阪大学基礎工学部、2008 October 26 “鉄系超伝導体の理論について”

[105] 柳瀬陽一: 名古屋大学 2009, 3 “FFLO 超伝導・超流動の微視的理論”

[106] Y. Fuseya: Spring-8, 2008, December 2 “Phase Diagram of the Triangular t-J Model with Multiple Spin Exchange in the Doped-Mott Region”

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 第一原理電子状態計算の応用

窒化物半導体およびその界面の構造と電子状態

窒化ガリウム (GaN) 等の窒化物半導体は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重要であり、実際 Gd や Cr をドープした GaN では室温強磁性が報告されている. 窒化物半導体結晶は固有欠陥の密度が非常に高い事が知られているが、我々は第一原理計算による理論解析により、Gd をドープした GaN 中におけるスピン分極した Ga 単原子空孔の強磁性的相互作用が実験的に測定された巨大磁気モーメントの起源となっている事を明らかにした.

我々はさらに、非磁性材料と GaN とのヘテロ界面において、スピン状態・磁気的性質を発現させ・制御する事を目指し、第一原理計算により GaN 等、窒化物半導体ヘテロ界面の電子状態における固有欠陥等の影響に対し物性予測を行っている.2008 年度は GaN と二ホウ化ジルコニウム (ZrB_2) との界面を検討した (図 3.4.7).ZrB_2 は、GaN との格子定数のミスマッチがわずか 1%である、等の利点があり、デバイスにおいて界面を構成する物質の候補として期待されている. 固有欠陥によるスピン分極に対する界面の影響を理論解析するために、様々な点欠陥による磁気モーメント μ を計算した. その結果、界面再近接の Ga 空孔 (V_{Ga}) では $\mu = 0.6\mu_B$ の値が得られた. これは GaN 結晶中の値 $\mu = 3.0\mu_B$ よりもかなり小さく、ZrB_2 の金属的状態による遮蔽効果によるものと考えられる. また、c 軸方向配置の複空孔 ($V_2 \equiv V_{Ga} - V_N$) では $\mu = 1.1\mu_B$ となった [図 3.4.7(b)]. これは、V_{Ga} と界面の間に V_N が挿入される事により、ZrB_2 の金属状態が V_N により強い減衰を受けるため V_{Ga} サイトのスピン状態まで到達しにくくなっているためである、と理解する事が出来る.

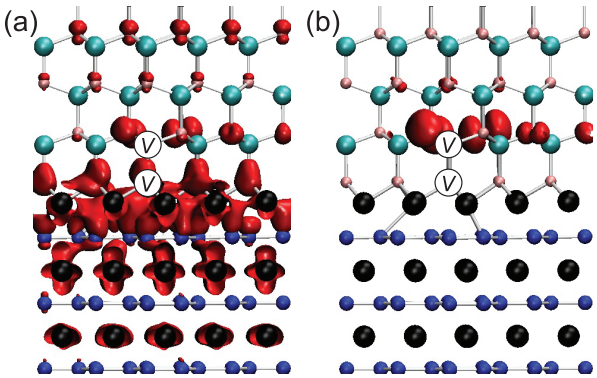

図 3.4.7: 界面近傍に V_2 が存在する GaN/ZrB_2(0001) 界面の最適化構造とフェルミ準位近傍における (a) 全電子密度分布 ($\rho_\uparrow + \rho_\downarrow$) および (b) スピン分極の分布 ($\rho_\uparrow - \rho_\downarrow$).

SiC 酸窒化膜の構造安定性と電子状態

次世代半導体材料として期待される半導体 SiC の表面に形成された SiON 絶縁超薄膜膜の電子状態に関して、構造・表面バンド分散・バンドギャップの深さ依存性という 3 つの観点から研究を行った.

SiON 薄膜は 180 °の Si-O-Si 結合角をもち、石英などに見られる 142 °という典型的な角度に比べて歪んでいるように見える. これは低速電子線回折実験 (LEED) でも、また第一原理計算による構造最適化でも確かめられている. この原因を第一原理電子状態計算結果のエネルギー密度解析 (EDA) により検討し、表面の Si 原子がもつ正四面体構造の安定性が重要であることを見出した.

次に角度分解光電子分光（ARPES）の実験結果を表面に局在した状態のバンドと比較した. これは各バンド、各 k 点の 1 電子波動関数がつくる電子密度を、SiON 絶縁膜層のある領域で積分し、積分値が 1 に近いものを表面に局在した状態だと判定することで行った. その結果、実験結果を定性的に説明することができ、実験結果のシグナルの起源となる状態を同定することができた.

最後にバンドギャップの深さ依存性の依存性を計算した. これは深さ方向に薄い層の中の局所状態密度 (LDOS) を積分し、その深さでのバンドギャップを定義することで行った. その結果、軟 X 線発光吸収分光 (SXES,SXAS) による結果を定性的に説明することができた.

SO_2 分子の Ni(100) 表面への吸着メカニズム

金属表面への分子吸着メカニズムの解明は触媒反応を理解するための重要なステップである. 物性研/Spring-8 の辛グループでは, Ni(100) 表面への SO_2 分子が吸着した系に対する軟 X 線発光エネルギースペクトルを, 波動関数の対称性ごとに分離して観測することに成功している. このスペクトルに対して我々はこれまでにモデルクラスターを用いた軟 X 線発光スペクトルのシミュレーションを行い, 実験と定量的によく一致するスペクトルを得ることに成功している.

その結果を踏まえ, 本年度は SO_2 分子の Ni(100) 表面への吸着メカニズム, 特に実験のスペクトルにおいて SO_2 分子が一層で吸着したときの結合エネルギーが, SO_2 が多層吸着した場合に比べて低エネルギー側にシフトする原因について考察した. 単純に考えると, 多層吸着の方が表面との相互作用が小さいため結合エネルギーはより低エネルギー側にシフト

すると予想されるが, 実験ではそうなっていない. そこで, 分子吸着に際して起こり得る構造および電子状態の変化を考慮して, 計算により得られるエネルギースペクトルを段階的に解析した. その結果, (1) 吸着による SO_2 分子の構造変化に伴う分子軌道の形状変化, (2) Ni 表面からの SO_2 分子への電子移動, (3) Ni 表面と SO_2 分子の間の結合生成の 3 つの効果の差し引きによりピークシフトの方向および大きさが決まることを定性的に明らかにした.

異種金属三核錯体 Rh-Mo-Rh の 1 ステップ 2 電子還元反応メカニズム

多電子移動反応は, 生体反応の理解や有機ポリマーによる導電性機能性材料の設計といった巨大な系を取り扱う上で非常に重要な現象である. これらの理解には, 酸化還元反応の前後における電子状態や分子構造の変化を把握する必要がある. 近年, 1 電子還元状態を経由せずに 1 ステップで 2 電子還元および 2 電子酸化を起こすという珍しい異種金属三核錯体 $[\{(\eta 5\text{-}C_5Me_5)Rh(S_2C_6H_4)\}_2Mo(CO)_2]$ が東京大学の邨次ら（理・化学、西原グループ）によって合成された (図 3.4.8(a)). この Rh-Mo-Rh 錯体の中性 1 重項状態の構造は実験的に調べられているが (図 3.4.8(b)), ジアニオン 3 重項状態については結晶化が難しく, 分子構造は未知のままである. そこで我々は, Rh-Mo-Rh 錯体のジアニオン 3 重項状態の分子構造を第一原理計算により求め, 1 ステップ 2 電子還元反応が起こるメカニズムについて考察した.

構造最適化計算は, Gauss 関数を用いた DFT 計算（B3LYP 汎関数）により行った. 実験は電位差を生じさせた THF 溶媒下で行われており, 溶媒の効果を計算に取り込むため, 導体様分極連続体モデル (CPCM) を用いた. 図 3.4.8(c) に, 得られた最適化構造を示す. Rh とカルボニル基の炭素との距離が中性 1 重項の X 線構造では 2.670Å であるのに対し, ジアニオン 3 重項の最適化構造では 2.157Å と短くなった. Mo とカルボニル炭素間距離は中性 1 重項の実験値とジアニオン 3 重項の計算値でそれぞれ 1.955Å および 2.018Å であり, 2 電子還元によってカルボニル基が Mo と Rh を架橋する構造に変化することが示唆された. この計算結果を検証するために電位勾配下における赤外分光測定が東京大学の邨次らによって行われた. その結果, カルボニル基の振動ピークの低波数シフトが観測され, 計算による架橋構造を支持する結果となった. このことから, Rh-Mo-Rh 錯体における 1 ステップ 2 電子還元反応は, 還元された 2 つの Rh からカルボニル炭素への π-バックドネーションによる分子構造の変化を伴う反応であることが明らかとなった.

ペロフスカイト型強誘電体 $BaTiO_3$ 中の酸素欠陥と不純物水素

チタン酸バリウム（$BaTiO_3$）は高い比誘電率を有することから、キャパシタ用途電子部品の母材料として広く用いられている.$BaTiO_3$ 中の酸素欠陥及び水素は共にドナー（V_O^{2+}, H^+）として働き結晶中に n 型キャリアを与える事が従来から知られてきたが、最近の研究ではこれらアルカリ土類ペロブスカイト酸化物中の水素は必ずしもドナーとして振舞わず、特に酸素欠陥が多量に存在する場合はアクセプター (H^-) として振舞うことが実験的に確認されている. このとき水素原子は酸素欠陥と複合欠陥を生成する可能性が指摘されているものの、その形成に関する議論は推測の域を出おらず、また理論的な解析も殆ど進められていない. 我々はこれら複合欠陥の生成メカニズムを明らかにするために、$BaTiO_3$ 中の水素が酸素欠陥にトラップされて複合欠陥を形成する過程と、そのときの価数変化や安定性に関する第一原理計算を行った. その結果、酸素欠陥にトラップされた水素が H^- イオンとして複合欠陥を形成する事を初めて見出した.

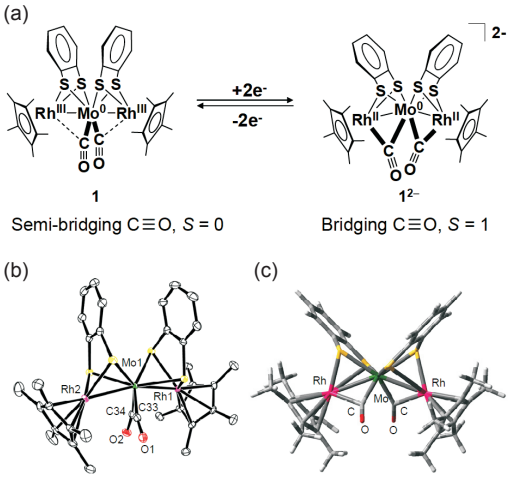

図 3.4.8: (a) HRh-Mo-Rh 錯体の酸化還元反応スキーム, (b) Rh-Mo-Rh 錯体中性 1 重項の X 線構造, (c) ジアニオン 3 重項状態の B3LYP 計算による最適化構造.

3 次元重合 C_{60} の第一原理計算

この物質は強く変形した C_{60} 分子が 3 次元重合してできた物質で、広島大学の山中グループによって近年実験的に得られた. 超伝導物質である可能性も示唆されている. 我々はこの物質の電子状態と格子振動の第一原理計算を行った. 実験で得られた 3D-orthorhombic に対しフォノン分散の計算をし、三つの構造内の炭素原子を sp^2 群と sp^3 群に分類して熱的性質を解析した. またエネルギー密度解析（EDA) により、各構造内の化学結合様式の違いがエネルギーの高低関係にどう影響するか定量的に理解することができた. さらに rhombohedral 対称性を持つ新 C_{60} 結晶構造を二つ理論的に予測した.

SiO_2 と TiO_2 のフォノン分散および熱力学的性質

SiO_2 スティショバイトと TiO_2 ルチルは同じ対称性の結晶格子を持つ物質だが、その力学的および誘電的物性は大きく異なる. またルチルとアナターゼはどちらも組成が TiO_2 であるが結晶構造が異なる. これらの物質を格子動力学の視点で比較するため、フォノン分散と熱力学関数の第一原理計算を行った. フォノン分散の計算に必要な力定数行列は直接法、誘電テンソルはグリーン関数理論、ボルン実効電荷は最局在ワニア軌道から計算した. 解析の結果、酸素原子の p 軌道とチタン原子の d 軌道の混成が存在することにより、両 TiO_2 はそうでないスティショバイトよりも強い誘電性を持つことが明らかになった. またアナターゼではルチルと比べてチタン原子がより等方的かつ酸素原子が非等方的であり、その競合の結果アナターゼの零点振動エネルギーがルチルよりも大きくなり、ルチル相の相対的な安定性が促進されることが分かった.

3.4.2 シミュレーション手法の開発

トランスコリレイティッド法に基づく第一原理電子状態計算手法の開発

電子相関効果を考慮して固体の電子状態を求めるために, 当研究室ではトランスコリレイティッド (TC) 法による第一原理計算を行ってきた.TC 法における多体波動関数は, 相関波動関数 $F\Phi$ で表される.Φ はスレーター行列式であり, F はジャストロウ関数 $F = \exp[-\sum_{i<j} u_{ij}]$ である. ここで u_{ij} はジャストロウ因子と呼ばれる 2 体関数である. 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, 3 体積分までで必要な積分計算全てを行うことができる. この H_{TC} のエネルギー分散を最小化することで 1 粒子方程式が得られ, これを自己無撞着場 (SCF) の手続きを用いて解くことで 1 電子軌道および軌道エネルギーが求められる. これまでに, TC 法による固体の全エネルギー計算に成功し, 共有結合性固体やイオン性固体のバンド計算について報告してきた.

TC 法では, 通常使われる局所密度近似 (LDA) に基づく DFT に比べて計算コストが格段に大きくなるという問題があるため, 今年度は TC 法の波動関数における SCF の効果について検討した. これまで用いてきた, 1 粒子方程式を SCF の手続きに従って解いて得られた TC 波動関数を用いてバンド計算を行う方法 (SCF-TC 法) に加えて, 今回新たに SCF の手続きを行わずに初期関数である LDA の波動関数を用いて TC 法によるバンドギャップを求めた (one-shot TC 法). その結果, Si, SiC, C といった共有結合性固体や NaCl や LiCl といったイオン性固体において one-shot TC 法は HF 法の結果を改善した. また, one-shot TC 法と SCF-TC 法の差は, Si 及び C では小さいが SiC および NaCl では大きくなり, LiF では非常に大きくなっている. この結果から, Si や C では TC 波動関数における SCF の効果は小さく SCF をする必要はあまり無いが, 固体内で電子が分極している系では LDA の記述が悪く, SCF の効果が重要であることが示された (図 3.4.9). 現在は 3 体積分の効率的な近似方法について研究を進めている.

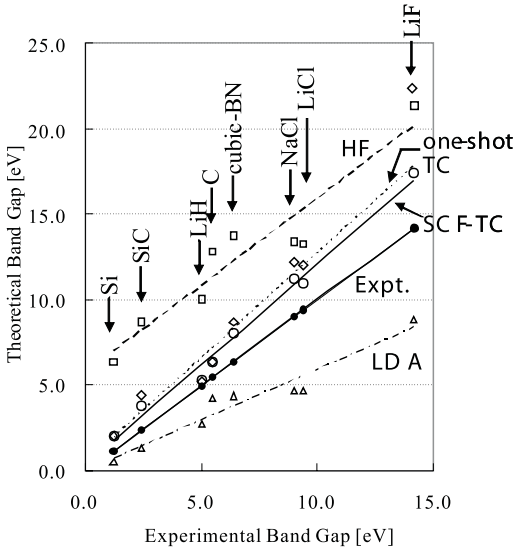

図 3.4.9: HF 法, one-shot TC 法, SCF-TC 法, DFT(LDA) で求めた半導体および絶縁体のバンドギャップとその実測値.

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

タンパク質や DNA のような生体分子の電子状態計算は、その巨大さと複雑さのため、従来非常に大きなコストを要するものであった. 本研究では、近年京都大学の北浦和夫らによって開発されたフラグメント分子軌道 (FMO) 法に基づき、生体分子全系の分子軌道とエネルギースペクトルを低コストで求める新たな方法論を開発し、FMO-LCMO 法と命名した.

フラグメント分子軌道法は、系をその構成要素であるフラグメント (部分系) に分割し、フラグメント単量体（モノマー）および二量体（ダイマー）のエネルギーから、全系の精密な全エネルギーと電子密度分布を算出する. この手法では、部分系の電子状態計算しか行わないため、生体分子全系の分子軌道やエネルギースペクトルは一切計算されない.

我々が新たに開発した FMO-LCMO 法では、FMO 法における各部分系（フラグメントモノマー、ダイマー）の分子軌道と分子軌道エネルギーから、極めて単純な操作により、フラグメントモノマーの分子軌道を基底とした系全体の一電子ハミルトニアンを構成する. この際、物性に関与しない HOMO,LUMO 近傍以外の情報を大胆に捨象することで、巨大系でありながらコンパクトなサイズのハミルトニアンの実現に成功した. その対角化の結果を検証したとこ

ろ、アミノ酸 5 量体から 20 量体までの小規模なポリペプチド系で、エネルギー固有値では平均自乗誤差 (従来の一電子理論で計算して得たエネルギー固有値との誤差) が 0.001Ht 程度であることが確認された. 今後はさらに方法論の整備および拡張を進めるとともに、大規模系への応用を計画している.

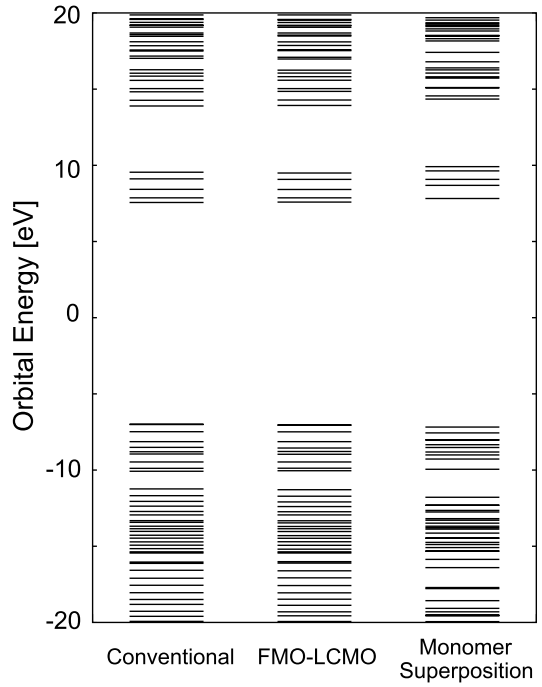

図 3.4.10: ハートリー・フォック近似で計算した擬グリシン 5 量体の軌道エネルギー. 左から、通常の全系計算、FMO-LCMO 法、フラグメントモノマーのエネルギースペクトルの重ね合わせ. 系を 5 つに分割して計算した FMO-LCMO 法の結果が、全系計算の結果をよく再現することがわかる.

＜**報文**＞

(原著論文)

[1] S. Tsuneyuki, Transcorrelated Method: Another Possible Way towards Electronic Structure Calculation of Solids, Prog. Theo. Phys. Suppl. 176, 134-142 (2008).

[2] Y. Gohda, S. Schnur, and A. Groß, Influence of water on elementary reaction steps in electrocatalysis, Faraday Discuss. **140**, 233 (2009).

[3] Y. Gohda and A. Oshiyama, Intrinsic ferromagnetism due to cation vacancies in Gd-doped GaN: First-principles calculations, Phys. Rev. B **78**, 161201 (R) (2008).

[4] Y. Gohda, S. Watanabe, and A. Groß, Quantum Electron Transport through Ultrathin Si Films: Effects of Interface Passivation on Fermi-Level Pinning, Phys. Rev. Lett. **101**, 166801 (2008).

Selected for the October 27, 2008 issue of Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology **18**, (2008).

[5] T. Tokushima, K. Sodeyama, Y. Harada, Y. Takata, M. Nagasono, Y. Kitajima, Y. Tamenori, H. Ohashi, S. Tsuneyuki, A. Hiraya, and S. Shin, σ-bonding contribution of a strong π-acceptor molecule: Surface chemical bond of SO_2 on Ni(100), Phys. Rev. B, 78 (2008) 085405.

[6] Satoshi Muratsugu, Keitaro Sodeyama, Fusao Kitamura, Manabu Sugimoto, Shinji Tsuneyuki, Seiji Miyashita, Tatsuhisa Kato, and Hiroshi Nishihara, Two-electron Reduction of a Rh-Mo-Rh Dithiolato Complex to Form a Triplet Ground State Associated with a Change in CO Coordination Mode, J. Am. Chem. Soc. 131 (2009) 1388.

[7] Desheng Fu, Mitsuru Itoh, Shin-ya Koshihara, Taichi Kosugi and Shinji Tsuneyuki, Anomalous Phase Diagram of Feroellectric (Ba, Ca)TiO_3 Single Crystals with Giant Electromechanical Response, Phys. Rev. Lett., 100, 227601-1-227601-4, 2008

[8] K. Nakamura, Y. Yoshimoto, R. Arita, S. Tsuneyuki, and M. Imada, Optical absorption study by ab initio downfolding approach: Application to GaAs, Phys. Rev. B 77, 195126 (2008).

[9] M. Furuhashi, A. Omura, Y. Yamashita, K. Mukai, J. Yoshinobu, K. Akagi and S. Tsuneyuki, Electron Transport Properties and Dielectric Breakdown of Alkyl Monolayers Chemisorbed on a Highly Doped n-Type Si(111) Surface, Jpn. J. Appl. Phys., in press.

(国内雑誌)

[10] 赤木和人，小堀知輝，袖山慶太郎，常行真司「タンパク質の電子状態解析：物性物理的アプローチ」，固体物理 vol.43 (11), 829 (2008).

(学位論文)

[11] （博士論文）小杉太一：“First-principles study of electronic structures and lattice dynamics in C60 polymers” (第一原理的手法による C60 ポリマーの電子状態と格子力学に関する理論研究), 東京大学 (2009).

[12] （修士論文）安藤康伸: ”Theoretical study on the electronic property of SiON/SiC(0001) surface insulating layer”(SiON/SiC(0001) 表面絶縁層の電子状態に関する理論研究)，東京大学 (2009).

[13] （修士論文）藤原弘康: 「１次元ハバードモデルにおけるトランスコリレイティッド法の評価」, 東京大学 (2009).

＜**学術講演**＞

(国際会議)

一般講演

[14] Shinji Tsuneyuki, Shinnosuke Furuya and Yoshihide Yoshimoto, “Theoretical study of self-organized nano structure at N/Cu(001) surface”, Mini-Workshop ’Recently developed methods of structure prediction using first principles simulation and their applications’, 2008.8.21, Osaka.

[15] S. Tsuneyuki, S. Furuya and Y. Yoshimoto, “Theoretical study of a strain-induced nanostructure at N/Cu(001) surface”, Supercomputing in Solid State Physics 2009 (SciSSP2009), ISSP, University of Tokyo, 2009.2.16-19, Kashiwa.

[16] Y. Gohda and A. Oshiyama, “Intrinsic spin polarization of cation vacancies in GaN”, 2009 APS March Meeting, Pittsburgh, USA, Mar. 17, 2009.

[17] Y. Gohda and A. Oshiyama, “Possibility of ferromagnetism due to cation vacancies in group-III nitrides”, Supercomputing in Solid State Physics (SciSSP) 2009, Kashiwa, JAPAN, Feb. 16, 2009.

[18] Y. Gohda and A. Oshiyama, “Intrinsic spin polarization of Ga vacancies in GdGaN”, The 11th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN11), Kaohsiung, TAIWAN, Nov. 3, 2008.

[19] Keitaro Sodeyama, Rei Sakuma, Shinji Tsuneyuki: “Numerical assessment of the SCF effect in transcorrelated method”, International Conference on Quantum Simulators and Design 2008, National Museum of Emerging Science and Innovation (Miraikan), Tokyo, May 31 - June 3, 2008.

[20] Keitaro Sodeyama, Takashi Tokushima, Shinji Tsuneyuki, Shik Shin: “Theoretical study of the soft x-ray emission spectroscopy of SO_2/Ni(100)”, The 1st International Conference of the Grand Challenge to Next-Generation Integrated Nanoscience, Tokyo International Exchange Center, National Museum of Emerging Science and Innovation (Miraikan), Tokyo, June 3-7, 2008.

[21] Keitaro Sodeyama, Takashi Tokushima, Shinji Tsuneyuki, Shik Shin: “Theoretical study of the soft x-ray emission spectroscopy: Absorption mechanism of SO_2 on Ni(100) surface”, The 11th AsianWorkshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, National Sun Yat-sen University, Kaohsiung, Taiwan, November 3-5 2008.

[22] Keitaro Sodeyama, Rei Sakuma, Shinji Tsuneyuki: “Transcorrelated method applied to solids: analysis of the SCF effect”, Supercomputing in Solid State Physics 2009 (SciSSP2009), ISSP (Kashiwa), February 16-19, 2009.

[23] Keitaro Sodeyama, Rei Sakuma, Shinji Tsuneyuki: “Transcorrelated method applied to solids: numerical assessment of the SCF effect”, March Meeting of The American Physical Society, Pennsylvania (Pittsburgh, USA), March 16-20, 2009.

[24] Yasunobu Ando, Hiroyasu Fujiwara, Kazuto Akagi, Shinji Tsuneyuki, Tetsuroh Shirasawa and Hiroshi Tochihara: “Theoretical study about electronic properties of SiON/SiC(0001) with the density functional theory”, 1st International Conference of the Grand Challenge to Next-Generation Integrated Nanoscience, Tokyo,JAPAN,JUNE 3-6, 2008.

[25] Yasunobu Ando, Kazuto Akagi, Shinji Tsuneyuki, Tetsuroh Shirasawa and Hiroshi Tochihara: “First-principles study of SiON/SiC(0001) surface insulating layer”, APS March meeting, Pittsburgh, PA, USA, MARCH 16-21, 2009.

[26] T. Kosugi and S. Tsuneyuki: “First-principles calculation of phonon dispersion without using DFPT: Comparison of stishovite and rutile”, International Conference on Quantum Simulators and Design 2008, National Museum of Emerging Science and Innovation (Miraikan), Tokyo, May 31 - June 3, 2008

[27] T. Kosugi and S. Tsuneyuki: “First-principles calculation of phonon dispersion without using DFPT: Comparison of stishovite and rutile”, The 1st International Conference of the Grand Challenge to Next-Generation Integrated Nanoscience June 3-7, 2008, Tokyo, Japan

[28] T. Kosugi and S. Tsuneyuki: “First-principles calculation of electronic structures and phonon dispersions of polymerized C_{60} solids”, The 11th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN11), Nov. 3-5, 2008, Kaohsiung, Taiwan

[29] T. Kosugi and S. Tsuneyuki: “First-principles calculation of electronic structures in new C_{60} polymers”, APS meeting, March 2009

[30] S. Furuya, Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki: “Theoretical Study of Nitrogen Self-Organization on Copper Surface”, International Conference on Quantum Simulators and Design 2008, Tokyo, Japan, May 31-Jun. 3, 2008.

[31] S. Furuya, Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki: “Theoretical Analyses of Self-Organization Mechanism on Cu(001) Surface”, The 1st International Conference of the Grand Challenge to Next-Generation Integrated Nanoscience, Tokyo, Japan, Jun. 3-2008, 7.

[32] Tomoki Kobori, Shinji Tsuneyuki, Keitaro Sodeyama, Kazuto Akagi, Hidetoshi Fukuyama and Kiyoyuki Terakura: “Orbital energy analysis for proteins based on FMO method” The 11th AsianWorkshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, National Sun Yat-sen University,Kaohsiung,Taiwan,November 3-5 2008

[33] Tomoki Kobori, Shinji Tsuneyuki, Keitaro Sodeyama, Kazuto Akagi, Hidetoshi Fukuyama and Kiyoyuki Terakura: “Electronic Structure of a Protein based on FMO-LCMO method”, Supercomputing in Solid State Physics 2009

(SciSSP2009), ISSP (Kashiwa), February 16-19, 2009.

[34] Tomoki Kobori, Shinji Tsuneyuki, Keitaro Sodeyama, Kazuto Akagi, Hidetoshi Fukuyama and Kiyoyuki Terakura: "Electronic Structure Analysis for proteins on the FMO method" March Meeting of The American Physical Society, Pennsylvania(Pittsburgh,USA), March 16-20 2009

招待講演

[35] Shinji Tsuneyuki, "An Accurate Wave Function Approach to Solids Practicable with the Next-Generation Supercomputer", 1st International Conference of The Grand Challenge to Next-Generation Integrated Nanoscience, "Development & Application of Advanced High-Performance Supercomputer" Project, 2008.6.3-7, Tokyo.

[36] S. Tsuneyuki, S. Furuya and Y. Yoshimoto, "Theoretical study of strain-induced nanostructure at N/Cu(001) surfaces", International Workshop on "Novel Aspects of Phase Transitions with Long-range Interactions", 2008.10.28-30, Tokyo.

(国内会議)

一般講演

[37] 常行真司 「はじめに」日本物理学会秋季大会（岩手大学, 2008.9.20-23）シンポジウム「第一原理計算手法に基づくマルチスケールシミュレーションの展望」.

[38] S. Tsuneyuki, T. Kobori, K. Akagi, K. Sodeyama, H. Fukuyama and K. Terakura, "Electronic Structure of a Protein as a Molecular Assembly of Amino Acids", 次世代スーパーコンピュータプロジェクト・ナノ統合拠点・ナノ情報機能・材料 成果報告会 (東北大学), 2008.12.10-11.

[39] 常行真司, "Can we understand electronic structure of a protein as an assembly of amino acids?", 生物物質科学フォーラム, 2009.3.17.

[40] 合田 義弘、押山 淳：「窒化ガリウム複空孔におけるスピン分極と構造緩和の第一原理計算」日本物理学会第 64 回年次大会 立教大学（東京都豊島区）2009 年 3 月 30 日

[41] 合田 義弘、押山 淳：「窒化物半導体における陽イオン空孔による磁性」日本物理学会 2008 年秋季大会 岩手大学（盛岡市）2008 年 9 月 21 日

[42] 袖山慶太郎, 徳島高, 常行真司, 辛埴: 「$SO_2/Ni(100)$ における軟 X 線発光スペクトルの理論的研究」, 第 11 回 理論化学討論会, 慶應義塾大学 (矢上), 2008 年 5 月 22 日-24 日.

[43] 袖山慶太郎, 徳島高, 常行真司, 辛埴: 「$SO_2/Ni(100)$ における軟 X 線発光スペクトルと吸着機構に関する理論的研究」, 平成 20 年度 第一回 特定領域「ナノリンクの電気伝導」領域会議, ホテル花びし (函館), 2008 年 7 月 3 日-5 日.

[44] 袖山慶太郎, 佐久間怜, 常行真司: 「トランスコリレイティッド法の SCF 効果に対する数値的検討」, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学 (盛岡), 2008 年 9 月 20 日-23 日.

[45] 袖山慶太郎, 佐久間怜, 常行真司: 「平面波を用いたトランスコリレイティッド法による固体の第一原理計算：SCF 効果の数値的検討」第 2 回分子科学討論会 2008, 福岡国際会議場 (福岡), 2008 年 9 月 24 日-27 日.

[46] Keitaro Sodeyama, Rei Sakuma, Shinji Tsuneyuki: "Transcorrelated method applied to solids: numerical assessment of the SCF effect", 次世代ナノ情報機能・材料グループ成果報告会, 東北大学金属材料研究所 (仙台), 2008 年 12 月 10 日-11 日.

[47] 袖山慶太郎, 邨次智, 西原寛, 常行真司: 「異種金属三核錯体 Rh-Mo-Rh の 2 電子還元による分子構造変化に関する理論的研究」, 文部科学省「最先端・高性能汎用スーパーコンピュータの開発利用」プロジェクト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 3 回公開シンポジウム, 自然科学研究機構 岡崎コンファレンスセンター (岡崎), 2009 年 3 月 4 日-5 日.

[48] 邨次智, 北村房男, 袖山慶太郎, 常行真司, 西原寛: 「ジチオラト架橋異種金属三核錯体のレドックス反応による構造、電子状態変化」, 電気化学会第 76 回大会, 京都大学 (京都), 2009 年 3 月 29 日-31 日.

[49] 安藤康伸、藤原弘康、赤木和人、常行真司、白澤徹郎、栃原浩: SiON/SiC(0001) 表面での深さ方向の電子状態解析, 特定領域研究「ナノリンク分子の電気伝導」第四回領域ミーティング, 函館, 2008 年 7 月 3-5 日.

[50] 安藤康伸、藤原弘康、赤木和人、常行真司、白澤徹郎、栃原浩: SiON/SiC(0001) 表面での電子状態の深さ依存性とその起源, 日本物理学会秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2008 年 9 月 20-23 日.

[51] 安藤康伸、藤原弘康、赤木和人、常行真司、白澤徹郎、栃原浩: SiON/SiC(0001) 表面系のバンドギャップ近傍における電子状態の深さ依存性, 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 3 回公開シンポジウム」, 分子科学研究所, 2009 年 3 月 4,5 日.

[52] 岩崎 誉志紀, 吉本芳秀, 常行 真司：「絶縁体電子状態の Pseudo SIC を施した第一原理計算」日本物理学会 秋季大会, 盛岡（岩手）, 2008 年 9 月 20 日.

[53] 岩崎 誉志紀, 鈴木利昌, 常行 真司：「チタン酸バリウム中の酸素欠陥による水素価数変化の第一原理計算」, 水素量子アトミクス研究会, 新潟大（新潟）, 2008 年 11 月 21 日.

[54] 岩崎 誉志紀, 鈴木利昌, 常行 真司：「チタン酸バリウム中の酸素欠陥による水素価数変化の第一原理計算」, 日本物理学会 年次大会, 立教大（東京）, 2009 年 3 月 28 日.

[55] 小杉太一、常行真司：C_{60} ポリマーのフォノン分散の第一原理計算、日本物理学会、盛岡、2009 年 3 月

[56] 古家真之介, 常行真司: N/Cu(001) 表面の自己組織化構造の理論解析, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 盛岡 (岩手), 2008 年 9 月 20-23 日.

[57] S. Furuya, Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki: "Monte Carlo Simulations of Nitrogen Self-Organization on Cu(001) Surface", 次世代ナノ情報機能・材料グループ成果報告会, 仙台 (宮城), 2008 年 12 月 10-11 日.

[58] 小堀知輝、常行真司、袖山慶太郎、赤木和人、寺倉清之、福山秀敏：「Orital energy analysis for proteins based on the FMO method」次世代ナノ情報機能・材料グループ成果報告会、東北大学金属材料研究所 (仙台), 2008 年 12 月 10 日-11 日

[59] 小堀知輝、常行真司、袖山慶太郎、赤木和人、寺倉清之、福山秀敏：「FMO-LCMO 法に基づくタンパク質のハミルトニアン解析」：文部科学省「最先端・高性能汎用スーパーコンピュータの開発利用」プロジェクト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 3 回公開シンポジウム、自然科学研究機構岡崎コンファレンスセンター (岡崎) 2008 年 9 月 20 日-23 日

[60] 小堀知輝、常行真司、袖山慶太郎、赤木和人、寺倉清之、福山秀敏：「FMO 法に基づくタンパク質のハミルトニアン解析」：日本物理学会 2008 年秋季大会、岩手大学上田キャンパス (盛岡) 2008 年 9 月 20 日-23 日

招待講演

[61] 常行真司「固体電子状態理論の現状と可能性」, 第 5 回 AMO(原子・分子・光科学）討論会（首都大学東京）, 2008.6.13-14.

[62] 常行真司「表面吸着系の第一原理計算：単分子吸着からナノパターン形成まで」, 表面科学講演大会（早稲田大学国際会議場）, 2008.11.13-11.15.

[63] S. Tsuneyuki, ”Can we understand electronic structure of proteins as anr assembly of amino acids?”, RCIS Theory Scries; 11th “computational sciences” seminar, 2009.2.9, JAIST, Nomi.

[64] 合田 義弘: “Intrinsic spin polarization of cation vacancies in group-III nitrides”, 横浜国立大学大学院工学研究院知的構造の創生部門大野研究室オープンセミナー　横浜国立大学（横浜市）2008 年 11 月 20 日

4 物性実験

4.1 藤森研究室

藤森研究室では，光電子分光，磁気円二色性等の手法を用いて強相関系の研究を行っている．遷移金属化合物，磁性半導体などの複雑物質が示す高温超伝導，スピン依存伝導，金属－絶縁体転移，界面新物性等の発現機構解明をめざしている．実験室光源を用いた測定の他に，紫外光から X 線に至る高輝度放射光（高エネルギー加速器研究機構フォトン・ファクトリー，SPring-8，広島大放射光，スタンフォード放射光研究所，台湾国立放射光研究所）を用いた光源共同利用実験，共同研究を行っている．

4.1.1 高温超伝導

銅酸化物における高温超伝導現象は，その発見以来 20 年余り多くの研究が積み重ねられてきたにもかかわらず，機構解明に至っていない世紀の難問である．我々は，非常に有力な実験手段である角度分解光電子分光（angle-resolved photoemission spectroscpy: ARPES）を用いて高温超伝導体の電子状態を調べている．昨年，鉄化合物でも高温超伝導が発見され，鉄化合物にも研究対象を拡大している．

鉄系超伝導体の電子構造

昨年発見された鉄化合物超伝導体 $LaFeAsO_{1-x}F_x$ について角度積分型光電子分光を行い，以下の基本的電子構造を明らかにした．(i) フェルミ準位付近の電子状態は Fe $3d$ 軌道からなる．これは，銅酸化物においてフェルミ準位付近の電子状態に酸素 O $2p$ 軌道が強く混成しているのと対照的である．(ii) 電子間のクーロン斥力の効果（電子相関）は銅酸化物に比べて弱い [14].

キャリアーのコヒーレント－非コヒーレント転移

銅酸化物高温超伝導体 $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ のアンダードープ領域において，高温でフェルミ端が消失する現象を見出し，フェルミ縮退したキャリアーから古典的なキャリアーに移り変わるためと考えた．フェルミ端が消失する温度を $T_{\rm coh}$ とすると，高温超伝導体のキャリアー濃度（x）-温度（T）相図においてよく知られた擬ギャップ温度 T^* が右下がりであるのに対して，$T_{\rm coh}$ は右上がりの振る舞いをしめす新しい温度スケールであることを示した [23].

4.1.2 スピントロニクス

従来の半導体エレクトロニクスにスピンの自由度を導入する “半導体スピントロニクス”の実現には，半導体に磁性イオンをドープした希薄強磁性半導体が有力な材料とされており，高いキューリー温度を持つ物質の開発が盛んに行われている．我々は，元素選択的・磁性選択的な手法である軟 X 線磁気円二色性（x-ray magnetic circular dichroism: XMCD）を用いて，通常の磁気測定では得られない希薄強磁性半導体のミクロで内因的な磁性を調べている．

強磁性半導体 $Ga_{1-x}Mn_xAs$ における格子間 Mn 原子の磁気的相互作用

代表的な希薄強磁性半導体である $Ga_{1-x}Mn_xAs$ のキューリー点が試料作製条件によっては十分上昇しないことが大きな問題となっている．XMCD 強度の温度および磁場依存性の系統的測定から，母体 GaAs の格子間位置に入った Mn 原子が Ga を置換した Mn 原子と反強磁性的に結合していることを明らかにし，キューリー温度を低下させる原因であるとした [10].

反強磁性体 NiO をベースとした強磁性半導体

希薄強磁性半導体の母体は一般に非磁性半導体であるが，最近，反強磁性半導体 NiO を母体として Fe と Li をドープした希薄強磁性半導体が開発された．我々は，光電子分光，軟 X 線吸収分光を用いて，Li によって供給されたホール型キャリアーの多くが Fe にトラップされ価数変化 $Fe^{2+}\rightarrow Fe^{3+}$ を引き起こすが，一部は伝導に寄与しながら強磁性を引き起こしていることを明らかにした [18].

4.1.3 強相関

高温超伝導の他にも，金属-絶縁体転移，巨大磁気抵抗，スピン・電荷・軌道秩序など非常に多彩な物性を示す遷移金属酸化物の電子状態を，光電子分光，軟 X 線吸収分光を用いて調べている．また，これらの物質がつくる界面が，それぞれのバルクにない新しい物性を示す機構の解明を目指している．

バンド幅制御によるマンガン酸化物の化学ポテンシャル・シフト

キャリアーをドープすることによって電子の化学ポテンシャルがシフトすることはよく知られている

が，原理的にはバンド幅を変えても化学ポテンシャルのシフトがおこるはずである．バンド幅の異なる巨大磁気抵抗マンガン酸化物の化学ポテンシャルの差を光電子スペクトルから求めることに成功し，バンド幅に依存した化学ポテンシャルのシフトを導いた．シフトの向きと大きさは，二重交換相互作用の理論の予想と一致した [11].

$SrTiO_3$ の電子構造と強い電子－格子相互作用

典型的な酸化物半導体である $SrTiO_3$ の ARPES を測定し，バンド構造を実験的に明らかにした．価電子帯頂上の光電子スペクトルのピーク位置が，光学スペクトルから予想される位置より約 500 meV ずれていることを見出し，これが酸素 $2p$ 電子と格子の強い相互作用に起因するとして説明した [22]

＜受賞＞

[1] 出田真一郎：第 22 回日本放射光学界年会・放射光科学合同シンポジウム，学生発表賞（東大，2009 年 1 月）[紹介記事　山本正貴：第 22 回日本放射光学界年会・放射光科学合同シンポジウム学生発表賞審査結果，放射光 **22** 96-105（2009）]

[2] 和達大樹：井上研究奨励賞「エピタキシャル薄膜を用いたペロブスカイト型遷移金属酸化物の光電子分光による研究」（2007 年物理学専攻博士（理学）取得）

＜新聞・雑誌・ホームページ等紹介記事＞

[3] 「半導体スピントロニクス材開発へ前進－磁気特性低下要因を解明」化学工業日報，2008 年 6 月 17 日 11 ページ.

[4] 「鉄を含む新しい高温超伝導体～銅酸化物と似ているか？～」News@KEK，2008 年 11 月 27 日（KEK ホームページ http://www.kek.jp/newskek/2008/novdec/LaFeAsO.html）

[5] E. Dagotto: Viewpoint - Playing with the Geometry of Oxide Heterostructures, Physics **2** (2009) 12.

[6] Special Topics "High Temperature Superconductors", *Science Watch* (Thomson Reuters, February 2009) Top 20 Overall-Authors, http://sciencewatch.com/ana/st/hts/authors/.

＜報文＞

(原著論文)

[7] M. Kobayashi, Y. Ishida, J. I. Hwang, G. S. Song, A. Fujimori, C.-S. Yang, L. Lee, H.-J. Lin, D. J. Huang, C. T. Chen, Y. Takeda, K. Terai, S.-I. Fujimori, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, K. Kobayashi, A. Tanaka, H. Saito and K. Ando: Local Electronic Structure of Cr in the II-VI Diluted Ferromagnetic Semiconductor $Zn_{1-x}Cr_xTe$, New J. Phys. **10** (2008) 055011–1-15; arXiv:0804.3272.

[8] M. Arita, K. Shimada, Y. Takeda, M. Nakatake, H. Namatame, M. Taniguchi, H. Negishi, T. Oguchi, T. Saitoh, A. Fujimori, T. Kanomata: Angle-Resolved Photoemission Study of the Strongly Correlated Semiconductor FeSi, Phys. Rev. B **77** (2008) 205117–1-5.

[9] Y. Osafune, G. S. Song, J. I. Hwang, Y. Ishida, M. Kobayashi, K. Ebata, Y. Ooki, A. Fujimori, J. Okabayashi, K. Kanai, K. Kubo and M. Oshima: Depth Profile Photoemission Study of Thermally Diffused Mn/GaAs (001) Interfaces, J. Appl. Phys., J. Appl. Phys. **103** (2008) 103717–1-4; arXiv:0711.3257.

[10] Y. Takeda, M. Kobayashi, T. Okane, T. Ohkochi, J. Okamoto, Y. Saitoh, K. Kobayashi, H. Yamagami, A. Fujimori, A. Tanaka, J. Okabayashi, M. Oshima, S. Ohya, P.N. Hai and M. Tanaka: Nature of Magnetic Coupling between Mn Ions in As-Grown $Ga_{1-x}Mn_xAs$ Studied by X-Ray Magnetic Circular Dichroism, Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 247202–1-4; arXiv:0801.1155.

[11] K. Ebata, M. Takizawa, A. Fujimori, H. Kuwahara, Y. Tomioka and Y. Tokura, Chemical Potential Landscape in Band-Filling and Bandwidth-Control of Manganites: Photoemission Spectroscopy Measurements, Phys. Rev. B **78** (2008) 020406(R)–1-4, *Selected as an Editor's Choice*; arXiv:0807.5066.

[12] G.S. Song, M. Kobayashi, J. I. Hwang, T. Kataoka, M. Takizawa, A. Fujimori, T. Ohkouchi, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D. J. Huang, C. T. Chen, S. Kimura, M. Funakoshi, S. Hasegawa and H. Asahi: Electronic Structure of $Ga_{1-x}Cr_xN$ and Si-Doping Effects Studied by Photoemission and X-Ray Absorption Spectroscopy, Phys. Rev. B **78** (2008) 033304–1-4; arXiv:0805.3299.

[13] R.J.O. Mossanek, M. Abbate, T. Yoshida, A. Fujimori, N. Shirakawa, H. Eisaki, S. Kohno and F.C. Vicentin: Evolution of the Spectral Weight in the Mott-Hubbard Series $SrVO_3$-$CaVO_3$-$LaVO_3$-YVO_3, Phys. Rev. B **78** (2008) 075103–1-7.

[14] W. Malaeb, T. Yoshida, T. Kataoka, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita, H. Aoki, Y. Kamihara, M. Hirano, and H. Hosono: Electronic Structure and Electron Correlation in $LaFeAsO_{1-x}F_x$ and $LaFePO_{1-x}F_x$, J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 093714–1-4; arXiv:0806.3860.

[15] G.S. Song, T. Kataoka, M. Kobayashi, J.I. Hwang, M. Takizawa, A. Fujimori, T. Ohkochi, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, F. Takano and H. Akinaga: Soft X-ray Absorption and Photoemission Studies of Ferromagnetic Mn-Implanted 3*C*-SiC, Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 7113-7116; arXiv:0803.2185.

[16] S. Sahrakorpi, R.S. Markiewicz, M. Lindroos, X.J. Zhou, T. Yoshida, W. L. Yang, T. Kakeshita, H. Eisaki, S. Uchida, Seiki Komiya, Yoichi Ando, F.

Zhou, W. X. Ti, J.W. Xiong, Z. X. Zhao, T. Sasagawa, A. Fujimori, Z. Hussain, Z.-X. Shen and A. Bansil: Appearance of Universal Metallic Dispersion in a Doped Mott Insulator, Phys. Rev. B **78** (2008) 104513–1-5; arXiv:0809.2357.

[17] T. Ohkochi, S.-I. Fujimori, H. Yamagami, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, Y. Haga, E. Yamamoto and Y. Onuki: Observation of 5f Electrons in the Itinerant Limit: Three Dimensional Electronic Structure of UB_2, Phys. Rev. B **78** (2008) 165110–1-5.

[18] M. Kobayashi, J.I. Hwang, G.S. Song, Y. Ooki, M. Takizawa, A. Fujimori, Y. Takeda, S.-I. Fujimori, K. Terai, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, Y.-H. Lin, C.-W. Nan: Systematic Changes of the Electronic Structure of the Diluted Ferromagnetic Oxide Li-doped $Ni_{1-x}Fe_xO$ with Hole Doping, Phys. Rev. B **78** (2008) 155322–1-4; arXiv:0711.4658.

[19] M. Rini, Z. Hao, R.W. Schoenlein, C. Giannetti, F. Parmigiani, S. Fourmaux, J.C. Kieffer, A. Fujimori, M. Onoda M, S. Wall, and A. Cavalleri: Optical Switching in VO_2 Films by Below-Gap Excitation, Appl. Phys. Lett. **92** (2008) 181904–1-2.

[20] R.J.O. Mossanek, M. Abbate, T. Yoshida, A. Fujimori, Y. Yoshida, N. Shirakawa, H. Eisaki, S. Kohno, P.T. Fonseca, and F.C. Vicentin: Minimal Model Needed for the Mott-Hubbard $SrVO_3$ Compound, Phys. Rev. B **79** (2009) 033104–1-4.

[21] T. Higuchi, Y. Hotta, T. Susaki, A. Fujimori and H.Y. Hwang: Modulation Doping of a Mott Quantum Well by a Proximate Polar Discontinuity, Phys. Rev. B **79** (2009) 075415–1-6; arXiv:0810.3469.

[22] M. Takizawa, K. Maekawa, H. Wadati, T. Yoshida, A. Fujimori, H. Kumigashira and M. Oshima: Effects of Electron-Phonon Coupling in Angle-Resolved Photoemission Spectra of Nb-Doped $SrTiO_3$, Phys. Rev. B **79** (2009) 113103–1-4; arXiv:0712.4309.

[23] M. Hashimoto, T. Yoshida, K. Tanaka, A. Fujimori, M. Okusawa, S. Wakimoto, K. Yamada, T. Kakeshita, H. Eisaki, and S. Uchida: Coherent Quasi-Particles-to-Incoherent Hole-Carriers Crossover in Underdoped Cuprates, Phys. Rev. B, in press; *Selected for an Editor's Choice*; arXiv:0806.0101.

[24] M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, D.H. Lu, Z.-X. Shen, M. Kubota, K. Ono, M. Ishikado, K. Fujita and S. Uchida:, Effects of Out-of-Plane Disorder on the Nodal Quasiparticle and Superconducting Gap in Bi2201, Phys. Rev. B, in press; arXiv:0807.1779.

[25] H. Wadati, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, A. Fujimori, M. Oshima, M. Lippmaa, M. Kawasaki, and H. Koinuma: *In-situ* Photoemission Study of $Nd_{1-x}Sr_xMnO_3$ Epitaxial Thin Films, Phys. Rev. B, in press.

(会議抄録)

[26] S. Ideta, K. Takashima, M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Kojima and S. Uchida: Anisotropy of Gap and Kink Energies in the Trilayer High-T_c Cuprate Superconductor $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$, *Proceedings of International Symposium on Lattice Effects in Cuprate High Temperature Superconductors*; J. Phys.: Conf. Ser. **108** (2008) 012015–1-5.

[27] W. Malaeb, T. Yoshida, M. Hashimoto, M. Takizawa, K. Ebata, A. Fujimori, H. Eisaki, T. Kakeshita, T. Sasagawa and S. Uchida: Temperature Dependence of the Chemical Potential in $La_{2-x}Sr_xCuO_4$, *ibid*; J. Phys. Conf. Ser. **108** (2008) 012018–1-5.

[28] M. Ikeda, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, Y. Kaga, T. Sasagawa and H. Takagi: Effects of Annealing Process on the Electronic Structure of the Electron-Doped High-T_c Superconductor $Nd_{1.85}Ce_{0.15}CuO_4$, *ibid*; J. Phys. Conf. Ser. **108** (2008) 012016–1-6.

[29] W. Malaeb, T. Yoshida, T. Kataoka, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita, H. Aoki, Y. Kamihara, M. Hirano, and H. Hosono: Photoemission Study of the Electronic Structure of $LaFeAsO_{1-x}F_x$ and $LaFePO_{1-x}F_x$, *Proceedings of International Symposium on Fe-Pnictide Superconductors*; J. Phys. Soc. Jpn. **77** Supplement C (2008) 69-71.

[30] T. Kataoka, M. Kobayashi, G.S. Song, Y. Sakamoto, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D. J. Huang, C. T. Chen, S. K. Mandal, D. Karmakar and I. Dagupta: X-Ray Magnetic Circular Dichroism Investigations of the Origin of Room Temperature Ferromagnetism in Fe-Doped ZnO Nano-Particles, in *Proceedings of 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2008)*, Jpn. J. Appl. Phys., in press.

[31] M. Kobayashi, T. Ohkochi, G. S. Song, T. Kataoka, Y. Sakamoto, A. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, H. Yamahara, H. Saeki, T. Kawai and H. Tabata: Experimental Observation of Bulk Band Dispersions in the Oxide Semiconductor ZnO, *Proceedings of 29-th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2008)*; J. Appl. Phys., in press.

[32] K. Sato, Y. Harada, M. Taguchi, S. Shin and A. Fujimori: Characterization of Fe 3d States in $CuFeS_2$ by X-Ray Emission Spectroscopy, *Proceedings of 16-th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-16)*, Phys. Status Solidi A, in press.

(綜説，解説，その他)

[33] A. Fujimori: Comment on "Optical Probe of Electrostatic-Doping in an n-Type Mott Insulator", Journal Club for Condensed Matter Physics, http://www.condmatjournalclub.org/?p=559.

[34] 石田行章，藤森淳，太田裕道，細野秀雄：熱電コバルト酸化物のキャリア・エントロピーの光電子分光による直接観察，固体物理 **43** (2008) 343-349.

[35] 藤森淳：ユーザーから見た物性研と全国共同利用，日本物理学会誌 **63** (2008) 929-932.

[36] 藤森伸一，斎藤祐児，岡根哲夫，藤森淳，山上浩志，芳賀芳範，山本悦，大貫惇睦：重い電子系超伝導体 UPd_2Al_3 に対する軟 X 線放射光角度分解光電子分光，放射光学会誌 **22** (2009) 11-19.

(編著書)

(学位論文)

[37] 池田正樹：High-Resolution Photoemission Study of Electron-Doped High-Temperature Superconductors（博士論文，新領域創成科学研究科）

[38] 出田真一郎：Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy Study of Trilayer Cuprate High-Temperature Superconductor（修士論文）

[39] 坂本勇太：X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of Diluted Ferromagnetic Semiconductor $Ti_{1-x}Co_xO_{2-\delta}$（修士論文，新領域創成科学研究科）

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[40] A. Fujimori: XMCD Studies of Oxide Diluted Magnetic Semiconductors, *Indo-Japan Workshop on Novel Magnetic Ordering in Nanostructured Materials* (University of Tokyo, June 2008).

[41] M. Kobayashi, T. Ohkochi, G. S. Song, T. Kataoka, Y. Sakamoto, A. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, H. Yamahara, H. Saeki, T. Kawai and H. Tabata: Electronic Band Dispersion of the Oxide Semiconductor ZnO Revealed by Soft X-Ray Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, *29-th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2008)* (Rio de Janeiro, July 2008).

[42] A. Fujimori, Unusual High-Temperature Behaviors of Charge Carries in High-T_c Cuprates from Photoemission, *International Conference on Quantum Phenomena in Complex Matter (Stripes 08)* (Erice, Italy, July 2008).

[43] T. Yoshida, S. Ideta, K. Takashima, M. Hashimoto, K. M. Kojima, A. Fujimori, S. Uchida, H. Anzai, T. Fujita, Y. Nakashima, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, D. H. Lu and Z.-X. Shen: Observation of the Multiband Electronic Structure in the Trilayer High-T_c Cuprates $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$, *ibid.*

[44] K. Sato, Y. Harada, M. Taguchi, S. Shin and A. Fujimori: Characterization of Fe 3*d* States in $CuFeS_2$ by X-Ray Emission Spectroscopy, *16-th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-16)* (Berlin, September 2008).

[45] A. Fujimori: Electron Correlation and Electron-Phonon Interaction in Perovskite Oxides from ARPES Data, *Third International Workshop 2008 "Ordering Phenomena in Transition Metal Oxides"* (Augsburg, October 2008).

[46] T. Yoshida: Fermi Arc and Pseudogap of $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ Observed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, *Inelastic Neutron and X-Ray Scattering in Strongly Correlated Electron Systems* (Tohoku University, October 2008).

[47] T. Yoshida, W. Malaeb, T. Kataoka, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita, H. Aoki, Y. Kamihara, M. Hirano and H. Hosono: Resonant Photoemission Study of $LaFeAsO_{1-x}F_x$ and $LaFePO_{1-x}F_x$, *ibid.*

[48] K. Tanaka, W.S. Lee, I.M. Vishik, D.H. Lu, R. Moore, T. Sasagawa, A. Fujimori, T. Fujii, Risdiana, I. Terasaki, D.J. Scalapino, T.P. Devereaux, Z. Hussain and Z.-X. Shen: ARPES Study of Pseudogap in High-T_c Superconductors, *21st International Symposium on Superconductivity* (Epocal Tsukuba, October 2008).

[49] A. Fujimori: Photoemission Spectroscopy of Oxide Multilayers and Nano-Particles, *Villa Conference on Complex Oxide Heterostructures (ViC-COH)* (Orlando, November 2008).

[50] A. Fujimori: Universal Fermi Arc and Material-Dependent Superconducting Gap in the High-T_c Cuprates, *9-th Korea-Japan-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Systems* (Tamsui, Taiwan, November 2008).

[51] A. Fujimori: Enhanced Superconducting Gap and Kink Energies in Trilayer Bi2223, *JSPS-NSFC-KOSEF A3 Foresight Program Joint Research on Novel Properties of Complex Oxides 1st Workshop* (Shanghai, December 2008).

[52] T. Yoshida: Two-Gap Behavior of $La_{2-x}Sr_xCuO_4$: Universal versus Material-Dependent Properties, *ibid.*

[53] W. Malaeb, T. Yoshida, T. Kataoka, A. Fujimori, H. Aoki, M. Kubota, K. Ono, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita, Y. Kamihara, S. Matsuishi, M. Hirano, and H. Hosono: Photoemission Study of FeAs High-T_c Supercondcutors, *International Conference on FeAs High T_c Superconducting Multilayers and Related Phenomena* (Rome, December 2008).

[54] T. Yoshida: Electronic Structure of $Ba(Fe,Co)_2As_2$ Observed by ARPES, *International Workshop on Iron Related High-T_c Superconductors (IRiSes2009)* (Tokyo, January 2009).

[55] A. Fujimori: Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy of High-T_c Superconductors, *Joint Symposium by Nanyang Technological University & University of Tokyo* (Nanyang Technological University, Singapore, Ferburary 2009).

[56] A. Fujimori: Enhanced Superconducting Gap in the Trilayer Cuprate Bi2223 Studied by ARPES, *Meeting on Physics and Chemistry of Oxide Materials* (S.N. Bose National Centre for Basic Sciences, Kolkata, February 2009).

[57] A. Fujimori: Electronic Structure of Fe-Pnictide Superconductors from Photoemission Spectroscopy, *Recent Trends in Strongly Correlated Systems* (Indian Association for the Cultivation of Science, Kolkata, March 2009).

[58] A. Fujimori: Comparative ARPES Studies of Single- to Tri-Layer Cuprates, *AIST-RIKEN Joint Workshop - Emergent Phenomena of Correlated Materials* (Okinawa, March 2009).

[59] A. Fujimori: ARPES Studies of Single- to Tri-Layer High-T_c Cuprates, *13-th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation* (Hiroshima University, March 2009).

[60] A. Fujimori: Superconducting Gap and Pseudogap in Cuprates from ARPES Data of Single-, Double-, and Tri-Layer Cuprates, *Fifth Meeting of the Study of Matter at Extreme Conditions (SMEC)* (Miami, March 2009).

一般講演

[61] A. Fujimori, W. Malaeb, T. Yoshida, T. Kataoka, Y. Kamihara, M. Hirano and H. Hosono: Electronic Structure and Electron Correlation in $LaO_{1-x}F_xFeAs$, *International Symposium on Fe-Oxipnictide Superconductors* (Tokyo, June 2008).

[62] M. Kobayashi, Y. Ishida, J. I. Hwang, Y. Osafune, A. Fujimori, Y. Takeda, K. Terai, S.-I. Fujimori, T. Okane, Y. Saitoh, K. Kobayashi, H. Saeki, T. Kawai and H. Tabata: X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of the Oxide-Based Diluted Magnetic Semiconductor $Zn_{1-x}Co_xO$: Antiferromagnetic Interaction and Ferromagnetism, *5-th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-V)* (Foz do Iguacu, Brazil, August 2008).

[63] W. Malaeb, M. Hashimoto, M. Takizawa, K. Ebata, T. Yoshida, A. Fujimori, H. Eisaki, T. Kakeshita, T. Sasagawa, S. Uchida: Temperature Dependence of the Chemical Potential in $La_{2-x}Sr_xCuO_4$, *International Conference on Quantum Phenomena in Complex Matter (Stripes 08)* (Erice, Italy, July 2008).

[64] W. Malaeb, T. Yoshida, T. Kataoka, A. Fujimori, Y. Kamihara, M. Hirano and H. Hosono: Core- and Valence-Level Spectra of $La(O_{1-x}F_x)FeAs$ as Revealed by X-Ray Photoemission Spectroscopy, *ibid.*

[65] T. Kataoka, M. Kobayashi, G. S. Song, Y. Sakamoto, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D. J. Huang, C. T. Chen, T. Ohkochi, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, 4, D. Karmakar, S. K. Mandal, I. Dasgupta: XMCD and Photoemission Investigations of the Origin of Room-Temperature Ferromagnetism in Fe-Doped ZnO Nanoparticles, *2008 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2008)* (Tsukuba, October 2008).

[66] M. Ikeda, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, Y. Kaga, T. Sasagawa, H. Takagi: High-Energy Anomaly in Band Dispersion Observed in the Electron-Doped High-T_c Superconductors, *21st International Symposium on Superconductivity (ISS 2008)* (Tsukuba, October 2008)

[67] S. Ideta, K. Takashima, M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, H. Anzai, T. Fujita, Y. Nakashima, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, D. H. Lu, Z.-X. Shen, K. M. Kojima and S. Uchida: ARPES Study of the Trilayer High-T_c Cuprate Superconductor $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$, *2nd International Symposium on Anomalous Quantum Materials (ISAQM2008) and the 7th Asia-Pacific Workshop* (Tokyo, November 2008).

[68] M. Ikeda, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, Y. Kaga, T. Sasagawa, H. Takagi: High Energy Anomaly in Band Dispersion Observed in the Electron-Doped High-T_c Superconductors, *ibid.*

[69] T. Yoshida, M. Hashimoto, K. Tanaka, N. Mannnella, Z. Hussain, Z.-X. Shen, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, S. Komiya, Y. Ando, H. Eisaki and S. Uchida: Two Gap Energy Scales in $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ Observed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, *ibid.*

[70] W. Malaeb, T. Yoshida, T. Kataoka, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita, H. Aoki, Y. Kamihara, M. Hirano and H. Hosono: Electronic Structure of $LaFeAsO_{1-x}F_x$ from Photoemission Spectroscopy, *ibid.*

[71] K. Ishigami, M. Takizawa, K. Yoshimatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, T. Yoshida and A. Fujimori: *In-situ* Soft X-Ray Photoemission Study of $La_{1-x}Sr_xTiO_3$ Thin Films, *ibid.*

[72] T. Higuchi, Y. Hotta, T. Susaki, A. Fujimori and H. Y. Hwang: Modulation Doping of a Mott Quantum Well by a Proximate Polar Discontinuity, *ibid.*

[73] Y. Sakamoto, T. Kataoka, M. Kobayashi, Y. Yamazaki, A. Fujimori, F.-H. Chang, L. Lee, H.-J. Lin, D.-J. Huang, C.T. Chen, H. Toyosaki, T. Fukumura, and M. Kawasaki: Soft X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of the Ferromagnetic Semiconductor $Ti_{1-x}Co_xO_{2-\delta}$ Thin Films, *9-th Korea-Japan-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Systems* (Tamsui, Taiwan, November 2008)

[74] T. Kataoka, Y. Sakamoto, Y. Yamazaki, A. Fujimori, Y. Takeda, T. Ohkochi, T. Okane, Y. Saitoh, and H. Yamagami: Inter-Molecular Ferromagnetic

Coupling in β-Type Polycrystals of Manganese Phthalocyanine, *ibid.*

[75] M. Ikeda, M. Takizawa, T. Yoshida, A. Fujimori1, K. Segawa, Y. Ando: Chemical Potential Jump between Hole- and Electron-Doped High-T_c Superconductors of Y-Based System, *ibid.*

[76] M. Ikeda, M. Takizawa, T. Yoshida, A. Fujimori, K. Segawa, and Y. Ando: Chemical Potential Jump between Hole- and Electron-Doped Y-Based high-T_c Superconductors, *JSPS-NSFC-KOSEF A3 Foresight Program Joint Research on Novel Properties of Complex Oxides 1st Workshop* (Shanghai, December 2008)

[77] W. Malaeb: Electronic Structure and Electron Correlation in $LaFeAsO_{1-x}F_x$ and $LaFePO_{1-x}F_x$, ibid.

[78] S. Ideta, K. Takashima, M. Hashimoto, T. Yoshida, K.M. Kojima, A. Fujimori, S. Uchida, H. Anzai, T. Fujita, Y. Nakashima, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, and M. Taniguchi, ARPES Study of the Trilayer High-T_c Cuprate Superconductor $Bi_2Sr_2Cu_3O_{10+\delta}$, ibid.

[79] W. Malaeb, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Kiho, P.M. Shirage, H. Kito, A. Iyo, H. Eisaki, Y. Nakajima, and T. Tamegai: Three-Dimensional Electronic Structure of $Ba(Fe,Co)_2As_2$ Observed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, *Joint Symposium by Nanyang Technological University & University of Tokyo* (Nanyang Technological University, Singapore, Ferburary 2009).

[80] T. Kataoka, M. Kobayashi, Y. Sakamoto, G.S. Song, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, T. Ohkochi, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Tanaka, S. K. Mandal, T. K. Nath, D. Karmakar, and I. Dasgupta: XMCD and Photoemission Investigations of the Origin of Room Temperature Ferromagnetism in Fe-Doped ZnO Nano-Particles, *ibid.*

[81] T. Kataoka, M. Kobayashi, Y. Sakamoto, G.S. Song, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, T. Ohkochi, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Tanaka, S. K. Mandal, T. K. Nath, D. Karmakar, and I. Dasgupta: XMCD and Photoemission Investigations of the Origin of Room Temperature Ferromagnetism in Fe-Doped ZnO Nano-Particles, *Meeting on Physics and Chemistry of Oxide Materials* (S.N. Bose National Centre for Basic Sciences, Kolkata, February 2009).

[82] Y. Yamazaki, T. Kataoka, Y. Sakamoto, 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 Ferromagnetic Semiconductor $Zn_{1-x}Cr_xTe$: *AIST-RIKEN Joint Workshop - Emergent Phenomena of Correlated Materials* (Okinawa, March 2009).

[83] V. R. Singh, Y. Sakamoto, T. Kataoka, Y. Yamazaki, A. Fujimori, F.-H. Chang, L. Lee, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, H. Toyosaki, T. Fukumura, and M. Kawasaki: XMCD study of Ferromagnetic Semiconductor Anatase $Ti_{1-x}Co_xO_{2-\delta}$ Thin Films, *ibid.*

[84] M. Ikeda, T. Yoshida, A. Fujimori, D. H. Lu, Z.-X. Shen, K. Unozawa, T. Sasagawa, and H. Takagi: Peculiar Momentum Dependence of the "Antiferromagnetic" Pseudogap in the Electron-Doped High-T_c Superconductor $Sm_{1.85}Ce_{0.15}CuO_4$, *ibid.*

[85] S. Aizaki, K. Yoshimatsu, S. Ideta, T. Yoshida, K. Horiba, H. Kumigashira, M. Oshima, A. Fujimori: High Resolution Angle-Resolved Photoemission Study of $SrVO_3$ Thin Films, *ibid.*

[86] K. Horiba, A. Maniwa, A. Chikamatsu, K. Yoshimatsu, H. Kumigashira, H. Wadati, A. Fujimori, S. Ueda, H. Yoshikawa, E. Ikenaga, J. J. Kim, K. Kobayashi, and M. Oshima: Pressure-Induced Change in Electronic Structure of Eptaxially Strained $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ Thin Films, *ibid.*

[87] S. Ideta, K. Takashima, T. Yoshida, M. Hashimoto, K. M. Kojima, A. Fujimori, S. Uchida, H. Anzai, T. Fujita, Y. Nakashima, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, M. Kubota, K. Ono, D. H. Lu, and Z. -X. Shen: ARPES Study of the Trilayer High-T_c Cuprate Superconductor $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$, *13-th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation* (Hiroshima University, March 2009).

[88] R.H. He, K. Tanaka, S.-K. Mo, H. Yao, M. Hashimoto, E. Berg, T. Sasagawa, T. Adachi, M. Fujita, T. Yoshida, N. Mannella, W. Meevasana, Y. Koike, K. Yamada, A. Fujimori, S. Kivelson, Z. Hussain and Z.-X. Shen: Fermiological Interpretation for Collective Spin and Charge Orderings in Underdoped La-Based Cuprates by ARPES, *American Physical Society March Meeting* (Pittsburgh, March 2009).

(国内会議)

招待講演

[89] 藤森淳：光電子分光から見る熱起電力，日本熱電学会第 7 回研究会「強相関系熱電材料の進展」（早稲田大学，2008 年 6 月）

[90] 吉田鉄平：擬ギャップとフェルミアーク：角度分解光電子分光，先進機能材料若手ワークショップ（電中研，2008 年 7 月）

[91] 吉田鉄平：Fermi Arc and Gap Structure of High-T_c Superconductor Measured by Photoemission Spectroscopy，シンポジウム "Concerting Researches of Real Space Observations by STM/STS and Reciprocal Space Measurements by High-Resolution ARPES"，日本物理学会 2008 年秋季大会（岩手大学，2008 年 9 月）

[92] 藤 森 淳：Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy of High-Temperature Superconductors: Present Status and Outlook，物構研シンポジウム「放射光・中性子・ミュオンを用いた構造物性科学の最前線」（つくば，2008 年 10 月）

[93] 吉田鉄平：モット・ハバード系酸化物の角度分解光電子分光，PF 研究会「高分解能角度分解光電子分光研究と将来展望」（高エネ研 PF，2008 年 12 月

一般講演

[94] 吉田鉄平，Walid Malaeb，片岡隆史，藤森淳，神原陽一，平野正浩，細野秀雄：$LaO_{1-x}F_xFeAs$ の電子構造と電子相関，国内シンポジウム「高温超伝導研究の新境地〜新物質を徹底的に解明する〜」（丸の内サピアタワー，2008 年 6 月）

[95] 藤森淳，小出常晴，竹田幸治：光電子分光と XMCD を用いた高温強磁性半導体，高スピン偏極材料のキャラクタリゼーション，科研費特定領域研究「スピン流の創出と制御」平成 20 年度研究会（京大芝蘭会館，2008 年 7 月）

[96] 佐藤勝昭，原田慈久，田口宗孝，辛埴，藤森淳：X 線発光分光による $CuFeS_2$ の 3d 状態の研究，ICTMC-16 にむけた研究討論会（東京理科大，2008 年 8 月）

[97] 出田真一郎，高島憲一，橋本信，吉田鉄平，小嶋健児，藤森淳，内田慎一，久保田正人，小野寛太，安斎太陽，藤田泰輔，中島陽祐，井野明洋，有田将司，生田目博文，谷口雅樹，D.H. Lu，Z.-X. Shen：三層系高温超伝導体 $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$ の角度分解光電子分光 ，日本物理学会 2008 年秋季大会（岩手大学，2008 年 9 月）.

[98] 吉田鉄平，Walid Malaeb，池田正樹，藤森淳，大川万里生，木須孝幸，石坂香子，辛埴，小宮世紀，安藤陽一，永崎洋，内田慎一：$La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$ のレーザー励起角度分解光電子分光，同上.

[99] 池田正樹，Andres-Felipe Santander-Syro，吉田鉄平，藤森淳，Nicole Bontemps，大川万里生，木須孝幸，石坂香子，辛埴，Alexandre Zimmers，Bing Liang，Pengcheng Li，Rick Greene：$Sm_{1.85}Ce_{0.15}CuO_4$ のレーザー励起角度分解光電子分光，同上.

[100] 池田正樹，滝沢優，吉田鉄平，藤森淳，瀬川耕司，安藤陽一：Y 系高温超伝導体の電子ドープ、ホールドープ間の化学ポテンシャルのとび，同上.

[101] W. Malaeb, T. Yoshida, T. Kataoka, A. Fujimori, Y. Kamihara, M. Hirano and H. Hosono: Core- and Valence-Level Spectra of $La(O_{1-x}F_x)FeAs$ Superconductor, 同上.

[102] 坂本勇太，小林正起，片岡隆史，藤森淳，F.-H. Chang，L. Lee，H.-J. Lin，D. J. Huang，C. T. Chen，豊崎秀海，福村知昭，川崎雅司：磁性半導体 $Ti_{1-x}Co_xO_{2-\delta}$ 薄膜の X 線磁気円二色性の組成依存性，同上.

[103] 片岡隆史，小林正起，宋敬錫，坂本勇太，藤森淳，F.-H. Chang，H.-J. Lin，D. J. Huang，C. T. Chen，大河内拓雄，竹田幸治，岡根哲夫，斎藤祐児，山上浩志，D. Karmakar，S.K. Mandal，I. Dasgupta：光電子分光および軟X線磁気円二色性から見た $Zn_{1-x}Fe_xO$ ナノ粒子の室温強磁性の起源，同上.

[104] 和達大樹，摩庭篤，近松彰，組頭広志，尾嶋正治，溝川貴司，藤森淳，George A. Sawatzky：$La_{1-x}Sr_xMnO_3$ 薄膜の内殻光電子分光スペクトルに見られるマーデルングポテンシャルの効果，同上.

[105] 小林正起，石田行章，黄鐘日，長船義敬，藤森淳，竹田幸治，寺井恒太，藤森伸一，岡根哲夫，斎藤祐児，小林啓介，佐伯洋昌，川合知二，田畑仁：酸化物希薄磁性半導体 $Zn_{1-x}Co_xO$ の軟X線磁気円二色性による研究：反強磁性相互作用と強磁性，同上.

[106] 藤森伸一，大河内拓雄，岡根哲夫，斎藤祐児，山上浩志，藤森淳，青木大，芳賀芳範，山本悦嗣，大貫惇睦：反強磁性ウラン化合物 UN の角度分解光電子分光，同上.

[107] 藤森伸一，S.-K. Mo，田中清尚，Z. Hussain，Z.X. Shen，藤森淳，山上浩志，摂待力生，大貫惇睦：空間反転対称性のない重い電子系超伝導体 $CeIrSi_3$ の角度分解光電子分光，同上.

[108] 岡根哲夫，大河内拓雄，稲見俊哉，竹田幸治，山上浩志，藤森淳，青木大，本間佳哉，塩川佳伸，芳賀芳範，山本悦嗣，大貫惇睦：NpNiGa$_5$ の Np $M_{4,5}$ 吸収端での X 線吸収磁気円二色性測定，同上.

[109] 岡根哲夫，大河内拓雄，藤森伸一，竹田幸治，保井晃，斎藤祐児，山上浩志，藤森淳，松本裕司，木村憲彰，小松原武美，青木晴善：$CeRu_2(Si_{1-x}Ge_x)_2$ の軟X 線角度分解光電子分光，同上.

[110] 竹田幸治，小林正起，岡根哲夫，大河内拓雄，岡本淳，斎藤祐児，小林啓介，山上浩志，藤森淳，田中新，岡林潤，尾嶋正治，大矢忍，ファムナムハイ，田中雅明：$Ga_{1-x}Mn_xAs$ の内殻吸収磁気円二色性による磁気的相互作用の研究，同上.

[111] 安斎太陽，加茂剛，藤田泰輔，井野明洋，有田将司，生天目博文，谷口雅樹，藤森淳，Z.-X. Shen，石角元志，内田慎一：低エネルギー放射光角度分解光電子分光による Bi2212 の準粒子構造のホール濃度依存性，同上.

[112] 朝倉大輔，小出常晴，片岡隆史，坂本勇太，山崎陽，藤森淳，平智幸，石川貴之，山本眞史：MgO バリアと界面を形成する Co_2MnGe 薄膜の XMCD 測定，同上.

[113] 片岡隆史，坂本勇太，山崎陽，藤森淳，竹田幸治，大河内拓雄，岡根哲夫，斎藤祐児，山上浩志：π-d 系金属錯体分子のキャリアー誘起強磁性に関連する電子構造，物性科学領域横断研究会「スピンが拓く物性科学の最前線」（東京大学，2008 年 11 月）

[114] 出田真一郎，高島憲一，橋本信，吉田鉄平，小嶋健児，藤森淳，内田慎一，安斎太陽，藤田泰輔，中島陽祐，井野明洋，有田将司，生田目博文，谷口雅樹，久保田正人，小野寛太，D.H. Lu，Z.-X. Shen: 三層型高温超伝導体 $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$ における電子構造の温度変化，PF 研究会「高分解能角度分解光電子分光研究と将来展望」（物構研 PF，2008 年 12 月）

[115] 相崎真一，吉松公平，出田真一郎，吉田鉄平，組頭広志，堀場弘司，尾嶋正治，藤森淳：$SrVO_3$ 薄膜の高分解能角度分解光電子分光，同上.

[116] 池田正樹，吉田鉄平，藤森淳，久保田正人，小野寛太，加賀義弘，笹川崇男，高木英典：電子ドープ系高温超伝導体 $Nd_{1.85}Ce_{0.15}CuO_4$ の高エネルギーキンク，同上.

[117] W. Malaeb, T. Yoshida, S. Ideta, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, T. Kurahashi, M. Nakajima, and S. Uchida: Angle-Resolved Photoemission Study of $La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO_4$，同上.

[118] 小林正起，宋敬錫，片岡隆史，坂本勇太，藤森淳，大河内拓雄，竹田幸治，岡根哲夫，斎藤祐児，山上浩志，山原弘靖，佐伯洋昌，川合知二，田畑仁：酸化物半導体 ZnO の軟X線角度分解光電子分光，同上.

[119] 藤森 淳：三層系高温超伝導体のギャップとキンク，科研費特定領域研究「異常量子物質」2008 年度成果報告会（東大生産研，2009 年 1 月）

[120] 出田真一郎，高島憲一，橋本信，吉田鉄平，小嶋健児，藤森淳，内田慎一，安斎太陽，藤田泰輔，中島陽祐，井野明洋，有田将司，生田目博文，谷口雅樹，久保田正人，小野寛太，D.H. Lu，Z.-X. Shen：角度分解光電子分光による三層型高温超伝導体 $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$ の電子構造研究，同上.

[121] 吉田鉄平，橋本信，藤森淳，鎌倉望，久保田正人，小野寛太，永崎洋：$SrVO_3$, $CaVO_3$ のフェルミ面、バンド分散：角度分解光電子分光による観測，同上.

[122] W. Malaeb, T. Yoshida, T. Kataoka, A. Fujimori1, H. Aoki, M. Kubota, K. Ono, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita, Y. Kamihara, S. Matsuishi, M. Hirano, and H. Hosono: Photoemission Study of FeAs High-T_c Supercondcutors，同上.

[123] 池田正樹，滝沢優，吉田鉄平，藤森淳，瀬川耕司，安藤陽一：Y 系高温超伝導体の電子ドープ，ホールドープ間の化学ポテンシャルのとび，同上

[124] 藤森 淳，小出 常晴，竹田 幸治：光電子分光と XMCD を用いた高温強磁性半導体，高スピン偏極材料のキャラクタリゼーション，科研費特定領域研究「スピン流の創出と制御」平成 20 年度成果報告会（東北大金研，2009 年 1 月）.

[125] 朝倉大輔，小出常晴，片岡隆史，坂本勇太，山崎陽，藤森淳，平智幸，石川貴之，山本眞史：MgO バリアと界面を形成する Co_2MnGe 薄膜の XMCD 研究，同上.

[126] 坂本 勇太，片岡隆史，小林正起，山崎陽，藤森淳，F.H. Chang，L. Lee，H.J. Lin，D.J. Huang，C.T. Chen，豊崎秀海，福村知昭，川崎 雅司：$Ti_{1-x}Co_xO_{2-\delta}$ の X 線磁気円二色性による研究，同上.

[127] 山崎陽，片岡隆史，坂本勇太，藤森淳，F.-H. Chang，H.-J. Lin，D.J. Huang，C.T. Chen，石川弘一郎，黒田眞司：X線磁気円二色性を用いた $Zn_{1-x}Cr_xTe$ 薄膜の電子状態の研究，同上.

[128] 片岡隆史，坂本勇太，小林正起，山崎陽，藤森淳，竹田幸治，大河内拓雄，岡根哲夫，斉藤祐児，山上 浩志，K.V. Rao：X 線磁気円二色性および光電子分光を用いた希薄磁性半導体 $Zn_{1-x}Mn_xO$ 薄膜の電子状態，同上.

[129] 小出常晴，朝倉大輔，藤森淳：軟 X 線共鳴磁気散乱装置の製作と偏光放射光利用研究への応用 (III)，同上.

[130] 片岡隆史，坂本勇太，山崎陽，藤森淳，竹田幸治，大河内拓雄，岡根哲夫，斎藤祐児，山上浩志：軟 X 線磁気円二色性および光電子分光による強磁性フタロシアニン分子の電子状態，第 22 回放射光学会合同シンポジウム（東京大学，2009 年 1 月）

[131] 出田真一郎，吉田鉄平，橋本信，藤森淳，安斎太陽，藤田泰輔，中島陽佑，井野明洋，有田将司，生天目博文，谷口雅樹，小野寛太，久保田正人，高島憲一，小嶋健児，内田慎一，D. H. Lu，Z.-X. Shen：三層系高温超伝導体 $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$ の角度分解光電子分光による電子構造の研究，同上.

[132] 吉田鉄平，橋本信，藤森淳，久保田正人，小野寛太，永崎洋：$SrVO_3$，$CaVO_3$ の角度分解光電子分光，同上.

[133] 池田正樹，吉田鉄平，藤森淳，久保田正人，小野寛太，加賀義弘，笹川崇男，高木英典：電子ドープ系高温超伝導体 $Nd_{1.85}Ce_{0.15}CuO_4$ の高エネルギーキンク，同上.

[134] 坂本勇太，小林正起，片岡隆史，山崎陽，藤森淳，竹田幸治，大河内拓雄，岡根哲夫，斉藤祐児，山上浩志，F.-H. Chang，L. Lee，H.-J. Lin，D.-J. Huang，C.T. Chen，豊崎秀海，福村知昭，川崎雅司：磁性半導体 $Ti_{1-x}Co_xO_{2-\delta}$ の軟 X 線磁気円二色性による研究，同上.

[135] 山崎陽，片岡隆史，坂本勇太，藤森淳，F.-H. Chang，H.-J. Lin，D.J. Huang，C.T. Chen，石川弘一郎，黒田眞司：軟X線磁気円二色性を用いた $Zn_{1-x}Cr_xTe$ 薄膜の電子状態，同上.

[136] 和達大樹，摩庭篤，近松彰，組頭広志，尾嶋正治，溝川貴司，藤森淳，George A. Sawatzky：内殻光電子分光スペクトルに見られるマーデルングポテンシャルの効果，同上.

[137] 藤田泰輔，加茂剛，安斎太陽，中島陽祐，井野明洋，有田将司，生天目博文，谷口雅樹，藤森淳，内田慎一，藤田和博，Z.-X. Shen：低エネルギー放射光角度分解光電子分光による $Bi_2Sr_{1.6}Ln_{0.4}CuO_{6+\delta}$ の面外乱れの効果の研究，同上.

[138] 朝倉大輔，小出常晴，片岡隆史，坂本勇太，山崎陽，藤森淳，平智幸，石川貴之，山本眞史：MgO バリアと界面を形成する Co_2MnGe 薄膜の XMCD，同上.

[139] 相崎真一：SVO 薄膜の高分解能角度分解光電子分光，科研費基盤研究 A「遷移金属酸化物界面における新規強相関電子状態の放射光分光と探索」研究会（東大理，2009 年 2 月）

[140] 吉田鉄平，W. Malaeb，出田真一郎，藤森淳，R. Moore，D.H. Lu，Z.-X. Shen，久保田正人，小野寛太，小宮世紀，安藤陽一，永崎洋，藤巻洋介，内田慎一：$La_{2-x}Sr_xCuO_4$ のアンチノード付近における擬ギャップと超伝導ギャップ，物理学会第 64 回年次大会（立教大学，2009 年 3 月）

[141] 池田正樹，吉田鉄平，藤森淳，D.H. Lu，Z.-X. Shen，宇野沢圭一，笹川崇男，高木英典：電子ドープ系高温超伝導体 $Sm_{1.85}Ce_{0.15}CuO_4$ における反強磁性効果の波数依存性，同上.

[142] 出田真一郎，高島憲一，橋本信，吉田鉄平，藤森淳，小嶋健児，内田慎一，小野寛太，久保田正人，安斎太陽，藤田泰輔，中島陽佑，井野明洋，有田将司，生天目博文，谷口雅樹，D.H. Lu，Z.-X. Shen：三層型高温超伝導体 $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$ の ARPES スペクトルおける面間相互作用の効果，同上.

[143] W. Malaeb, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Kihou, H. Eisaki: Fermi Surfaces of $BaFe_2As_2$ Observed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, 同上.

[144] 相崎真一，吉松公平，組頭広志，堀場弘司，吉田鉄平，出田真一郎，藤森淳，尾嶋正治：$SrVO_3$ 薄膜の高分解能角度分解光電子分光，同上.

[145] 片岡隆史，坂本勇太，山崎陽，藤森淳，竹田幸治，大河内拓雄，岡根哲夫，斎藤祐児，山上浩志：強磁性フタロシアニ錯体の電子状態，同上.

[146] 山崎陽，片岡隆史，坂本勇太，藤森淳，F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen，石川弘一郎，黒田眞司：軟 X 線磁気円二色性を用いた $Zn_{1-x}Cr_xTe$ 薄膜の電子状態に関する研究，同上.

[147] 藤森伸一，大河内拓雄，岡根哲夫，斎藤祐児，山上浩志，藤森淳，青木大，池田修悟，松田達麿，芳賀芳範，山本悦嗣，大貫惇睦：放射光光電子分光によるウラン化合物の電子状態，同上.

[148] 竹田幸治，岡根哲夫，大河内拓雄，斎藤祐児，山上浩志，藤森淳，落合明：軟 X 線光電子分光によるウランモノカルコゲナイド化合物の研究，同上.

[149] 安斎太陽，加茂剛，藤田泰輔，井野明洋，有田将司，生天目博文，谷口雅樹，藤森淳，Z.-X. Shen，石角元志，内田慎一：Bi2212 のノード近傍準粒子構造のドーピング依存性：低エネルギー放射光角度分解光電子分光，同上.

[150] 原豪太郎，藤田泰輔，加茂剛，安斎太陽，中島陽祐，井野明洋，有田将司，生天目博文，谷口雅樹，藤森淳，Z.-X.Shen，藤田和博，内田慎一：低エネルギー角度分解光電子分光による不足ドープおよび最適ドープ Bi2201 の準粒子分散

[151] 岡部崇志，吉松公平，組頭広志，相崎真一，藤森淳，尾嶋正治：$SrVO_3$ 薄膜の *in situ* 放射光光電子分光スペクトルの膜厚依存性，第 56 回応用物理学関係連合講演会（筑波大学，2009 年 3 月）

セミナー他

[152] A. Fujimori: Mechaism of High-Temperature Ferromagnetism in Semiconductors from XMCD (National Synchrotron Radiation Research Center, Taiwan, April 2008).

[153] A. Fujimori: Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy of Complex Oxides (Photon Factory International Scientific Advisory Committee Meeting, 物構研 PF，2008 年 12 月).

[154] A. Fujimori: Application of XMCD and Soft X-Ray Scattering for Material Research (Saha Institute for Nuclear Physics, Kolkata, February 2009).

4.2 内田研究室

研究室およびその活動の概要。

4.2.1 ２００８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。Cu 酸化物のドーピング、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 μSR、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を発見 (Nature (1995)(2008), Science (1999)(2007), Phys. Rev. Lett. (2000)(2001)(2002))。
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), 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 20 年経った現在でもメカニズムが未解明なのは、高温超伝導発現におけるスピン・電荷・フォノン自由殿役割、複数の競合する秩序が自己組織的に作るどのような「構造」が高温超伝導をもたらしているのかがわかっていないためであると考えられる。それを明らかにする為、高温超伝導と競合する秩序の同定、そして競合を制御するパラメーターの追及を行う。これらは、室温超伝導実現への 1 つの道でもある。

4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相

超伝導ゆらぎ

高温超伝導体と低温超伝導体との際立った違いの１つは、T_c 以上の温度の正常状態でも観測される「擬ギャップ」である。この擬ギャップの起源は未だ

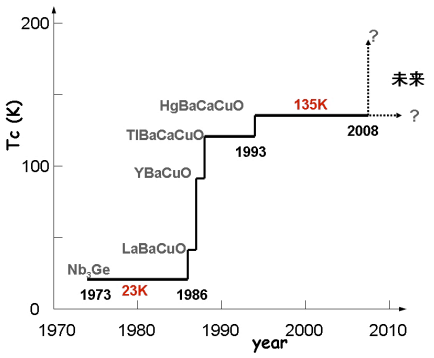

図 4.2.1: 超伝導体 T_c の上昇の歴史（1973 年以降）

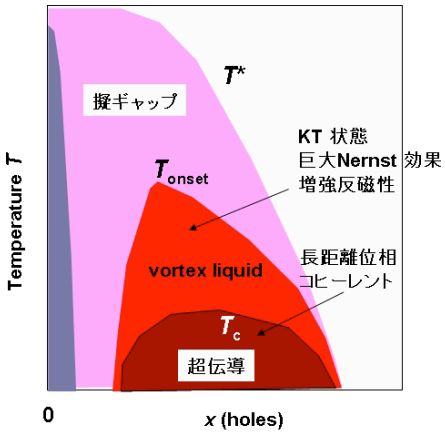

図 4.2.2: 高温超伝導体の電子相図

明らかではないが、「擬ギャップ状態は電子対が形成されているがその位相の揃っていない状態である」というのが有力な考え方の 1 つである。低温超伝導体においても、T_c の近傍で「超伝導ゆらぎ」が観測されるが、T_c の直上の狭い温度領域に限られている。「ゆらぎ」領域では超伝導は短距離秩序として存在していると考えられる。このような場所に磁場をかけると、磁場は磁束（磁気ボルテックス）として存在するはずである。

我々は、Princeton 大学の Prof. Ong と共同の Nernst 効果の実験で磁束の存在を確認した。更に、ミクロな超伝導領域が応答していると考えられる反磁性をトルクを利用した高感度の磁化測定で観測した。Nernst 効果は試料の温度勾配によって生ずるホール効果であるが、高温超伝導体で観測されたのは電荷キャリアーの拡散に伴う Nernst 効果に比べ桁違いに大きなものである。正常状態での磁束は T_c よりかなり高い温度（T_{onset}）まで観測できる。しかし、擬ギャップ温度 T^* に比べると、T_{onset} は低い。この結果から結論できるのは、高温超伝導状態は非常にゆらぎの強い状態であるということである。その原因は、CuO_2 面の 2 次元性や T_c が高いことによる熱力学的ゆらぎだけではなく、量子力学的ゆらぎが大きいことにもある。量子力学ゆらぎは、高温超伝導体中のクーパー対密度が低温超伝導体に比べ 1 桁以上小さいことに起因している。一方、T_{onset} と T^* が異なることは、擬ギャップの起源が超伝導ゆらぎとは別のところにあることを意味している。擬ギャップは超伝導秩序と競合する秩序に関連していると考えるのが自然である。

秩序競合・共存

最近、「強相関電子系」と分類される Mn,Ni や Cu の酸化物内で電子が「ストライプ秩序」と呼ばれる全く新しい秩序を形成していることが明らかになった。ここでいう強相関とはクーロン相互作用が極限的に強く、電子がモット（Mott）転移で局在するような状況を意味している。高温超伝導は、そのような 2 次元 Cu 酸化物に電荷キャリアーを注入（ドーピング）することによって起こっている。注入された電荷キャリアーは、それ自体で空間的に一様な電子気体/液体を形成しているのであるが、それらが偏析して 1 次元的に配列してしまうという現象が発見されたのである。これがストライプ秩序と呼ばれるものである。一種の電荷秩序と考えてよいであろう。このストライプに挟まれた領域は元の（ドープされていない）モット絶縁体状態であり、電子のもつスピンが表に現れて、反強磁性秩序が形成されている。このようなストライプ秩序が形成されると超伝導秩序の方は抑制されてしまう。

これまでのところ、ストライプ秩序は La 系高温超伝導体、$La_{2-x}Ba_xCuO_4$、$La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO_4$、でのみ観測されている。しかし、Bi 系高温超伝導体に対する STM 観察（コーネル大学 J. C. Seamus Davis グループとの共同研究）で、類似の秩序が超伝導秩序と競合・共存している様子が見えてきた。

STM/STS では、T_c の上の正常状態だけではなく、T_c 以下の超伝導状態でも、CuO_2 面の一部（ナノメートルスケールの領域）に擬ギャップが観測された。超伝導秩序が局所的に壊れた磁束の芯近くでも擬ギャップが出現する。これらの擬ギャップ領域では、チェッカーボード状のトンネルコンダクタンスの空間変調パターンが観測される。同様な「パターン」は超伝導を外れた稀薄ドーピング域（スピングラス相と呼ばれる）でも観測されるので、STM 観測結果からは、超伝導とは別の秩序を表わしてるようにみえる。

特殊な手法（トンネル非対称性）で詳細な構造をみると、ランダムに配向した一軸性のドメイン構造が見えてくる。各ドメインはナノメートルスケールの「ストライプ」のミニチュアのようなもので、これが電荷秩序（電子結晶）の破片だとすると「電子ガラス状態」が実現していることになる。これが「チェッカーボード」のパターンをつくり出す擬ギャップ相の空間構造といえる。このような「電子ガラス」組織が CuO_2 を覆っていると同時に、その上を超伝導の準粒子が自由に飛びまわっていることも STM/STS で明らかになった。驚くべきことに超伝導秩序も CuO_2 を覆っているのである。

STM や ARPES は試料表面の電子状態を調べるプローブであり、実験は殆んどの場合 Bi 系超伝導体（Bi2212）に対して行われているので、結晶表面だけに現われる特殊な状態を見たもので、擬ギャップ状態の真の姿を捉えているのかという疑問があった。しかし、現在では、この疑問はほぼ解消している。擬ギャップは、ドープされた CuO_2 面で実現する複数の状態のうちの１つであり、「擬ギャップ相」と呼ぶべきものとなる。その正体として、空間的にゆらいだストライプ秩序（電子液晶とも呼ばれている）、電子対が整列して結晶化したもの（電子結晶）、など様々な候補があげられているが決め手となる証拠が未だにない。

「擬ギャップ相」は超伝導秩序が形成される前、あるいは超伝導秩序が弱められた場所に出現していることがわかった。この意味では、La 系物質のストライプ秩序と同様、超伝導秩序と敵対する電子秩序であり、またその電荷秩序のパターンからストライプ秩序と「擬ギャップ相」とは密接な関係にあると想像できる。一方、ストライプ秩序に比べると「擬ギャップ」は超伝導秩序との相性がはるかに良い。超伝導ギャップと同じ d 波ギャップである。また、磁束芯の近くやドーピング量の少ない（アンダードーピング）領域の超伝導状態で、CuO_2 面に「擬ギャップ相」が顔を出すが、超伝導にとっては必ずしも破壊的な存在ではなく、両者は共存して高い T_c を保持しているようにみえる。どのような共存状態にあるかを明らかにすることが次の課題である。

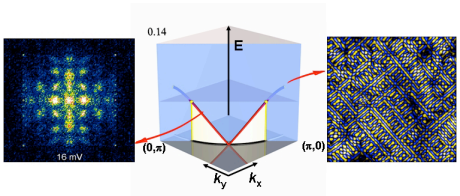

図 4.2.3: 超伝導相と擬ギャップ相の共存状態と擬ギャップ相の空間構造

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 LaFeAsO1-yFy という組成での Tc=26K から始まり、僅か 1 ヶ月の間に T_c は 56K にまで跳ね上がったのである。 銅酸化物の履歴を辿るように、T_c の上昇は La を他の希土類元素（Nd あるいは Sm）に置換することにより実現した。その後、いくつかの結晶構造の異なる鉄－砒素化合物で超伝導が確認されたが、現在の T_c の最高値は上記の 56K である。多種の結晶構造が存在し、多様な元素置換が可能であるという意味で、銅酸化物と共通点をもった物質群が形成されつつある。銅酸化物群の共通要素が CuO_2 面であったのと同様、この物質群は鉄と砒素がつくる原子層である。

鉄を他の遷移金属元素、コバルトやニッケル、更には銅、に置き換えた物質は高温超伝導を示さない。また、砒素をリン（P）に換えても同様である。従って、FeAs 層が CuO_2 面と同様、高温超伝導の舞台であり、鉄と砒素の組み合わせが特別な状況を作り出していると考えられた。しかし、その後、砒素を周期表の隣の VI 族セレン（Se）に置き換えた $FeSe_{1-y}$ (あるいは $Fe_{1+x}Se$) という化合物でも超伝導が観測され、高圧下ではあるが T_c が 27K まで上昇した。この高温超伝導体の主舞台は鉄の二次元正方格子らしいのである。但し、鉄の層は、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ない。未だ発見後１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。

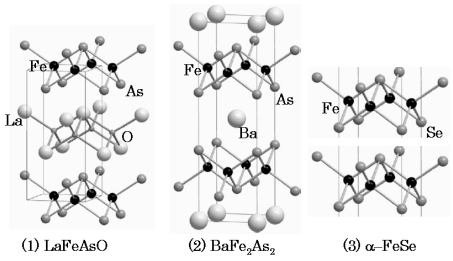

図 4.2.4: Fe 系化合物の結晶構造

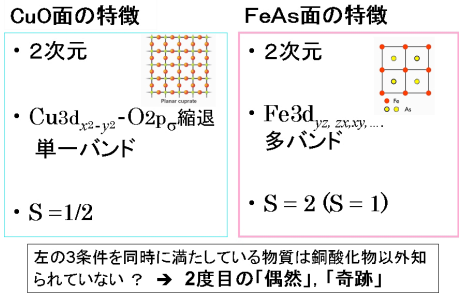

図 4.2.5: Cu 酸化物、Fe 化合物電子状態それぞれの特徴

4.2.4 T_c は上がるか？

高温超伝導の舞台は CuO_2 面であり、CuO_2 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、CuO_2 面の外の環境が T_c に大きな影響を与えているのである。幸いにも、メカニズムに比べ、T_c がどのような因子で決定されているのか、かなりわかってきている。従って、T_c を決める因子が CuO_2 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。

T_c の決定因子

高温超伝導においては、これまで知られている T_c の決定因子は極めて多数にのぼる。(a) ドーピング量　(b) 超流動密度 (ρ_S)　(c) CuO_2 面の枚数　(d) 面内の乱れ (Zn 置換)　(e) 相競合 (ストライプ秩序) がある。しかし、実は (d) の面内乱れを除くと、これらの因子は面外の状況変化によりもたらされている。面外の状況を決めるのは、(f) CuO_2 面外の乱れ　(g) 頂点酸素の位置　(h) La や Sr 等の金属のイオン半径など、結晶化学に関連した因子であることがわかっている。

フォノン BCS 超伝導体の場合との大きな違いは、超伝導ギャップよりも超流動密度が T_c を支配するパラメーターになっていることである。実際、アンダードープ領域では、T_c はギャップの大きさとは無関係に、ρ_S に比例して増大する (Uemura プロット)。ρ_S はクーパー対の密度なのでドーピング量とは密接な関係にある。ドーピングは CuO_2 面外の原子への化学操作により行われるが、特に CuO_2 面に隣接する頂点酸素を含む原子層 (頂点酸素ブロック) へのドーピング等による乱れの導入が ρ_S そして CuO_2 面の電子状態に大きな影響を与えることがわかってきた。この乱れは不純物として CuO_2 面の電子 (正孔) の運動を乱す。しかし、不純物散乱としての効果は T_c に影響を与える程強くはない。STM の観測から、超伝導と他の相 (擬ギャップ相) との競合状況がこの乱れによって変化していることがわかってきた。La 系において、La の一部を同じ希土類元素の Nd に置き換えると、ストライプ相が誘起されることが知られている。La 系以外でも、頂点酸素ブロックの乱れが競合相の勢を強めているのである。

頂点酸素の CuO_2 面からの距離も重要な因子である。この距離が長くなる程 T_c が高くなるという傾向が見出されている。現在、最高の T_c をもつ Hg 系物質は、頂点酸素距離の最も長い物質である。

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、$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ (Bi2212) を挙げると、CuO_2 面の電子状態と T_c とに目に見える影響を与えるのは、頂点酸素ブロック (SrO ブロック) の乱れである。乱れの主因は 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 ($Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$) の T_c を 125K まで向上させることができると予測される。

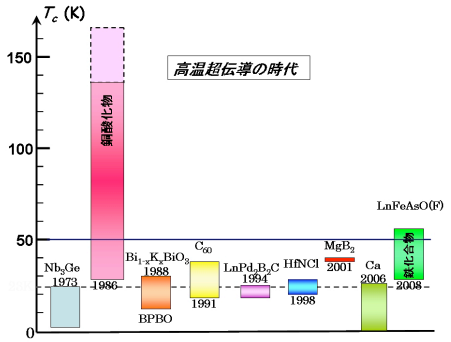

図 4.2.6: Bi 系高温超伝導体の結晶乱れを減らすことにより上昇する超伝導臨界温度 T_c

＜報文＞

(原著論文)

[1] Evolution of the electronic excitation spectrum with strongly diminishing hole density in superconducting $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$, J. W. Alldredge, Jinho Lee, K. McElroy, M. Wang, K. Fujita, Y. Kohsaka, C. Taylor, H. Eisaki, S. Uchida, P. J. Hirschfeld, and J. C. Davis, Nature Physics 4, 319-326 (2008).

[2] Strain Amplification of the $4k_F$ Chain Instability in $Sr_{14}Cu_{24}O_{41}$, A. Rusydi, P. Abbamonte, H. Eisaki, Y. Fujimaki, S. Smadici, N. Motoyama, S. Uchida, Y.-J. Kim, M. Rubhausen, and G. A. Sawatzky, Phys. Rev. Lett. 100, 036403 (2008).

[3] X-ray imaging of dispersive charge modes in a doped Mott insulator near the antiferromagnet/superconductor transition", Y. W. Li, D. Qian, L. Wray, D. Hsieh, Y. Xia, Y. Kaga, T. Sasagawa, H. Takagi, R. S. Markiewicz, A. Bansil, H. Eisaki, S. Uchida, and M. Z. Hasan, Phys. Rev. B 78, 073104 (2008).

[4] Bogoliubov angle and visualization of particle-hole mixture in superconductors, K. Fujita, I. Grigorenko, J. Lee, W. Wang, J. X. Zhu, J.C. Davis, H. Eisaki, S. Uchida, and A. V. Balatsky, Phys. Rev. B 78, 054510 (2008).

[5] How Cooper pairs vanish approaching the Mott insulator in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$, Y. Kohsaka, C. Taylor, P. Wahl, A. Schmidt, J. Lee, K. Fujita, J. W. Alldredge, K. McElroy, Jinho Lee, H. Eisaki, S. Uchida, D.-H. Lee, and J. C. Davis , Nature 454, 1072-1078 (2008).

[6] Appearance of universal metallic dispersion in a doped mott insulator, S. Sahrakorpi, R. S. Markiewicz, H. Lin, M. Lindroos, X. J. Zhou, T. Yoshida, W. L. Yang, T. Kakeshita, H. Eisaki, S. Uchida, S. Komiya, Y. Ando, F. Zhou, Z. X. Zhao, T. Sasagawa, A. Fujimori, Z. Hussain, Z.-X. Shen, and A. Bansil, Phys. Rev. B 78, 104513 (2008).

[7] An Isotopic Fingerprint of Electron-Phonon Coupling in High-T_c Cuprates, 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, Phys. Rev. Lett. 101, 157005 (2008).

[8] Bogoliubov angle and visualization of particle-hole mixture in superconductors, K. Fujita, J. Lee, M. Wang, J.C. Davis, H. Eisaki, S. Uchida, and A. V. Balatsky, J. Phys. Chem. Solids 69, 3000-3005 (2008).

[9] A New Road to Higher Temperature Superconductivity, S. Uchida, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (suppl.) 9-14 (2008).

[10] Spin gap of a pressure-induced superconductor $Sr_2Ca_{12}Cu_{24}O_{41}$ at an optimum pressure of 3.8 GPa, N. Fujiwara, Y. Fujimaki, S. Uchida, T. Matsumoto, and Y. Uwatoko, J. Phys. Chem. Solids 69, 3171-3173 (2008).

[11] Enhancement of the superconducting critical temperature in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ by controlling disorder outside CuO_2 planes", H. Hobou, S. Ishida, K. Fujita, M. Ishikado, K. M. Kojima, H. Eisaki, and S. Uchida, Phys. Rev. B 79, 064507 (2009).

[12] Crossover from coherent quasiparticles to incoherent hole carriers in underdoped cuprates, M. Hashimoto, T. Yoshida, K. Tanaka, A. Fujimori, M. Okusawa, S. Wakimoto, K. Yamada, T. Kakeshita, H. Eisaki, and S. Uchida, Phys. Rev. B 79, 140502(R) (2009).

(学位論文)

[13] 石田茂之：高温超伝導体のドーピング制御と輸送現象（修士論文）

[14] 中島正道:銅酸化物および鉄砒素化合物の CDW/SDW 転移と光学スペクトル（修士論文）

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[15] S. Uchida: Introduction and Road to Room Temperature Superconductivity (JST International Symposium on Fe-oxipnictide superconductors, Tokyo, June 29, 2008).

[16] S. Uchida: Role of Apical Oxygen Atoms in High-T_c Superconductivity (The 6th International Conference, Stripe 2008, "Quantum Phenomena in Complex Matter", Erice, Italy, July 27, 2008).

[17] S. Uchida: Coherence-incoherence crossover in the cuprates (International Workshop on Inerastic Newton and X-ray Scattering in Strongly Correlated Electron Systems, Sendai, October 01, 2008).

[18] S. Uchida: Common Ingredients for High T_c between Cuprates and Fe-Pnictides (Japan-China-Korea A3 Foresight Meeting, Shanghai, China, December 08, 2008).

[19] S. Uchida: High-T_c Cuprates: Overview, (G-COE Workshop, Tokyo, January 10, 2009).

[20] S. Uchida: Superconductivity (Joint Symposium by Nanyang Technological University and University of Tokyo, Singapore, February 20, 2009).

(国内会議)

一般講演

[21] 石田茂之，金谷尚亮，藤崎晴信，石角元志，小嶋健児，内田慎一：Ca サイトの希土類置換による Bi2212 の輸送特性の研究，日本物理学会 2008 年秋季大会,（岩手大学，2008 年 9 月 20 日）.

[22] 安斎太陽，加茂剛，藤田泰輔，井野明洋，有田将司，生天目博文，谷口雅樹，藤森淳，Z.-X. Shen，石角元志，内田慎一：低エネルギー放射光角度分解光電子分光による Bi2212 の準粒子構造のホール濃度依存性，日本物理学会 2008 年秋季大会,（岩手大学，2008 年 9 月 22 日）.

[23] 出田真一郎，高島憲一，橋本信，吉田鉄平，小嶋健児，藤森淳，内田慎一，久保田正人，小野寛太，安斎太陽，藤田泰輔，中島陽祐，井野明洋，有田将司，生田目博文，谷口雅樹，D.H. Lu，Z.-X. Shen：三層系高温超伝導体 $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$ の角度分解光電子スペクトルにおけるキンク，日本物理学会 2008 年秋季大会,（岩手大学，2008 年 9 月 22 日）.

[24] 岩澤英明，J.F. Douglas，佐藤耕二，増井孝彦，吉田良行，Z. Sun，永崎洋，阪東寛，井野明洋，有田将司，島田賢也，生天目博文，谷口雅樹，田島節子，内田慎一，齋藤智彦，D.S. Dessau，相浦義弘：低エネルギー励起 ARPES による Bi2212 における酸素同位体効果の精密検証，日本物理学会 2008 年秋季大会,（岩手大学，2008 年 9 月 22 日）.

[25] 吉田鉄平，Walid Malaeb，池田正樹，藤森淳，大川万里生，木須孝幸，石坂香子，辛埴，小宮世紀，安藤陽一，永崎洋，内田慎一：$La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$ のレーザー励起角度分解光電子分光，日本物理学会 2008 年秋季大会,（岩手大学，2008 年 9 月 22 日）.

[26] 藤原直樹，藤巻洋介，内田慎一，久田旭彦，松本武彦，上床美也：銅酸化物圧力誘起超伝導体 14-24-41

系における 3-4 万気圧下，微小磁場での核磁気共鳴，日本物理学会 2008 年秋季大会，(岩手大学，2008 年 9 月 22 日)．

[27] 中島正道，藤巻洋介，小嶋健児，内田慎一：梯子型銅酸化物 $Sr_{14-x}Ca_xCu_{24}O_{41}$ における電荷秩序と光学スペクトル，日本物理学会 2008 年秋季大会，(岩手大学，2008 年 9 月 22 日)．

[28] 平田靖透，小嶋健児，伊豫彰，永崎洋，石角元志，内田慎一：多層系高温超伝導体の面間光学応答，日本物理学会 2008 年秋季大会，(岩手大学，2008 年 9 月 22 日)．

[29] 石田茂之，中島正道，富岡泰秀，伊藤利充，宮沢喜一，鬼頭聖，木方邦宏，伊豫彰，永崎洋，内田慎一：鉄ニクタイド系化合物の輸送特性とドーピング依存性，日本物理学会 2009 年春季大会，(立教大学，2009 年 3 月 27 日)．

[30] 原豪太郎，藤田泰輔，加茂剛，安斎太陽，中島陽祐，井野明洋，有田将司，生天目博文，谷口雅樹，藤森淳，Z.-X.Shen，藤田和博，内田慎一：低エネルギー角度分解光電子分光による不足ドープおよび最適ドープ Bi2201 の準粒子分散，日本物理学会 2009 年春季大会，(立教大学，2009 年 3 月 27 日)．

[31] 吉田鉄平，W. Malaeb，出田真一郎，藤森淳，R. Moore，D.H. Lu，Z.-X. Shen，久保田正人，小野寛太，小宮世紀，安藤陽一，永崎洋，藤巻洋介，内田慎一：$La_{2-x}Sr_xCuO_4$ のアンチノード付近における擬ギャップと超伝導ギャップ，日本物理学会 2009 年春季大会，(立教大学，2009 年 3 月 28 日)．

[32] 安斎太陽，加茂剛，藤田泰輔，井野明洋，有田将司，生天目博文，谷口雅樹，藤森淳，Z.-X. Shen，石角元志，内田慎一：Bi2212 のノード近傍準粒子構造のドーピング依存性：低エネルギー放射光角度分解光電子分光，日本物理学会 2009 年春季大会，(立教大学，2009 年 3 月 28 日)．

[33] 出田真一郎，高島憲一，橋本信，吉田鉄平，藤森淳，小嶋健児，内田慎一，小野寛太，久保田正人，安斎太陽，藤田泰輔，中島陽佑，井野明洋，有田将司，生天目博文，谷口雅樹，D.H. Lu，Z.-X. Shen：三層型高温超伝導体 $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$ の ARPES スペクトルおける面間相互作用の効果，日本物理学会 2009 年春季大会，(立教大学，2009 年 3 月 28 日)．

[34] 掛下照久，安達成司，内田慎一：T*型銅酸化物超伝導体のキャラクタリゼーションと低 T_c の要因についての考察，日本物理学会 2009 年春季大会，(立教大学，2009 年 3 月 30 日)．

[35] 中島正道，石田茂之，木方邦宏，富岡泰秀，伊藤利充，伊豫彰，永崎洋，小嶋健児，内田慎一：鉄系化合物の光学スペクトル，日本物理学会 2009 年春季大会，(立教大学，2009 年 3 月 30 日)．

招待講演

[36] 内田慎一：JST 新高温超伝導体国内シンポジウム（丸の内、2008 年 6 月 8 日）．

[37] 内田慎一：高温超伝導機構解明の次に見えるもの、超伝導の将来ビジョン－ 30 年後までを語る（東京大学、2008 年 6 月 30 日）．

4.3 長谷川研究室

4 月から修士課程 1 年生として小森田拓と東野剛之が、10 月から特任研究員として保原麗が新しくメンバーに加わった。9 月には顧艶が修士課程を終了し中国に帰国した。3 月には，宮田伸弘と高瀬恵子が博士課程を修了し、北岡佑介と新沼優人が修士課程修了し、それぞれ企業に就職した。

当研究室では、表面物性、特に「表面輸送」をキーワードにして実験的研究を行っている。おもにシリコン単結晶表面上に形成される種々の表面超構造や超薄膜を利用し、それらナノスケール低次元系に固有の電子状態や電子輸送特性、スピン状態を明らかにし、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。そのために、表面構造や原子層成長の制御・解析、表面電子状態、電子輸送特性、スピン状態、電子励起など、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

希薄磁性金属表面における電気抵抗異常； 近藤効果と RKKY 相互作用の競合

Si(111)$\sqrt{7}\times\sqrt{3}$-In 表面は、放物線的バンドをもった表面二次元自由電子系として知られており、冷却によって電気抵抗が単調減少する金属的振る舞いを示すことが当研究室によって明らかにされている。この表面に磁性不純物として Co 原子を希薄（0.0013 原子層以下）に蒸着し、プローブ間隔が数十 μ mのマイクロプローブを用いた表面敏感電気伝導測定法によって電気抵抗の温度依存性を測定した。その結果、温度降下に対して、室温から 100 K 程度までは $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$-In 表面と抵抗の差異がなく、電気抵抗が減少していく。しかし、それ以下の温度で抵抗が増大し始め、さらに低温領域で抵抗減少に転じた。この抵抗極大の温度は Co の蒸着量に依存することが分かった。このような抵抗異常は、三次元希薄磁性合金においては、スピングラスの特徴であることが知られている。一般的な抵抗増大の原因として、弱局在及び電子相関も挙げられるが、これらでは説明できないことが計算により分かった。そこで近藤効果・RKKY 相互作用の競合の理論を適用した結果、今回の観測結果の抵抗極大温度の Co 濃度依存性を用いて、近藤温度やスピングラスを特徴づける温度を導出することに成功した。しかし、観測した抵抗異常を定量的に説明できなかった。そこで、$\sqrt{7}\times\sqrt{3}$-In 表面が disorder の強い表面であることに注目し、disorder によって近藤効果が増大される理論を適用し、観測した抵抗増大を定量的に説明するこができた。これらの議論から、希薄磁性金属表面において、近藤効果と RKKY 相互作用の競合が確かに重要であることが分かった。

さらに、Co 濃度を 10 倍以上にすると、温度降下によって電気抵抗は金属的に減少したのち、極小を示して抵抗増大に転じるだけで抵抗極大が見られなかった。これは、Co 蒸着によりさらに disorder が増えたことに起因すると考えられる。これらの抵抗増大部分は、弱局在や電子相関では説明できず、また、disorder の強い物質で適用できると報告されているトンネル電子モデルでも観測結果は十分に説明できなかった。そこで、磁性不純物濃度が高く disorder が強いアモルファス物質で観測される Kondo-like 抵抗の解析で行われているように、規格化した抵抗の大きさと抵抗極小の温度を Co 濃度に対して調べた。その結果、観測結果の振る舞いが、系の磁性状態の変化（スピングラス状態から強磁性秩序の始まりへの変化）を示唆していることが分かった。

トポロジカル絶縁体のバンド構造とエッジ状態の輸送特性

スピン軌道相互作用が強い物質において、バルクはバンドギャップが開き絶縁体であるが、エッジ（表面）に金属的な状態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。最近 3 次元物質の BiSb 合金結晶がこのトポロジカル絶縁体になっているという報告があった。そこで本研究ではシリコン表面上に BiSb 合金超薄膜を成長させ、その電子状態と表面状態の輸送特性に関して検証を行った。角度分解光電子分光による測定は残念ながら分解能が足りなく、トポロジカル絶縁体の特徴を発見することはできなかった。一方マイクロ 4 端子法で BiSb 合金超薄膜の電気伝導度の膜厚依存性より表面状態の室温における電気伝導度を決定することができた。今後は不純物を入れた場合の電気伝導度の温度依存性に主眼を置いて研究を続ける。

Bi(001) 薄膜の磁気抵抗

Bi(001) 薄膜は巨大磁気抵抗を示すことが報告されている．そこで Bi(001) 薄膜を超高真空環境で作成してその磁気抵抗をその場測定した．1 μm の試料で 1,000 %の磁気抵抗比を得た．この値は先行研究の値よりも小さいが，それは作成条件の違いから Bi の電子とホールの濃度比が異なるためであると考えられる．また，磁気抵抗比の膜厚依存性から表面状態の寄与分を見積ったところ，およそ 10 %であった.（物性研究所との共同研究）

Bi/Ag(111) 超薄膜の磁気抵抗

固体表面における表面状態が Rashba 効果によってスピン分裂していることが光電子分光の実験から明らかになってきた．加えて，金属超薄膜内の量子井戸状態もスピン分裂していることがスピン角度分解光電子分光の直接測定から報告されている．一方，磁気抵抗の測定からスピン緩和時間が得られることが知られている．そこで Ag(111) 超薄膜表面に Bi を 1/3 原子層ほど吸着させた Ag(111)$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Bi 超薄膜の磁気抵抗を測定することで系のスピン緩和時間を求めた．その値は 1 ps 程度であった．さらに系のスピン緩和機構が Rashba 効果によって起こる伝導帯のスピン分裂に起因すると仮定して，系の Rashba 相互作用定数を各々の量子井戸状態に対して求めた．その値は 1×10^{-12} eV m 程度で、現行の角度分解光電子分光では検出できないほど小さな値である．以上の研究によって、マイクロ 4 端子プローブ法による磁気輸送測定装置によって、金属量子薄膜の磁気輸送現象によけるスピン軌道相互作用を調べることが可能となった.（物性研究所との共同研究）

キャリアドープしたモット絶縁体表面の電気伝導度

Si(111) 表面上に Sn を 1/3 原子層 (ML) 蒸着すると $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 構造が形成される。最近この表面は Mott 絶縁体であることが知られており、キャリアドープすることによって金属的ふるまいに変わることが期待される。今回プローブ間隔 20 μm のマイクロ 4 端子プローブ法を用いて、微量の Na や In 原子吸着によってキャリアドープした表面の電気伝導度測定を行った。室温から 260 K においては、温度が下がるにつれて抵抗も下がり、金属的ふるまいに変わった。一方 260 K においては温度が下がると抵抗が急激に増大した。これはキャリアドープした原子が散乱体として寄与してキャリアの局在が起こったと考えられる。今後はこれらの表面の角度分解光電子分光による電子状態の測定や走査トンネル顕微鏡による原子構造観察を行う予定である。また、この $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Sn 表面に Na を約 1/9 ML 蒸着すると、3×3 構造に変化することが RHEED 観察から発見されている。今回走査トンネル顕微鏡 (STM) によってこの表面を観察し、サンプルバイアスが正においての像をとり、3×3 の構造を確認することができた。今後、この構造の電子状態および伝導特性も合わせて測定する予定である。

ダマシン Cu ワイヤの電気伝導

半導体デバイスに使われる Cu 配線の線幅の減少に伴って抵抗率が上昇する原因としては表面散乱や粒界散乱が考えられている。しかし、これらの影響を微小領域電気伝導測定で直接観測したという報告はない。そこで、白金被覆カーボンナノチューブ（CNT）探針を電気伝導測定プローブとして用いた 4 探針 STM装置によって、ダマシン法で作成された様々な線幅の Cu 配線について 4 端子電気伝導測定を室温で行った。CNT の探針間隔を最短で 70 nm まで小さくして測定する事に成功した。測定した全ての線幅のワイヤにおいて、電気抵抗は 70 nm の探針間隔まで探針間隔に比例しており、古典的な 1 次元拡散伝導の振る舞いを示した。また線幅の減少に伴い抵抗率が上昇することが確認された。さらに測定した

一番細い幅 70 nm のワイヤに関して 200nm 以下の探針間隔で粒界散乱の影響を直接観測することに成功した。（東京大学工学部との共同研究）

Fe シリサイドナノワイヤの電気伝導

Si(110) 面に Fe を蒸着すると $FeSi_2$ ナノワイヤが形成され、加熱処理によって金属的な γ 相から半導体的な β 相に転移することが知られている。γ 相と β 相のそれぞれについて、金属被覆カーボンナノチューブ探針を用いてた４探針ＳＴＭ装置によって電気伝導測定を室温で行った。その結果、いずれの場合も薄膜で報告されている抵抗率と近い値を得た。また、γ 相では探針間隔 40 nm まで抵抗は探針間隔に比例し、古典的な 1 次元拡散伝導を示した。一方、β 相においては、探針間隔が狭い部分で離散的な抵抗を示し、古典的な１次元拡散伝導から外れる振る舞いが見られた。これは半導体的な β 相の伝導電子の平均自由行程が長いため、個々の散乱が見える準弾道伝導現象と考えられる。今後は他の β 相のナノワイヤ測定を行い、物理機構を明らかにする予定である。

ハイドープ基板を用いた Si(111)-4×1-In 表面の電気伝導度

Si(111) 表面上に１原子層の In を蒸着すると、異方性をもった 4×1-In/Si(111) が形成される。この表面は 130 K 程度で 8×2 に絶縁体相に相転移し、抵抗が急激に増大する。最近この表面に O_2 や H_2 を吸着させると、この転移温度が変化することが見出された。また、ハイドープの Si(111) 基板上では転移温度が大きく低下するというＳＴＭ観察が報告された。本研究では、ハイドープ基板にこの表面構造を作製し、室温から 90 K までの電気伝導度測定を行った。その結果、急激に抵抗が増加する転移温度は見られず、RHEED パターンにも変化がなかった。つまり、転移温度は 90 K より低温にあると考えられ、低ドープ基板と相転移温度が異なることが明らかとなった。今後はこの試料をさらに冷やして電気伝導度測定を行い、その転移温度を明らかにする。（韓国 Inha 大学との共同研究）

4.3.2 表面ナノ構造

SiC 上のグラフェンの電子状態

シリコンカーバイド (SiC) を真空中で 1250°C に加熱すると Si が脱離して表面上に炭素が堆積することが知られており、単原子層の炭素であるグラフェンが形成される。さらに高温で加熱すると炭素の原子層が増え、最終的にはグラファイトになる。原子層の数が増えるにつれていわゆる Dirac バンドの数が増え、層数を判別できる。本研究ではまずグラフェン作成の条件を最適化するために SiC を様々な温度で加熱後にバンド構造を角度分解光電子分光法によって測定した。その結果過去の報告とほぼ同じ分散形状を得ることに成功し、確かに単原子層や数原子層のグラフェンが形成されていることが明らかになった。今後は走査電子顕微鏡（SEM）でグラフェンの実空間観察を行い、その細かいドメイン構造や層数判別、さらには電気伝導測定を行う予定である。

シリコン表面上極薄 Ag 超薄膜の量子井戸状態の Rashba 分裂

反転対称性が破れている系ではスピン軌道相互作用により非磁性物質であっても Rashba 効果によってバンドがスピン偏極することが知られている。今までこのような Rashba 分裂した系においては表面状態に関する研究が主であった。今回シリコン表面に六原子層の銀 (Ag) 超薄膜を作成し、角度分解光電子分光測定を行った。その結果膜内の電子が閉じ込められたことで形成される量子井戸状態においても Rashba 分裂に近い傾向が見られた。今後より低温で高分解能測定およびスピン分解光電子分光測定を行って実際にスピン分裂しているかどうかさらに詳しい検証を行う予定である。

Si(111)4×1-In 表面の相転移に及ぼす欠陥の影響

Si(111)4×1-In は擬 1 次元金属的な電子物性を持つ表面超構造として知られている。ここでの原子ワイヤ中の欠陥を調べることは、低次元系の物理という観点からもナノデバイス応用の観点からも興味深い。4×1-In 構造が低温で示す 8×2-In 構造への相転移は、基本的には電荷密度波 (CDW) の発生を伴うパイエルス転移と考えられている。反射高速電子線回折（RHEED）における各構造のスポット強度の温度依存性をとることにより、相転移温度を決定できる。4×1-In 清浄表面に導入した欠陥種 (酸素、水素、インジウム等) と欠陥密度 (吸着量) による相転移温度の変化を系統的に調べた。その結果、RHEED 強度変化では、酸素欠陥の場合と、水素・インジウム欠陥の場合とで欠陥密度と相転移温度の依存性が異なることが発見された。なお、電気伝導度測定による金属絶縁体転移としての相転移温度の振る舞いとも異なり、実験手法によって見ている相転移のメカニズムも異なることも発見された。RHEED 強度変化は原子構造変化を反映するものである。4×1-In 構造と 8×2-In 構造、その中間の 4×2-In 構造で、欠陥種と欠陥密度によって CDW の各種ピン止めおよびロッキング (隣接ワイヤー間に効いて 8x の周期を生むもの、欠陥により誘起されて x2 の周期を生むもの等) が効き始める温度が異なることが推測される。今後は STM 観察やＣＤＷの理論と合わせて、複雑な表面系の相転移のメカニズムをさらに明確に検証していく予定である。（韓国 Inha 大学との共同研究）

SMOKE 装置による Gd/In/Si(111) 表面の磁性

金属に磁性不純物を入れると近藤効果や RKKY 相互作用等の興味深い現象が起きる。これらの現象は物理的な面においてだけでなく、技術への応用面においても重要であり、広く研究されてきた。特に Mn を GaAs に混ぜると“ 希薄磁性半導体 ”が形成されることが知られている。系の次元を低下させる事により、遮蔽の効果が弱くなるため、不純物の効果は大きくなると予想される。そこで、本研究では磁性特性を評価するために SMOKE（表面磁気光カー効果）装置を製作し、1 原子層の In を Si(111) 表面に蒸着して得られる、自由電子的二次元金属である $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ 構造上に Gd を蒸着して、表面磁気カー効果測定、RHEED・STM 観察、マクロ 4 端子電気伝導測定を行った。その結果、$\sqrt{7}\times\sqrt{3}$-In 表面は、Gd の蒸着により $\sqrt{7}\times\sqrt{7}$ に相転移し、80 K で、磁場を表面垂直方向に印加する極カー効果測定において、磁気ヒステリシスが得られた。また、Gd の蒸着により電気伝導度が増大するのが観測された。これは、Gd が自由電子的なバンドに電子を供給したという事を示していると思われる。

4.3.3 新しい装置・手法の開発

グリーン関数 STM 装置の改良

当研究室では、約 6 K までの低温で動作可能な独立駆動型 4 探針 STM 装置を開発している。本年度は主に、Si(111)4×1-In 表面とその上に成長させた Ag 薄膜の電気伝導測定に特化してセットアップを進めてきた。いずれの系も擬 1 次元的な電子的性質を持つことが知られており、4 端子測定の温度依存性や探針間隔依存性、膜厚依存性を測ることで、フェルミ面のトポロジカル相転移、表面パイエルス転移、バリスティック伝導の直接観測、異方性のある系での局在現象等の物理現象の解明に役立つことが期待される。低温での安定した動作と温度依存性測定を可能にするために、装置の冷却機構を大幅に改良し、寒剤 (ヘリウム 4) の持続時間を向上させた。この装置では、STM/STS や温度可変マイクロ 4 端子電気伝導測定に加え、「多探針 STM」の利を活かして、輸送現象の本質的な特性を表す遅延グリーン関数の実空間マッピングや、磁性探針を用いた表面でのスピンホール効果検出などが可能である。来年度は実際に、上記の表面超構造や量子薄膜のほかナノワイヤ等の電気伝導度測定を μm から nm のオーダーの探針間隔で 4 端子測定を行う予定である。

磁気抵抗測定装置の開発

超高真空 ($\leq 1\times10^{-8}$ Pa)、極低温 (液体 He 温度)、強磁場 ($\sim$ 7 T) 環境下で動作するマイクロ 4 端子プローブ法による電気伝導測定装置の開発を行い、実際に 7.6 K，最大 7 T において表面敏感・微小領域の電気伝導測定が可能となった。プローブを駆動させるピエゾ素子の駆動法の制御法を改良することで. プローブの破壊や測定値のばらつきを防ぐことに成功し、装置の稼働率が大幅の向上した。

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われた。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「半導体結晶上の希薄磁性表面状態の形成とスピントロニクスへの応用」（代表 長谷川修司）
・日本学術振興会 日中韓フォーサイト事業「サブ 10 nm ワイヤ；その新しい物理と化学」（日本側代表 長谷川修司）
・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）

＜報文＞

(原著論文)

[1] K. He, T. Hirahara, T. Okuda, S. Hasegawa, A. Kakizaki, and I. Matsuda: *Spin-polarization of quantum well states in Ag films induced by Rashba effect at surface*, Physical Review Letters **101**, 107604 (Sep, 2008).

[2] H. Morikawa, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Absence of Charge-Density Waves on the Dense Pb/Ge(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ Surface*, Physical Review B **77**, 193310 (May 2008).

[3] T. Hirahara, T. Komorida, A. Sato, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, K. He, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Manipulating quantum-well states by surface alloying: Pb on ultrathin Ag films*, Physical Review B **78**, 035408 (Jul 2008).

[4] C. Liu, I. Matsuda, S. Yoshimoto, T. Kanagawa, and S. Hasegawa: *Electronic Transport of Au-Adsorbed Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Ag Surface: Metallic Conduction and Localization*, Physical Review B **78**, 035326 (Jul, 2008).

[5] N. Miyata, K. Horikoshi, T. Hirahara, S. Hasegawa, C. M. Wei, and I. Matsuda: *Electron Transport Property of Quantum-Well States in Ultrathin Pb (111) Films*, Physical Review B **78**, 245405 (Dec, 2008).

[6] M. D ̀angelo, K. Takase, T. Hirahara, S. Hasegawa, and I. Matsuda: *Conductivity of the Si(111)*7 × 7 *dangling-bond state*, Physical Review B **79**, 035318 (Jan, 2009).

[7] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *Localization and Hopping Conduction at Glass and Crystal Phases of Monatomic Au Layers on Silicon Surface*, Physical Review B **79**, 085317 (Feb, 2009).

[8] T. Hirahara, K. Miyamoto, A. Kimura, Y. Niinuma, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, T. Nagao, I. Matsuda, S. Qiao, K. Shimada, H. Namatame, M.

Taniguchi, and S. Hasegawa: *Origin of the surface-state band-splitting in ultrathin Bi Flms: From a Rashba effect to a parity effect*, New Journal of Physics **10**, 083038 (Aug, 2008).

[9] Y. Kakefuda, K. Narita, T. Komeda, S. Yoshimoto, and S. Hasegawa: *Self-assembled Nanowire Arrays of Gold Nanoparticles*, Applied Physics Letters **93**, 163103 (Oct, 2008).

[10] C. Liu, I. Matsuda, T. Hirahara, S. Hasegawa, J. Okabayashi, S. Toyoda, and M. Oshima: *Band-bending inhomogeneity of Au adsorbed Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Ag evaluated with Si 2p core-level spectra*, Surface Science **602**, 3316 (Sep, 2008).

(総説)

[11] Y. Nakayama, I. Matsuda, S. Hasegawa, and M. Ichikawa: *Growth, Quantum confinement and Transport mechanisms of Ge nanodot arrays formed on a SiO_2 monolayer* (Review), e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **6**, 191 (Aug, 2008).

[12] T. Hirahara: *Electronic structure of ultrathin bismuth films: The Rashba and quantum-size effects and their interplay*, Journal of Vacuum Society of Japan, 印刷中.

(国内雑誌)

[13] 長谷川修司：半導体結晶表面上の擬１次元金属, 真空 **51** (No. 7), 453 (Jul, 2008).

[14] 保原麗、長谷川修司：４探針ＳＴＭ装置, 応用物理学会薄膜表面物理分科会 News Letter No. 133, pp. 23 (Sep, 2008).

[15] 平原徹、松田巌、山崎詩郎、長谷川修司: 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、印刷中.

(著書)

[16] 長谷川修司: 見えないものをみる－ナノワールドと量子力学－, ＵＴフィジックス・シリーズ, 東京大学出版会 (Oct, 2008).

(その他)

[17] 長谷川修司: *e-Journal* の現状と将来 -表面科学講演大会特別講演より-, 表面科学 **29**, 437 (Jul, 2008).

[18] 長谷川修司: 国際物理オリンピック *2008* ベトナム大会報告, 応用物理 **77** (No. 11), 1364 (Nov 2008)

[19] 長谷川修司: 物理チャレンジ *2008* 全国大会実験コンテスト, 大学の物理教育 **14** (No. 3), 139 (Nov, 2008)

[20] 長谷川修司: 国際物理オリンピック ～世界に羽ばたく物理のハンカチ王子たち～, 教育フォーラム 中学校数学理科保健体育、2008 秋号 p. 22 (大日本図書, Sep, 2008).

(学位論文)

[21] 高瀬恵子: *Interaction between magnetic adatoms and surface two-dimensional electron gas* (博士論文).

[22] 宮田伸弘：磁場中マイクロ 4 端子プローブ法による金属量子薄膜の輸送現象の研究（博士論文）.

[23] 顧艶：*Electronic Structure and Transport of Sn-terminated Silicon Surface*（修士論文）.

[24] 北岡佑介：カーボンナノチューブ探針を用いたナノワイヤの電気伝導測定（修士論文）.

[25] 新沼優人：超高真空低温型表面磁気光学カー効果測定装置の開発とそれによる表面磁性研究（修士論文）.

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[26] T. Hirahara: *The Rashba and quantum size effects in ultrathin Bi films*, Deutsche Physical Gesellschaft Spring Meeting、2009 年 3 月 27 日 (Dresden, Germany).

[27] S. Hasegawa: *The Art and Science of Multi-tip Nanoprobes*, Brookhaven National Laboratory Worshop “ Electrical Nanoprobes ”(2008 NSLS/CFN User's Meeting), 2008 年 5 月 19 日 (Brookhaven National Laboratory, USA).

[28] S. Hasegawa: *Carrier Localization and Transport at Metallic Atomic Wires and Monolayers on Silicon Surfaces*, The 14th International Conference on Solid Films and Surfaces, 2008 年 7 月 1 日 (Trinity College, Dublin, Ireland).

[29] S. Hasegawa: *Kondo effect in transport on Co/Si(111)$\sqrt{7}\times\sqrt{3}$-In surface*, Korean Vacuum Society (The 6th Korea-Japan Symposium on Surface Nanostructures), 2009 年 2 月 11 日 (Hyundai Seongwoo Resort, Korea).

[30] S. Hasegawa: *Electronic Transport on Surfaces and Nanowires Measured by Microscopic Four-Point Probes*, Joint Symposium by Nanyang Technological University and University of Tokyo, 2009 年 2 月 20 日 (Nanyang Tech. Univ., Singapore).

[31] S. Hasegawa: *Transport on Surfaces and Nanowires Measured by Microscopic Four-Point Probes*, 2009 WPI-AIMR Annual Workshop, 2009 年 3 月 4 日 (蔵王, 宮城).

一般講演

[32] K. Takase, T. Shibasaki, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Kondo effect in transport on Co/Si(111)$\sqrt{7}\times\sqrt{3}$-In surface*, Symposium on Surface and Nano Science 2009, 2009 年 1 月 28 日 (雫石).

[33] S. Hasegawa: *Electronic Transport on Surfaces and Nanowires Measured by Microscopic Four-Point Probes*, Annual Meeting of A3 Foresight Program Seminar, 2009 年 2 月 23 日 (Xiamen University, China).

[34] Y. Niinuma, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Gd adsorption on a nearly-free-electron surface superstructure; Structure and magetic properties*, The 16th International colloquium on Scanning Probe Microscopy, 2008 年 12 月 10 日 (熱川).

[35] Y. Gu, T. Hirahara, H. Morikawa, S. Hasegawa: *An insulating ground state of Si(111)*$\sqrt{3} \times \sqrt{3}$*-Sn revealed by micro-four-pointprobe conductivity measurements*, The 4th Vacuum and Surface Sciences Conference of Asia and Australia (VASSCAA-4), 2008 年 10 月 28 日 (松江).

[36] Y. Kitaoka, S. Yoshimoto, T. Hirahara, S. Hasegawa, and T. Ohba: *Nanometer-scale Four-Point Probe Resistance Measurements of Cu Wires Using Carbon Nanotube Tips*, H Advanced Metallization Conference 2008: 18th Asian Session, 2008 年 10 月 9 日 (東京大学、本郷).

- **A3 Foresight Program Spring School on 'Sub-10 nm Wires'**, 2008 年 5 月 28 日（物性研究所, 柏）

[37] Y. Kitaoka: *Four-terminal conductivity measurements of nanometer-scale Cu wires.*

[38] Y. Niinuma: *Gd adsorption on metallic surface superstructures of In/Si(111).*

[39] Y. Gu: *Insulating ground state of Sn/Si(111) observed by conductivity measurements with micro-four-point probes.*

[40] N. Nagamura, T. Shibasakhi, H. Okino, S. Yamazaki, Y. K. Kim, T. Hirahara, I. Matsuda, G. S. Lee, and S. Hasegawa: *Influence of defects on the phase transition of Si(111)*4×1*-In.*

[41] T. Komorida,T. Hirahara, A. Sato, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, K. He, I. Matsuda, T. Nagao, and S. Hasegawa: *Manipulating quantum-well states by surface alloying: Pb on ultrathin Ag films.*

- **The Eighth Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces (RJSSS-8)**, 2008 年 10 月 20-21 日、東北大学

[42] K. Takase, N. Miyata, S. Nishide, H. Narita, M. Ogawa, A. Kakizaki, S. Hasegawa and I. Matsuda: *Conductivity of the Si(111)*7×7 *dangling-bond state.*

[43] N. Nagamura, T. Hirahara, T. Shibasakhi, H. Okino, S. Yamazaki, Y. K. Kim, I. Matsuda, G. S. Lee, and S. Hasegawa: *Influence of defects on the phase transition of Si(111)4×1-In.*

[44] T. Komorida,T. Hirahara, A. Sato, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, K. He, I. Matsuda, T. Nagao, and S. Hasegawa: *Manipulating quantum-well states by surface alloying: Pb on ultrathin Ag films.*

- **International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-5)**, 2008 年 11 月 12 日、早稲田大学

[45] K. Takase, T. Shibasaki, T. Hirahara, S. Hasegawa: *Detection of Kondo effect in Co/Si (111)* $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$*-In Surface by surface-sensitive conductivity measurements.*

[46] N. Miyata, C. M. Wei, K. Horikoshi, T. Hirahara, S. Hasegawa, I. Matsuda: *Electronic Transport of Quantum-Well States in Ultrathin Pb (111) films.*

[47] Y. Gu, T. Hirahara, H. Morikawa, S. Hasegawa: *An insulating ground state of Si(111)*$\sqrt{3} \times \sqrt{3}$*-Sn revealed by micro-four-point probe conductivity measurements.*

[48] N. Nagamura, T. Hirahara, T. Shibasakhi, H. Okino, S. Yamazaki, Y. K. Kim, I. Matsuda, G. S. Lee, and S. Hasegawa: *Influence of defects on the phase transition of Si(111)4×1-In.*

[49] T. Komorida,T. Hirahara, A. Sato, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, K. He, I. Matsuda, T. Nagao, and S. Hasegawa: *Manipulating quantum-well states by surface alloying: Pb on ultrathin Ag films.*

(国内会議)

招待講演

[50] 平原徹: ビスマス超薄膜のスピン偏極表面電子状態、電気伝導特性に関する研究, 日本物理学会第 64 回年次大会　第 3 回領域 9 若手奨励賞受賞記念講演、立教大学 2009 年 3 月 28 日.

[51] 長谷川修司: 多探針ＳＴＭとナノエレクトロニクス, 第 49 回真空に関する連合講演会, 2008 年 10 月 29 日 (松江).

[52] 長谷川修司: 物理チャレンジと国際物理オリンピック—実験教育の視点から—, 応用物理学会 応用物理教育分科会「サイエンス教育サミット」, 2008 年 8 月 23 日 (東京工科大学, 八王子).

一般講演

- **日本物理学会第 64 回年次大会**, 2009 年 3 月 29-30 日 (立教大学)

[53] 北岡佑介、東野剛之、平原徹、長谷川修司： 金属被覆 CNT 探針を用いた $FeSi_2$ ナノワイヤーの四端子電気伝導測定.

[54] 東野剛之, 北岡佑介, 吉本真也, 平原徹, 大場隆之, 長谷川修司: 金属被覆 CNT 探針を用いたダマシン銅ワイヤのナノメーター電気伝導測定.

[55] 小森田拓, 平原徹, Yan Gu, 長谷川修司: ナトリウムを吸着した Si(111)$\sqrt{3} \times \sqrt{3}$-Sn 表面の研究.

[56] 新沼優人、平原徹、長谷川修司：SMOKE 装置の開発と Gd/In/Si(111) 金属表面の磁性研究.

- **日本物理学会 2008 秋季大会**, 2008 年 9 月 22 日 (岩手大学)

[57] Yan Gu, 平原徹, 長谷川修司: 表面状態電気伝導測定による Sn/Si(111) の基底状態の研究.

[58] 平原徹, 新沼優人, 長谷川修司: 超高真空低温型表面磁気光学カー効果測定装置の開発.

[59] 高瀬恵子, 平原徹, 長谷川修司： 磁性体吸着した金属表面 Si(111)-$\sqrt{7} \times \sqrt{3}$-In の電気伝導.

[60] 宮田伸弘, 魏金明, 平原徹, 長谷川修司, 松田巌：Pb 超薄膜電気伝導度の bilayer 振動－バンド構造からの考察－.

[61] 永村直佳, 芝崎剛豪, 沖野泰之, 山崎詩郎, Y. K. Kim, 平原徹, 松田巌, G. S. Lee, 長谷川修司: Si(111)4×1-In 表面の相転移と欠陥の効果 II.

- **日本表面科学会学術講演会**, 2008 年 11 月 14 日 (早稲田大学)

[62] 平原 徹, 宮本 幸治, 木村 昭夫, 新沼 優人, Bihlmayer Gustav, Chulkov E V, 長尾 忠昭, 松田 巌, Qiao S, 島田 賢也, 生天目 博文, 谷口 雅樹, 長谷川 修司: *Bi* 超薄膜におけるスピン軌道相互作用と表面状態.

[63] 高瀬 恵子, 芝崎 剛豪, 平原 徹, 長谷川 修司: 不純物を導入した金属表面 Si(111)$\sqrt{7} \times \sqrt{3}$-In の電気伝導度測定.

[64] 小森田拓, 平原徹, 佐藤礼奈, Bihlmayer Gustav, Chulkov E V, He Ke, 松田巌, 長谷川修司: 表面合金化による量子井戸状態の制御：Pb/Ag 超薄膜.

(講義等)

[65] 長谷川修司: 半導体表面ーナノサイエンス・ナノテクノロジーの舞台ー, 東京理科大学理工学部物理学科特別講義, 2009 年 1 月 15 日、東京理科大学（野田）.

[66] 長谷川修司： 兵庫県立大学理学部集中講義「表面科学」2008 年 8 月 20-22 日.

[67] 長谷川修司、平原徹、小森田拓 (TA)、東野剛之 (TA)：物理学実験 I （3 年生）真空技術、 2008 年度夏学期（本郷）.

[68] 長谷川修司：現代物理実験学 I (学部 3 年生講義) 2008 年度夏学期（本郷）.

[69] 長谷川修司：固体物理学 I（学部 4 年生講義） 2008 年度夏学期（本郷）.

[70] 長谷川修司：物理学ゼミナール (学部 3 年生) 2008 年度冬学期（本郷）.

4.4 福山研究室

低温極限で現れる超流動、超伝導、強相関効果、磁気フラストレーション、量子ホール効果など、様々な量子多体現象や相転移現象を実験的に研究している。特にこれらの現象に対する空間次元の効果に着目し、新しい物理概念の発見とその機構解明を目指している。対象となる実験系は、代表的な量子液体・固体である液体および固体ヘリウム、低次元導体、異方的超伝導体などである。

我々の用いる実験手法は多岐に渡るが、その中でも独自に開発した次の二つの装置を主力としている。一つは 50 μK に至る超低温で比熱および核磁気共鳴 (NMR) 測定を行うことができる核断熱消磁冷凍機であり、もう一つは 30 mK に至る超低温、6 T までの高磁場、10^{-8} Pa 以下の超高真空という多重極限環境下で作動する超低温走査トンネル顕微/分光装置 (ULT-STM) である。

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 ^{3}He 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、^{3}He 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い範囲で自在にコントロールできる点である。我々は、予め核スピンをもたない ^{4}He を吸着第 1 層として吸着させることでグラファイト基板の乱雑さをできるだけ小さくしておき、吸着第 2 層目以上に現れる 2 次元 ^{3}He の多彩な量子物性を広い温度および密度範囲で研究している。

密度が 1 層目の 4/7($\rho_{4/7} = 6.80$ nm^{-2}) のとき、2 層目 ^{3}He は 1 層目に対して整合な三角格子を組んで量子局在することが知られている (4/7 相)。我々の過去の研究から、この 4/7 相の磁性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と信じられている。最近我々は、4/7 相より最大 20 %までの低密度域で、粒子密度を減少させるにつれて増大する熱容量異常を見出し、これが零点空格子点 (ZPV) 相の存在で説明できるとの仮説を提唱した。ZPV 相は、絶対零度でも結晶としての周期性と量子流体としての流動性を併せ持つ新奇な量子相である。今年度はスピン-スピン緩和時間 (T_2) の測定を通じて、その仮説の検証実験を続けた。一方、4/7 相より高密度域には 1 層目に不整合な三角格子構造をもつ強磁性的な固相 (不整合相) が存在することが以前より知られていたが、その間の密度変化の詳細は知られていなかった。我々は $0.3 \leq T \leq 80$ mK の温度域で詳細な熱容量測定を行い、自己束縛した 3 層目のフェルミ液体相や 4/7 相-不整合相の 1 次転移など、さまざまな新しい知見を得ることができた。図 4.4.7 は、こうして完成しつつある、2 次元 ^{3}He の量子相図の全体像である。

自己凝縮した 3 層目フェルミ液体相

(領域 III : $1 \leq n \leq 1.2$)

4/7 相から粒子密度を増してゆくと、20 %増 ($n \equiv \rho/\rho_{4/7} = 1.2$) までは 4/7 相由来の熱容量のダブルピーク構造に大きな変化はなく、縮退したフェルミ流体相特有の温度に比例した熱容量成分が高温域で増加してくる (領域 III : $1 \leq n \leq 1.2$)。つまり、この密度域では、新たに追加された ^{3}He 原子は 2 層目ではなく選択的に 3 層目に吸着され、そこで流体相を形成する。しかし、温度に比例する熱容量の比例係数 (γ) は 2 次元理想フェルミ気体のそれ (γ_0) より

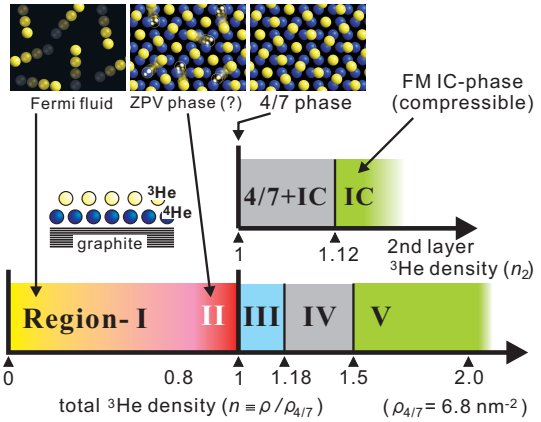

図 4.4.7: グラファイト上に吸着した 2 次元 ^{3}He の量子相図。

小さく、$n = 1.2$ で初めて γ_0 を超え、同時に 4/7 相由来の熱容量のダブルピーク構造が大きく変化し始める (図 4.4.8)。すなわち、領域 III の 3 層目 ^{3}He は自己凝縮して固有の密度 ($\rho \approx 1.2$ nm^{-2}) をもつ 2 次元フェルミ液体 (パドル) を形成し、粒子を追加してゆくとその面積が増し、最終的に全吸着表面積と等しくなると、それ以降に追加された粒子は 2 層目にも入り込んで、4/7 相の構造変化が始まることを示している。

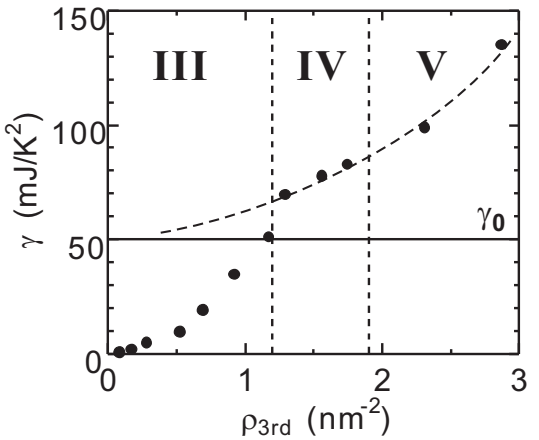

図 4.4.8: グラファイト上の 3 層目に吸着した ^{3}He フェルミ流体が示す温度に比例する熱容量の係数 (γ) の面密度変化。ρ_{3rd} は 3 層目のみの面密度を表す。$\rho_{3rd} \approx 1.2$ の折れ曲がりは、それ以下の密度で自己束縛した 2 次元フェルミ液体 (パドル相) が実現していることを示している。

グラファイト上の 1 層目および 2 層目 ^{3}He は吸着ポテンシャルの閉じ込めが強く、気-液相転移が起こらないことが知られており (臨界点の消失)、純粋な 2 次元 ^{3}He に対する理論計算の結果とも一致している。3 層目 ^{3}He でパドル相が出現した理由は、1、2 層目と違って吸着ポテンシャルの閉じ込めが弱く、面直方向の運動の自由度が無視できなくなって (3 次元性の混入)、気-液相転移が生じものと考えられる。

なお、$1.1 \leq n \leq 1.2$ の範囲では、$T = 4$ mK 付近に強磁性的な小さな熱容量ピークが成長することが観測された。これと後述の領域 V の不整合固相における強磁性ピークとの関係は未解明であり、今後の研究課題である。

2 相共存域

(領域 IV : $1.2 \leq n \leq 1.4$**)**

更に面密度を増すと、$1.2 \leq n \leq 1.4$ の密度範囲 (領域 IV) で、2 層目が 4/7 整合相から共存状態を経て不整合固相に移り変わることが観測された。これは、この領域内の任意の密度および温度での熱容量が、4/7 相と $n = 1.4$ の不整合相の熱容量の線形結合でよく表され、その係数が密度とともに線型に変化することから結論づけられる。従来から 4/7 相から不整合相への変化は 1 次相転移であろうと考えられてきたが、複雑なドメイン壁構造を伴う可能性も指摘されていた。今回の結果は、それが単純な 1 次の構造相転移であることを初めて明瞭に示したものである。

強磁性的な不整合相

(領域 V : $1.4 \leq n \leq 2.1$**)**

$n \geq 1.4$ の密度域 (領域 V) では、2 層目は純粋な不整合固相である。ここでは隣接する 4-6 原子がリング状に位置交換する多体の交換相互作用が競合的に働いていると考えられ、フラストレーションのある強磁性が観測される。具体的には、密度の増加に伴って低温の磁気的熱容量ピークが $T = 3$ mK から 1 mK まで連続的に減少する。それに伴い、熱容量の温度依存性はフラストレーションのない 2 次元ハイゼンベルク強磁性のそれに漸近する。高温から熱容量ピーク程度までの温度依存性を 6 体交換まで考慮したモデルで解析すると、図 4.4.9 の結果を得る。ここで、J は 3 体交換 (J_3) を繰り込んだ 2 体の有効交換相互作用 ($J = J_2 - 2J_3$) である。密度の増加に伴い、各種の交換相互作用の絶対値は全体的に小さくなるが (剛体球斥力の効果)、相対的に 3 体交換が支配的になってゆくことが分かる。

零点空格子点 (ZPV) 相

(領域 II : $0.8 \leq n \leq 1$**)**

ZPV 相と考えられる密度域 (領域 II : $0.8 \leq n \leq 1$) でパルス NMR のスピンエコー実験を行い、従来より長い時間範囲までエコー信号の減衰曲線を測定し

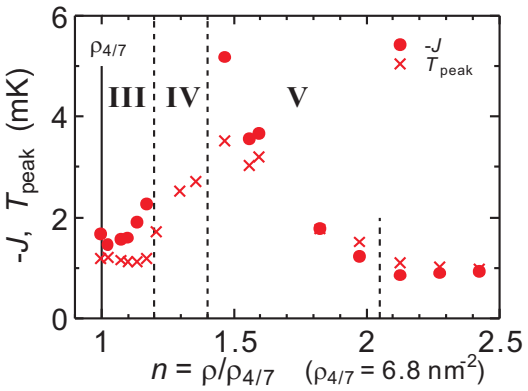

図 4.4.9: 2 体の有効交換相互作用 J (•) および熱容量のピーク温度 $T_{\rm peak}$ (×) の面密度依存性。

た。図 4.4.10 に示すように、エコー信号の減衰曲線は単一の指数関数で表すことができず、T_2 の長い成分 (long 成分) が存在することが分かった。$T = 20$ mK と 100 mK でほとんど同じ振る舞いをするという実験事実は、4/7 相と低密度のフェルミ流体相がマクロなサイズに相分離しているモデルでは説明できない。一方、2 次元系の NMR には、T_2 が静磁場と 2 次元面のなす角に依存するという特殊性がある。このことを考慮すると、観測された long 成分はグラファイト基板のモザイク角分布でおよそ説明されることが分かった。また、連続波 (cw)NMR のスペクトルの周波数シフトは基板のモザイク角分布 (θ) に敏感なので、実際に過去の cw-NMR データを解析することで、θ を良い精度で決定することができた。得られた値はガウス分布を仮定した場合 $\theta = 27.5 \pm 0.5°$ である。

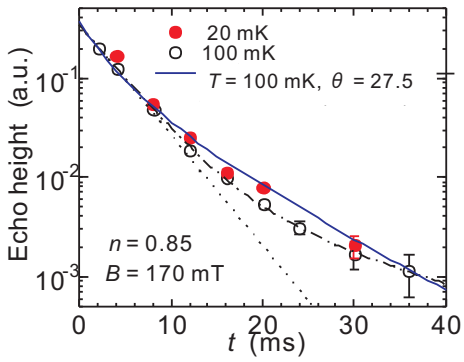

図 4.4.10: パルス NMR で測定された $n = 0.85$ の 2 次元 ^{3}He 試料のエコー信号の減衰。実線は 27.5° のモザイク角分布を仮定した場合の計算値。

無冷媒希釈冷凍機の立ち上げ

2 次元 ^{3}He の重要な研究課題として、比較的高温域の $T \approx 1$ K にあるとされる 4/7 相の整合-不整合転移の相転移のユニバーサリティクラスを精密な熱容量測定から決定することや、その吸着構造を粒子線の散乱実験で明らかにすることがある。また、これまでに見出された種々の新しい量子相の性質が、吸着基板の不完全さでどの程度影響されるかを実験的に調べることも重要である。

今年度は、これらの実験を行うための新しい希釈冷凍機を設置し、立ち上げ作業を開始した。この希釈冷凍機は、パルス管冷凍機を使った液体ヘリウム寒剤を必要としない新しいタイプのもので、最低到達温度は 12 mK、$T = 100$ mK での冷却能力は 200 μW である。従来のグラファイト基板よりも単結晶子サイズが 1 桁大きな吸着基板を用いた熱容量測定や、極低温下 ($T \leq 0.5$ K) での低速電子線回折 (LEED) 測定のための実験装置の開発と製作が進んでいる。

4.4.2 グラフェンの電子物性

炭素の単原子層シートであるグラフェンは、ハニカム格子構造に由来してフェルミエネルギーで線型に交わる特異な分散関係をもち、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る舞うことが知られている。この物質は、このユニークな電子状態のために特異な輸送現象や半整数の量子ホール効果を示すだけでなく、大きな電界効果を示す機能性の高い 2 次元電子/正孔系でもある。その構造は安定で化学的に不活性なので、原子レベルで清浄な表面を比較的容易に得ることができるはずで、表面走査プローブ実験との親和性は基本的に高いと考えられる。

グラファイトはグラフェンがベルナル積層 (ABAB 積層) した層状物質である。これまで我々は、ULT-STM 装置を使って、グラファイト表面の擬 2 次元電子系が極低温・高磁場下で示すランダウ量子化や不純物局在、さらにはグラファイト端状態の走査トンネル分光測定という、先駆的な研究を行ってきた。昨年度は、これらの研究を真性 2 次元電子系であるグラフェンに拡張するための実験準備を鋭意進めた。グラフェンの作成方法は複数あるが、我々は、次の二つのアプローチを同時並行で進めている。すなわち、母物質であるグラファイトを SiO_2 上に劈開する方法 (劈開グラフェン) と、SiC 基板を加熱処理することでその表面に結晶成長させる方法 (エピタキシャルグラフェン) である。

劈開グラフェンの STM 観測

劈開グラフェン試料の大きさは高々数 10 μm 四方であり、絶縁体 SiO_2 基板上に作成される。したがって、走査範囲が 1 μm 四方と小さく、絶縁体表面では走査できない STM 実験の場合には、特別な工夫が必要である。極低温・高磁場中の STM 装置の場

合、微小試料の位置を他の顕微鏡で目視しながら探針をアプローチすることができないので、その困難はより大きい。

そこで我々は、図 4.4.11(a) に示したような微細構造を金蒸着膜で表面に作成し、STM 探針をグラフェン試料上に誘導する工夫を施し、これに成功した。ここでは、グラフェン以外の全表面に金薄膜をまず蒸着し、その上に電子線微細加工の手法で金の蜘蛛の巣構造を作成した。図中中心付近の四角い部分が、グラフェン試料が露出している部分である。図 4.4.11(b) は、こうして室温大気中で得られたグラフェン表面の STM 原子像である。画像上部ではグラフェン特有のハニカム構造が見られるが、下部では周辺、下地あるいは表面の汚染の影響で三角格子構造が観測されている。しかし、この方法で原子分解能を得るのは容易ではなく、その原因は、微細加工のプロセスによって試料表面が原子レベルで汚染されてしまうことにあると思われる。現在、適切な表面洗浄の方法を試行錯誤している。

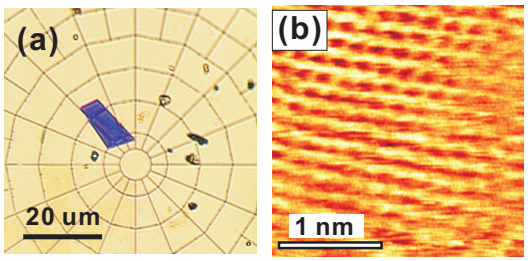

図 4.4.11: 周辺に金着膜で蜘蛛の巣構造を微細加工した劈開グラフェン試料の光学顕微鏡写真 (a) と、この試料の STM 原子像 (b)。

エピタキシャルグラフェンの作成と LEED および STM 観測

この試料の場合、劈開試料と異なり、SiC 基板表面の広い領域に渡ってグラフェンがエピタキシャル成長することが期待される。そのため、STM 実験にはより適した作成法といえる。ただし、量子ホール効果が未だどのグループからも報告されていないように、基板との相互作用がより大きいことには注意を要する。

我々はまず、6H-SiC 基板の Si-*rich* 面を加熱処理する作成法を試み、多層グラフェンの作成に成功した。図 4.4.12(a) はその LEED パターンである。SiC の回折スポット (図中実線の四角内) に加えて、多層グラフェンの回折スポット (図中破線の四角内) が観測されている。図 4.4.12(b)-(d) はこの試料の $T = 79$ K での STM 像である。(b) 図に見られるように、基板のステップをまたぐようにして $6\sqrt{3} \times 6\sqrt{3}$ 超格子構造が成長しており (この超格子は SiC 基板の影響による)、部分的ではあるが数原子層の多層グラフェンが形成されていることが分かる。現在、より広い領域に渡る試料成長を目指して、熱処理方法の最適化を図っているところである。

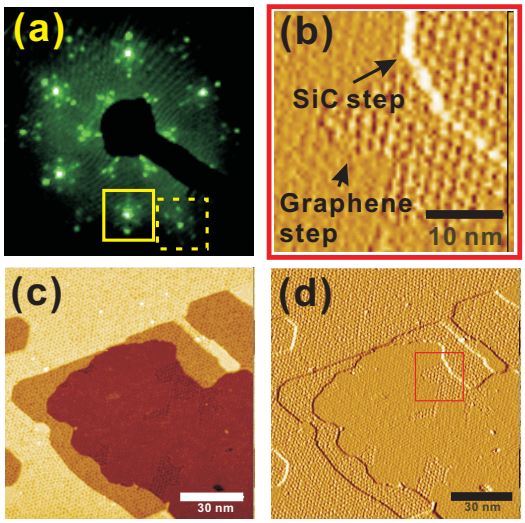

図 4.4.12: 6H-SiC の Si-*rich* 面に作成した多層グラフェンの LEED スポット (a)、$T = 79$ K での STM 像 (c) とその微分像 (d)。(b) は図 (d) 中の四角のエリアの拡大像。(a) 中の実線の枠は SiC のスポット、破線の枠は多層グラフェンのスポットに対応している。(b)-(d) のスケールバーはそれぞれ (b) 10 nm, (c)(d) 30 nm である。

4.4.3 超薄膜超伝導体の物性研究

前節の劈開グラフェン同様、層状超伝導物質を劈開することで、単原子層に迫る超薄膜の超伝導試料を作成できる可能性がある。その場合、超伝導転移は 2 次元系特有の Kosterlitz-Thouless 転移となることが期待され、伝導及び走査トンネル分光測定を通じて、このトポロジカル相転移の本質に迫る実験ができる可能性がある。また、通常の薄膜試料より欠陥の少ない、より理想的な 2 次元導体試料を得ることができると期待されるので、常伝導状態の性質も興味深い。今年度はまず、層状超伝導体 $NbSe_2$ を試料として、表面微細加工による微小電極作成法や低温での微小抵抗の精密測定系の整備を行った。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Hiroshi Fukuyama: Nuclear Magnetism in Two-Dimensional Solid Helium Three on Graphite, Journal of the Physical Society of Japan **77**, 111013 (2008).

[2] Naoki F Kawai, Hiroshi Fukuyama: Anisotropic superconductivity in graphite intercalation compound YbC6, Physica C **468**, 2403 (2008).

[3] Yasuhiro Niimi, Hiroshi Kambara, and Hiroshi Fukuyama: Localized Distributions of Quasi-Two-Dimensional Electronic States near Defects Artificially Created at Graphite Surfaces in Magnetic Fields, Physical Review Letters **102**, 026803 (2009).

[4] Giuseppe Maruccio, Christian Meyer, Tomohiro Matsui, Dmitri V. Talapin, Stephen G. Hickey, Horst Weller, and Roland Wiesendanger: Wavefunction Mapping of Immobilized InP Semiconductor Nanocrystals, Small **5**, 808 (2009).

[5] Yoshiyuki Shibayama, Hiroshi Fukuyama, and Keiya Shirahama: Torsional oscillator studies for possible supersolidity in two-dimensional ^{4}He solid, J. Phys: Conf. Series **150**, 032096 (2009).

[6] Shintaro Takayoshi, Kazuyoshi Obata, Daisuke Sato, Tomohiro Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Spin-Echo Measurements for an Anomalous Quantum Phase of 2D Helium-3, J. Phys: Conf. Series **150**, 032104 (2009).

[7] Shintaro Takayoshi, Wataru Kokuyama, and Hiroshi Fukuyama: The boiling suppression of liquid nitrogen, Cryogenics **49**, 221 (2009).

(総説, 解説, その他)

[8] Hiroshi Fukuyama: A New Quantum Fluid of Helium Three in Two Dimensions, JPSJ Online—News and Comments [March 16, 2009].

(学位論文)

[9] 小畑 和幸：無冷媒希釈冷凍機を用いた ZYX グラファイト基板上 2 次元ヘリウム 3 の熱容量測定装置の開発（修士論文）.

[10] 佐藤 大輔：グラファイト上第 2 層ヘリウム 3 の量子相の密度変化（修士論文）.

[11] 高吉 慎太郎：2 次元ヘリウム 3 の 4/7 局在相近傍における NMR 横緩和時間測定（修士論文）.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[12] T. Matsui, H. Kojima, N. Kawai, K. Kawabata, M. Yamamoto, R. Deacon, S. Tarucha, H. Fukuyama: STM/STS Observations of Graphene in Magnetic Fields, International Conference on Nanoscience + Technology (ICN+T 2008), (Keystone, Colorado, USA, July 20-25, 2008).

[13] T. Matsui, H. Kojima, N. Kawai, K. Kawabata, M. Yamamoto, R. Deacon, S. Tarucha, H. Fukuyama: Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy Observations of Graphene, 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25), (Amsterdam, Netherlands, August 6-13, 2008).

[14] K. Obata, D. Tsuji, S. Takayoshi, D. Sato, T. Matsui, H. Fukuyama: Density Variation of the Frustrated Magnetism in 2D Solid ^{3}He, 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25), (Amsterdam, Netherlands, August 6-13, 2008).

[15] S. Takayoshi, K. Obata, D. Sato, T. Matsui, H. Fukuyama: Spin-Echo Measurements for an Anomalous Quantum Phase of 2D Helium-3, 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25), (Amsterdam, Netherlands, August 6-13, 2008).

[16] Y. Shibayama, H. Fukuyama, K. Shirahama: Torsional Oscillator Studies for Possible Supersolidity in Two-Dimensional ^{4}He Solid, 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25), (Amsterdam, Netherlands, August 6-13, 2008).

[17] Y. Shibayama, H. Fukuyama, K. Shirahama: Torsional Oscillator Studies for Possible Supersolidity in Two-Dimensional Solid ^{4}He on a Graphite Basal Plane, 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25), (Amsterdam, Netherlands, August 6-13, 2008).

[18] Y. Shibayama, H. Fukuyama, K. Shirahama: Torsional Oscillator Experiments for Possible Supersolidity in Two-Dimensional Solid ^{4}He adsorbed on Graphite, Frontiers of Low Temperature Physics (ULT2008), (London, UK, August 14-17, 2008).

招待講演

[19] H. Fukuyama: STM/STS Studies of Low Dimensional Conductors at mK Temperatures in High Magnetic Fields, International Conference on Nanoscience + Technology (ICN+T 2008), (Keystone, Colorado, USA, July 20-25, 2008).

[20] H. Fukuyama: Frustrated magnetism and strong correlation effects in 2D He-3, Strong Correlation in Materials and Atom Traps, (Trieste, Italy, August 4-15, 2008).

[21] H. Fukuyama: ^{3}He in Two Dimensions – A strongly correlated Fermion system –, Frontiers of Low Temperature Physics (ULT2008), (London, UK, August 14-17, 2008).

[22] H. Fukuyama: Novel Correlation and Frustration Effects in Helium Three of Two Dimensions, International Workshop on Quantum Critical Phenomena and Novel Phases in Superclean Materials (PSM2009ws), (Honolulu, Hawaii, USA, January 10-13, 2009).

[23] H. Fukuyama: Landau Levels in Graphene Studied by Scanning Tunneling Spectroscopy, Okazaki Conference 2009 -Fron Aromatic Molecules to Graphene: Chemistry, Physics and Device Applications-, (Okazaki Institute of Natural Science, Okazaki, Japan, February 21-23, 2009).

(国内会議)

一般講演

[24] 高吉 慎太郎、小畑 和幸、佐藤 大輔、松井 朋裕、福山 寛：NMR measurements of Transverse relaxation time for the Anomalous Quantum Phase in 2D Helium-3、特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A01&A05 班合同研究会（小柴ホール、2008 年 5 月）.

[25] 小畑 和幸、高吉 慎太郎、佐藤 大輔、松井 朋裕、福山 寛：Ferromagnetism in High-Density 2D Solid 3He、特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A01&A05 班合同研究会（小柴ホール、2008 年 5 月）.

[26] 佐藤 大輔、高吉 慎太郎、小畑 和幸、中村 祥子、松井 朋裕、福山 寛：パルス NMR 法による 2 次元ヘリウム 3 の横緩和時間の測定、日本物理学会　2008 年秋季大会（岩手大学上田キャンパス、2008 年 9 月）.

[27] 佐藤 大輔、高吉 慎太郎、小畑 和幸、松井 朋裕、福山 寛：Phase Diagram and Magnetism in 2D Helium 3、特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」研究成果報告会 2008 年（奈良県新公会堂、2008 年 12 月）.

[28] 中村 祥子、小畑 和幸、松井 朋裕、福山 寛：Development of a Heat-Capacity Measurement System for 2D ^{3}He based on a Cryogen-Free Dilution Refrigerator、特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」研究成果報告会 2008 年（奈良県新公会堂、2008 年 12 月）.

[29] 河合 直樹、松井 朋裕、福山 寛：SiC エピタキシャル・グラフェンの STM 観測、日本物理学会　第 64 回年次大会（立教大学、立教池袋中学・高校、2009 年 3 月）.

[30] 佐藤 大輔、高吉 慎太郎、小畑 和幸、福山 寛：グラファイト上 2 次元固体ヘリウム 3 の相図 II、日本物理学会　第 64 回年次大会（立教大学、立教池袋中学・高校、2009 年 3 月）.

[31] 高吉 慎太郎、小畑 和幸、佐藤 大輔、松井 朋裕、福山 寛：2 次元ヘリウム 3 の新奇量子相におけるスピンエコー測定 II、日本物理学会　第 64 回年次大会（立教大学、立教池袋中学・高校、2009 年 3 月）.

[32] 柴山 義行、福山 寛、白浜 圭也：グラファイト上に形成された 2 次元 ^{4}He 系の非古典的回転慣性、日本物理学会　第 64 回年次大会（立教大学、立教池袋中学・高校、2009 年 3 月）.

招待講演

[33] 福山 寛：Hole and Particle doping into 2D ^{3}He、特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A01&A05 班合同研究会（小柴ホール、2008 年 5 月）.

[34] 松井 朋裕：グラフェンのランダウ準位観測、日本物理学会　2008 年秋季大会（岩手大学上田キャンパス、2008 年 9 月）.

[35] 福山 寛：Recent Progress of Experimental Studies on Two Dimensional Helium Three、特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」研究成果報告会 2008 年（奈良県新公会堂、2008 年 12 月）.

[36] 福山 寛：2 次元ヘリウム 3 のスピン液体相とフラストレート磁性、第 3 回トロピカルミーティング「フラストレーションとスピン液体」（神戸大学百年記念会館六甲ホール、2008 年 12 月）.

[37] 松井 朋裕：グラファイト系物質における磁場中 2 次元電子系の STM/STS 観測、カーボンナノチューブとグラフェンの物性評価とエレクトロニクス応用（東京大学、2008 年 12 月）.

[38] 福山 寛：グラフェンの低温物性、ナノプローブテクノロジー第 167 委員会第 53 回研究会「最新 CMOS 半導体評価技術と BEYOND-CMOS の有力素子：グラフェン」（キャンパスプラザ京都、2009 年 1 月）.

(集中講義、セミナー)

[39] 福山 寛：集中講義「低温物理学入門」（千葉大学理学部物理学科、千葉、2008 年 9 月 24-26 日）.

[40] 福山 寛：セミナー「フラストレーションのある 2 次元強相関フェルミオン系 — 単原子層ヘリウム 3 の低温物性」（千葉大学大学院理学研究科、千葉、2008 年 9 月 26 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。^{3}He-^{4}He 希釈冷凍機を用いた 20 mK までの極低温および 15 T までの強磁場環境において、さまざまな独自技術により半導体 2 次元系に新しい自由度を持たせた研究を行っている。

4.5.1 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。

本年度は、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た。特に、ランダウ準位交差に関する実験において重要な成果が得られた。

イジング量子ホール強磁性

強磁場下においては、軌道運動がランダウ準位に束ねられるため、自動的に電子相関が重要になる。我々は、量子ホール強磁性、スピン偏極・非偏極転移、分数量子ホール効果、ウィグナー結晶などに関連した研究を推進している。

磁場中で試料の角度を傾けることにより、サイクロトロンエネルギーとゼーマンエネルギーの比を変えて、軌道量子数 n とスピンの向きが異なる２つのランダウ準位を交差させることができる。それぞれのランダウ準位に擬スピンのアップとダウンを割り当てることにより、磁性の問題として取り扱うことができる。電子間相互作用が軌道量子数に依存するために擬スピン間の相互作用は異方的あり、実スピン系とは大きく異なった多体系となる。我々のグループでは、試料温度を 50 mK 以下の極低温で一定に保ったまま磁場に対する角度をその場制御する技術を有しており、準位交差の実験を系統的に行うことが可能である。

通常の２次元電子系の整数量子ホール領域ではイジングライクな強磁性となると考えられている。高移動度 Si/SiGe ヘテロ構造中の２次元電子系に対して、ランダウ準位充填率 $\nu = 4$ において $(n = 1, \uparrow)$ と $(n = 0, \downarrow)$ の準位交差を行ったところ、非常に大きな抵抗ピークが観測された。抵抗ピークの大きさは面内磁場の向きに強く依存し、100 mK 程度の極低温では強いヒステリシスを示す。これらの実験結果から、我々は、準位交差の過程で擬スピンの強磁性ドメイン構造が形成されていると考えている。異方性の起源については明らかではないが、実験結果は、面内磁場に直交する方向に伸びたストライプ状のドメイン構造を示唆している。抵抗ピークは 0.3 K を越えたあたりから急速に減少するが、強磁性ドメイン構造の崩壊によるものと考えられる。それとともにダブルピーク構造が現われるが、常時性領域における擬スピンの揺らぎを反映していると考えている。

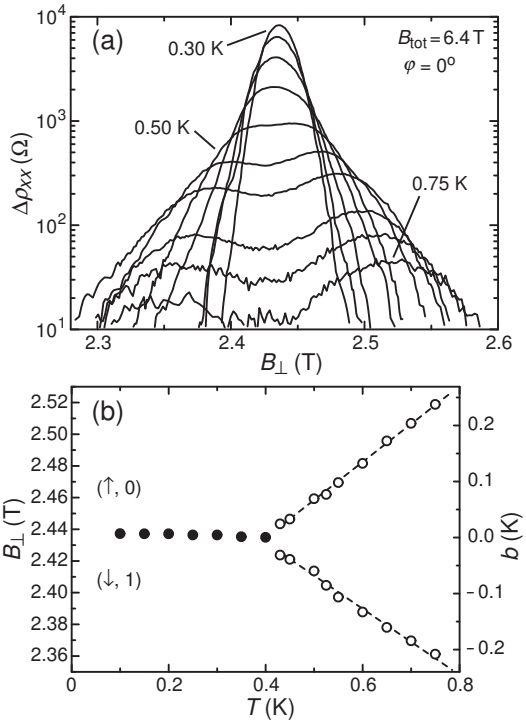

図 4.5.13: (a) 準位交差に伴う異常抵抗の温度依存性。(b) ピーク位置をプロット。右の軸は擬スピンの有効磁場。黒丸はシングルピーク、白丸はダブルピークの位置を表す。実験結果よりキュリー温度は 0.4 K 程度と見積もられる。

擬スピン偏極・非偏極転移

ν が整数からずれた遷移領域においては擬スピン強磁性状態は安定とは限らず、新しいタイプの基底状態が期待できる。ランダウ準位充填率を系統的に変えて準位交差の実験を行ったところ、遷移領域では縦抵抗の急峻なディップ構造が観測された。同時に観測されたホール抵抗の異常や、他の充填率での実験結果とあわせた考察から、電子（あるいはランダウ準位中の正孔）の局在化が起こっていると結論した。ディップの幅の充填率依存性やヒステリシスの観測などから、局在領域において擬スピンが非偏極状態にあることは、ほぼ間違いないと思われる。少数系に対する厳密対角化計算を行ったところ、少なくとも $\nu^* = \nu - 3 < 0.3$ においては、擬スピン非偏極状態が基底状態であることが示された。$n = 0$ と $n = 4(\text{or } 5)$ に対する明楽らの計算からの類推から、n の異なる電子がそれぞれ正方格子状の副格子を形成する電子結晶が実現された可能性が示唆される。

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の理想的な系としても盛んに研究が行われている。我々のグループでは磁気抵抗効果の角度依存性からスピン自由度の重要性を明らかにする研究を先駆的に行ってきた。

我々は、金属的温度依存性の機構を明らかにするために、サイクロトロン共鳴の測定に着手した。線幅から求まる緩和時間 τ_c を電気抵抗から求まる緩和時間 τ_t と比較し、これまで提唱されてきたモデルの妥当性を検証することを目的としている。昨年度までは、２次元電子自身をボロメーターとして利用する抵抗検出型のサイクロトロン共鳴の測定を行ってきたが、Shubnikov-de Haas 振動が顕著になる 1 K 以下の領域での解析が複雑になる欠点があった。そこで、本年度、透過型のサイクロトロン共鳴測定を行うため、高感度ボロメータをはじめとする実験技術の開発を行い、予備的実験を行った。

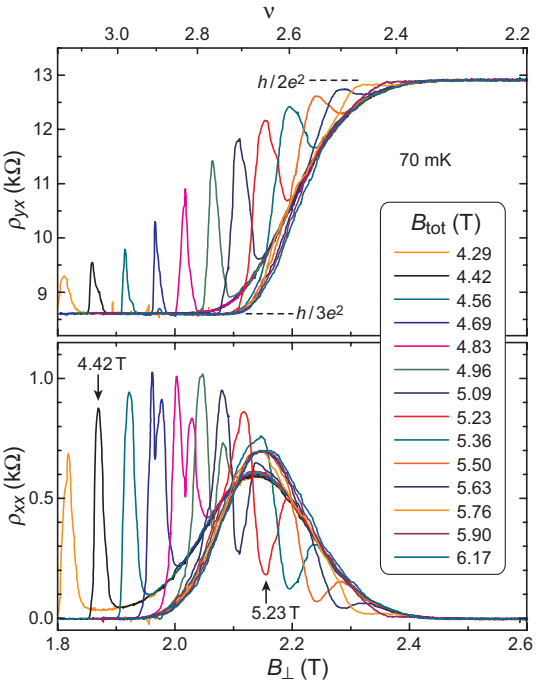

図 4.5.14: 様々なトータル磁場に対して、試料回転によりランダウ準位交差の実験を行った結果。量子ホール領域（∼ 2.0 T）ではピーク構造が見られるのに対して、遷移領域（∼ 2.3 T）ではディップ構造に観測された。

4.5.2 劈開表面に形成された２次元電子系

量子ホール効果などの２次元系における重要な輸送現象は、これまですべてデバイス中に閉じ込められた界面２次元系に対して行われてきた。一方、InAs や InSb の清浄表面に金属原子などを堆積させることにより表面にキャリアが誘起されることが光電子分光や STS などの測定からわかっていたが、面内伝導の測定は電極技術の困難などから行われていなかった。表面に形成された２次元電子系は、表面に堆積させる物質の自由度や走査型プローブ顕微鏡との相性の良さなどから非常に大きな可能性を持つ。近年、我々のグループにおいて、ｐ型 InAs および InSb を超高真空中で劈開して得られた清浄表面に金属を付着させて誘起した２次元電子系に対する面内電気伝導の測定手法が確立され、Ag などを蒸着して得られた劈開表面では整数量子ホール効果が観測されている。本年度は、磁性体や有機物質を吸着物質とした表面２次元電子系に対して新現象の探索を行った。

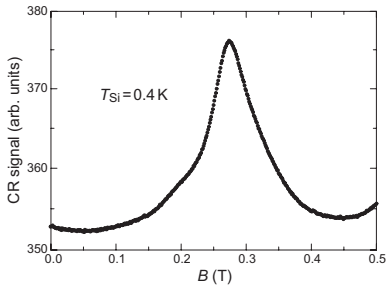

図 4.5.15: 透過型のサイクロトロン共鳴の予備実験。シリコン２次元系の電子温度上昇が無視できる微弱なミリ波に対して共鳴信号を検出した。

InAs 劈開表面に吸着した Fe 原子層における２次元スピングラス的ふるまい

スピングラスに関して多くの計算が行われているが、２次元における有限温度でのスピングラス秩序の有無については決着がついていない。１原子層以下の磁性体の超薄膜は２次元スピングラスの舞台の有力な候補である。昨年度、Fe を吸着させた系において２次元電子の磁気抵抗曲線における明瞭なヒステリシスが望月らにより観測された。１原子層以下の吸着薄膜の磁気的状態を２次元電子系の電気伝導を通じて観測した初めての研究成果である。ヒステリシスは、0.3〜0.4 原子層でのみ観測され、１０Ｋ程度の温度で消失する。本年度は、（１）残留磁気抵抗効果の履歴による違い、（２）磁場掃引後に見られる長時間緩和の対数的依存性、（３）残留磁気抵抗効果の温度依存性、について系統的に調べた。実験結果は、Fe 超薄膜においてスピングラスが形成されていることを強く示唆する。図は、ゼロ磁場で冷却後に磁場の上げ下げを行った場合 [(b), solid symbols] の結果と、磁場中で冷却後に消磁した場合 [(c), open symbols] の結果である。磁場中で冷却した場合の方が、残留磁気抵抗効果の絶対値が大きいことがわかる。これはバルク（３次元）のスピングラスの残留磁化測定で見られる振る舞いとよく似ている。また、磁場印加・冷却方法の違いの他に、磁場方位による違いも観測された。Ising 的な異方性の存在が示唆される。

InAs 劈開表面における有機物質蒸着と超伝導の探索

２次元系における非フォノン機構の超伝導の探索のため山本が中心となり予備的な実験を行った。まず、ペンタセンを InAs 表面に蒸着することにより２次元電子系を誘起することを試みたが、予想とは異なり反転層は形成されなかった。そこで、さらにペンタセン膜の上から Cs を蒸着したところ、伝導率は低いものの、２次元電子を形成することができた。また、１Ｋ以下まで測定領域を拡張するため劈開・蒸着機構を組み込んだ ^{3}He 冷凍機の製作を行い、超

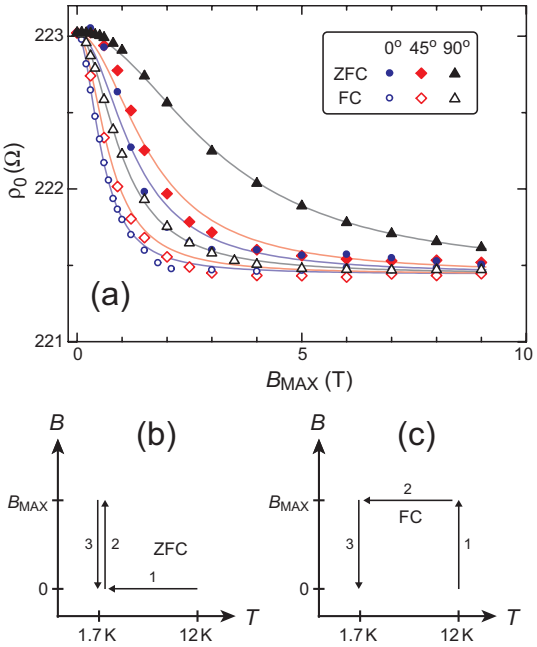

図 4.5.16: (a)Fe を堆積させた InAs 劈開表面において観測された残留磁気抵抗。磁場印加の履歴によるゼロ磁場、1.7 K における抵抗値の変化を (b) および (c) のプロセスに対して、最大印加磁場の関数としてプロットしている。

高真空中におかれた試料が 0.5 K 以下まで冷却されたことを確認した。

＜報文＞

(原著論文)

[1] M. Minowa, R. Masutomi, T. Mochizuki, and T. Okamoto: Alkali-metal-induced Fermi-level and two-dimensional electrons at cleaved InAs(110) surfaces, Physical Review B **77**, 233301 (2008).

[2] K. Toyama, T. Nishioka, K. Sawano, Y. Shiraki, and T. Okamoto: Electric Transport Properties of the Ising Quantum Hall Ferromagnet in a Si Quantum Well, Physical Review Letters **101**, 016805 (2008).

[3] T. Mochizuki, R. Masutomi, and T. Okamoto: Evidence for Two-Dimensional Spin-Glass Ordering in Submonolayer Fe Films on Cleaved InAs Surfaces, Physical Review Letters **101**, 267204 (2008).

(会議抄録)

[4] R. Masutomi, M. Minowa, T. Mochizuki, and T. Okamoto: Alkali Metal Induced Two Dimensional Electron Systems at Cleaved Surface of InAs, Proceedings of the 29th International Conference on the Physics of Semiconductors (July 27-August 1, 2008, Rio de Janeiro, Brazil), in press.

[5] T. Mochizuki, R. Masutomi, and T. Okamoto: Evidence for spin-glass ordering in submonolayer Fe films on InAs, Proceedings of the 29th International Conference on the Physics of Semiconductors (July 27-August 1, 2008, Rio de Janeiro, Brazil), in press.

(学位論文)

[6] 望月敏光：「InAs 劈開表面に吸着した Fe 原子層における二次元スピングラス的ふるまい」（博士論文）

[7] 関根啓仁：「極低温におけるサイクロトロン共鳴測定技術の開発と Si 二次元電子系に対する測定」（修士論文）

[8] 山本 覚：「InAs 劈開表面における有機物質蒸着と超伝導の探索」（修士論文）

(著書)

[9] Junya Matsunami and Tohru Okamoto: Electrical Detection of Electron-Spin Resonance in Two-Dimensional Systems, in “Electron Spin Resonance and Related Phenomena in Low-Dimensional Structures”, Series: the Topic in Applied Physics, Vol. 115, Ed. Marco Fanciulli, in press.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[10] R. Masutomi, M. Minowa, T. Mochizuki, and T. Okamoto: Alkali Metal Induced Two Dimensional Electron Systems at Cleaved Surface of InAs, The 29th International Conference on the Physics of Semiconductors (Rio de Janeiro, Brazil), July 27-August 1, 2008.

[11] T. Mochizuki, R. Masutomi, and T. Okamoto: Evidence for spin-glass ordering in submonolayer Fe films on InAs, The 29th International Conference on the Physics of Semiconductors (Rio de Janeiro, Brazil), July 27-August 1, 2008.

(国内会議)

一般講演

[12] 岡本徹：強相関シリコン二次元電子系における量子相転移、特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A01 & 05 班合同研究会（東京大学・小柴ホール）2008 年 5 月 9 日-10 日.

[13] 岡本徹，當山清彦，佐々木恒平，枡富龍一，澤野憲太郎，白木靖寛：シリコン 2 次元電子系におけるランダウ準位交差と擬スピン非偏極状態の可能性、日本物理学会 秋季大会（岩手大学）2008 年 9 月 20 日-23 日.

[14] T. Okamoto, K. Toyama, K. Sasaki, R. Masutomi, K. Sawano, and Y. Shiraki: Landau level crossing and pseudospin phase transitions in two dimensional electron systems, 特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」平成 20 年度研究成果報告会（奈良県新公会堂）2008 年 12 月 19 日-21 日.

[15] 望月敏光, 枡富龍一, 岡本徹：表面二次元電子の抵抗測定でみる Fe/InAs(110) 表面上のスピングラス、日本物理学会 第 64 回年次大会（立教大学）2009 年 3 月 27 日-30 日.

4.6 島野研究室

島野研究室では、レーザー分光の手法を用いて、凝縮系における光と物質の相互作用の解明、光励起によって発現する多体の量子現象の探索に取り組んでいる。特に、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調べるために、可視光領域の光学応答に加えて、低エネルギー、テラヘルツ (THz) 周波数帯での電磁応答に着目している。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。理論的には、十分低温では励起子ボースアインシュタイン凝縮相や電子正孔 BCS 相の存在することも予測されている。このような多彩な相を示す半導体高密度電子正孔系の研究の舞台として、間接遷移型半導体に注目した。間接遷移型半導体は光励起キャリアの寿命が比較的長く、相転移ダイナミクスにキャリア寿命の効果がさほど影響しないと考えられる。そこで、典型的な間接遷移型半導体である Si を対象に、高密度光励起下での相転移ダイナミクスとクーロン相関の効果をテラヘルツ時間領域分光法を用いて調べた。Si の励起子は束縛エネルギーが 14 meV であり、さらに Si の電子正孔液滴では表面プラズモン共鳴が 34 meV に現れる。この二つの共鳴を同時に観測するために、光ポンプ広帯域テラヘルツ分光システムを開発した。励起子内部遷移 (1s-2p 遷移) 吸収をプローブとして、光生成した自由な電子正孔対から励起子が形成される過程を 1 ps の時間分解能で調べた。結果の一例を図 4.6.17 に示す。図は (a) 励起子モット転移濃度以下の低密度 (b) モット転移濃度以上の高密度領域での、誘電率実部 ($\Delta\epsilon$)、光学伝導度実部 ($\Delta\sigma$) の時間変化を示している。低密度領域（a) の誘電率スペクトルからは、光励起直後のドルーデ型スペクトルから、約 200 ps 後に励起子共鳴 (11 meV) での分散型スペクトルに移行する様子が明瞭に見える。さらに 600 ps 後には励起子微細構造が観測される。実線はドルーデモデル、ローレンツモデルによるフィッティングである (励起子高リュードベリ系列は無視した)。高密度領域 (b) の光学伝導度スペクトルでは、光励起直後のドルーデ応答から、高エネルギー側に向かって伸びる幅の広い吸収バンドに移行する様子がわかる。この吸収バンドは、電子正孔液滴形成に伴う表面プラズモン共鳴の裾野である。スペクトルの詳細な解析の結果、高密度領域では、空間的に均一な電子正孔プラズマから実空間での凝縮が始まりパーコレーション伝導を経て、より高密度の電子正孔液滴へと変化することが明らかとなった。この凝縮過程は連続的であり、液滴形成は高密度の電子正孔プラズマからのスピノーダル分解によって生じていることがわかった。また、10 ps のスペクトル形状の解析から、平均場近似 (RPA) から予測される絶縁体金属転移（励起子モット転移）濃度の高密度側でも、電子正孔の多体相関が残存している兆候が見られた。

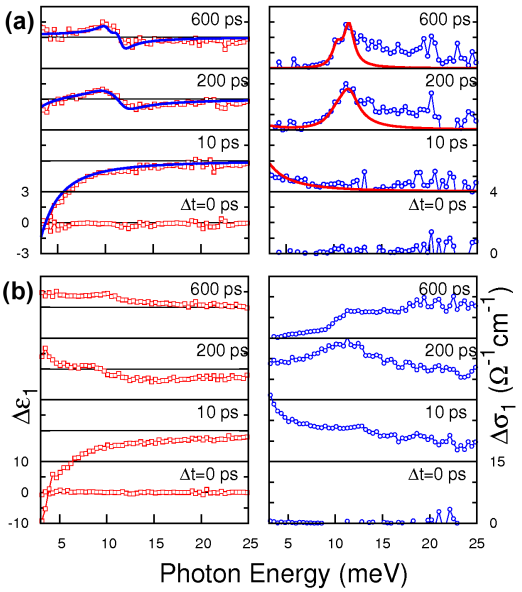

図 4.6.17: (a) 弱励起 10 $\mu J/cm^2$、(b) 強励起 200 $\mu J/cm^2$ 下での差分誘電率スペクトル (左）、差分光学伝導度スペクトル (右）の時間変化。実線はドルーデモデル (10 ps)、ドルーデローレンツモデル (200,600 ps) によるフィッティング

4.6.2 擬 1 次元有機導体

擬一次元有機導体 $(TMTSF)_2PF_6$ は転移温度 T_c = 12 K 以下においてスピン密度波 (SDW) を形成し金属から絶縁体に転移する。この SDW 絶縁相における光誘起絶縁体金属転移のダイナミクス、SDW 秩序の破壊と回復のダイナミクスを調べるために、約 2THz に存在する SDW 相の一粒子ギャップ（SDW ギャップ）の観測を反射型 THz 分光を用いて行った。(試料提供：東京大学鹿児島研究室）さらに光ポンプテラヘルツプローブ分光法を用いて、光パルス励起後の SDW ギャップの消失と回復のダイナミクスをピコ秒からサブナノ秒の時間領域で調べた。SDW 転移温度 (12K) より十分低温 (4 K) では、近赤外光 (1.55 eV, パルス幅 30 fs) を照射すると、光照射直後 3 ps 以内に SDW ギャップが消失し金属相が形成されることを見出した。また光照射後数十 ps～数百 ps 後に

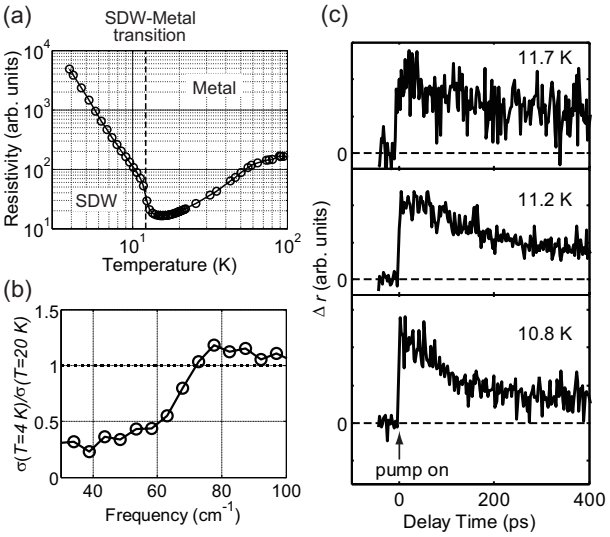

図 4.6.18: (a) 抵抗率の温度依存性。高温の金属相から T_c=12 K 以下でスピン密度波 (SDW) 絶縁相へ転移する。(b)THz 帯電気伝導度スペクトル。転移点以下（4K）のスペクトルを転移点以上 (20K) で規格化してある。SDW 形成に伴いフェルミ面に一粒子ギャップが開く。(c) 光パルス励起後の THz 帯振幅反射率変化とその温度依存性。SDW ギャップの消失と回復のダイナミクスに相当。

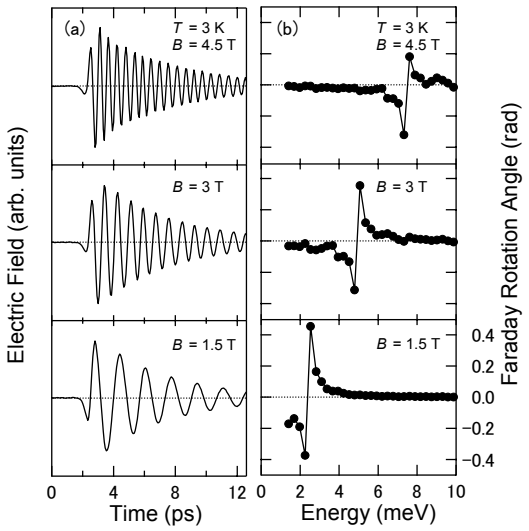

図 4.6.19: GaAs/AlGaAs 2 次元電子系におけるサイクロトロン運動に起因する (a) 実時間 FID 信号と (b) 偏光回転角スペクトル

は反射率が光照射前の値に近づき、徐々に SDW 相が回復する様子が観察できた。

図 4.6.18 に直流抵抗率の温度依存性 (a), テラヘルツ帯電気伝導度スペクトル (b), 光パルス励起後のテラヘルツ帯振幅反射率変化とその温度依存性 (c) を示す。光励起後の THz 反射率の増加は SDW ギャップの消失に対応しており、この変化率は SDW 転移温度である T_c = 12 K に近づく程小さくなり、さらに回復時間も長くなる傾向が確認できた。この原因については、スピン系の緩和時間が相転移点近傍で著しく長くなる臨界緩和現象、あるいは転移点近傍でのギャップの縮小によって準粒子のフォノン緩和が抑制されるフォノンボトルネック効果が推測され、現在より詳細な考察・解析を進めている。

4.6.3 異常ホール効果、量子ホール効果

これまでに開発してきた磁場下高感度テラヘルツ偏光分光測定系を用いて以下の研究を行った。

異常ホール効果

強磁性体のホール効果（異常ホール効果）の起源には、バンド間遷移に由来する内因的なものと不純物散乱による外因的なものが存在する。前者は近年、ブロッホ関数の幾何学的位相（ベリー位相）の観点からより一般化され、その概念はスピンホール効果などより広範な現象へと拡張されつつある。このベリー位相に基づく異常ホール効果は、バンド交差点近傍の低エネルギー meV(テラヘルツ）領域の交流ホール伝導度に特徴的なスペクトルとなって発現することが期待された。そこで、直流ホール効果と磁化測定の結果からベリー位相に由来する異常ホール効果が発現していると考えられる強磁性体 $SrRuO_3$ を対象にテラヘルツ周波数帯の磁気光学ファラデー効果測定を行った。その結果、強磁性体の自発磁化に起因する微弱なファラデー回転信号を検出することに初めて成功した。

量子ホール効果

２次元電子系はランダウ準位中に局在、非局在状態を形成し、量子化されたホール抵抗率を生じる。直流領域の電気伝導測定において観測されるこの量子ホール効果が光 (テラヘルツ）領域でも存在しうるか否かを調べることを目的として、ランダウ準位間エネルギーに相当するテラヘルツ周波数領域で磁気光学ファラデー効果を用いたホール伝導度スペクトルの計測を開始した。２次元電子系の試料には GaAs/AlGaAs ヘテロ構造を用いた（試料提供：物理学教室岡本研究室)。図 4.6.19(a) は直線偏光のパルステラヘルツ電磁波を試料に入射した際に、入射波と直交する偏光方向に放射された電磁波の実時間波形である。この信号は２次元電子系のサイクロトロン運動による自由誘導減衰 (FID) 信号に相当する。時間波形にみられる振動の周波数はサイクロトロン周波数に対応し、磁場に比例して増加する。図 4.6.19(b) はこの時間波形から求められたファラデー回転角スペクトルであり、ランダウ準位エネルギー（サイクロトロン共鳴

周波数）において分散型の構造を示している。ファラデー回転角はホール伝導度実部に対応するものであり、低温強磁場下、量子ホール効果が発現する領域でのテラヘルツホール伝導度を初めて観測することに成功した。現在、より系統的な実験と詳細な解析を進めている。

4.6.4 高強度テラヘルツ波発生

固体内非局在電子系において、強い光電場によるエネルギーギャップの崩壊や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ポテンシャルは一定電場振幅では光の波長が長い程大きくなる。テラヘルツ帯ではこの効果が顕在化することが予想され、固体における光強電場効果を調べるのに適していると考えられる。超短パルス光レーザーを空気中に集光し、その際に生じるフィラメント状のプラズマから強いテラヘルツ波が発生していることを確認した。そこで、プラズマフィラメントからのテラヘルツ波発生の強度を、電気光学サンプリング法を用いて定量的に評価した。特に、レーザー光の基本波と第二高調波をプラズマフィラメントに同時照射することにより、電場尖塔値 100kV/cm を越える高強度のテラヘルツ波を発生させることが可能となった。

＜報文＞

(原著論文)

[1] S. Watanabe, R. Kondo, S. Kagoshima, and R. Shimano: Spin-density-wave gap in $(TMTSF)_2PF_6$ probed by reflection-type terahertz time domain spectroscopy, Phys. Stat. Solidi(b) **245**, 2688 (2008)

[2] Y. Takahashi, N. Kida, Y. Yamasaki, J. Fujioka, T. Arima, R. Shimano, S. Miyahara, M. Mochizuki, N. Furukawa, and Y. Tokura: Evidence for an electric dipole active continuum band of spin excitations in multiferroic $TbMnO_3$,Phys. Rev. Lett.**101**, 187201 (2008)

[3] N. Kida, Y. Ikebe, Y. Takahashi, J. P. He, Y. Kaneko, Y.Yamasaki, R. Shimano, T. Arima, N. Nagaosa and Y. Tokura: Electrically driven spin excitation in a ferroelectric magnet $DyMnO_3$, Phys. Rev. B**78**, 104414 (2008)

[4] N. Kida,Y. Yamasaki, R. Shimano, T. Arima, Y. Tokura: Electric-Dipole Active Two-Magnon Excitation in ab Spiral Spin Phase of a Ferroelectric Magnet $Gd_0.7Tb_0.3MnO_3$, J. Phys. Soc. Jpn.**77**, 123704 (2008)

(学位論文)

[5] 池田勇一: 「高強度テラヘルツ波発生法の研究」(修士論文)

[6] 芝沼隆太: 「テラヘルツ分光法によるカーボンナノチューブの光励起キャリアダイナミクスの研究」(修士論文)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[7] Yohei Ikebe and Ryo Shimano: High sensitive terahertz Faraday rotation measurements of doped semiconductors, NTU-Todai Joint Workshop, Singapore, Feb.19, 2009

[8] T. Suzuki and R. Shimano: Ultrafast liquid-gas transition dynamics in electron-hole system of photo-excited Si probed by terahertz spectroscopy, International Workshop on Novel aspects of phase transitions with long-range interactions, University of Tokyo, Japan, 28th - 30th October, 2008

招待講演

[9] R. Shimano： Terahertz time-domain spectroscopy for phase transition phenomena in semiconductors and strongly correlated electron systems, 2nd International Symposium on Filamentation, Paris, France, Sept. 25, 2008

[10] R. Shimano: Terahertz spectroscopic studies of exciton Mott transition in semiconductors;exploring quantum degenerate phases, Nanyang Technology University(NTU)-Todai Joint Workshop,2008, Singapore

[11] R. Shimano： Terahertz frequency magneto-electric correlation; from anomalous Hall effect to electromagnon, AIST-RIKEN Joint Workshop, Okinawa, March 4, 2009

[12] S. Watanabe, R. Shimano, R. Kondo, and S. Kagoshima: Spin-density-wave gap in $(TMTSF)_2PF_6$ probed by terahertz time domain spectroscopy ,8th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (EXCON'08), Kyoto, June 22-27, 2008

(国内会議)

一般講演

日本物理学会第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 27 日-3 月 30 日　於　立教大学)

[13] 鈴木剛, 島野亮: テラヘルツ分光法による Si 電子正孔系のクーロン遮蔽効果と相転移ダイナミクスの観測

[14] 渡邉紳一, 島野亮, 近藤隆祐, 鹿児島誠一: $(TMTSF)_2PF_6$ スピン密度波相の光融解ダイナミクス

[15] 伊藤弘毅, 金子良夫, 島野亮, 十倉好紀:$Eu_{1-x}Y_xMnO_3$ におけるらせん磁気秩序誘起強誘電分極 (P//a 及び P//c) ドメイン構造の光第二高調波発生イメージング

[16] 高橋陽太郎、山崎裕一、金子良夫、貴田徳明、有馬孝尚、島野亮、十倉好紀: マルチフェロイック $Eu_{1-x}Y_xMnO_3$ における光の電場誘起による磁気励起の全体像

[17] 藤岡淳，堀内佐智雄，貴田徳明，島野亮，十倉好紀: 水素結合型強誘電体 Phz-H_2ba における強誘電転移とプロトン・分子振動ダイナミクス

日本物理学会 2008 年秋季大会 (2008 年 9 月 20 日-9 月 23 日於　岩手大学)

[18] 芝沼隆太、島野亮、南信次: 孤立分散したカーボンナノチューブ薄膜の光ポンプテラヘルツプローブ分光

[19] 鈴木剛、芝沼隆太、島野亮: THz 時間領域ポンププローブ分光法による Si の励起子・電子正孔液滴形成ダイナミクスの観測

[20] 伊藤弘毅, 徳永祐介, 貴田徳明, 島野亮, 十倉好紀: 層状マンガン酸化物 $Pr(Sr_{1-y}Ca_y)_2Mn_2O_7$ における電荷整列誘起分極の光第二高調波発生イメージング

[21] 貴田徳明, 山崎祐一, 島野亮, 有馬孝尚, 十倉好紀: テラヘルツ分光法を用いた $Gd_{0.7}Tb_{0.3}MnO_3$ の ab スパイラル相における光で誘起される磁気励起の全貌

[22] 貴田徳明, 石渡晋太郎, 田口康二郎, 島野亮, 有馬孝尚, 十倉好紀: テラヘルツ分光法を用いたヘキサフェライトにおける光の電場で誘起される磁気励起の観測と弱磁場下における巨大な光学スペクトル変化

5　一般物理理論

5.1　宇宙理論研究室 (佐藤・須藤)

宇宙物理学は取り扱う対象が極めて多岐に渡っているのみならず、その方法論も多様であり非常に学際的な体系をなしている。実際、素粒子物理学、原子核物理学、プラズマ物理学、流体力学、一般相対性理論、などの基礎物理学を駆使して宇宙の諸階層の現象の本質的な理解にせまろうという点では、応用物理学的な色彩の濃い学問分野である。当教室の宇宙理論研究室では、佐藤教授、須藤教授、樽家助教、および十数名の大学院学生、研究員が様々な宇宙物理の問題に取り組んでいる。研究室の活動は、「初期宇宙・相対論」、「観測的宇宙論」、「超新星・高密度天体」の３つの中心テーマを軸として行なわれており、研究室全体でのセミナーに加えて、それぞれのテーマごとのグループでのセミナーや論文紹介等、より研究に密着した活動も定期的に行なわれている。

我々の住むこの宇宙は今から 137 億年の昔、熱い火の玉として生まれた。膨張にともなう温度の降下によってハドロン、原子核、原子が形成され、さらにガスがかたまり銀河や星などの天体が形成され豊かな構造を持つ現在の宇宙が創られた。これが物理学に基づいて描きだされてきた現在の宇宙進化像である。しかし宇宙の進化には多くの謎が残されている。またさらに近年の技術革新の粋を用いた宇宙論的観測の爆発的進歩によって新たな謎も生じている。宇宙論のもっとも根源的謎はこの３次元の空間と１次元の時間を持った宇宙がいかに始まったかという問題である。「初期宇宙・相対論」は、1980 年代に急速な発展を遂げたインフレーション理論に代表される、素粒子的宇宙論の進歩を基礎とし、さらにより根源的な問題として残されている宇宙の誕生・創生の研究を目的としている。当研究室では、最近の超紐理論の進展で中心的役割を担っているブレインを基礎とした相対論的宇宙論に取り組んでいる。重力の深い理解によって真の宇宙創生像を明かにすることを目標としている。

宇宙の誕生の瞬間を出発として宇宙の進化を説明しようとするのが素粒子的宇宙論の立場であるとすれば、「観測的宇宙論」は、逆に現在の宇宙の観測データを出発点として過去の宇宙を探ろうとする研究分野である。現在そして近い将来において大量に提供される宇宙論的観測データを理論を用いて正しく解釈する、さらにコンピュータシミュレーションを通じて、ダークマター、宇宙初期の密度揺らぎのスペクトル、宇宙の質量密度、膨張率、宇宙定数など宇宙の基本パラメータを決定することで現在の宇宙像を確立するとともに宇宙の進化の描像を構築することが「観測的宇宙論」の目的である。このテーマに関して現在我々が具体的に取り組んでいる課題は、日米独国際共同観測プロジェクトであるスローンデジタルスカイサーベイを用いた宇宙論パラメータの決定、銀河・銀河団の空間分布の定量化、赤方偏移空間での銀河・クェーサー分布 2 体相関関数の探求である。また宇宙のバリオンの半分以上を占める “ダークバリオン” を酸素輝線によってサーベイする軟 X 線精密分光観測ミッション DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) を首都大学東京、名古屋大学、宇宙科学研究所、のグループとともに共同で推進しつつある。特に、数値シミュレーションを用いてその検出可能性とそれらの科学的意義を理論的に探求することが我々の担当である。このミッションが成功すれば、可視光での銀河の赤方偏移サーベイ、および X 線による銀河団観測とは相補的な新しい宇宙の窓が開かれることが期待できる。これらと同時に、国立天文台、プリンストン大学の共同研究者とともに、すばる望遠鏡を用いた太陽系外惑星の観測的・理論的研究を行っている。　現時点で、系外惑星の分光観測を行っている国内では唯一のグループであり、食を起こしているトランジット惑星の大気と反射光の検出、さらには系外惑星のリングと衛星の検出を目指している。(http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/を参照)

質量の大きい星は進化の最終段階で超新星爆発を起こし、中心にブラックホールもしくは中性子星を形成する。超新星爆発の物理を解明するにはニュートリノを中心とする素粒子の反応、中性子過剰原子核がいかに合体しながら核物質へ移行するのか、という基礎過程の研究とともに、それらの効果を取り込んだ一般相対論的な流体力学計算によって爆発のシミュレーションを行なわなければならない。従来中性子星形成の研究は球対称を仮定した研究が中心であったが、実際の星は自転しており、遠心力の効果、対流、非等方な衝撃波の発生などが爆発に大きな寄与をしていると考えられ、我々の研究室では爆発のエンジンとなる星のコアの重力崩壊、中性子星形成の 2 次元 3 次元流体シミュレーションを中心に研究を進めている。爆発のシミュレーションだけでなく、超新星コアにおける原子核から核物質への相転移が爆発に与える影響にも注目し、分子動力学シミュレーションを用いた核物質の微視的研究も行なっている。また近年、重力崩壊型超新星爆発とガンマ線バーストが相関していることが観測的に確立したが、これは、全ての超新星に相対論的ジェットが存在するのかという疑問を投げかけている。光では見えない隠されたジェットのプローブとして、高エネルギーニュートリノを中心とした研究も行っている。さらに、ガンマ線バーストが一つの候補天体となっている超高エネルギー宇宙線についての研究も進めている。

5.1.1 初期宇宙・相対論

フラックスコンパクト化の安定性

フラックスコンパクト化は、フラックスにより余剰次元のコンパクト化および安定化を図り、高次元時空から４次元宇宙を実現するために有用なアイデアである。このようなフラックスコンパクト化のモデルの内、６次元ブレーン宇宙モデル [155] や Freund–Rubin コンパクト化 [65, 67, 58, 87, 95] について、その安定性を動的・熱力学的両側面から調べた。この結果、どちらのモデルについても線形摂動に対し不安定になる動的に不安定な時空は、４次元の de Sitter 時空に付随するエントロピーが低い系列に属する時空となっており、熱力学的にも不安定なものであることがわかった。以上のように、これらの系は熱力学的安定性と動的安定性に相関が存在することを示した。

動的ブラックホールにおける AdS/CFT 対応

AdS/CFT 対応は、重力理論と一つ次元の低い共形場理論の間にある種の対応関係を示唆する。この対応を用いて、非一様に膨張する４次元上の流体の性質を、動的な５次元ブラックホールを使って解析した。この結果、ブラックホール時空が正則である要請から、粘性等の流体の性質を特徴付けるパラメータが一意に決定されることを示した [3, 4]。

超弦理論における宇宙論

最近、超弦理論における加速膨張宇宙の理解が目覚ましく進展し、その枠内でインフレーションを議論する事が可能になりつつある。その様なインフレーション模型においてはインフラトン場が重力と共形結合している場合があり、本研究ではその際に生成される宇宙の初期密度揺らぎのスペクトルの計算を行った。また、WMAP の観測結果を用いて特に D ブレーン・インフレーションモデルに対して制限を課した [5, 30, 66, 68, 59, 88, 105]。

5.1.2 観測的宇宙論

質量パワースペクトルの非線形重力進化に対する精密理論テンプレートの構築

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、「宇宙標準ものさし」として銀河分布の赤方偏移・距離関係の決定に有効で、次世代分光サーベイによるダークエネルギー探査の重要な手段の１つである。近年、N 体シミュレーションなどによる系統的な研究から、非線形重力進化によってバリオン音響振動スケールが時間変化することが明らかになり、赤方偏移・距離関係の精度決定する上でバリオン音響振動の時間進化を正確に記述する理論テンプレートの構築が不可欠であると考えられている。昨年度、我々は、乱流などの分野で知られる完結近似と呼ばれる手法を駆使し、バリオン音響振動の精密理論テンプレートに対する新しい計算手法の定式化を行った。本年度は、高次補正の影響を取り入れた計算手法を開発するとともに、赤方偏移歪みの影響を取り入れた精密理論テンプレートの作成を進めてきた。N 体シミュレーションとの詳しい比較から、パワースペクトル、２点相関関数に対して、従来の摂動計算より適用範囲の広い理論テンプレートの構築が可能となり、パーセントレベルの精度が概ね達成できることがわかった。 [69, 98, 106, 129, 130, 151, 152, 156, 157, 158, 159, 160]

質量パワースペクトルに対する原始非ガウス性の影響

次世代の CMB 観測や銀河サーベイから宇宙初期に起こったとされるインフレーションを探る上で、原始非ガウス性の検出はきわめて重要なプローブと考えられている。近年、理論研究の進展から、原始非ガウス性はゆらぎの生成メカニズムとインフレーションのモデルに大きく依存するすることが示され、原始非ガウス性の統計性を観測的に詳しく調べることで、インフレーションに対するより強い制限が得られることが明らかになってきた。CMB、大規模構造の観測から原始非ガウス性を検出するには、通常、バイスペクトルなどのような高次統計量を解析する。特に大規模構造の場合、重力非線形性に伴って現れる非ガウス性も存在するため、より注意深い解析が必要となる。本研究は、これまであまり考えられていなかったパワースペクトルに現れる原始非ガウス性の影響に注目、観測可能性について議論を行った。パワースペクトルのような２次の統計量でも、重力非線形性、銀河バイアスの非線形性を通じて原始非ガウス性の影響が現れうる。具体的な原始非ガウス性のモデルに基づき計算を行った結果、重力非線形性による原始非ガウス性の影響は、たかだかパーセントレベルでほぼその影響は無視できることがわかった。その一方、カーバトンや多成分スカラー場などによって生成される原始非ガウス性の場合、銀河バイアスの非線形性を通じて非常に強いスケール依存性が現れ、大スケールではこの効果が卓越することが明らかになった。このことは、銀河パワースペクトルの観測から原始非ガウス性に対する強い制限が得られることを示唆している。 [12, 89]

修正重力理論における質量パワースペクトルの非線形進化

Ia 型超新星の観測などで明らかになった宇宙の加速膨張を説明する１つの考え方として、重力理論の変更・修正というアイデアがある。この修正重力理論は、宇宙論的スケールでは一般相対論からずれる一方、観測的制限から、太陽系スケールでは一般相対論が実質的に回復するような理論であることが要請

されている。近年、こうした修正重力理論がいくつも提唱されているが、宇宙膨張に関する観測と比較する限り、(一般相対論の) ダークエネルギーと見分けがつかない。しかしながら、構造形成、つまり、密度ゆらぎの重力進化を調べることで、修正重力理論とダークエネルギーの峻別が可能となる。本研究では、広いクラスの修正重力理論に対して、密度ゆらぎの重力進化を取り扱う摂動論の一般的定式化を行った。その定式化にもとづき、加速膨張を説明する2つの修正重力理論 ($f(R)$ モデル、Dvali-Gabadadze-Porratti モデル) に対して、質量パワースペクトルの摂動計算を行った。こうした摂動計算をもとにパラメトライズド・ポストフリードマンの定式化を用いて非線形領域におけるパワースペクトルのふるまいを評価した結果、小スケールにいくと一般相対論からのずれは徐々に小さくなるが依然として顕著な違いが残ることが明らかになった。 [108, 130]

背景重力波の検出法

背景重力波は、多数の波が折り重なってできた位相がランダムな重力波であり、初期宇宙をプローブする上で重要なターゲットと考えられている。背景重力波を用いることで、従来の電磁波観測からは得られない情報を手に入れることができる。とりわけ興味深い点は、宇宙初期の高エネルギー極限において、重力理論自体がパリティ対称性の破れを自然に含みうることが予想されており、対称性の破れに伴って背景重力波にも特有の偏極 (円偏極) が残る可能性があるということである。また、現在の宇宙の加速膨張を説明するアイデアとして、宇宙論的スケールで一般相対論が変更される可能性が議論されており、重力波自体もテンソル成分以外の自由度を持つ可能性が指摘されている。本研究では、背景重力波の持つさまざまな偏極成分を複数台のレーザー干渉計を用いて、分離・検出する一般的手法について考察した。その手法に基づき、Advanced LIGO, LCGT などの地上の次世代干渉計を用いて背景重力波の検出可能性について定量的な議論を行った。 [11, 13]

銀河団ガス内部の非一様性のモデル化とその観測的検証

銀河団を用いた宇宙論においては、銀河団の内部構造の複雑さ故に、精密なパラメタ測定が困難である。銀河団ガスの内部構造を統計的に記述し、モデル化することで、銀河団を用いた宇宙論の系統誤差を理解することを目指している。そのために、銀河団ガスの数値シミュレーションで得られた内部の温度、密度の不均一性が対数正規分布で良く近似できることを示し、銀河団ガスの内部構造を統計的に扱うモデルを構築した。このモデルを用いて、 Sunyaev-Zel'dovi ch 効果を用いたハッブル定数推定の系統誤差を評価したところ、Reese et al. (2002) 等の観測結果と WMAP 等の他の推定法との矛盾を良く説明した。

しかし、この対数正規モデルはあくまで数値流体シミュレーションに基づいたものであった。そこで、更に、実際の銀河団の X 線観測データから密度揺らぎの統計的情報を引き出す事を試みた。観測量は必然的に二次元投影されたものであるので、まず非一様性の三次元的統計的情報を二次元 X 線輝度分布から引き出す方法を開発した。その上で実際の銀河団の X 線観測データを解析した。

まず投影による効果を調べるために密度揺らぎが対数正規分布に従うような場合の X 線輝度分布を多数作成し、X 線輝度の動径分布からのゆらぎ、輝度ゆらぎの分布関数を求めた。その結果、輝度ゆらぎの分布関数も対数正規分布に従う事が分かった。また、輝度揺らぎの大きさと、密度揺らぎの大きさ、パワースペクトルの関係を求めた。さらに X 線輝度分布から密度揺らぎのパワースペクトルを推定するため、輝度揺らぎのパワースペクトルのベキと密度揺らぎのパワースペクトルのベキの間の関係を求めたところ、ほぼ同じである事が分かった。また系統誤差の可能性として温度揺らぎ、温度動径分布、密度動径分布、望遠鏡の角度分解能について検討を行った結果、どれも統計誤差に比べ大きくないことが分かった。 次に実際の銀河団の Chandra 衛星による X 線データの解析を行った。クーリングコアを持たない銀河団という条件のもと、Chandra のアーカイブデータ中、最も光子統計の良い観測データを持つ銀河団である Abell3667 を選んだ。そして、X 線輝度揺らぎの分布を求めた所、対数正規分布が最も良く一致した。充分光子統計の良い観測データを用いたためポアソン統計による影響はほとんど無視できる。また、合成銀河団で得られた関係式をもちいて、(三次元) 密度揺らぎの大きさを推定した。この結果は銀河団ガスの密度揺らぎに対する対数正規モデルの兆候を確かめた初めての観測結果であると言える [14, 90, 99, 70]。

N 体シミュレーションを用いたバリオン音響振動の精密テンプレートの作成

再結合期以前の宇宙では光子とバリオンは強く結合しており、1つの流体のように振る舞う。バリオンの受ける重力と光子の受ける輻射圧のため、この流体はバリオン音響振動 (BAO) と呼ばれる振動を起こし、その音波は再結合期まで進行する。現在観測できる宇宙マイクロ波背景輻射の温度揺らぎ、及び、銀河分布の密度揺らぎには BAO の痕跡が残されている。近年、銀河赤方偏移探査の広視野化により、BAO の観測が報告されるようになってきた。

今後、銀河分布から BAO の特徴的距離をより正確に測定することができるようになれば、これを標準物差として利用することにより、宇宙の膨張史をこれまでにない精度で再構築できると期待されている。そして、それは宇宙の加速膨張を支配する暗黒エネルギーの正体を明らかにするのに大きな役割を果たし得る。また、BAO の距離情報だけでなく、振動の大きさに関する情報も宇宙論的に重要であると考えられている。

近い将来の超大規模銀河探査を前に、銀河分布を

記述する理論モデルの高精度化が至上命題となっている。より具体的には、密度揺らぎの非線形な重力進化、銀河の特異速度による赤方偏移揺らぎを正確にモデル化しなければならない。我々は、N 体シミュレーションを用いてこの課題に取り組んだ。まず、N 体シミュレーション自身の精度を評価し、シミュレーションの体積の有限性から来る系統誤差を評価した。[15, 71] 次に、摂動理論を用いてこの系統誤差を取り除く方法を開発し、BAO のスケールでのパワースペクトルに対する重力非線形の効果をサブパーセントレベルの精度で正確に取り扱うことに成功した。[72, 61, 131, 132, 91, 100, 153, 161] さらに、赤方偏移歪みの影響も考慮できるよう、この方法論を拡張し、達成した精度について議論した。 [109]

また、BAO の振幅の非線形な時間進化に関しては、理論モデル、N 体シミュレーションを用いて簡単なフィッティング公式を開発し、これが密度揺らぎ自身の大きさとその成長率に強く依存することを発見した。 [16] さらに、この公式とスローンディジタルスカイサーベイの LRG と呼ばれる銀河のパワースペクトルとを比較し、非線形進化の兆候を検出した。 [17]

銀河の非線形パワースペクトルを用いたニュートリノ質量の制限

ニュートリノが質量をもつことは素粒子標準模型の限界を示す最初の証拠であり、ニュートリノがどの程度の質量を持つかは重要な問題である。非常に興味深いのは、ニュートリノ質量の総和の上限である、$\sum m_\nu < 0.2 - 0.6$eV という制限が宇宙論的観測から得られていることである。

宇宙論的な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。$\sum m_\nu$ 0.1eV 程度の場合、その特徴的なスケールは偶然にもバリオン振動の現れるスケールであるので、将来の大規模な銀河サーベイ計画では、ニュートリノの質量をプローブできる可能性が非常に大きい。

しかし、その 100Mpc ほどのスケールでは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、摂動論な手法に基づき、有質量ニュートリノの効果を非線形パワースペクトルの計算に組み込むことに成功した。さらに、ニュートリノが成長を均す効果は重力の非線形進化により増幅され、この効果によりニュートリノ質量の制限が非常に強くなりうることを示した [18]。

さらに銀河バイアスや赤方偏移ゆがみによる非線形効果を取り入れてニュートリノの質量の予想される達成精度を見積もった。これは非線形効果をすべて考慮したという点では、初めての試みである [60, 73, 74, 75, 92, 101, 107, 133, 162, 163]。

CMB と大規模構造の相関で探る CMB に対する弱い重力レンズ効果

CMB はその温度ゆらぎと偏光の観測により、宇宙論パラメータは精密に測定され非常に成功をおさめたが、その一方で $z \sim 1000$ の宇宙の情報を見ていることに対応するためにダークエネルギーやニュートリノの質量など、より現在に近い宇宙の進化に影響を及ぼすものの情報を得ることができない。しかし、CMB 光子もまた宇宙の大規模構造によって弱い重力レンズ効果を受けるために、これを観測すればCMB からもそれらの情報を得ることができる。

CMB の観測のみから弱い重力レンズ効果を検出するのは非常に難しいが、大規模構造の観測量と相関をとることによってその検出効率は飛躍的に増加する。実際に WMAP と SDSS の相関から、この弱い重力レンズ効果を検出されたという報告がここ数年数例ある。

そこで我々は、次世代の CMB 観測衛星 Planck と、すばる望遠鏡の広視野撮像計画である HSC との相関によって、CMB に対する弱い重力レンズ効果が検出できること、さらに宇宙論パラメータの制限が十分に改善されることを示した [134]。

背景重力波による再加熱温度の決定可能性について

背景重力波は原理的には宇宙のインフレーション期のような極初期宇宙を直接プローブできる。特にそのスペクトルは宇宙の膨張史、つまりは熱史に関する情報を含んでいる。我々は、宇宙の再加熱期には物質優勢に近い宇宙になり、スペクトルの形が変わるという性質に注目し、DECIGO や BBO といった次世代の重力波干渉計により、宇宙の再加熱温度が 10^{6-9}GeV ほどであれば決定できる可能性を示し、素粒子物理に対するインパクトを議論した [19, 20]。

ロシター効果による視線速度変動の摂動公式に対する精度検証

これまで系外惑星は主にドップラー法によって発見されてきたが、最近主星の前を惑星が通過して食を起こすトランジット惑星系も多く見つかってきている。トランジット惑星系ではドップラー法だけからは得られない情報を引き出すことが可能である。主星の視線速度がトランジット中に特徴的な変化を起こすロシター効果がその 1 つで、それにより主星の自転速度 $v \sin i$ と、主星の自転軸の向きと惑星の軌道公転軸の向きが天球面上でなす角度 λ を推定することができる。

Ohta et al.(2005) は、ロシター効果に対する解析的な公式（OTS 公式）を導出した。一方で、Winn et al.(2005) は、高分解能の太陽スペクトルから出発してトランジットを起こしている際の星の模擬スペクトルを作成し、それを Keck での視線速度解析ルーチンにかけることでロシター効果に対する経験的な公

式を導出した。その結果、$v \sin i$ の見積もりに 10% 程度のずれがあると結論した。

このずれの原因はこれまでよく分かっていなかった。しかし今回の我々の研究で、ロシター効果に起因する視線速度変動に対して OTS 公式と実際の視線速度解析で異なる推定量を用いていたためにこのずれが引き起こされたのだということが明らかとなった。我々はさらに、すばる HDS のデータ解析に関しても同様にトランジット中の星の模擬スペクトルを作成し、ヨードセル法を用いた視線速度解析の手続き (Sato et al. 2002) に従って視線速度の変化を求めた。それにより Winn et al.(2005) と同様のロシター効果に対する経験式、さらには主星の自転速度を系統的に変化させた場合の経験的な公式を得た。 [110]

地球型惑星の反射光の時間変動

地球と同様の惑星の発見は系外惑星探査の一つのマイルストーンであるが、科学的には、そのような惑星をできる限り精密に測光・分光観測することで特性を探ることの重要性は高い。惑星の反射光は、惑星表面の各地点の反射特性を反映し、その時間変動は自転周期で繰り返す。我々は、Ford, Seager & Turner (2001) などよる現在の地球のデータを用いた測光強度変動のシミュレーションを再現した。また、植物による反射が 750nm 付近で急激に大きくなるといういわゆるレッドエッジという特性に注目しつつ、反射光の時間変動から逆に地表面の様子を探るアプローチについて考察している。 [111]

5.1.3 天体核・素粒子物理

マグネターの誕生とガンマ線バースト

大質量星の終焉はそのコアの重力崩壊にトリガーされる。その際、超新星やガンマ線バーストなど実に様々な爆発現象が起こることがわかってきている。その超新星の中でも観測で見つかる元素は違った様相をみせる他、ガンマ線バーストの中でもそのエネルギーや継続時間には大きなバリエーションがある。我々はこの多様性を親星の性質の違いと理解し、特殊相対論的磁気流体シミュレーションを用いて親星と爆発現象の関係を明らかにしようとしている。本年度は従来考えてきた磁場と自転の強さ違いに加えて、親星の質量や微分回転・剛体回転度などの違いも踏まえた多くのパラメータでこの崩壊現象を考察した。その結果、磁場による爆発は今まで考えられてきたパラメータ領域よりも広くなることがわかった。また、どのような時爆発が強く起るのか、その条件の詳細を明らかにした。 [21, 76, 77, 62, 78, 135, 136, 93, 102, 164]

重力崩壊型超新星からの背景ニュートリノ放射の観測見込み

重力崩壊型超新星は大量の熱的ニュートリノを放出することが知られているが、地球上のニュートリノ検出器で熱的ニュートリノが検出できるほどこの地球近くで超新星は 1987 年以来起きていない。ところが、「超新星背景ニュートリノ放射」は、遠方に起きた過去のすべての超新星から放射された熱的ニュートリノの集計であり、その観測は近傍の超新星の発生を待つ必要がない。我々は、まず、星の誕生の情報を記録する星形成率、次に星の一生の情報を記録する銀河外背景光子放射や星の質量密度、そして最後に星の末期の情報を記録する超新星発生レートを同時に評価し、最新の観測データに基づいた超新星背景ニュートリノ放射の観測見込について理論的に考察した。その結果、大質量星の誕生から末期までの一貫した描写が得られ、充分な超新星レートがあることと、これまでより小さい超新星発生レートの不確定性を示すことができたのである。近い将来に、超新星背景ニュートリノ放射が超新星の内部やニュートリノの物理のプローブになりうることが結論付けられた [23, 112, 138, 46, 165, 166]。

強磁場を持つ星の重力崩壊型超新星からの非熱的ニュートリノ放射

近年、非常に強い表面磁場が一部の大質量星や中性子星に観測されており、その磁場起源について議論が続いている。星の磁場が保存されるという考え方（これを fossil field と呼ぶ）がある一方で、中性子星の形成段階で磁場が増幅されるというとらえ方も主流になりつつあるが、いずれもまだ定説にはなっていない。それで我々は、相対論的陽子の核反応より生成され、超新星の中間的時間帯（つまり、熱的ニュートリノ放出の後・可視光の放出の前）に放射されうるニュートリノの放出に着目した。強磁場を保持した大質量星が超新星爆発すれば、星の磁場を利用した粒子加速と非熱的ニュートリノ放射が可能であり、超新星が銀河内で起こった場合、現在のニュートリノ検出器で検出可能であることを示した [22, 137, 46, 165]。これは星の表面下の磁場のプローブとなりうるだけでなく、磁場起源への示唆も得られる。

超新星コアにおける原子核パスタ形成

超新星爆発はコアの重力崩壊から始まる。そして、コアが非常に高密度になった際に原子核は融解して核物質となるが、その際に核子同士に働く強力は反発力によってコアの収縮が止まり、コアバウンスを起こして爆発に発展していくと考えられている。しかしながら、上記の過程において、原子核が如何にして融解し、一様な核物質と変化していくかは完全には理解されていない。原子核が融解していく過程においては、元々球形だった原子核が棒や板といった形状の原子核 (原子核パスタ) へと変化していくと

考えられているが、実際にどのようにして形状が変化していくのか、そのプロセスは不明であり、それと同時に本当に形成されるかどうかという問題自体も自明ではなかった。我々はこの問題に対して、量子分子動力学法を用いて球状の原子核が一様核物質へと転移していく過程のシミュレーションを行った。我々は実際に球状から棒状や板状の原子核への相転移を観察し、超新星コア中において棒や板の原子核が動的に形成され得ることを示した [48]。

最高エネルギー宇宙線到来方向分布の予言

銀河系内・系外にはそれぞれ特有の形状を持った磁場が存在する。宇宙線は荷電粒子であるためこれら磁場によって飛行軌跡を曲げられる。よって、これらの磁場が到来方向に反映されることが期待される最高エネルギー宇宙線源の情報を消し去ってしまうことが考えられる。我々はまず構造磁場中の宇宙線伝搬を考えることにより、6×10^{19}eV 以上の宇宙線陽子が磁場から受ける曲がりは軽微であり、ソースの位置と到来方向のずれは 2-3 度程度であり、現在知られている最も妥当なソースの特徴を仮定すると Aug er 実験で 5 年程度観測すればソースの位置が宇宙線到来方向分布として見えてくることを示した [24, 49] 。次に銀河内磁場について考察し、数度での相関が見えるかどうかはまだ確定していない銀河磁場の方向反転のモデルに依存することを示し、曲がりが小さいモデルが真実であった場合、北半球で相関が見えやすいということを示した。

Auger 実験が示唆する最高エネルギー宇宙線ソースの性質

Auger 実験は非等方な最高エネルギー宇宙線分布を検出した。この非等方性は宇宙線源の分布と点源ソースの数についての情報を持っていることが期待される。我々は銀河系内・系外の詳細な磁場モデルを仮定したシミュレーションを行い、Auger 観測所の結果と比較することで、宇宙線源の数密度が $10^{-4}\mathrm{Mpc}^{-3}$ 程度であると見積もり、強力な宇宙線源候補だった特殊なタイプの活動銀河核は数が少なすぎて宇宙線源になり得ないことを示した [26, 49] 。さらに、より低いエネルギーの超高エネルギー宇宙線で観測されている宇宙線分布の「等方性」はこの数密度のソース分布からは生成することが難しいことを示し、もう一桁程度大きい数を持つ、放射最高エネルギーが 10^{20}eV に満たないソースがある可能性を指摘した [26, 49] 。また、この等方性を再現するもう一つのシナリオとして宇宙線生成が突発的である場合を指摘し、宇宙線伝搬を考えることで突発的宇宙線ソースのレートについて世界で初めて上限と下限を見積もった [27, 49]。

最高エネルギー宇宙線と宇宙大規模構造との相関

Auger 実験は最高エネルギー宇宙線と特定の銀河系外天体との位置相関を指摘した。これをより一般化し、我々は近傍銀河の分布（宇宙大規模構造）と宇宙線到来方向の相関を議論した [80, 63, 96, 49]。この結果、典型的な相関角は 10° 程度と見積もられ、銀河のかたまっている角度スケールとほぼ同程度であることから、最高エネルギー宇宙線は銀河系外の天体起源であることを示した。また、この相関角は実際の宇宙線源と到来方向のずれの最大値と解釈することができ、この事実からいくつかの銀河系外磁場モデルに制限を加えた。

GZK ニュートリノから探る最高エネルギー宇宙線の起源

最高エネルギー宇宙線はその伝搬中に宇宙背景放射光子と反応することによりエネルギーを失う一方で超高エネルギーのニュートリノを生成する。超高エネルギーの宇宙線の起源は 10^{17}eV 以上を銀河系外起源とするシナリオと 10^{19}eV 以上のみを銀河系外起源とするシナリオがあり現在のところどちらが正しいかはっきりしていないが、我々は上記のニュートリノスペクトルが観測されればどちらのシナリオが正しいか探れることを示した [28, 49]。また、10^{18}eV 付近のニュートリノスペクトルは上記起源のシナリオによらず、最高エネルギー宇宙線ソースの宇宙論的進化のシナリオにのみ依存することを示し、このニュートリノが $z = 1$ 程度の宇宙での最高エネルギー宇宙線の生成に関する情報を与えることを示した。

第一世代の重力崩壊とニュートリノ・重力波放射

宇宙で最初にできた星のことを第一世代と呼ぶ。このような天体は現在の星と異なり非常に重かったことが示唆されている。これまで第一世代星の形成についてはよく調べられてきたが、その進化の最終段階である崩壊についてはほとんど調べられてこなかった。そこで我々は、どのような星が最終的にどのような現象を引き起こすのかを詳細なシミュレーションを行って明らかにした。その結果を用いて、重力波やニュートリノの背景放射の成分にどのような影響を及ぼすのかを調べた。重力波については、次世代の重力波検出器である DECIGO や BBO といったもので観測可能性が高いことを示し、ニュートリノに関してはこれまで観測可能性は低いとされていたが、今まで考慮されていなかった回転の効果を入れた計算を行うと、観測の窓となる周波数帯が存在する可能性を示唆した [29, 140, 172, 173, 174]。

ガンマ線バースト中心エンジンからの重力波

ガンマ線バーストは宇宙で最も激しい爆発現象である。2004 年に打ち上げられた Swift 衛星をはじめ、

非常に多くの観測があるものの、その中心メカニズムはいまだ明らかになっていない。ガンマ線バーストを起こすには非常に小さい角度に絞られた超相対論的なジェットが必要と考えられている。中心エンジンの候補として有力なのは、コラプサーと呼ばれるブラックホールと降着円盤の系である。しかし具体的にどういったメカニズムで GRB に不可欠なジェットを生成するのか、というのは光学的に厚いため光子での観測では制限を加えることができない。そのような中、本研究ではガンマ線バーストの中心エンジンから放出される重力波の強度を見積もった。その結果 LISA を用いることで中心エンジンに制限を加えることができることを示した。また、ガンマ線バーストからの背景重力波についても計算を行い、観測可能性を議論した [81, 64, 82, 94, 97, 141, 142]。

コラプサーモデルにおける非熱的ニュートリノとガンマ線バースト中心エンジン

ガンマ線バーストは宇宙で最も激しい爆発現象の一つであり、小さな角度に絞られている相対論的なジェットから放出されていることが観測から分かってきている。ジェットはブラックホールと降着円盤のシステムから駆動されていると考えられているが、その生成機構は明らかになっていない。有力な候補として、降着円盤から放出されるニュートリノの対消滅によるエネルギー供給が提唱されている。ニュートリノ対消滅によってガンマ線バーストを起こすのに十分なエネルギーをつくるには、大きなニュートリノ光度が必要である。これはニュートリノ反応の断面積の小ささ ($\sigma \sim 10^{-44}$ cm ^{2}) と幾何学的な構造から、実際にジェットに行くエネルギーは全エネルギーの 1%程度であるためである。しかし、近年のニュートリノの光学的厚みを考慮した計算は、十分な大きさのニュートリノ光度が達成できないためニュートリノ対消滅ではガンマ線バーストを起こすのは困難だということを示唆している。そのような背景の中、本研究ではニュートリノ輸送方程式を用いて、降着円盤の動径方向の運動によって非熱的ニュートリノが生成されることを示した。これまでニュートリノ輸送は簡略化して扱われてきたのでこのような効果は考えられておらず、ニュートリノはすべて熱的分布を持っていると仮定されていた。ニュートリノ対消滅の効率はニュートリノエネルギーに大きく依存するため、この非熱的成分によってジェット生成効率は大きく変化する。今回は、非熱的成分によってどれだけ効率が変化し、それによって、ニュートリノ対消滅によってガンマ線バーストを起こすのに十分なエネルギーを生成できるのかどうかを議論した [113, 143]。

磁気駆動型超新星爆発における元素合成

近年、重力崩壊型超新星爆発において回転や磁場といった多次元の効果がダイナミクスにどのような影響を与えるのか、ということが精力的に調べられてきている。特に、マグネターと呼ばれる強磁場中性子星を形成するほど強い磁場を持つ大質量星は重量崩壊の際に原始中性子星を形成した後、ジェット状の磁気駆動型爆発を起こすことが分かっている。このようなジェットはガンマ線バーストとの関連から、近年非常に活発に議論されているものである。そのような背景の中本研究では、現実的状態方程式、ニュートリノ冷却を含んだ特殊相対論的磁気流体コードを用いてそのようなジェット状爆発を起こすモデルを計算し、ジェット中における元素合成を計算した。その結果を用いて、元素合成がどう進むのか、またどういった組成比を持って星の外に放出されるのか、を議論した [104]。

5.1.4 その他

佐藤勝彦教授が 2009 年 3 月 31 日付けで退官、明星大学および東京大学数物宇宙連携機構に赴任され、新たな研究生活を始められることになりました。

＜**受賞**＞

[1] 稲田直久、第 20 回日本天文学会研究奨励賞、2009 年 3 月 26 日

[2] 大栗真宗、第 3 回日本物理学会若手奨励賞、日本物理学会、2009 年 3 月 29 日

＜**報文**＞

(原著論文)

[3] Shunichiro Kinoshita, Shinji Mukohyama,Shin Nakamura, Kin-ya Oda: “A Holographic Dual of BjorkenFlow”; Prog. Theor. Phys. **121**, 121 (2009)

[4] Shunichiro Kinoshita, Shinji Mukohyama,Shin Nakamura, Kin-ya Oda: “Consistent Anti-de Sitter-Space/Conformal-Field-Theory Dual for a Time-Dependent Finite Temperature System”; Phys. Rev. Lett. **102**, 031601 (2009)

[5] Takeshi Kobayashi & Shinji Mukohyama: ”Conformal Inflation, Modulated Reheating, and WMAP5”; Physical Review D **79**, 083501 (2009)

[6] Jennifer K. Adelman-McCarthy et al.: The Sixth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey, The Astrophysical Journal Supplement **175**(2008) 297–313 (astro-ph/0707.3413)

[7] Joshua N. Winn, John Asher Johnson, Norio Narita, Yasushi Suto, Edwin L. Turner, Debra A. Fischer, R. Paul Butler, Steven S. Vogt, Francis T. O’Donovan, and B. Scott Gaudi: The Prograde Orbit of Exoplanet TrES-2b, The Astrophysical Journal **682**(2008) 1283–1288 (arXiv:0804.2259)

[8] John A. Johnson, Joshua N. Winn, Norio Narita, Keigo Enya, Peter K. G. Williams, Geoffrey W. Marcy, Bun’ei Sato, Yasuhiro Ohta, Atsushi Taruya, Yasushi Suto, Edwin L. Turner, Gaspar Bakos, R. Paul Butler, Steven S. Vogt, Wako Aoki,

Motohide Tamura, Toru Yamada, Yuzuru Yoshii and Marton Hidas: Measurement of the Spin-Orbit Angle of Exoplanet HAT-P-1b, The Astrophysical Journal **686**(2008) 649–657 (arXiv:0806.1734)

[9] N. Ota, K. Murase, T. Kitayama, E. Komatsu, M. Hattori, H. Matsuo, T. Oshima, Y. Suto, and K. Yoshikawa: Suzaku broad-band spectroscopy of RX J1347.5-1145: constraints on the extremely hot gas and non-thermal emission, Astronomy & Astrophysics **491**(2008) 363–377 (arXiv:0805.0500)

[10] Piro, L. et al. : EDGE: Explorer of diffuse emission and gamma-ray burst explosions, Experimental Astronomy **23**(2009) 67–89 (arXiv:0707.4103)

[11] Naoki Seto, Atsushi Taruya: "Polarization analysis of gravitational-wave backgrounds from the correlation signals of ground-based interferometers: Measuring a circular-polarization mode"; Phys. Rev. D **77** (2008) 103001

[12] Atsushi Taruya, Kazuya Koyama, Takahiko Matsubara: "Signature of primordial non-Gaussianity on the matter power spectrum"; Phys. Rev. D **78** (2008) 123534

[13] Atsushi Nishizawa, Atsushi Taruya, Kazuhiro Hayama, Seiji Kawamura, Masa-aki Sakagami:"Probing non-tensorial polarizations of stochastic gravitational-wave backgrounds with ground-based laser interferometers"; Phys. Rev. D (2009) in press.

[14] Hajime Kawahara, Erik D. Reese, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki and Yasushi Suto: "Extracting Galaxy Cluster Gas Inhomogeneity from X-Ray Surface Brightness: A Statistical Approach and Application to Abell 3667"; The Astrophysical Journal **687** (2008) 936

[15] Ryuichi Takahashi, Naoki Yoshida, Takahiko Matsubara, Naoshi Sugiyama, Issha Kayo, Takahiro Nishimichi, Akihito Shirata, Atsushi Taruya, Shun Saito, Kazuhiro Yahata & Yasushi Suto: "Simulations of Baryon Acoustic Oscillations I: Growth of Large-Scale Density Fluctuations"; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **389**(2008)1675

[16] Hidenori Nomura, Kazuhiro Yamamoto & Takahiro Nishimichi: "Damping of the baryon acoustic oscillations in the matter power spectrum as a probe of the growth factor"; Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **10**(2008)031

[17] Hidenori Nomura, Kazuhiro Yamamoto, Gert Huetsi & Takahiro Nishimichi: "Confronting the damping of the baryon acoustic oscillations with observation"; Physical Review D **79**(2009)063512

[18] Shun Saito, Masahiro Takada, & Atsushi Taruya: "Impact of massive neutrinos on nonlinear matter power spectrum"; Phys.Rev.Lett **100**, 191301 (2008)

[19] Kazunori Nakayama, Shun Saito, Yudai Suwa, & Jun'ichi Yokoyama: "Space-based gravitational-wave detectors can determine the thermal history of the early Universe"; Phys.Rev.D **77**, 124001 (2008)

[20] Kazunori Nakayama, Shun Saito, Yudai Suwa, & Jun'ichi Yokoyama: "Probing reheating temperature of the universe with gravitational wave background"; Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **06** (2008) 020

[21] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake and Katsuhiko Sato: "Special Relativistic Simulations of Magnetically Dominated Jets in Collapsing Massive Stars"; Astrophysical Journal **691** (2009) 1360

[22] Shunsaku Horiuchi, Yudai Suwa, Hajime Takami, Shin'ichiro Ando, and Katsuhiko Sato: "Nonthermal neutrinos from supernovae leaving a magnetar"; Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **391**, 1893 (2008)

[23] Shunsaku Horiuchi, John F. Beacom, and Eli Dwek: "The Diffuse Supernova Neutrino Background is detectable in Super-Kamiokande"; Physical Review D accepted in 2009

[24] Hajime Takami & Katsuhiko Sato: "Toward Unraveling the Structural Distribution of Ultra-high-energy Cosmic Ray Sources"; Astrophysical Journal **678** (2008) 606

[25] Hajime Takami & Katsuhiko Sato: "Distortion of Ultra-high-energy Sky by Galactic Magnetic Field"; Astrophysical Journal **681** (2008) 1279

[26] Hajime Takami & Katsuhiko Sato: "Implications to Sources of Ultra-high-energy Cosmic Rays from their Arrival Distribution"; Astroparticle Physics **30** (2009) 306

[27] Kohta Murase & Hajime Takami: "Implications to Ultra-high-energy Cosmic Rays for Transient Sources in the Auger Era"; Astrophysical Journal Letters **690** (2009) L14

[28] Hajime Takami, Kohta Murase, Shigehiro Nagataki & Katsuhiko Sato: "Cosmogenic Neutrinos as a Probe of the transition from Galactic to Extragalactic Cosmic Rays"; Astroparticle Physics **31** (2009) 201

[29] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, and Katsuhiko Sato: "Impact of Rotation on Neutrino Emission and Relic Neutrino Background from Population III Stars"; Astrophys. J., 690 913 (2009)

(会議抄録)

[30] Takeshi Kobayashi & Shinji Mukohyama: "Conformal Inflation, Modulated Reheating, and WMAP5"; Proceedings of The 18th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, in press

[31] Hajime Takami & Katsuhiko Sato: "Towards Unravelling the Structural Distribution of Ultra-high-energy Cosmic Ray Sources"; Journal of the Physical Society of Japan **78** (2009) 120

[32] Hajime Takami & Katsuhiko Sato: "Towards Unravelling the Structural Distribution of Ultra-high-energy Cosmic Ray Sources"; AIP Conference Proceedings, **1040** (2009) 211

(国内雑誌)

[33] 佐藤 勝彦:「宇宙の誕生と進化」; 応用物理 77 巻 8 号 (2008)

[34] 佐藤 勝彦:「宇宙物理の面白さ:多様な階層のからみ合い」; パリティ 2009 年 3 月号 61 頁

[35] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その三: 都会のネズミと田舎のネズミ"、東京大学出版会 UP **427** (2008) 5 月号, pp.36–40.

[36] 須藤 靖: "科学者からの手紙 第一回"、真夜中 **1**(2008) Early Summer, pp.106–107.

[37] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その四: ガリレオ・ガリレオ"、東京大学出版会 UP **431**(2008)9 月号, pp.42–47

[38] 須藤 靖: "理学の宝物 第 3 回 穴あきアルミ板から夜空のムコウを見る"、東京大学理学系研究科・理学部ニュース 2008 年 9 月号 40 巻 3 号, p.7.

[39] 須藤 靖: "アルミ板の穴が描いた立体宇宙地図"、星ナビ 2008 年 11 月号, pp.98–101

[40] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その五: レレレのシュレーヂンガー"、東京大学出版会 UP **434**(2008)12 月号, pp.24–31

[41] 須藤 靖: "宇宙の暗黒 問題"、SONY CX-PAL Semiconductor & Component News, Vol. 79, 2009 年 1 月号

[42] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その六: 一般二相対論"、東京大学出版会 UP **437**(2009)3 月号, pp.36–43

[43] 樽家篤史 :「宇宙の彼方の非線形性」; 岩波「科学」11 月号 2008 年, pp.1229–1233.

[44] 小林洸:「D ブレーン-超弦理論の高次元物体が描く世界像-(書評)」; 天文月報 2008 年 6 月号 pp.351

(学位論文)

[45] Shunji Matsuura:"Holographic Non-Local Operators" (博士論文)

[46] Shunsaku Horiuchi: "Neutrino Probes of Core-collapse Supernova Interiors" (博士論文)

[47] Hajime Kawahara: "Inhomogeneity in Intracluster Medium and Its Cosmological Implications " (博士論文)

[48] Hidetaka Sonoda: "Nuclear "pasta" structure in supernovae" (超新星内部に現れる原子核パスタ構造) (博士論文)

[49] Hajime Takami: "Investigation of the Sources of Ultra-high-energy Cosmic Rays with Numerical Simulations" (博士論文)

[50] Yu Arafuka: "Formation of Pulsar Planet Systems -Comparison with the Standard Scenario of Planetary Formation-" (修士論文)

(著書)

[51] 佐藤 勝彦:『眠れなくなる宇宙のはなし』; 宝島社、2008 年 7 月

[52] 佐藤 勝彦:『宇宙論入門』; 岩波新書 2008 年 11 月

[53] 須藤靖、田中深一郎、荒深遊、杉村美佳、東悠平 訳: "宇宙生物学入門 惑星・生命・文明の起源"、シュプリンガージャパン (2008 年 7 月), Peter Ulmschneider 著、Intelligent Life in the Universe, Springer 2006, 2nd edition)

[54] 須藤 靖: "解析力学・量子論" 東京大学出版会 (2008 年 9 月)

[55] 岩波書店編: "ブックガイド〈宇宙〉を読む" 岩波科学ライブラリー 152、岩波書店 (2008 年 11 月、第 9 章 須藤靖執筆)

[56] 文藝春秋編: "東大教師が新入生にすすめる本 2" 文春新書 688、文藝春秋 (2009 年 3 月、pp.174 ー 176 須藤靖執筆)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

・The 7th RESCEU International Symposium on Astroparticle Physics and Cosmology (Nov. 12-14, 2008, The University of Tokyo, Tokyo, Japan)

[57] Katsuhiko Sato: "From Supernovae to Inflation"

[58] Shunichiro Kinoshita: "Thermodynamic and dynamical stability of Freund-Rubin compactification"

[59] Takeshi Kobayashi: "Conformal Inflation,Modulated Reheating, and WMAP5"

[60] Shun Saito: "Prospects of neutrino masses through nonlinear power spectrum"

[61] Takahiro Nishimichi: "Modeling Nonlinear Evolution of Baryon Acoustic Oscillations: Convergence Regime of N-body Simulations and Analytic Models"

[62] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake & Katsuhiko Sato: "General conditions of MHD explosions"

[63] Hajime Takami, Takahiro Nishimichi, Kazuhiro Yahata & Katsuhiko Sato: "Cross-correlation between UHECR Arrival Distribution and Large-scale Structure"

[64] Yudai Suwa: "Gravitational wave emission from the central engine of gamma-ray bursts"

・The 18th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (Hiroshima, November 17-21, 2008)

[65] Shunichiro Kinoshita: “Thermodynamic and dynamical stability of Freund–Rubin compactification”

[66] Takeshi Kobayashi: ”Conformal Inflation, Modulated Reheating, and WMAP5”

・その他

[67] Shunichiro Kinoshita: “Stability of deformed Freund-Rubin compactification”; France–Japan Joint Workshop on the Early Universe (Nikko-Kirifuri Convention Hall, Nikko, Japan, May 14-16, 2008)

[68] Takeshi Kobayashi: ”Conformal Modulated Reheating”; France–Japan Joint Workshop on the Early Universe (Nikko-Kirifuri Convention Hall, Nikko, Japan, May 14-16, 2008)

[69] Atsushi Taruya: ”Accurate modeling for matter power spectrum and baryon acoustic oscillations”; Cosmology Near & Far: sciences with WFMOS (Hawaii, 5/19-21, 2009)

[70] Erik. D. Reese, Hajime Kawahara, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, & Yasushi Suto: ”A Statistical Approach to Galaxy Cluster Gas Inhomogeneity: Chandra Observations of Nearby Galaxy Clusters”; American Astronomical Society (January,2009, Long Beach, USA)

[71] Takahiro Nishimichi: ”Systematic effects on BAO measurements”; Cosmology Near and Far: Science with WFMOS (Waikoloa Beach Marriott, Hawaii, May 19-21 2008)

[72] Takahiro Nishimichi: ”Modeling Nonlinear Evolution of Baryon Acoustic Oscillations”; 3rd Biennial Leopoldina Conference on Dark Energy (Ludwig Maximilians University, Munich, Germany, Oct. 7-11 2008)

[73] Shun Saito, Masahiro Takada, & Atsushi Taruya: ”Impact of Massive Neutrinos on Nonlinear Clustering and Degeneracy with Dark Energy Parameter”; A Decade of Dark Energy (STScI, Baltimore, US, May 5, 2008)

[74] Shun Saito, Masahiro Takada, & Atsushi Taruya: ”Probing neutrino masses through nonlinear matter power spectrum with WFMOS survey”; Cosmology Near and Far: Science with WFMOS (Waikoloa Beach Marriott, Hawaii, May 19-21 2008)

[75] Shun Saito, Masahiro Takada, & Atsushi Taruya: ”Determining w & neutrino mass through nonlinear galaxy power spectrum”; 3rd Biennial Leopoldina Conference on Dark Energy (Ludwig Maximilians University, Munich, Germany, Oct. 7-11 2008)

[76] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake & Katsuhiko Sato: ”Magnetorotational collapses and jet formations”; Paris Asymmetric instabilities in stellar core collapse (Institut Henri Poincare, June 30-July 11, 2008)

[77] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake & Katsuhiko Sato: ”Magneto-rotational collapse of stellar cores and formation of magnetars and engines of GRBs”; 10th Asian-Pacific Regional IAU Meeting, (Kunming, Yunnan, P.R. China, August 3-6 2008)

[78] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake & Katsuhiko Sato: ”Magneto-rotational collapse of stellar cores and formation of magnetars and engines of GRBs”; 24th Texas Symp24th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, (Vancouver, Canada, December 8 - 12, 2008)

[79] Hajime Takami & Katsuhiko Sato: ”Theoretical Predictions of the positional correlation between the highest energy cosmic rays and nearby cosmic ray sources”; International Astroparticle Physics Symposium (5/6-8, 2008, Colorado school of Mines, USA)

[80] Hajime Takami, Takahiro Nishimichi, Kazuhiro Yahata & Katsuhiko Sato: ”Cross-correlation Between UHECR Arrival Distribution and nearby large-scale structure”; International School of Cosmic Ray Astrophysics (7/8, 2008, Erice school, Erice, Italy)

[81] Yudai Suwa: ”Gravitational Collapse of Very Massive Stars”; Asymmetric instabilities in stellar core collapse (Paris, France, July 2008)

[82] Yudai Suwa: ”Gravitational wave emission from the central engine of gamma-ray bursts”; 1st International LISA-DECIGO Workshop (Kanagawa, Japan, November 2008)

招待講演

[83] Yasushi Suto: ”Panel discussion: Cosmology near and far”; Cosmology Near and Far: Science with WFMOS (Hawaii, Kona, May 19–21, 2008)

[84] Yasushi Suto: ”Log-normal fluctuations in the intracluster medium and their impact on X-ray and SZ cluster observations”; the 3rd KIAS workshop on Cosmology and structure formation (Seoul, Korea, October 27-28, 2008)

[85] Yasushi Suto: ”From exoplants to astrobiology”: The 2nd Yonsei-Tokyo joint workshop on physics (Yonsei University, Seoul, Korea, October 30, 2008)

[86] Yasushi Suto: ”How to proceed next ? towards successful planning of HSC surveys” Japan-Princeton HSC collaboration meeting (NAOJ, Tokyo, January 17-20, 2009)

(国内会議)

一般講演

・RESCEU 研究会 (浅虫、2008 年 8 月)

[87] 木下俊一郎: 「Stability of Freund–Rubin compactification」

[88] 小林洸：「Conformal Inflation, ModulatedReheating, and WMAP5」

[89] 樽家篤史:「Signature of primordial non-Gaussianity on matter power spectrum」

[90] 河原創：「Log-normal distribution Model of density and temperature fracuation in cluster gas 」

[91] 西道啓博：「A study of nonlinear clustering and redshift-space distortion using N-body simulations」

[92] 斎藤俊：「Constraint on neutrino masses with nonlinear galaxy power spectrum」

[93] 滝脇知也：「超新星における磁場と不安定性の役割 」

[94] 諏訪雄大:「ガンマ線バースト中心エンジンと重力波」

・日本物理学会 2008 年秋季大会（山形大学、2008 年 9 月）

[95] 木下俊一郎: 「Freund–Rubin コンパクト化の熱力学的性質」

[96] 高見一、西道啓博、矢幡和浩、佐藤勝彦：「Cross-correlation between UHECR arrival distribution and large-scale structure」

[97] 諏訪 雄大、村瀬 孔大：「重力波で探るガンマ線バースト中心エンジン」

・日本天文学会 2008 年秋季大会（岡山理科大学、2008 年 9 月）

[98] 樽家篤史：「バリオン音響振動の非線形進化：高次補正の影響」

[99] 河原創：「X 線輝度分布を用いた銀河団ガス内不均一性の探索」

[100] 西道 啓博、樽家 篤史、須藤 靖：「N 体シミュレーションに基づいた赤方偏移歪みのモデリング」

[101] 斎藤俊、高田昌広、樽家篤史：「物質ゆらぎの非線形パワースペクトルに対する有質量ニュートリノの効果 II」

[102] 滝脇知也：「磁場によるジェット放出のための一般的条件」

[103] 高見一、井上進、山本常夏、佐藤勝彦：「活動銀河核寿命からの最高エネルギー宇宙線ソースへの示唆」

[104] 諏訪 雄大、滝脇 知也、固武 慶、佐藤 勝彦、藤本 信一郎、橋本 正章：「磁気駆動型超新星爆発における元素合成」

・日本物理学会 2009 年春季大会（立教大学、2008 年 3 月）

[105] 小林洸, 向山信治：「Inflation from Rapid-Rolling D-Branes」

[106] 樽家篤史：「赤方偏移空間におけるバリオン音響振動の非線形進化」

[107] 斎藤俊、高田昌広、樽家篤史：「銀河の非線形パワースペクトルによるニュートリノ質量の制限」

・日本天文学会 2009 年春季大会（大阪府立大学、2008 年 3 月）

[108] 樽家篤史：「修正重力理論における質量パワースペクトルの非線形進化」

[109] 西道啓博、樽家篤史、斎藤俊、須藤靖：「赤方偏移空間におけるバリオン音響振動の非線形進化」

[110] 平野照幸、須藤靖、樽家篤史、成田憲保、佐藤文衛：「ロシター効果による視線速度変動の摂動公式に対する精度検証」

[111] 藤井友香、須藤靖、樽家篤史、福田悟、中島映至、E.L.Turner：「地球型惑星の反射光の時間変動とバイオマーカー」

[112] 堀内俊作:「The Diffuse Supernova Neutrino Background is detectable at Super-Kamiokande」

[113] 諏訪 雄大：「降着円盤による非熱的ニュートリノ生成とガンマ線バースト中心エンジン」

・その他

[114] 佐藤勝彦：「宇宙論の現状と展望」; 東京工業大学物理教室談話会（東京工業大学、2008 年 7 月 18 日)

[115] 佐藤勝彦:「アインシュタインの相対論と宇宙論」; アインシュタイン LOVE 鹿児島展（鹿児島大学、2008 年 8 月 23 日)

[116] 佐藤勝彦：「宇宙の誕生と未来」; 日本物理学会秋季大会　市民講演会（山形県生涯学習文化財団遊学館ホール、2008 年 9 月 20 日）

[117] 佐藤勝彦：「宇宙はこうして始まった」; 愛媛大学宇宙進化研究センター講演会（愛媛大学グリーンホール、2009 年 1 月 10 日)

[118] 佐藤勝彦：「宇宙は無数にあるか？マルチバースと人間原理」; 日本学術会議サイエンスカッフェ（文部科学省情報広場、2009 年 1 月 23 日）

[119] 佐藤勝彦：「21 世紀 COE「極限量子系とその対称性」の成果」; G-COE キックオフミーティング （東京大学安田講堂、2009 年 1 月 24 日）

[120] 佐藤勝彦：「宇宙の始まりとは?宇宙の果てとは？」; （小牧市まなび創造館あさひホール、2009 年 2 月 7 日）

[121] 佐藤勝彦：「宇宙の誕生とインフレーション理論」; 多摩六都科学館サイエンスカフェ「宇宙」（多摩六都科学館、2009 年 2 月 21 日）

[122] 須藤 靖: 「見えない宇宙をみる：宇宙の組成とダークエネルギー」; 第 13 回東京大学理学部公開講演会『理学研究のフロンティア』(東京大学駒場キャンパス、2008 年 5 月 10 日）

[123] 須藤 靖: 「WFMOS」; 日本学術会議シンポジウム『第二回　天文学・宇宙物理学の展望　－長期計画の策定に向けて－』(東京大学小柴ホール、2008 年 5 月 31 日)

[124] 須藤 靖: 「夜空の向こうの物理学」; 土佐塾高校ワンデイセミナー (土佐塾高校、2008 年 6 月 14 日)

[125] 須藤 靖: 「宇宙は何からできている？」; ビッグバン宇宙国際研究センター　第 3 回公開講演会「暗黒エネルギーと宇宙の未来」(東京大学、2008 年 7 月 31 日）

[126] 須藤 靖: 「見えない≠存在しない」; 第６回自然科学研究機構シンポジウム「宇宙究極の謎： 暗黒物質、暗黒エネルギー、暗黒時代」(東京国際フォーラム、2008 年 9 月 23 日)

[127] 須藤 靖: 「夜空のムコウを探る」; 広島大学物理学科セミナー (広島大学、2008 年 9 月 30 日)

[128] 須藤 靖: 「見えなくともそこにあるもの」; 相馬高校 SSH 講演会 (代々木オリンピックセンター、2008 年 10 月 1 日)

[129] 樽家篤史:「非線形構造進化について」; 構造形成研究会その２（東大本郷、2008 年 6 月 12 日）

[130] 樽家篤史:「東京大学活動報告」;「広視野深宇宙探査によるダークエネルギーの研究」第３回研究会（国立天文台、2009 年 3 月 18 日）

[131] 西道 啓博:「N 体シミュレーションに基づくバリオン音響振動の精密モデリング」; 第 21 回理論懇シンポジウム（国立天文台、2008 年 12 月 15 日）

[132] 西道 啓博:「N 体シミュレーションを用いたバリオン音響振動の精密なモデリング」; 特定領域研究「公視野深宇宙探査によるダークエネルギーの研究」第３回研究会（国立天文台、2009 年 3 月 19 日）

[133] 斎藤俊:「銀河の非線形パワースペクトルを用いたニュートリノ質量の制限」; 第 21 回理論懇シンポジウム（国立天文台、2008 年 12 月 15 日）

[134] 斎藤俊:「Cross correlation study: CMB lensing」; 特定領域研究「公視野深宇宙探査によるダークエネルギーの研究」第３回研究会（国立天文台、2009 年 3 月 19 日）

[135] 滝脇知也:「General conditions of MHD explosions」;「ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙」第二回領域シンポジウム, （国立天文台, 2008 年 11 月 29 日）

[136] 滝脇知也:「MHD explosions at stellar core-collapses」: 重力崩壊型超新星と高エネルギー天文学, （東京大学, 2009 年 2 月 2-4 日）

[137] 堀内俊作:「非熱的ニュートリノで探る星の強磁場」; 第２１回理論懇シンポジウム （国立天文台、2008 年 12 月 15-17 日）

[138] 堀内俊作:「The Diffuse Supernova Neutrino Background is Detectable in SK」; 重力崩壊型超新星と高エネルギー天文学（東京大学、2009 年 2 月 2-4 日）

[139] 高見一、佐藤勝彦:「Implications to the Sources of Ultra-high-energy Cosmic Rays」; 第 21 回理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム（国立天文台、2008 年 12 月 17 日）

[140] 諏訪 雄大:「初代星からのニュートリノ、重力波とその観測から分かること」; 初代星・銀河形成研究会（甲南大学、2008 年 9 月 9 日）

[141] 諏訪 雄大:「重力波で探る GRB 中心エンジン」;「ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙」第２回領域シンポジウム（国立天文台、2008 年 11 月 29 日）

[142] 諏訪 雄大:「重力波で探るガンマ線バースト中心エンジン」; 第 21 回理論懇シンポジウム 「理論天文学の将来」（国立天文台、2008 年 12 月 15 日）

[143] 諏訪 雄大:「Nonthermal neutrino production by bulk motion and implication to collapsar」; 重力崩壊型超新星と高エネルギー天文学 （東京大学、2009 年 2 月 3 日）

招待講演

[144] 佐藤勝彦:「超新星爆発と原子核のパスタ構造」; 茅コンファレンス（秋葉原、2008 年 6 月 9 日）

[145] 佐藤勝彦:「超新星爆発と r プロセス元素合成」; 日本物理学会秋季大会　超新星爆発と r?プロセス　宇宙線・宇宙物理領域シンポジウム（山形大学、2008 年 9 月 20 日）

[146] 佐藤勝彦:「基調講演　素粒子・原子核・天文宇宙シミュレーションにかける期待」; シンポジウム「大規模計算が切り拓く基礎科学の将来」（つくば国際会議場、2009 年 2 月 23 日)

[147] 須藤 靖: 「系外惑星：観測 ートランジット惑星とロシター効果ー」; 京都太陽系研究会 (京都大学基礎物理学研究所、2008 年 4 月 7 日)

[148] 須藤 靖: 「WFMOS で期待されるサイエンス（ダークエネルギー編）」; 2008 年度 光学赤外線天文連絡会 シンポジウム地上大型望遠鏡計画：2020 年のための決心 (国立天文台、2008 年 8 月 22 日)

[149] 須藤 靖: 「系外惑星から宇宙生物学へ」; アストロバイオロジーワークショップ (湘南国際村、2008 年 12 月 20 日)

[150] 須藤 靖: 「WFMOS に至る経緯と期待されるサイエンスの概観」; 2008 年度 すばるユーザーズミーティング (国立天文台、2009 年 1 月 14 日)

[151] 樽家篤史:「宇宙構造形成の理論研究の新たな展開」日本物理学会 招待講演 (山形大学、2008 年 10 月 20 日)

[152] 樽家篤史:「Baryon acoustic oscillations」; すばるユーザーズミーティング（国立天文台、2009 年 1 月 14 日）

[153] 西道 啓博: 「構造形成の N 体計算について」; 研究会「宇宙構造形成の理論研究とその進展 その 2」（東京大学、2008 年 6 月 12 日）

[154] 高見一:「最高エネルギー宇宙線の伝搬」; 超高エネルギー宇宙線とハドロン構造 2008（高エネルギー加速器研究機構、2008 年 4 月 26 日）

(セミナー)

[155] 木下俊一郎: 「Stability of flux compactifications and de Sitter thermodynamics」; 国立天文台（2008 年 5 月 21 日）

[156] 樽家篤史:「宇宙大規模構造に関する話題：精密宇宙論の裏事情」; 東京大学駒場、コロキウム（2008 年 5 月 1 日）

[157] 樽家篤史:「大規模構造の非線形重力進化と精密宇宙論」; 立教大学、Joint seminar on cosmology & graviation （2008 年 9 月 30 日）

[158] 樽家篤史:「Baryon Acoustic Oscillations and Future Galaxy Surveys 」; 高エネルギー加速器研究機構、理論セミナー（2008 年 10 月 7 日）

[159] Atsushi Taruya：”Perturbation Theory of Large-scale Structure and Future Galaxy Surveys”；seminar at Institute for Cosmology and Gravitation、University of Portsmouth (2008 年 10 月 16 日)

[160] Atsushi Taruya：”Accurate Modeling for Power Spectrum and Baryon Acoustic Oscillations”；coffee talk at Royal Observatory of Edinburgh、University of Edinburgh (2008 年 10 月 23 日)

[161] Takahiro Nishimichi：「Modeling Nonlinear Evolution of Baryon Acoustic Oscillations」; ICG, University of Portsmouth（Oct. 15 2008）

[162] Shun Saito: ”Forecast of constraint on neutrino masses through nonlinear galaxy power spectrum”; Coffee seminar (Royal Observatory Edinburgh, UK , Oct 24, 2008)

[163] Shun Saito: ”Recent progress of nonlinear matter P(k) & impact of massive neutrinos on nonlinear galaxy P(k)” Cosmology seminar (University College London, UK, Oct 30, 2008)

[164] 滝脇知也：「大質量星の重力崩壊時における磁場によるジェット生成 」; 早稲田大学（2008 年 5 月 16 日）

[165] Shunsaku Horiuchi: ”Star Formation History and the Neutrino Background”; The Ohio State University (2009 Sept 25th)

[166] 堀内俊作：「ニュートリノで探る大質量星の最期」; 立教大学（2008 年 10 月 28 日）

[167] 高見一、村瀬孔大、長滝重博、佐藤勝彦：「最高エネルギー宇宙線到来方向分布からその起源に迫る」; 京都大学基礎物理学研究所（2008 年 4 月 17 日）

[168] 高見一、村瀬孔大、長滝重博、佐藤勝彦：「最高エネルギー宇宙線の起源の解明に向けて」; 国立天文台（2008 年 6 月 18 日）

[169] 高見一、村瀬孔大、長滝重博、佐藤勝彦：「荷電粒子天文学の開拓」; 広島大学セミナー （2008 年 7 月 1 日）

[170] 高見一、村瀬孔大、西道啓博、矢幡和浩、長滝重博、佐藤勝彦：「Bottom-up Approaches to the Origin of the Ultra-high-energy Cosmic Rays」; 早稲田大学（2008 年 10 月 24 日）

[171] 高見一、村瀬孔大、西道啓博、矢幡和浩、長滝重博、佐藤勝彦：「Implications to the origin of ultra-high-energy cosmic rays」; 東京大学宇宙線研究所（2008 年 11 月 28 日）

[172] Yudai Suwa：「Gravitatoinal Collapse of Very Massive Stellar Core: Neutrino and Gravitational Wave Emissions」; University of Basel（2008 年 7 月 22 日）

[173] 諏訪 雄大：「第一世代星の重力崩壊とニュートリノ、重力波放射」; 京都大学（2008 年 10 月 8 日）

[174] 諏訪 雄大：「第一世代星からのニュートリノ、重力波とその観測から分かること」; 早稲田大学（2008 年 12 月 5 日）

(集中講義)

[175] 須藤 靖: 「宇宙の始まりと終わり」; 東京大学理学クラスター講義「進化」(東京大学小柴ホール、2008 年 7 月 24 日)

[176] 須藤 靖: 「太陽系外惑星から宇宙生物学へ」; 広島大学理学部物理学科集中講義 (広島大学、2008 年 9 月 30 日、10 月 1 日)

[177] 須藤 靖: 「物理学的世界観: 第 1 回　物理屋の偏見、 夜空のムコウ、第 2 回 物質の起源と宇宙の歴史、宇宙の組成、第 3 回 自然法則と人間原理、 世界を科学で俯瞰する」; 2008 年度 東京大学学術俯瞰講義『137 億年の物質の旅 -ビッグバンからみどりの地球へ-』(東京大学駒場 18 号館ホール、2008 年 10 月 8 日、15 日、22 日)

5.2 村尾研究室

本研究室では、物理学の中でも最も新しい研究分野の一つである量子情報の理論的研究を行っている。量子情報とは、0 と 1 からなる 2 進数の「ビット」を基本単位とするような古典力学的な状態で表される従来の情報（古典的情報）に対して、0 と 1 のみならず 0 と 1 の任意の重ね合わせ状態を取ることができるような量子力学的な状態で表される情報を指し、量子 2 準位系の状態で記述される「量子ビット (qubit)」を基本単位とする。量子情報を用いると古典情報とはクラスの違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。

量子情報に関する研究は 1990 年代から大きく発展してきたが、この背景には、ナノテクノロジーに代表されるような科学技術の発展によって，量子力学で記述されるようなミクロスコピックな世界を実際に制御・操作することが可能となってきた、という事実がある。つまり、我々の「器用さ」が全く新しい段階に進歩し，受動的のみならず能動的に「アクセス」できる自然界の範囲が，古典力学で記述される世界から，量子力学で記述される世界へと広がってきたことを示している。従来のテクノロジーでは，量子力学で記述されるような世界とのやりとりは，マクロスコピックな制御変数の操作や，統計的に平均化された物理量の観測を通じて行うことしかできなかっ

たため，古典力学で記述される世界にはないような量子的な世界の持つ全ポテンシャルを自由に「利用する」ことはできなかった．量子の世界を同じ量子スケールで直接扱うことが可能となってきて初めて，我々は，量子の世界の持つ全ポテンシャルを，利用可能な「資源」として手にいれたことになる．

そこで本研究室では、情報と情報処理という新しい観点から自然の基本法則である量子力学への理解を深め、量子力学特有の「資源」を活用した新たな情報処理システムの提案を行うことを目的として、「資源」として多体系や多準位系におけるエンタングルメント（量子もつれ）や非局所性に注目して研究を進めている。

エンタングルメントとは，複数の部分系からなる量子系において，個々の部分系状態の積では表されないような「分離不可能 (inseparable) な状態」」(例えばスピン１／２系のような量子２準位系における singlet 状態 $(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)/\sqrt{2}$) に現れる，距離を越えて瞬時に働く相関（非局所的相関）である．エンタングルメントを持つ状態（エンタングル状態）では，非局所的相関の作用により，一方の部分系の状態を観測などにより変化させると，もう一方の部分系の状態が自動的に他方の観測結果に応じた状態に瞬時に変化する．この非局所的相関は，ある時点で部分系間に相互作用が存在していたことによって生じるが，一度相関ができてしまえば，エンタングル状態を保持する限り部分系間の距離には関係なく「作用」する．エンタングルメント（のドイツ名）がシュレディンガーによって命名されたことからわかるように、エンタングルメントの存在は量子力学の創生期から量子系特有の性質として知られており、その非局所性に関してはアインシュタインらが EPR パラドックスに関する論文を提出し、量子力学を「攻撃」する材料ともなったという歴史的いきさつがある。

現在では、エンタングルメントの存在は実験で確認されており、古典力学には存在しない量子力学の本質的な資源として、量子計算の優位さや量子通信の安全性に関連していると考えられている。しかしながら、多体系や混合状態においてエンタングルメントを評価することは、一般的には計算量的に難しい問題であることが示されており、エンタングルメントの性質に関しては依然未解明な点が多い。また、エンタングルメントが存在せずとも非局所的な性質を持つ量子情報タスクの存在が発見されたり、エンタングルした状態を作るような量子計算の中には古典的にシミュレーション可能であるものが存在することが指摘されるなど、単純にエンタングルメントの存在のみが量子情報処理の優位性が特徴づけているとは言えないことも明らかになっており、量子情報処理の本質を理解するために、より多角的な視点からの研究が望まれている。

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 (JICA 青年海外協力隊でエチオピアに赴任のため休学中)、修士課程大学院生である坂下理沙氏、杉山太香典氏、染谷将人氏のメンバーで、エンタングルメント理論、量子参照座標系、量子トモグラフィ、量子計算プロトコルに関する研究を行い、多角的な視点から量子情報処理の性質を解析した。

5.2.1 エンタングルメント理論

多量子ビット対称系における多体エンタングルメント

置換対称性を持つ多量子ビット系の多体エンタングルメントを、球面上の離散的な点の配置である Majorana 表現を用いて、幾何学的な観点から解析する手法を提案した。そして、多体エンタングルメント量 (幾何学的測度) を求める問題と、他の球面上の離散的な点の配置に関する最適値問題である、Tòth 問題、Thompson 問題などと比較することによって、置換対称性を持つ３量子ビットから１１量子ビットまでの最大エンタングル状態の候補となる状態を見つけることに成功した。この研究は、英国 Leeds 大学の Martin Aulbach 氏、フランス TELECOM ParisTech の Damian Markham 博士との共同研究である。[担当：村尾]

２体ユニタリ操作の非局所性

中規模な量子系を用いて有効な量子情報処理を行うためのシステム探索を目標とした。まず、２つの入力用量子ビットとある資源状態から構成される中規模量子系を考え、この資源状態を用いて局所化された入力用量子ビットの情報を非局所化するプロトコルを分析した。ここでは資源状態をベル状態が０個、１個、また２個用意されている場合を想定した。そして、それぞれの場合において与えられた資源状態によってどの２体ユニタリ操作が局所操作及び古典通信（ＬＯＣＣ）によって実装可能かを解析した。次に、その資源状態によって実装可能な２体ユニタリ操作によってどれだけ情報を非局所化できるかを求めた。また、これにより量子情報処理の２体ユニタリ操作の非局所性を定義できるようになった。[担当： 添田、Turner、村尾]

多体エンタングルメント熱頑強性の評価

有限温度での量子相転移と多体エンタングルメントとの関連を理解するため、基底状態の多体エンタングルメントの幾何学的測度を用いて、熱平衡状態においてエンタングルメントを持つことが保証される限界温度を定義し、横磁場中の一次元 XY モデルの解析を行った。その結果、横磁場中の一次元 XY モデルには、基底状態のエンタングルメント量は大きいが熱に弱い状態や、反対に基底状態のエンタングルメント量は小さいが熱によって壊れにくい状態があることが示された。エンタングルメントを量子情報処理の資源として用いる際には、このような熱耐性に関する性質も重要な因子となる。この研究は、フランス TELECOM ParisTech の Damian Markham 博士

との共同研究である。なお担当の中田は、JICA 青年海外協力隊でエチオピアに赴任しているため休学中ではあるが、電子メールを通じて村尾・Markham 博士との議論を行い研究を進めた。[担当： 中田、村尾]

5.2.2 量子参照座標系

群論を用いた量子参照座標系の解析

量子参照座標系は、量子測定を記述する際の参照系として用いられる量子系であり、量子情報理論における定量化可能な資源である。量子参照座標系が無限系であるならば、古典参照座標系が与えられることになるが、量子参照座標系が有限しか与えられていない、という実際的な状況において、量子計算や量子通信にどのような制限が加わるかということを考察した。まず、U(1) と SU(2) の有限次元の量子参照座標系を用いて量子情報の符号化と復号化を行う場合について表現論を用いた解析を行い、参照座標系の次元の有限性がデコヒーレンス通信路の働きをすることを示した。次に、時間反転対称性と関連した量子参照座標系の反ユニタリー表現における資源の解析を行い、エンタングルメント資源の場合との類似点と相違点の双方を発見した。この研究は、オーストラリア Sydney 大学の S. Bartlett 博士、カナダ Calgary 大学の G. Gour 教授と B. Sanders 教授、英国 Imperial College の T. Rudolph 博士、カナダ Perimeter Institute の R. Skeppens 博士との共同研究である。[担当: Turner]

古典参照座標系を共有しない二者間通信における量子資源解析

二者間における量子力学的な状態を用いた古典情報通信において、送信者と受信者の用いる座標系がいつも完全に一致しているとは限らない。このように古典的な座標を共有せず、かつ座標情報を送ることができるような古典通信チャネルを用いることができない場合に、量子チャネルのみを利用して古典情報を通信する状況を考える。このとき、1 ビット情報を 1 量子ビットの量子系に符号化して送信し、受信者がその 1 量子ビットを測定して複合化を求める場合、座標系の情報がまったく不明であれば、情報を正しく通信することができない。しかし、量子ビット資源を付け加えてエンタングルさせた量子状態を用いた古典情報の符号化と、エンタングルした状態への射影測定などの大局的な測定を用いた復号化を行えば、情報を正しく通信することができることが知られている。これらの符号化・復号化におけるエンタングルメントの役割を解析するために、符号化過程でエンタングルメントを用いずに量子参照座標系を使う場合において、量子参照座標系の資源の有無および、復号化過程での測定におけるエンタングルメント資源の効用を、大局的最適測定と LOCC(局所演算と古典通信）を用いた場合について解析し、通信のクオリティーとのトレードオフの関係を見いだした。[担当者：坂下、Turner、村尾]

5.2.3 量子トモグラフィ

量子トモグラフィにおける操作的な識別不可能性

量子トモグラフィは、実験データから推定される量子的演算子を再構築することであり、群論の応用が有効である分野となっている。我々は量子光学実験で得られる多粒子状態の密度行列を再構築するための量子状態トモグラフィにおいて、原理的には識別可能であるが、実験の精度によって識別不可能となってしまっている自由度が存在する場合に現れる影響について定式化を行った。トモグラフィを行うために必要な情報的に完全な基底は t-design という数学の問題とも関連しており、今後は、量子測定トモグラフィへと拡張を行う予定である。この研究は、カナダ Perimeter Institute の R. Blume-Kohout 博士、カナダ Toronto 大学の A. Steinberg 教授との共同研究である。[担当: 杉山、Turner、村尾]

量子測定トモグラフィにおける最尤推定再構成法とベイズ再構成法

一般に量子測定では測定値は確率的に得られ、測定によって被測定量子系の状態は変化する。測定装置の量子系への作用を記述する数学的枠組みとして、測定値の確率分布を記述する正作用素値測度（Positive Operator-Valued Measure、以下 POVM と略記する）と、測定値の確率分布及び測定に伴う被測定系の状態変化を記述するインスツルメントがある。与えられた測定装置を記述する POVM やインスツルメントが未知のときに、これを実験的に求める手法を量子測定トモグラフィという。トモグラフィの対象が POVM の場合には POVM トモグラフィ、インスツルメントの場合にはインスツルメントトモグラフィという。我々は、POVM トモグラフィにおけるベイズ再構成法と、インスツルメントトモグラフィにおける最尤推定再構成法・ベイズ再構成法を研究している。これらの手法は既存の再構成法では扱えない問題に有用なのではないかと期待している。[担当: 杉山、Turner、村尾]

5.2.4 量子計算プロトコル

権限付き量子計算

コピー不可能な量子鍵を与えられた権限を有するユーザーのみが、暗号化・難読化をほどこされて公開された量子ゲート列情報を実行することで、認証されたプログラマによって作られたユニタリ変換を実行できる、という権限付き量子計算の概念を提案した。この権限付き量子計算では、公開された量子

ゲート列の情報から量子鍵を偽造することが、量子計算機を用いても多項式時間では不可能であることが要求される。我々は、権限付き量子計算の安全性は公開された量子ゲート列の分解問題に基づいており、十分にランダムな量子ゲートシャッフリングアルゴリズムの存在という仮定の下で、量子鍵の偽造プロセスを非恒等演算子正確照合問題という NQP (Non-deterministic quantum polynomial) クラスに属する問題に帰着させることで、その計算量的複雑性が複雑性クラス NQP 困難となり得ることを示した。NQP は計算量クラス NP の量子版ともいうべきものであり、量子公開鍵暗号系への発展可能性を切り開いた。この研究は、ソニー情報技術研究所の田中雄氏との共同研究である。[担当： 村尾]

測定ベース量子計算における pattern 変換アルゴリズム

測定ベース量子計算では、資源として用いるグラフ状態の基になるグラフと、各量子ビットに対する測定角度の組み合わせによって実現されるユニタリ演算が決定される。(ここで、グラフ状態とは、元になるグラフの辺で結ばれたグラフの各頂点に置かれた量子ビット間に、制御 σ_z 演算を作用させることで得られる状態のことである。) このグラフと測定角度の組み合わせのことを pattern と呼ぶ。 異なる pattern が同じユニタリ変換を実現するための必要十分条件の式は知られているが、実現されるユニタリ演算を求めなくてはいけないという難点がある。そこで本研究では、実現されるユニタリ演算を求めなくとも、異なる pattern が同じユニタリ演算を実現すると判定できる必要条件を研究している。さらに、上記の議論を制御ユニタリに限定して深めることを見据え、与えられた pattern から、そのユニタリ演算を制御下したものに対応する pattern を求めるアルゴリズムを研究している。この研究は、英国 Edinburgh 大学の Elham Kashefi 博士、フランス Grenoble 大学の Mehdi Mhalla 博士との共同研究である。[担当：染谷、Turner、村尾]

＜報文＞

(原著論文)

[1] Yoshiko Ogata and Mio Murao, *Remote extraction and destruction of spread qubit information*, Phys. Rev. A **77**, 062340 (2008)

[2] Yoshifumi Nakata, Damian Markham, and Mio Murao, *Thermal enhancement of entanglement sensitivity to the phase diagram in XY model*, Int. J. Quantum Information **6**, 751-757 (2008)

[3] R. B. A. Adamson, P. S Turner, M. W. Mitchell, A. M. Steinberg, *Detecting hidden differences via permutation symmetries*, Phys. Rev. A. **78**, 033832 (2008)

[4] Z. Shaterzadeh Yazdi, P. S. Turner, B. C. Sanders, *SU(1,1) symmetry of multimode squeezed states*, J. Phys. A: Math. Theor. **41**, 055309 (2008)

[5] Yoshifumi Nakata, Damian Markham, and Mio Murao, *Thermal robustness of multipartite entanglement of the 1-D spin 1/2 XY model*, Phys. Rev. A **79**, 042313 (2009)

[6] Yu Tanaka and Mio Murao, *Authorized quantum computation*, arXiv:0903.2088 (quant-ph)

[7] S. D. Bartlett, T. Rudolph, R. W. Spekkens, P. S. Turner, *Quantum communication using a bounded-size quantum reference frame*, arXiv:0812.5040 (quant-ph)

[8] G. Gour, B. C. Sanders, R. W. Spekkens, P. S. Turner, *Overcoming time reversal superselection: reference frames and resources*, arXiv:0811.3980 (quant-ph)

(学位論文)

[9] 坂下理紗,*Investigation of reference-frame-free communication with quantum spins*, 修士論文

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[10] Peter Turner, *Hidden degrees of freedom, distinguishability, and quantum reference frames*, PI Quantum Discussions series, Perimeter Institute, Waterloo (Canada), April 2008

[11] Mio Murao and Yu Tanaka, *Authorized Quantum Computation*, QICS Workshop on Foundational Structures for Quantum Information and Computation, 2008, Obergurgl (Austria), September 2008

[12] Yu Tanaka and Mio Murao, *Authorized Quantum Computation*, JST-CNRS Workshop on Quantum Computation: Theory and Feasibility, Paris (France), September 2008

[13] 添田彬仁、マーカム・ダミアン、村尾美緒, *Reversible Transformation Induced by Measurement Operation*, International Symposium on Physics of Quantum Technology, 2008, Nara (Japan), November 2008

[14] Peter Turner and Robin Blume-Kohout, *Continuous variable 2-designs for quantum tomography*, International Symposium on Physics of Quantum Technology, page128, Nara (Japan), November 2008

[15] Mio Murao and Yu Tanaka, *Authorized Quantum Computation: Theory and Feasibility*, Japan-France Day of Quantum Seminars 2009, March 2009

招待講演

[16] Peter Turner, *Continuous variable 2-designs*, Quantum Estimation: Theory and Practice workshop, Perimeter Institute, Waterloo (Canada), August 2008

[17] Mio Murao Martin Aulbach, Seiji Miyashita and Damian Markham, *The maximally entangled multipartite states in terms of the geometric measure*, Dynamics and Manipulation of Quantum Systems, Tokyo (Japan), October 2008

[18] Mio Murao and Yu Tanaka, *Authorized Quantum Computation*, International Symposium on Physics of Quantum Technology, page20-22, Nara (Japan), November 2008

(国内会議)

一般講演

[19] Peter Turner, *Effective decoherence from bounded quantum reference frames*, QuLink seminar, University of Tokyo, Tokyo (Japan), May 2008

[20] Peter Turner, *Overcoming time reversal superselection*, Quantum Computation and Information (QCI) seminar, ERATO-SORST, Tokyo (Japan), November 2008

招待講演

[21] Peter Turner, *Continuous variable 2-designs*, GSIS workshop on quantum information theory, Tohoku University, Sendai (Japan), November 2008

[22] Mio Murao, Yoshifumi Nakata and Damian Markham, *Thermal robstness of multipartite entanglement of the 1-D spin 1/2 XY model*, 特定領域「情報統計力学の深化と展開」DEX-SMI 2008 研究成果発表会, page69-71, Sapporo (Japan), December 2008

5.3 上田研究室

当研究室では冷却原子気体の理論および量子情報の研究を行っている。前者では、ボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) やフェルミ超流動に関する研究を行っている。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うべき分野の開拓を行っている。

5.3.1 スピノル BEC におけるノット励起

スピノル BEC、すなわちスピン内部自由度を持った BEC は、秩序変数の自由度が大きいために多様なトポロジカル構造を研究することが可能であり、これまでに渦、モノポール、スカーミオンといったトポロジカル励起の研究がなされてきた。これらの励起が巻き付き数 (winding number) で分類されるのに対し、我々は絡み数 (linking number) で分類される新しいトポロジカル励起がスピン 1 ポーラー相の BEC で生成・観測が可能であることを見出した [4]。このような励起はノット (結び目) と呼ばれ、量子色力学における低エネルギー励起として存在することが知られているが [L. Faddeev and A. J. Niemi, Nature **387**, 58 (1997)]、具体的な観測には未だ至っていない。

ポーラー相はスピン空間で一軸対称性を持ち、対称軸の方向を表す 3 次元単位ベクトル $\mathbf{n}$ で秩序変数を記述することができる。3 次元空間において無限遠で $\mathbf{n}$ が一方向に揃うようなスピンテクスチャは、実空間 S^3 から秩序変数空間 S^2 への写像 (Hopf 写像) に対応し、ホモトピー $\pi_3(S^2) = Z$ で分類される。注目すべき点は、実空間 S^3 が秩序変数空間 S^2 よりも次元が一つ大きい点で、このために $\mathbf{n}$ がある一方向を向いた点を抜き出すと、実空間でリング状に分布する。テクスチャを特徴づける Hopf 不変量は、このようなリングの絡み数に対応することが知られており、具体的に図 5.3.1 に示すテクスチャの場合、(b) に示すような絡み数 1 のリンクが生じている。

本研究では、原子気体の実験で常用される四重極磁場を用いることで、動的にノット励起を生成できることを指摘し、Stern-Gerlach 実験によってノットの存在を検出可能であることを示した。また、ノットはトポロジカルに安定な構造であるが、エネルギー的には有限の寿命を持ち、ポーラー相を壊して秩序変数空間を変えることによって崩壊する過程が存在することがわかった。

この研究は Physical Review Letter 誌 100 巻 18 号の表紙に掲載された [4]。

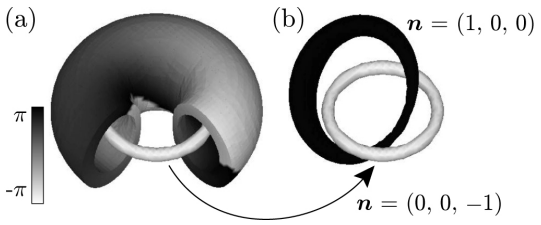

図 5.3.1: スピノル BEC におけるノット (a) Hopf 不変量 1 の $\mathbf{n}$ テクスチャー。無限遠で $\mathbf{n}_\infty = \hat{z}$ とすると、$\mathbf{n} \perp \hat{z}$ となる点がトーラス状に存在する。トーラス面上の色は $\arg(n_x + in_y)$ を示す。トーラスの内部には $\mathbf{n} = -\mathbf{n}_\infty$ となるコアが存在する。(b) $\mathbf{n} = -\hat{z}$ (白線) と $\mathbf{n} = \hat{x}$ (黒線) の逆像を取り出すと絡み数 1 の結び目を構成している。

5.3.2 スピン自由度を持った異核フェルミ超流動

異なる 2 種類の原子間に引力が働きクーパー対を形成するようなフェルミ超流動を考える。このとき、一方の原子はスピン $s_1 = 1/2$、もう一方は半整数スピン s_2 を持つとすると、クーパー対の持つ全スピンは $S = s_2 \pm 1/2$ の 2 通りが可能で、どちらのクーパー対が実現するかはスピン依存した原子間相互作用の

強さで決まる。我々は $S \neq 0$ のクーパー対が形成される場合に、ギャップ方程式を解いてその自由エネルギーを比較することによって、基底状態となるスピン内部状態を求めた。その結果、Ginzburg-Landau 自由エネルギーがスピノル BEC と同じ表式で書け、弱結合近似の範囲では内部状態によらず局所磁化を持たない相が安定になることがわかった。つまり、$S = 1$ の場合はスピノル BEC におけるポーラー相、$S = 2$ の場合はポーラー相とサイクリック相が縮退して安定となる。スピン 1 のポーラー BEC における多体の基底状態は 2 つのボース粒子のスピンシングレット対の凝縮であることを考えると、本研究の結果はフェルミ粒子 4 つのカルテット状態が安定となることを示唆している [5]。

5.3.3 ダイポール BEC の d 波崩壊

近年 Stuttgart のグループにより実現されたクロム原子の BEC では、磁気双極子相互作用がファン・デル・ワールス力に匹敵するほど強く、異方的長距離相互作用する凝縮体として注目を集めている。我々は、Stuttgart の実験グループとの共同研究により、双極子相互作用による異方的な崩壊現象の研究を行った [7]。

実験では、系を崩壊に対して支えている短距離型の斥力を、フェッシュバッハ共鳴という現象を利用して時間的に減少させている。斥力が系を支えきれなくなると、双極子相互作用による崩壊が起こる。図 5.3.2 (a) 上の行は、斥力を減少させそれぞれの時間だけ待った後撮影を行ったものである。斥力を減少させた直後の写真は崩壊前の BEC の形を反映しているが、やがて上下に広がる成分が現われ四葉のクローバー状の形になっている。これは BEC の中心付近で崩壊が発生し、それに続いて爆発が起こったためである。四葉のクローバー状のパターン形成は、崩壊および爆発が非等方的に起こっていることを示しており、双極子相互作用の持つ d 波の対称性を反映している。もし等方的な爆発であれば円状のパターンが撮影されたであろう。図 5.3.2 (a) 下の行は数値計算の結果であり、実験と非常に良く一致していることがわかる。本結果は、長距離相互作用する系においても平均場近似が有効であることを示した初めての結果でもある。

さらに数値計算から、爆発後の BEC にはリング状の渦輪が生成されていることがわかった。図 5.3.2 (b) は爆発後の等密度面と量子渦の位置を表すが、中心付近で密度がえぐれたようになっており、四葉を取り巻くように量子渦ができている。図 5.3.2 (c) は原子の流れの断面図を示しており、$\times$ 印が量子渦の位置を表している。原子は z 軸に沿って中心へと流れ、爆発によってそれと垂直方向に外側へと流れており、その結果流れが $\times$ 印を取り巻く渦状になっている。

この研究は Physical Review Letter 誌の View Point および Editor's suggestion に選ばれ、101 巻 8 号の表紙に掲載された [7]。

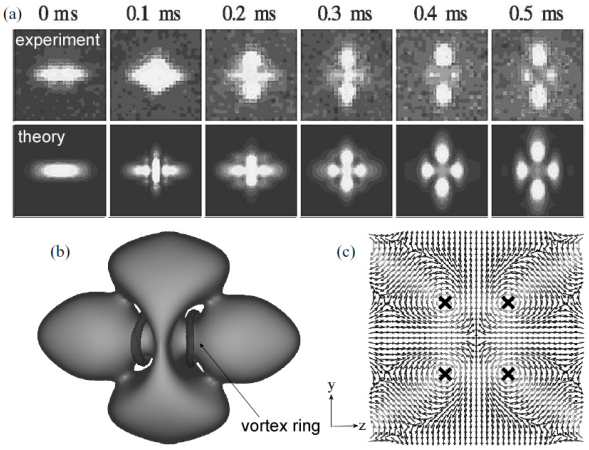

図 5.3.2: (a) BEC が双極子相互作用により崩壊・爆発する様子（上の行は実験結果、下の行は理論計算）。それぞれの原子の磁気双極子は常に紙面右方向を向いている。(b) 数値計算によって得られた爆発後の等密度面。中央付近の二つの輪は量子渦 輪の位置を表す。(c) 図 (b) の紙面に沿った断面図上の流れ。$\times$ 印は量子渦の位 置を表す。

5.3.4 情報処理に要するエネルギーコストの熱力学的下限

情報と熱力学を関連付ける先駆的な仕事の一つに Landauer 原理がある。それによると、H ナット ($= H/\ln 2$ ビット) の情報を、温度 T の熱浴と接触しているメモリから等温的に消去するには、少なくとも $k_{\mathrm{B}}TH$ の仕事が必要で、それと同量の熱が環境に散逸する。ランダウアー原理の統計力学的な証明は 2000 年になってなされたが、それはメモリのポテンシャルがある種の対称性をもつ特殊な場合についてだけだった。本研究で私達は、メモリが非対称な場合も含む形に一般化された Landauer 原理を、統計力学的に導いた。それによると、H ナットの情報をメモリから等温的に消去するのに要する仕事 W_{eras} の下限は、$W_{\mathrm{eras}} \geq k_{\mathrm{B}}TH - \Delta F$ で与えられる。ここで $-\Delta F$ はメモリの Helmholtz 自由エネルギーの（情報消去の過程における）変化である。とくにメモリが対称な場合は $\Delta F = 0$ なので、これは従来の Landauer 原理を特別な場合として含んでいる。しかし、$\Delta F > 0$ ならば、$W_{\mathrm{eras}} < k_{\mathrm{B}}TH$ を達成することが可能である。私達は Landauer 原理を破る具体的なモデルも構築した。また私達は、測定に要する仕事 W_{meas} の下限を導いた：$W_{\mathrm{meas}} \geq -k_{\mathrm{B}}T(H - I) + \Delta F$、ここで I は測定で得た相互情報量であり、$0 \leq I \leq H$ を満たす。とくに、測定に誤差がなく（$I = H$）、かつメモリが対称（$\Delta F = 0$）の場合は、これは $W_{\mathrm{meas}} \geq 0$ に帰着する。これらの不等式においては、「情報」を表す H と I が、熱力学変数と対等に扱われている。我々の結果は熱力学第二法則と矛盾せず、またその

情報論的な一般化になっていると言える。

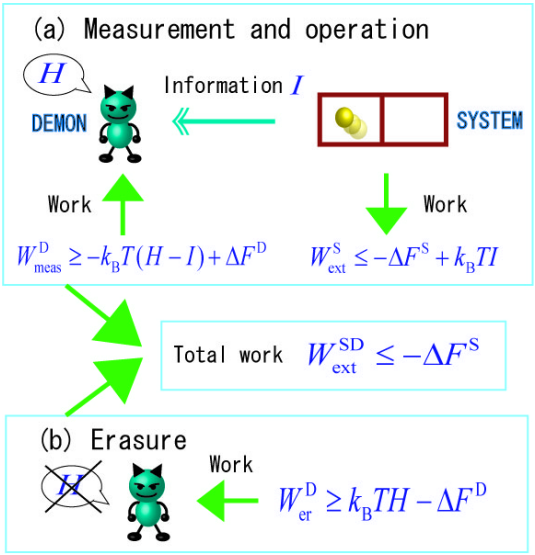

図 5.3.3: (a) 上の枠内は、測定の際にメモリ（”demon”）に要するエネルギーの下限と、フィードバックによって被測定系から取り出せるエネルギーの上限を表す不等式。(b) 下の枠内は、メモリが得た情報を消去する際に要するエネルギーの下限を表す不等式。両者を合計すると、中央の枠内の不等式が示すように、熱力学第二法則と矛盾がないことが分かる。

＜受賞＞

[1] 上田正仁：2008 年度仁科記念賞 (仁科財団、2008 年 11 月)

[2] 上田正仁：2008 年度日本学術振興会賞 (日本学術振興会、2009 年 1 月)

[3] Nguyen Thanh Phuc：平成 20 年度理学部学修奨励賞 (東京大学理学部、2009 年 3 月)

＜報文＞

(原著論文)

[4] Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda: Knots in a Spinor Bose-Einstein Condensate, Phys. Rev. Lett. **100**, 180403 (2008); Erratum: Phys. Rev. Lett. **101**, 029902(E) (Jul. 2008).

[5] D. B. M. Dickerscheid, Y. Kawaguchi and M. Ueda: Heteronuclear fermionic superfluids with spin degrees of freedom, Phys. Rev. **A 77**, 053605 (2008).

[6] S. Uchino, T. Otsuka, and M. Ueda: Dynamical symmetry in spinor Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. **A 78**, 023609 (2008) [See also viewpoint commentary Physics **1**, 13 (2008) by M. Lewenstein].

[7] T. Lahaye, J. Metz, B. Fröhlich, T. Koch, M. Meister, A. Griesmaier, T. Pfau, H. Saito, Y. Kawaguchi, and M. Ueda: d-wave collapse and explosion of a dipolar Bose-Einstein condensate, Phys. Rev. Lett. **101**, 080401 (2008).

[8] Y. Inada, M. Horikoshi, S. Nakajima, M. Kuwata-Gonokami, M. Ueda, and T. Mukaiyama: Collisional Properties of p-Wave Feshbach Molecules, Phys. Rev. Lett. **101**, 100401 (2008).

[9] Y. Inada, M. Horikoshi, S. Nakajima, M. Kuwata-Gonokami, M. Ueda, and T. Mukaiyama: Critical Temperature and Condensate Fraction of a Fermion Pair Condensate, Phys. Rev. Lett. **101**, 180406 (2008).

(国内雑誌)

[10] 沙川貴大、上田正仁：Maxell のデーモンと情報熱力学、数理科学 No. 545、2008 年 11 月

[11] 斎藤弘樹、川口由紀、上田正仁：磁性超流動体におけるスーパーノヴァ、科学 Vol. 79、No.2、2009 年 2 月

(修士論文)

[12] 井口光治：量子クラスター展開法による BEC-BCS クロスオーバー（2008 年 3 月、東京工業大学）

[13] 渡辺　優：量子操作の情報論的可視化（2008 年 3 月、東京工業大学）

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[14] Y. Kawaguchi: Knot soliton in a Spinor BEC, Quantum Coherence and Controllability at the Mesoscale (San Sebastian, Spain, May 2008)

[15] T. Sagawa and M. Ueda: Second Law of Thermodynamics with Discrete Feedback Control, International Workshop onBio-Soft Matter 2008 (Tokyo, Japan, June 2008) (poster)

[16] M. Tezuka and M. Ueda: Harmonically-Trapped Imbalanced Fermi Condensates, A Density-Matrix Renormalization Group Study, LPHYS'08 (Trondheim, Norway, July 2008)

[17] P. Zhang and M. Ueda: The Variational Calculation of Scattering Amplitude between Two p-Wave Feshbach Molecules,LPHYS'08 (Trondheim, Norway, July 2008)

[18] T. Sagawa and M. Ueda: Second Law of Thermodynamics with Discrete Quantum Feedback Control, The Ninth International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2008) (Calgary, Canada, August 2008) (poster)

[19] T. Sagawa and M. Ueda: Second Law of Thermodynamics with Discrete Quantum Feedback Control, The Principles and Applications of Control in Quantum Systems (PRACQSYS 2008) (Oregon, USA, August 2008) (poster)

[20] T. Sagawa and M. Ueda: Second Law of Thermodynamics with Discrete Quantum Feedback Control, International Conference – Dynamics and manipulation of quantum systems (Tokyo, Japan, October 2008)

[21] Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda: Knots in Spinor Bose-Einstein Condensates, International Conference sponsored by Center for Advanced Study of Tsinghua University (CASTU) – Frontiers of Degenerate Quantum Gases (Beijing, China, October 2008) (poster)

[22] M. Tezuka and M. Ueda: Imbalanced Fermi condensates: effect of trapping potential, International Conference sponsored by Center for Advanced Study of Tsinghua University (CASTU) – Frontiers of Degenerate Quantum Gases (Beijing, China, October 2008) (poster)

[23] T. Sagawa and M. Ueda: Minimal Energy Cost for Information Proceeding – Measurement and Information Erasure, International Symposium on Physics of Quantum Technology (Nara, Japan, November 2008) (poster)

招待講演

[24] M. Ueda: Nonlinear dynamics of Bose-Einstein condensates with internal degrees of freedom, Nonlinear phenomena in degenerate quantum gases(UCLM) (Toledo, Spain, April 2008)

[25] M. Ueda: Symmetry breaking in Bose-Einstein condensates with internal degrees of freedom, Quantum Coherence and Controllability at the Mesoscale (San Sebastian, Spain, May 2008)

[26] M. Ueda: What we know and have yet to learn about Spinor Bose-Einstein condensates, 39th Annual Meeting of the Division of Atomic, Molecular, and Optical Physics (DAMOP) (Pennsylvania, USA, May 2008)

[27] M. Ueda: Issues on Spinor-Dipolar Bose-Einstein Condensates, Nonlinear Waves -Theory and Applications (Beijing, China, June 2008)

[28] T. Sagawa and M. Ueda: Second Law of Thermoydnamics with Discrete Feedback Control, International Mini-Workshop : Theoretical Foundations and Applications of Quantum Control (Tokyo, Japan, July 2008)

[29] M. Ueda: Chiral symmetry breaking in spinor Bose-Einstein condensates, International Workshop: Spin Helicity and Chirality in Superconductor and Semiconductor Nanostructures: Novel Phenomena and Emergent Functionality (Karlsruhe, Germany, July 2008)

[30] M. Ueda: Symmetry Breaking in Bose-Einstein Condensates, 9th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-TOKYO'08) (Hatoyama, Saitama, August 2008)

[31] M. Ueda: Symmetry Breaking in Bose-Einstein Condensates, 10th German-Japanese Symposium: Collective Quantum-Phenomena inCorrelated Condensed Matter Systems (Ringberg Castle, Germany, September 2008)

[32] M. Ueda: First results of the ERATO macroscopic quantum project, International Conference sponsored by Centerfor Advanced Study of Tsinghua University (CASTU) (Beijing, China, October 2008)

[33] M. Ueda: Symmetry Breaking in Bose-Einstein Condensates, International Symposium on Physics of Quantum Technology (Nara, Japan, November 2008)

[34] Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda: Knots in Spinor Bose-Einstein Condensates, 3rd Annual Dodd-Walls Symposium (Queenstown, New Zealand, December 2008)

[35] Y. Kawaguchi: An introduction to Dipolar Bose Gases, Cold Atom Theory Workshop (Queenstown, New Zealand, December 2008)

[36] M. Ueda and T. Sagawa: Information Thermodynamics, Japan-UK Workshop (Tokyo, Japan, January 2009)

[37] M. Ueda: Symmetry Breaking in Bose-Einstein Condensates, International Workshop on Ultracold atoms/molecules,Hsinchu (Hsinchu, Taiwan, March 2009)

(国内会議)

一般講演

[38] 沙川貴大、上田正仁： 熱力学第二法則の量子フィードバック制御された系への拡張、第 18 回量子情報技術研究会 (QIT18) （東京大学、東京、2008 年 5 月）

[39] 川口由紀：内部自由度を持った凝縮体におけるトポロジカル励起、スーパークリーン特定 若手夏の学校（東伊豆熱川ハイツ、静岡、2008 年 8 月）

[40] 手塚真樹：粒子数不均衡な冷却フェルミオン気体の凝縮状態、スーパークリーン特定 若手夏の学校（東伊豆熱川ハイツ、静岡、2008 年 8 月）(ポスター)

[41] 井口光治：量子クラスター展開法による BEC-BCS クロスオーバー、スーパークリーン特定 若手夏の学校（東伊豆熱川ハイツ、静岡、2008 年 8 月）(ポスター)

[42] 斎藤弘樹、R.G. Hulet、上田正仁: ラビ振動による BEC ドロップレットの安定化、日本物理学会秋季大会（岩手大学、岩手、2008 年 9 月）

[43] 金本理奈、Lincoln D. Carr、上田正仁：臨界現象におけるエンタングルメント、日本物理学会秋季大会（岩手大学、岩手、2008 年 9 月）

[44] 内野瞬、大塚孝治、上田正仁：Spinor BEC and IBM、日本物理学会秋季大会（岩手大学、岩手、2008 年 9 月）

[45] 井口光治、川口由紀、上田正仁：量子クラスター展開法による BEC-BCS クロスオーバー、日本物理学会秋季大会（岩手大学、岩手、2008 年 9 月）

[46] 手塚真樹、上田正仁：トラップされた粒子数不均衡フェルミオン気体の凝縮状態、日本物理学会秋季大会（岩手大学、岩手、2008 年 9 月）

[47] 沙川貴大、上田正仁:熱力学第二法則の拡張:Maxwell's demon が取り出せる仕事量の上限、日本物理学会秋季大会（岩手大学、岩手、2008 年 9 月）

[48] 中島秀太、堀越宗一、稲田安寿、上田正仁、向山敬：ユニタリー極限における凝縮体出現温度の決定方法の比較、日本物理学会秋季大会（岩手大学、岩手、2008 年 9 月）

[49] 小林未知数、栗田泰生、森成隆夫、石原秀樹、坪田誠：ボース・アインシュタイン凝縮体における粒子生成 3：曲った時空上場の量子論の数値的検証、日本物理学会秋季大会（岩手大学、岩手、2008 年 9 月）

[50] 小林未知数、栗田泰生、森成隆夫、石原秀樹、坪田誠：膨張・収縮ボース・アインシュタイン凝縮体における粒子生成のシミュレーション、日本物理学会秋季大会（岩手大学、岩手、2008 年 9 月）

[51] 川口由紀：Knots in a Spinor-Dipolar Bose-Einstein Condensates、特定領域研究 研究成果報告会「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」(奈良県新公開堂、奈良、2008 年 12 月）(ポスター)

[52] 小林未知数：Collision Dynamics of Non-Abelian Vortics、特定領域研究 研究成果報告会「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」(奈良県新公開堂、奈良、2008 年 12 月）(ポスター)

[53] 井口光治：Quantum Cluster Expansion Approach for BEC-BCS Crossover、特定領域研究 研究成果報告会「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」(奈良県新公開堂、奈良、2008 年 12 月）(ポスター)

[54] 沙川貴大、上田正仁:Information Thermodynamics、古典および量子ダイナミクス・非平衡統計力学に関するワークショップ（学士会館、東京、2009 年 3 月）

[55] 金本理奈、L. D. Carr、上田正仁：弱－強相関ボース気体の準安定永久流と量子ソリトン、日本物理学会春季大会（立教大学、東京、2009 年 3 月）

[56] 小林未知数、川口由紀、新田宗土、上田正仁：非可換量子渦、日本物理学会春季大会（立教大学、東京、2009 年 3 月）

[57] 川口由紀、斎藤弘樹、上田正仁：ダイポール BEC における磁区パターン形成、日本物理学会春季大会（立教大学、東京、2009 年 3 月）

[58] 井口光治、川口由紀、上田正仁：量子クラスター展開法によるユニタリティ極限の研究、日本物理学会春季大会（立教大学、東京、2009 年 3 月）

[59] 沙川貴大、上田正仁：情報処理に要するエネルギーコストの熱力学的下限、日本物理学会春季大会（立教大学、東京、2009 年 3 月）

[60] 藤澤慎介、沙川貴大、宮下精二、上田正仁：量子フィードバックによる光子数制御、日本物理学会春季大会（立教大学、東京、2009 年 3 月）

招待講演

[61] 川口由紀：スピノール BEC におけるスピンテクスチャ、研究会「不均一超伝導超流動状態と量子物理」（京都大学基礎物理学研究所、京都、2008 年 7 月）

[62] 川口由紀：「スピノール BEC におけるトポロジカル励起」、日本物理学会秋季大会 領域 1 シンポジウム「冷却原子気体の新展開」（岩手大学、岩手、2008 年 9 月）

[63] 手塚真樹：電子格子系及び調和型トラップ中の粒子数不均衡フェルミオン系の DMRG、研究会「密度行列繰り込み群法を用いた物性研究の新展開」（京都大学基礎物理学研究所、京都、2008 年 12 月）

[64] 上田正仁：Issues in Spinor-Dipolar Bose-Einstein Condensates、特定領域研究 研究成果報告会「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」(奈良県新公開堂、奈良、2008 年 12 月）

(セミナー)

[65] 手塚真樹：粒子数インバランスのあるフェルミ原子気体の凝縮状態、物性セミナー（東京大学総合文化研究科物性理論グループ、2008 年 6 月）

6 一般物理実験

6.1 牧島研究室＋中澤研究室

6.1.1 「すざく」衛星の運用と稼働状況

○ 宇宙X線衛星「すざく」と硬X線検出器 (HXD)

2005 年 7 月 10 日に打ち上げられた宇宙X線衛星「すざく」は、3 年目の観測に入り、搭載されたX線 CCD カメラ (XIS; X-ray Imaging Spectrometer) および硬X線検出器 (HXD, Hard X-ray Detector) は、順調に稼働を続けている。HXD は我々が JAXA、広島大、埼玉大、理研、金沢大、阪大、青学大、Stanford 大などと協力して開発した非撮像装置で、10–600 keV の帯域で世界最高レベルの感度を実現している。本年度も中澤らを中心として衛星の運用を支援し、HXD の運用とその軌道上較正に貢献するとともに [12]、「すざく」データの解析を続けた。

HXD は 2 mm 厚シリコン PIN ダイオード (HXD-PIN) で 10–70 keV の光子を検出し、それを透過した 50–600 keV の光子は、背後に置いた GSO 結晶シンチレータ (HXD-GSO) で検出する。北口らは昨年に引き続き、HXD-PIN バックグラウンドを解析し、宇宙線が大気に突入して作る中性子がその主因であることを示した [29, 12]。中性子はシールドを抜けて HXD-PIN に飛び込み、シリコン原子核中と衝突して、反跳信号を作り出す。山田らは、HXD-GSO のエネルギー較正を改良し、全世界の「すざく」ユーザー向けに情報を更新する準備を進めた。

○ 太陽フレアからの中性子

HXD-PIN が大気中性子に感度をもつことから、太陽フレアで生じた高エネルギーの中性子が、崩壊せず地球まで到来すると、HXD-PIN で検出できる可能性がある。じっさい 2006 年 12 月 5 日に起きた X9.0 太陽フレアのさい、太陽ガンマ線をシールドできるはずの HXD-PIN 検出器が反応した。北口らはそのデータを詳しく調べた結果、この信号は太陽フレアガンマ線が衛星構体で散乱されたものと思われるものの、いっぱんに HXD-PIN は、強い太陽フレアに伴う中性子を十分に検出する能力をもつことを、数値シミュレーションなどにより明らかにした [29]。

「すざく」が遭遇した最大のフレアは、2005 年 9 月 7 日の X17 イベントである。あいにく台風で受信不能となったため、「すざく」では観測できなかったものの、地上中性子モニタがこのフレアから強い中性子信号を受けた。それをもとに HXD-PIN のデータをシミュレートした結果が図 6.1.1 で、高い有意度で中性子を検出できた可能性が示された。太陽活動の上昇に伴い今後、検出例が期待される。

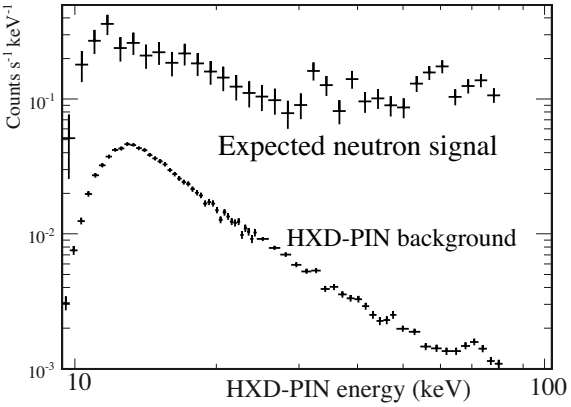

図 6.1.1: A simulated HXD-PIN spectrum to be produced by energetic neutrons from a large solar flare, compared with the typical HXD-PIN background. The simulation is based on an actual neutron detection by ground-based detectors, achieved during the 2005 September 7 solar flare (Watanabe et al. 2007) [29].

○ HXD-WAM による観測

HXD の外周シールド部（HXD-WAM）を用いた、ガンマ線バーストや太陽フレアの研究も、多くの機関と協力して進めた [13, 21, 22, 60, 89, 92]。

6.1.2 フェルミガンマ線宇宙望遠鏡

米日伊などの共同で開発された宇宙ガンマ線衛星 *GLAST* (Gamm-ray Large Area Space Telescope) は 2008 年 6 月 11 日、デルタ 2 ロケットにより、ケープカナベラルから打上げられ、フェルミガンマ線宇宙望遠鏡と名付けられた [46, 71]。これは 20 MeV–300 GeV 帯で高感度の全天サーベイを行なう衛星で、日本では広島大（トラッカー用シリコン検出器を製作）、東工大、JAXA/ISAS などが参加している。本教室では、釜江常好名誉教授がスタンフォード大学にて大きな貢献をしており、牧島も準メンバーの立場にある。今年度から、奥村が全面的にフェルミプロジェクトに参加し、スタンフォード大学に滞在しつつ、大気バックグラウンドの推定 [47]、分子雲からの π^0 崩壊ガンマ線 [74, 82, 91] などを研究している。

打ち上げ以来、フェルミは順調に全天サーベイを続け、数個の新しいガンマ線パルサーを発見するなど、画期的な成果を出しつつある [5, 6]。口絵カラー写真は、2009 年 2 月に公開された全天のガンマ線マップで、わずか 3 ヶ月の観測で、過去の *CGRO*/EGRET の数年分の結果を上回る感度を達成した。

6.1.3 質量降着するブラックホール

○ ブラックホール連星

図 6.1.2 は、これまで「すざく」で観測された、銀河系内のブラックホール連星のスペクトルを、標準天体である「かに星雲」のスペクトルで割って表示

したもので、質量降着するブラックホールの研究に、「すざく」の広帯域 (0.2–600 keV) が大きな威力となることを示す [2, 15, 35, 52, 102]。これは降着率により降着物質が、自由落下温度に近い高温（数十 MeV) から放射冷却の効いた低温 ($\sim$ 1 keV) まで、多様な温度を取りうるためである。５天体のうち、GX 339−4 と GRS 1915+105 は Very High 状態、他の３天体は Low/Hard 状態にある。

GX 339−4 の「すざく」データを解析した Miller *et al.* (2008) は、6–7 keV に見られる鉄 K_α 線が、相対論的効果で数 keV にわたり広がっていると論じ、よって降着円盤は非回転ブラックホールまわりの最終安定軌道 $3R_S$ (R_S は Schwarzschild 半径) より内側まで存在するので、この天体は極端 Kerr ブラックホールであると結論した。しかし山田らによる注意深い再解析の結果、彼らの結論はスペクトルの連続成分の選び方に強く依存し、また XIS データのパイルアップの補正が不十分なことが判明した [72, 76, 103]。過去の「てんま」や「ぎんが」による High/Soft 状態での観測では、GX 339−4 の円盤の内縁半径は $\sim 3R_S$ と計測されているので、Schwarzschild ブラックホールと考える方が妥当である。

理研の Gandhi らとの共同研究では、GX 339−4 から、きわめて興味ある速い (< 0.1 秒) 可視光の変動を検出した [11]。

山田、牧島らは、昨年度に得た、ブラックホール連星 Cyg X-1 の「すざく」による観測 の結果 [2] を深化させた [37, 43, 55, 102, 108]。要点は

1. 降着物質は、平たい低温 ($\sim$ 0.2 keV) の円盤と、厚い高温 ($\sim$ 100 keV) のコロナから成り、円盤の軟X線をコロナが逆コンプトン散乱することで、硬X線フォトンが作られる。
2. 円盤はコロナに半ば侵入するものの、$3R_S$ までは達せず、その数倍の距離で途切れる。
3. コロナは不均一で、結果としてX線連続成分は、単一のべき関数では表現できない。
4. コロナの密度の時間変化が、硬X線の変動を生み出している可能性がある。

の４点にまとめられる。

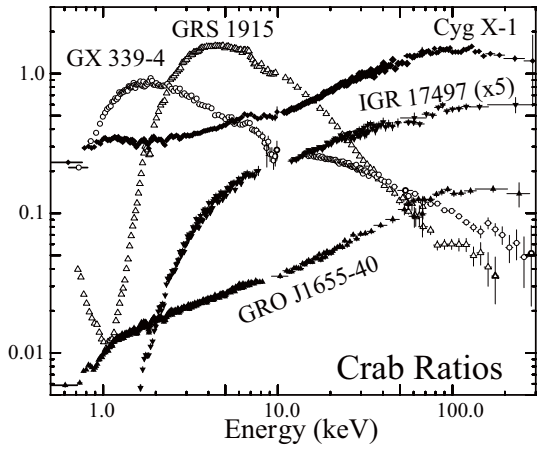

図 6.1.2: A compilation of *Suzaku* spectra of black-hole binaries, shown normalized to that of the Crab Nebula.

○ ULX 天体

ULX (Ultra-Luminous X-ray source) は、近傍銀河に見られる大光度のX線点源で、恒星質量ブラックホールと活動銀河核 (AGN) の中間に位置する、「中質量ブラックホール」の有力な候補である。宮脇らはスターバースト銀河 M82 にある明るい ULX (M82 X-1) を、HXD-PIN で $\sim$ 25 keV まで検出し、この天体は少なくとも 100–200 $M_\odot$ を持つブラックホールで、スリム円盤状態にあると論じた [17]。

理研の磯部らと協力し、NGC 2403 X-1 を「すざく」で観測した。その結果を *Chandra* 衛星などの結果と比べることで、この天体は 10–15 $M_\odot$ のブラックホールが、スリム円盤をもち、Eddington 限界に近い光度で輝いているものと解釈できた [18]。

カリフォルニア大学バークレイ校から、学振 Pre-Doc として Diane Wong が１月より研究室に加わり、ULX を可視光で研究している。NGC 6946 にある ULX を Keck 1 望遠鏡で観測した結果、多数の輝線が卓越した 310-936 nm の広帯域スペクトルを得た。ULX を生成した超新星の残骸が、X線で励起されている可能性があり、励起光度は $\sim 2 \times 10^{39}$ erg s^{-1} に達する。これは ULX が我々に向ってビーミングした天体であるという可能性を棄却し、真に質量が大きいブラックホールであることを支持する。

○ 活動銀河核 (AGN)

銀河の中心にある巨大 (10^{6-9} $M_\odot$) ブラックホールにガスが降着すると、活動銀河核 (AGN) となる。NGC 4258 銀河の中心核は、水メーザーで測定された質量 (3.6×10^7 $M_\odot$) から判断すると、Eddington 限界光度よ５桁も暗い「低光度 AGN」である。山田、伊藤らはその「すざく」データを解析し、吸収が強いわりには、冷たいガスによるX線の反射成分が弱いので、吸収体は視線上に局在し、AGN に普遍的に存在するとされる分子雲トーラスは、存在しない可能性が高いことを示した [4]。また時間変動を、Cyg X-1 で得た不均一コロナの描像で説明した。

「あすか」衛星の時代から、一部のセイファート銀河では、鉄の K_α 線が異常に幅広く、よってそれら AGN は極端 Kerr ブラックホールであると論じられてきた。しかし、ブラックホール直近で発生しているはずの鉄輝線が強度変動を示さない、反射成分が強すぎる、などの観測的な問題が伴っており、その解決には、相対論的な光線の曲がりなど、技巧的な説明が必要となる。上原らは、その代表格といえる MGC-6-30-15 銀河の「すざく」データを、スペクトルと時間変化の両面から詳しく解析した。その結果、従来は反射成分と考えられていた 20–40 keV のスペクトルの盛り上がりが、数時間のタイムスケールで連続成分と独立に強度変動することを発見した。その変動成分を抽出したところ、鉄輝線は付随せず、反射と考えるより、光学的厚みの大 ($\sim$ 10) な熱的コンプトン放射であると考える方が妥当であることを発見した。時間平均したスペクトルを、この熱的コンプトン成分を含めてフィットすると、図 6.1.3 のように鉄輝線の広がりも弱まり、Kerr ブラックホールと断じる証拠は薄いと判明した [32, 56, 77]。

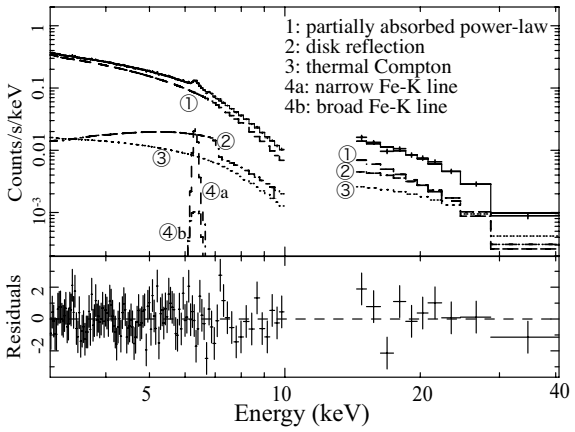

図 6.1.3: Background-subtracted count spectra of the Seyfert galaxy MCG–6-30-15 obtained with the *Suzaku* XIS (< 10 keV) and HXD-PIN (> 10 keV), fitted simultaneously with a model consisting of 5 comopnents.

6.1.4 強磁場コンパクト天体

○ X線パルサー

降着型パルサーは、中性子星に相手の星からガスが降着することでX線を放射し、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、中性子星の磁場計測の切り札となる。理研、埼玉大などと協力し、その研究を続行した [36, 78, 79]。

上田、中澤らは昨年度に続き、Her X-1 からのX線が数十分〜数時間にわたり、繰り返し不規則に弱まる dip 現象を研究した。その結果、これはパルサーからのX線が光電離した物質により遮られたためと判明した。硬X線がコンプトン散乱で減る様子から、この物質の柱密度は $0.3 \sim 3 \times 10^{23}$ cm^{-2} と求まり、XIS スペクトルの変化（0.7 keV の電離酸素の吸収端など）から、その電離パラメータは ~ 10 erg cm s^{-1} 程度と評価された。さらに時間変動などから、この吸収体はパルサーから 1×10^{12} cm 程度の距離にあると推定された。降着円盤の外縁部が、その候補となる。

○ マグネター天体

銀河系内にあるX線パルサーのうち 15 個ほどは、連星の証拠をもたず、その放射光度はスピンダウン光度を大幅に越え、時おり激しいバースト活動を示す [20, 63, 100]。よってこれらは、10^{14-15} G の超強磁場をもつ特殊な中性子星「マグネター」で、磁気エネルギーを消費し輝いていると考えられる。榎戸らは昨年度、その１つ 4U 0142+63 を「すざく」で観測し、図 6.1.4(下) のように、黒体放射的な軟X成分に加え、HXD-GSO のエネルギー域（$\sim$ 300 keV）まで光子指数 ~ 1 で延びる、硬いパルス硬X線を検出することに成功し [44, 54, 41, 42]、先行する *INTEGRAL* の発見をさらに進めた。この成分の起源は不明だが、これほど硬い放射は他の天体には無いので、超強磁場に関連した現象と想像される [52]。

2008年8月22日、新しいマグネター SGR 0501+4516 がバースト活動を開始したことが、*Swift* 衛星によって発見され、「すざく」もオランダの N. Rea、榎戸、理研の中川、牧島らの提案で、同 22 日に緊急観測を行った。その成果、32 発の短い (< 1 秒) バーストと明るい定常放射、および 5.76207 秒のパルスを検出することができた [10]。最も強いバーストは 89 Crab もの強度をもつため、HXD は飽和したが、その短い (0.2 秒) プリカーサーは HXD-GSO により 200 keV まで検出され、XIS まで含めた 1–200 keV スペクトルは、温度 3.3 keV と 15 keV の２温度黒体放射で良く説明できた [10, 75, 100]。距離 10 kpc にある球対称な放射体を仮定すと、半径は 8 km (低温) と 0.5 km (高温) になり、中性子星の大きさと矛盾しない。通常の中性子星の Eddington 温度 ($\sim$ 2 keV) を大きく越えるのは、超強磁場の効果と考えられる。図 6.1.4(中) に示すように、定常放射は 4U 0142+61 と酷似したスペクトルを示す [41, 42]。

幸運にも 2009 年 1 月 21 日、最も速い自転 (2.07 秒) で知られるマグネター 1E1547.0−5408 が急にバースト活動を開始し、最盛時期には「すざく」WAM でも、１日で 260 発もバーストが検出された。SGR 0501+4516 のときと同様、1 月 28 日から翌日にかけて緊急にポインティング観測を実行し、図 6.1.4(上) のように、硬軟の２成分から成る特徴的なスペクトルを得た。ただし軟X線成分に比べ硬X線成分が強いなど、３天体の間に微妙な差もあり、現象を理解する手掛かりになりうる。

こうした進展を踏まえ、牧島、榎戸、理研の中川らは、全国 10 機関の研究者を糾合し、「すざく」第４期公募観測 (2009 年度) に「マグネター大研究」を提案した。これは「すざく」キープロジェクトの１つとして採択され、2009 年度に約 470 ksec、2010 年度に 200 ksec の観測が予定されている。

○ 強磁場の白色わい星

白色わい星の一部は、10^{6-7} G の強磁場をもつ。昨年度、埼玉大などと協力し、高速自転する強磁場白色わい星 AE Aqr で、粒子加速の徴候を発見し、今年度は論文として出版した [1, 61]。今年度はまた観測例を増やすべく、候補天体を探査した。

6.1.5 星間空間における高エネルギー現象

○ 星間分子雲からの GeV ガンマ線

宇宙では、加速された陽子が標的陽子に衝突するさい π^0 粒子が作られ、その崩壊でエネルギー 70 MeV 以上のガンマ線が生成する。それを検出することは、宇宙線ハドロン成分の分布や生成を光子により知る、ほとんど唯一の方法で、フェルミ衛星の大きな目的の１つでもある。奥村、釜江名誉教授、広島大の水野らは、フェルミの初期データにより、オリオン星雲に付随する広がった放射を 0.1–20 GeV の帯域で検出し、宇宙線が分子雲に衝突して生じる π^0 起源のガンマ線と、そのスペクトルが良く一致することを示した。今後はガンマ線の強度から、太陽圏近傍から離れた地点での、宇宙線強度を推定したい。

○ 銀河系に付随するディフューズX線放射

湯浅らは昨年度、銀河中心まわりの銀河面から、高温の熱的放射に加え、HXD-PIN 検出器により、光子

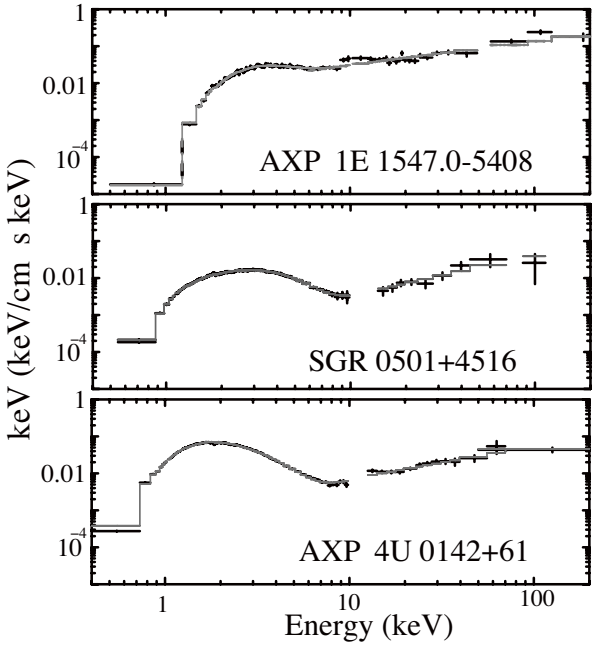

図 6.1.4: *Suzaku* $\nu F\nu$ spectra of persistent emission from three magnetars. The top two objects were caught during high bursting activities, while the bottom one was observed in quiescence [41, 42].

指数 2 ∼ 3 の非熱的な広がった放射を検出した。これが星間空間での高エネルギー現象によるディフューズ放射か、多数の点源の集まりなのか、熱い議論が続いている。そこで湯浅を中心に、点源の最有力候補である激変星（質量降着のある強磁場白色わい星）の広帯域X線スペクトルを、「すざく」により系統的に研究している [52]。これらの天体では、降着物質が白色わい星の磁極で衝撃波加熱され、図 6.1.5 の例に見るように高温 (20–30 keV) の熱的制動放射を出す。さらに鉄イオンからは、高温部分での H-like 輝線 (6.9 keV)、低温部分での He-like 輝線 (6.7 keV)、および白色わい星の表面や降着ガスによる中性蛍光輝線 (6.4 keV)、という 3 本のラインが放射される。今後、こうした白色わい星のスペクトルを集積し、それらの総和で銀河面X線放射の硬X線成分が説明できるか、検討を進めたい。

過去に岡田らは、数個の球状星団に付随する広がったX線放射を *Chandra* 衛星で検出し、球状星団が運動するさいの衝撃波加速の現れと論じた。湯浅らは、その代表である 47 Tuc を「すざく」で観測したところ、XIS スペクトル中に、赤方偏移した電離元素輝線を発見した。よって広がったX線は、 47 Tuc に付随するものではなく、近くに偶然いた赤方偏移 $z = 0.34$ の銀河団からの放射であると結論した。

○ 超新星残骸の観測

理研の玉川、早藤、山口、平賀らが展開している超新星残骸の研究に協力し、チコ・ブラーエの残骸から初めて、弱電離した Cr と Mn の特性X線を検出することに成功した [16, 59]。両者の存在比は、親星の重元素組成の良い指標になると考えられる。ケプラーの超新星残骸からも、これら希少元素が検出されつつある [81]。チコの残骸ではまた、膨張のドップラー効果に起因すると思われる鉄輝線の広がりを検出し [9, 59, 66]、また Fe に比べ Si や S が外側に分布する「玉ねぎ構造」の徴候を得た [64]。

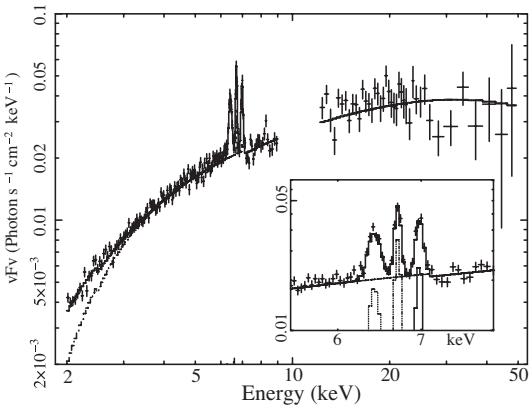

図 6.1.5: A deconvolved νF_ν spectrum of the cataclysmic variable TV Col obtained with *Suzaku* (crosses), compared with the best-fit Bremsstrahlung plus 3-Gaussian model. The inset shows details of the three Fe-K lines. .

○ 渦巻き銀河の星間ガスの化学組成比

理研の小波らと協力し、「すざく」で観測した渦巻き銀河 NGC 4258 のデータを解析した。HXD 帯域では低光度 AGN の放射が卓越するのに対し、XIS 帯域では、高温 (0.2–0.6 keV) の星間ガスからの熱的放射が強く、O、Mg、Ne、Si、S、Fe などの電離輝線が見られる。それらを解析した結果、この銀河の高温星間ガスの化学組成比は、我々の銀河系での組成比と ∼ 30% 以内で一致することがわかった [67, 83]。

6.1.6 銀河団および銀河群の研究

○ 非熱的硬X線の上限と非常に高温な熱的成分の発見

銀河団は、大規模構造の節をなし、周囲の銀河群／団と衝突合体しつつ成長する宇宙最大の天体である。この衝突の過程で、銀河団ガスの加熱と、粒子加速が起きると考えられる。銀河団には Mpc スケールに広がる電波源が付随する事があり、GeV 電子からのシンクロトロン放射と考えられている。同じ GeV 電子は宇宙マイクロ派背景放射 (CMB) を、硬 X 線帯域に逆コンプトン散乱 (IC 放射) する。中澤らは、広がった硬 X 線放射に高い感度を持つ「すざく」を用いて、この放射を探査した。衝突銀河団、Abell 3667 の観測で得られた IC 放射の上限から、その電波源中での銀河間磁場の値が 2 μG 以上である事を初めて示した [3]。また同様の解析を、Abell 2319 に適用し、同じく付随する電波源に対し > 0.2 μG という結果を得た [69]。いずれも、過去最高精度の結果であり、とくに前者は、磁気圧がガス圧の 20%近い値を持つ事を意味し、非熱的な圧力が銀河団に与える

影響を明確に実測した結果と言える。Abell 3667 では、13 keV 以上、おそらくは 20 keV に近い、極めて高温の熱的な放射の兆候をとらえた。この衝突銀河団の中で強い加熱が起きており、予想以上に速い速度で衝突したのか、未知の加熱機構があるのか、興味深い。

○ Weak Lensing 信号の X 線追観測

中澤らは「すばる」により複数の中小規模の weak lens(WL) 信号が検出された、ZwCl0823.2+4250 領域を、「すざく」を用いて観測した。その結果、2 つの強い WL ソースが $z = 0.2$ と $z = 0.4$ の中型の銀河団である事、また、4 つの弱い WL ソースのうち 1 つからは弱い信号があり、$z = 0.4$ の小型銀河団で説明できるが、残る 3 つは X 線で暗い事を確認した。現在、詳細な上限値の解析中であるが、WL 信号と X 線信号の強度間に有意なばらつきがあれば、宇宙のバリオン比の揺らぎなど、将来の研究につながる可能性がある [88]。

6.1.7 雷雲における静電加速現象の研究

我々は一昨年度より、宇宙での電場加速の手掛かりを得るため、榎戸らを中心に理研と協力し、新潟県柏崎刈羽原子力発電所にて、冬期雷雲からのガンマ線を探査する GROWTH 実験を開始した。その結果、2007 年 1 月と同 12 月に、1 分程度つづく強いガンマ線 (∼ 10 MeV まで) の増大を雷雲から 1 例づつ検出することに成功し、新しい研究分野を開拓しつつある [34, 49, 98, 38, 106]。

○ 高山での夏季雷雲からのガンマ線と電子

今年度は東大宇宙線研・乗鞍観測所 (標高 2770 m) をベースに、夏季雷雲も研究すべく、同研究所に共同研究を申請し (受入れ所員は瀧田准教授)、榎戸、湯浅、中澤らに 4 年生特別実験の鳥井、福山、山口を加え、小型 BGO シンチレータを製作した。これを観測所の屋内に、また理研の同様な装置を屋外に設置して、2008 年 9 月 4 日に観測を開始したところ、9 月 21 日の深夜、観測所が濃い雷雲（前線雷）に包まれたさい、理研の装置が 90 秒ほど続く強い放射線の増加をとらえた。NaI とプラスチックシンチがともに増加を示したので、ガンマ線と電子の両者が到来したことが確実で、ガンマ線は ∼ 10 MeV まで延び、電子の飛程やガンマ線スペクトルから、発生源の距離は ∼ 90 m と推測された [94]。東大の装置は屋内に置いたため、増加は弱かったものの、同期した信号を得た。雷光は検出されず、落雷には同期していないと判断できる。この日はさらに 3 例、短い増加が検出された可能性がある (表 6.1.1)。

○ 日本海側の冬季雷雲からのガンマ線と電子

今年度も榎戸らを中心に新潟県柏崎の刈羽原発で、東大と理研の装置を並べて自動観測を行なった結果、5 例もの放射線バーストをとらえることに成功した。いずれのイベントも雷雲と相関し、東大と理研の装置の両方で検出され、両者のデータはよく一致した。うち 2 例を図 6.1.6 に示し、乗鞍岳の例および柏崎での過去の 2 例を含めた現時点での全イベントを、表 6.1.1 にまとめる。大別すると、短い (< 1 秒) イベントと長い (1–2 分) ものと 2 種類あり、前者のみが落雷に同期するようである。ガンマ線のスペクトルはどの例でも、∼ 10 MeV まで延びるので、電子が 20 MeV 程度まで加速されていることは疑いない。ガンマ線に加え電子も検出される場合があり、その場合は発生源の距離が、20 MeV 電子の飛程 (大気中では ∼ 100 m) より近いと考えられる。

表 6.1.1: List of radiation bursts from thunder clouds.

場所	日時 (JST)	継続 (秒)	γ 線	電子 *
柏崎	07/01/07 06:43	40	あり	なし
柏崎	07/12/14 01:59	110	あり	なし
乗鞍	08/09/21 00:45	90	あり	あり
乗鞍	08/09/21 11:01	< 1	—	—
乗鞍	08/09/21 23:15	< 1	—	—
乗鞍	08/09/21 23:20	< 1	—	—
柏崎	08/12/23 14:48	0.2-0.4	あり	あり
柏崎	08/12/25 18:29	110	あり	なし
柏崎	09/01/13 05:30	< 1	あり	あり
柏崎	09/01/25 22:32	137	あり	なし
柏崎	09/02/11 19:40	12	あり	なし

*: もしくは高エネルギーのガンマ線。

○ 雷雲での電子加速のシナリオ

これまでの観測から、雷雲に起因するガンマ線は、以下のような機構で発生すると考えられる。まず雷雲内部で、鉛直方向に強い静電場が発達する。宇宙線などで高エネルギーの種電子が作られると、それらはイオン化でエネルギーを損失するより早く、電場により加速されうる (逃走電子加速)。電子は制動放射を出し、それは相対論的効果により、前方に鋭くビームする。このビームが検出器を掃いた場合に限り、ガンマ線が検出されると考えられる。今後は検出器の台数を増やし、ビームの移動を検出したい。

6.1.8 *ASTRO-H* 衛星計画およびその先

○ *ASTRO-H* 衛星とその搭載装置

ASTRO-H 衛星は 2013 年度中の打ち上げを目指して開発の進められている、次世代の宇宙 X 線衛星で、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て、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を持ち、多数の天体のドップラー速度を測定できる。もう一つの X 線観測装置、視野 X 線 CCD カメラ 1 台に加えて、5–80 keV までの分角の撮像分光を行う、硬 X 線イメージャ HXI が 2 台、そして、60–600 keV で最高感度の観測を行

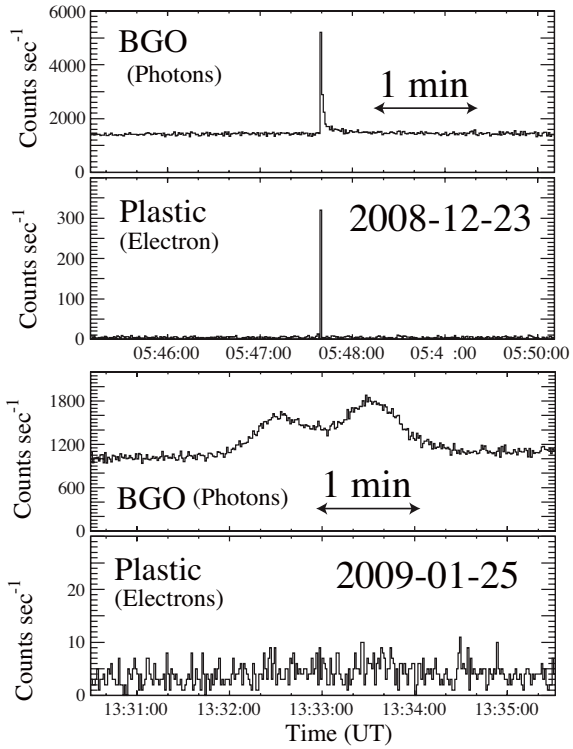

図 6.1.6: Two examples of radiation bursts detected from winter thunder clouds in Niigata prefecture. The plastic scintillator is mainly sensitive to charged particles and high-energy gamma-rays, while the BGO scintillator can detect low-energy gamma-rays as well.

う軟ガンマ線検出器 SGD が 2 台、搭載される。本研究室では、JAXA 等と共同で、この HXI と SGD の開発を進めている。

○ HXI 装置と SGD 装置

HXI は名古屋大学が中心となって開発している硬 X 線望遠鏡と組み合わせて、9 分角の視野を 1–2 分角の角分解能で撮像し、1.5 keV よりよい分解能で分光する。現在、最高感度を持つ「すざく」HXD と比較して、10–80 keV 帯域で二桁もの感度向上が見込まれ、画期的に高い精度の硬 X 線観測を実現する。X 線マイクロカロリーメータと組み合わせる事で、天体の運動や衝突を知り、その結果としての加熱や粒子加速を同時に探る事ができる。HXI は、井戸型に組み上げた BGO シンチレータで極低バックグラウンド環境を実現し、そこに両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) と両面 CdTe ストリップ検出器 (DSCdTe) を重ねた主イメージャーを置く構造をしている (図 6.1.7)。

SGD は、ポインティング型の半導体コンプトンカメラという世界初のアイデアにより、60–600 keV までの感度をこれまでより一桁上げるもので、多数の巨大ブラックホールや、衝突銀河団からの硬 X 線信号を 100 keV より上までとらえることができる。これも、井戸型に組み上げた BGO の中に、多層のシリコンパッド検出器と、CdTe パッド検出器で構成される半導体コンプトンカメラを配置した構造をしている (図 6.1.7)。

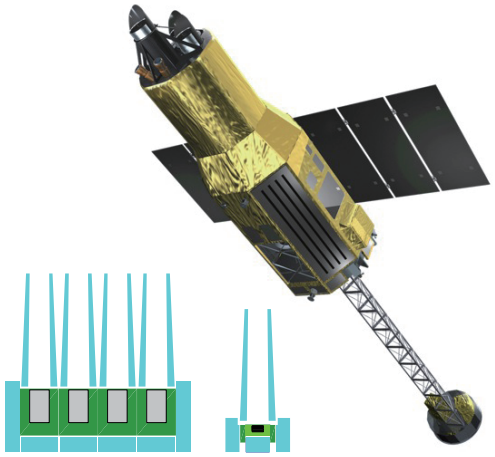

図 6.1.7: Drawing of the ASTRO-H satellite, to be launched into orbit at FY 2013. Overall length is 14 m, weight is 2.5 t. Also plotted are the cross section view of the HXI (right: 40 cm tall) and SGD (left: 50 cm tall).

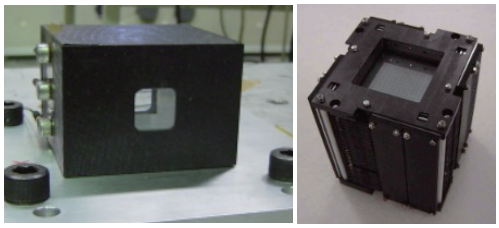

図 6.1.8: (*left*) A BGO crystal test model of the HXI and (*right*) a Compton Camera mechanical model of the SGD, tested for vibration input standard of the H-II rocket.

○ 両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) の開発

奥山らは、多層両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) の読み出しシステムの開発に参加し、特に各層を接続するインターフェースの評価を進めた。HXI でも 4 層を 2 ユニット、SGD では、合計 600 層をも超える、段間接続を簡素なデザインで信頼性高く実現する事が課題である。4 段多層 DSSD システムの試験の結果、当初試みた微細なピン等を使った手法で、常温では非常に良い性能が得られたものの、温度変化に対するノイズ特性の変化が抑えられなかった。温度とロケット打ち上げ振動等の環境試験を考慮すると、十分な信頼性を得る事は難しい事が確認され、小型ソケットを用いた開発に全面的に移行することとなった。

○ BGO 結晶シンチレータの耐震構造の開発

上田、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、「すざく」で用いられた技法では、BGO 結晶を支持する事は困難

である。そこで、CFRP とネジを使った全く新しい概念の固定方法を考案し、CFRP 製造業者と共同で設計、試作した。H-II ロケットでの打ち上げを考慮した振動試験 (図 6.1.8) を実施し、破壊が全く生じない事を確認した。これにより、HXI/SGD の構造開発の見通しが大きく開かれた [30]。この開発に関連して、業者と共同で特許を申請中である。

○ 半導体コンプトンカメラの構造開発

現在、チームとして HXI と SGD の基本構造の開発をしており、2008 年度は全体の機械設計、熱設計の検討を、JAXA、SLAC、そして三菱重工業などとともに進めている。2009 年の 3 月には、半導体コンプトンカメラのメカニカルモデルに対して、前項と同様の振動試験を実施しており (図 6.1.8)、機械構造上の目処が確認できた。今後は、熱設計が大きな課題である。

○ 結晶シンチレータの集光効率の研究

奥山らは、光学シミュレーションを導入して、BGO 等の結晶シンチレータにおいて、光検出素子へいかに効率よく集光するかを評価する仕組みを立ち上げた。特に 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外へ導くかが大きな課題である。この試みはこれまでも行われているが、反射材や結晶表面の境界条件が結果を大きく左右するため、実際に使用する予定の素材を用いた実験と比較しつつ、パラメータを正しく抽出する事が鍵を握る。多くの実験により、ゴアテックや ESR、$BaSO_4$ 粉の反射材の特性、および光学研磨面と曇りガラス面の透過/反射特性の評価に成功した。HXI/SGD で用いる BGO 結晶一種の形状の評価に応用したところ、実験結果をうまく再現した。これにより、今後、他の結晶の設計や、今後の設計変更をこのシミュレーションに立脚して進める事ができるようになった。

○ 新しい撮像型ガンマ線検出器

奥山らは、前項の結果を用いて、500 μm 幅のファイバー状の細い BGO 結晶、および 1.5 mm 幅の柱状の BGO 結晶を用いたイメージャの開発を行った。特許申請の都合上、今年度の年次報告での詳細の記述は差し控えるが、優れた位置分解能と、BGO 本来のエネルギー分解能を両立する新しい読み出し方法を考案し、検出器を試作してその性能を実証した [31]。この成果を受けて現在、MeV 帯域で使用できる、新しいガンマ線イメージャの開発を進めている。本件は特許申請準備中である。

○ スペースワイヤ (SpaceWire) の開発

SpaceWire は、次世代のシリアル通信規格であり、通信速度が可変、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、下位のレイヤーで実装されているという特徴を持つ。打ち上げ後の解体修理が不可能、低消費電力、という衛星の要求から、衛星内の通信規格として極めて有力で、JAXA および ESA の科学衛星の標準規格であるとともに、アメリカの将来衛星にも多く採用されている。湯浅らは、このデジタル技術の開発を中心となって進めてきた。今年度は、8 ノードのネットワーク型システムを試作し、一部の接続が切れた時に迂回経路を探して自動的に再接続する機能を確認した。奈良で開かれた SpaceWire 国際会議において実際に展示し [40]、その場で接続の切断、自動復帰のデモンストレーションを行うなど、その信頼性の高さも示した。また、時刻付けのための Time Code という仕様を取り込み、仕様通り 3 μs の精度でリモートノードを絶対時刻付けできる事を実証した [45]。

6.1.9 小型衛星計画への参加

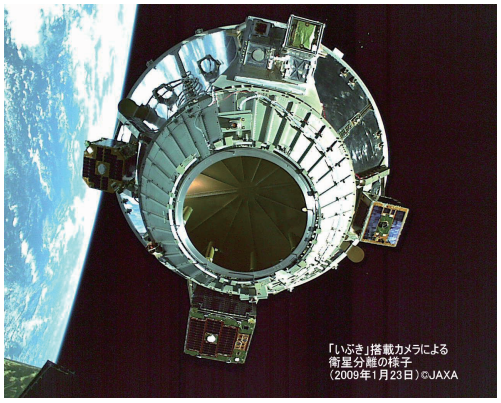

図 6.1.9: Small satellites launched at 23 Jan 2009, photo by **Ibuki** satellite. **SDS-1** is located to the bottom, and **Rising** is to the right. Credit JAXA.

○ 技術実証衛星１号機 *SDS-1* における重力波検出器

湯浅、中澤らは、東大坪野研、JAXA と共同で、JAXA の小型実証衛星 SDS-1 に搭載される SWIM 実験に参加した。SWIM は、SpaceWire に基づくシステムの実証と、小型重力波観測実験を兼ねた計画である。SDS-1 衛星は 2009 年 1 月 23 日に、「いぶき」地球観測衛星とともに打ち上げられ、以後、順調に運用を続けている。SWIM は、湯浅立ち会いのもと、2 月 10 日に立ち上げられ、SpaceWire 通信周りの試験を実施、各機器が完璧に動作している事を確認した。日本で初めての SpaceWire に基づく衛星搭載機器の実証がなされ、ASTRO-H などへの応用の道が開かれた。SDS-1/SWIM は現在も運用され、重力波アンテナの運用等を実施中である。[51, 97]

○ 雷観測衛星 *Sprite* における雷雲ガンマ線検出器

榎戸、上田、中澤らは、東北大学の主催する SPRITE-Sat 衛星計画 (現名 Rising 衛星) に参加し、JAXA と共同で雷からの突発的なガンマ線を宇宙から検出するカウンタ (Terrestrial Gamma-ray Counter: TGC) の開発を進めてきた [48]。地上での多くの動作試験を経て、「いぶき」衛星とともに 1 月 23 日に種子島より打ち上げられた。打ち上げ後、姿勢の決定、消費電力の調整等を行いつつ運用をしてきたが、2 月 4 日に、姿勢安定のためのマストを進展したところ、電力不足に陥り、上空からのデータを受信できなく

なっている。4 月 27 日現在、復旧していない[1]。幸いな事に衛星の通信機そのものは生きており、現在、東北大を中心に毎日の運用と復旧への努力が続けられている。

TGC は、重さ 1 kg、電力 0.7 W の極めてコンパクトな装置で、数 ms という極めて短いガンマ線パルスの検知を狙った、特徴のある検出器である。現時点で、APD を用いたガンマ線検出器の開発、振動試験、熱真空試験といった経験を得ており、回路などの共通性もできる限り確保したため、ASTRO-H 衛星の開発を進める上で、重要なステップとなった。また、この経験から、より効率の良い次世代 TGC のデザインなど多くのアイデアも生んでおり、試験の結果を含めて、論文を投稿準備中である。

○ 小型ガンマ線衛星 CAST 計画

中澤らを中心に、次世代の MeV ガンマ線全天観測を視野に、半導体コンプトンカメラに基づく小型衛星、CAST (Compton All Sky Telescope) 計画の検討を進めている。検出器技術は ASTRO-H の軟ガンマ線検出器 SGD に基づきつつ、600 keV までの帯域を、2 MeV 以上にまで広げ、ポインティング方向だけを観測する方法から、広い視野を見る方向へ変更する等、大きな改造を含む開発が求められる。今年度は、2009 年の 3 月に欧米の MeV 計画関係者をほぼ一同に会したワークショップを開催した。ここで、MeV ガンマ線帯域に隠される多くのサイエンスについて議論した後、その観測を実現するための技術的な方法について、ガンマ線レンズとの組み合わせ等多くのアイデアについて検討をした。中でも、CAST 計画は、2 MeV 以下に特化する事で、システムの巨大化を防ぐ事を主軸に、特徴ある計画として認識され、今後国際的な連携をしつつ開発を進めてゆく事を確認した。

＜【報文】＞

(原著論文)

[1] Terada, Y., Hayashi, T., Ishida, M., Mukai, K., Dotani, T., Okada, S., Nakamura, R., Naik, S., Bamba, A., & Makishima, K.: “Suzaku Discovery of Hard X-ray Pulsations from AE Aquarii”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **60**, 387-397 (2008)

[2] Makishima, K., Takahashi, H., Yamada, S., Done, C., Kubota, A., Dotani, T., Ebisawa, K., Itoh, T., Kitamoto, S., Negoro, H., (2 名): “Suzaku Results on Cygnus X-1 in the Low/Hard State”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **60**, 585-604 (2008)

[3] Nakazawa, K., Sarazin, C. L., Kawaharada, M., Kitaguchi, T., Okuyama, S., & Makishima, K., (7 名): “Hard X-ray Properties of the Merging Cluster Abell 3667 as Observed with Suzaku”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, in press (2009)

[4] Yamada S., Itoh T., Makishima K., & Nakazawa K.: “Suzaku Results on the Obscured Low-Luminosity Active Galactic Nucleus in NGC 4258”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, in press (2009)

[1]詳細は東北大学のプレスリリースを参照の事

[5] Abdo, A.A., (118 名), Okumura, A., (65 名): “The Fermi Gamma-Ray Space Telescope Discovers the Pulsar in the Young Galactic Supernova Remnant CTA 1”, *Science*, **322**, 1218-1221 (2009)

[6] Abdo, A. A., Ackermann, M., (167 名), Okumura, A., (84 名): “Fermi Observations of High-Energy Gamma-Ray Emission from GRB 080916C”, *Science*, **323**, 1688-1693 (2009)

[7] Tanaka, T., Uchiyama, Y., Aharonian, F. A., Takahashi, T., Bamba, A., Hiraga, J. S., Kataoka, J., Kishishita, T., Kokubun, M., Mori, K., Nakazawa, K., (3 名): “Study of Nonthermal Emission from SNR RX J1713.7-3946 with Suzaku”, *Astrophys. J.* **685**, 988-1004 (2008)

[8] Kawaharada, M., Makishima, K., Kitaguchi, T., Okuyama, S., Nakazawa, K., Matsushita, K., & Fukazawa, Y.: “A Galaxy Merger Scenario for the NGC 1550 Galaxy from Metal Distributions in the X-Ray Emitting Plasma”, *Astrophys. J.* **691**, 971-983 (2009)

[9] Furuzawa, A., Ueno, D., Hayato, A., Ozawa, M., Tamagawa, T., Bamba, A., Hughes, J., Kunieda, H., Makishima, K., (7 名): “Doppler-Broadened Iron X-Ray Lines From Tycho’s Supernova Remnant”, *Astrophys. J.* **693**, L61-L65 (2009)

[10] Enoto, T., (7 名), Makishima, K., Mereghetti, S., Murakami, H., Nakazawa, K., Sakamoto, T., Stella, L., Tiengo, A., Turolla, R., Yamada, S., (3 名): “Suzaku Observation of the New Soft Gamma Repeater SGR 0501+4516 in Outburst”, *Astrophys. J.* **693**, L122-L126 (2009)

[11] Gandhi, P., Makishima, K., Durant, M., Fabian, A. C., (5 名): “Rapid optical and X-ray timing observations of GX 339-4: flux correlations at the onset of a low/hard state”, *Mon. Not. Roy. Astro. Soc.* **390**, L29-L33 (2008)

● *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 「すざく」第３特集号

[12] Fukazawa, Y., Mizuno, T., Watanabe, S., Kokubun, M., (13 名) Enoto, T., Kitaguchi, T., Makishima, K., Nakazawa, K., Uehara, Y., Yamada, S., Yuasa, T., (6 名): “Modeling Reproducibility of Suzaku HXD PIN/GSO Background”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 17-33 (2009)

[13] Yamaoka, K., Endo, A., Enoto, T., (9 名), Makishima, K., Miyawaki, R., Morigami, K., Murakami, T., Nakagawa, Y. E., Nakazawa, K., (23 名) “Design and In-Orbit Performance of the Suzaku Wide-Band All-Sky Monitor”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 35-53 (2009)

[14] Hyodo, Y., Ueda, Y., Yuasa, T., Maeda, Y., Makishima, K., & Koyama, K.: “Timing and Spectral Study of AXJ1745.6-2901 with Suzaku”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 99-106 (2009)

[15] Paizis, A., Ebisawa, K., Takahashi, H., (6 名), Yamada, S., Yamaoka, K., & Yuasa, T.: “Broad-Band Spectrum of the Black Hole Candidate

IGRJ17497-2821 Studied with Suzaku", *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 107-113 (2009)

[16] Tamagawa, T., Hayato, A., Nakamura, S., Terada, Y., (17 名), Makishima, K.: "Suzaku Observations of Tycho's Supernova Remnant", *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 167-174 (2009)

[17] Miyawaki, R., Makishima, K., Yamada, S., Gandhi, P., Mizuno, T., Kubota, A., Tsuru, T. G., & Matsumoto, H.: "Suzaku Observations of M 82 X-1 : Detection of a Curved Hard X-Ray Spectrum", *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 263-278 (2009)

[18] Isobe, N., Makishima, K., Takahashi, H., Mizuno, T., Miyawaki, R., Gandhi, P., Kawaharada, M., Senda, A., Yoshida, T., Kubota, A., & Kobori, H.: "Spectral Transitions of an Ultraluminous X-Ray Source, NGC 2403 Source 3", *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 279-289 (2009)

[19] Kawano, N., Fukazawa, Y., Nishino, S., Nakazawa, K., Kitaguchi, T., Makishima, K., (7 名): "Constraint of Non-Thermal X-Ray Emission from the On-Going Merger Cluster Abell 3376 with Suzaku", *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 377-386 (2009)

[20] Nakagawa, Y. E., Mihara, T., Yoshida, A., Yamaoka, K., Sugita, S., Murakami, T., Yonetoku, D., Suzuki, M., Nakajima, M., Tashiro, M. S., & Nakazawa, K.: "Suzaku Observations of SGR1900+14 and SGR1806-20", *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 387-393 (2009)

(会議収録)

[21] Ohno, M., Uehara, T., Takahashi, T., Fukazawa, (14 名), Enoto, T., Miyawamki, R., Nakazawa, K., Makishima, K., (11 名): "The spectral properties of the GRB prompt gamma-ray emission observed by the Suzaku Wide-band All-sky Monitor", *Gamma-Ray Bursts 2007* (AIP Conf. Proc.) **1000**, 101-104 (2008)

[22] Tashiro, M. S., Terada, Y., Urata, Y., Onda, K., (13 名), Enoto, T., Miyawaki, R., Nakazawa, K., Makishima, K., (11 名): "Status of GRB Observations with the Suzaku Wideband All-sky Monitor", *Gamma-Ray Bursts 2007* (AIP Conf. Proc.) **1000**, 162-165 (2008)

[23] Kunieda, H., Takahashi, T., Kokubun, M., Nakazawa, K., & Ogasaka, Y.: "Hard x-ray imaging system for XEUS", *SPIE* **7011** 70110D (2008)

[24] Takahashi, T., Kelley, R., Mitsuda, K., Kunieda, H., (9 名), M., Makishima, K., Koyama, K., Madejski, G. M., Mori, K., Mushotzky, R., Nakazawa, K., (11 名): "The NeXT Mission", *SPIE* **7011** 70110O (2008)

[25] Kokubun, M., Nakazawa, K., Watanabe, S., Fukazawa, Y., Kataoka, J., Katagiri, H., Mizuno, T., Makishima, K., (22 名), Kitaguchi, T., Enoto, T., Yamada, S., Yuasa, T., Ueda, T., Uehara, Y., Okuyama, S., (14 名): "Hard X-ray imager (HXI) for the NeXT mission", *SPIE* **7011** 70110R (2008)

[26] Tamagawa, T., Hayato, A., Abe, K., Iwamoto, S., Nakamura, S., Harayama, A., Iwahashi, T., Makishima, K., Hamagaki, H., & Yamaguchi, Y. L.: "Gain properties of gas electron multipliers (GEMS) for space applications", *SPIE* **7011** 70113V (2008)

[27] Hayato, A., Tamagawa, T., Abe, K., Nakamura, S., Takanori, I., Harayama, A., Makishima, K., Yasuda, N., Kitamura, H., Sakurai, H., & Tokanai, F.: "Heavy ion irradiation test to gas electron multipliers", *SPIE* **7011** 70113W (2008)

[28] Aono, H., Takeda, S., Ishikawa, S., Odaka, H., Kokubun, M., Watanabe, S., Takahashi, T., Nakazawa, K., (4 名): "Application of double-sided silicon strip detectors to Compton cameras", *SPIE* **7021** 70211G (2008)

(学位論文)

[29] Kitaguchi, Takao: "*Suzaku* Studies of Energetic Neutrons from a Solar Flare and the Atmosphere", 博士学位論文

[30] 上田剛：「次期宇宙X線衛星 ASTRO-H に搭載する硬X線・軟ガンマ線検出器の機構開発」, 修士学位論文

[31] 奥山翔：「宇宙ガンマ線イメージャに向けた高屈折率結晶シンチレータの蛍光収集法の開発」, 同上

[32] 上原悠一：「『すざく』による活動銀河核からの鉄輝線と広帯域連続 X 線の研究」, 同上（天文学専攻）

(国内雑誌)

[33] 牧島一夫：「宇宙におけるプラズマ現象と長距離相互作用」、日本物理学会誌、2008 年 8 月号、595

[34] 榎戸輝揚, 土屋晴文：「雷雲は天然の粒子加速器か？」、天文月報 (日本天文学会)、2008 年 11 月号、667-676

＜**【学術講演】**＞

(国際会議)

● 招待講演

[35] Makishima, K.: "*Suzaku* Observations of Black-Hole Binaries and ULXs", *Astrophysics with All-Sky X-Ray Observations* (2008 年 6 月 10 日、理化学研究所和光キャンパス)

● その他の一般講演

[36] Makishima, K., Enoto, T., Mihara, T., Nakajima, M., Nakazawa, K., & Terada, Y.: "Recent *Suzaku* Results on Strongly Magnetized Neutron Stars", *The X-ray Universe 2008* (2008 年 5 月 27〜30 日, Granada)

[37] Yamada, S., Makishima, K., Takahashi, H., Done, C., Kubota, A., Dotani, T., & Nakazawa, K.: "New observational insights into the Low/Hard state of Cyg X-1 with Suzaku", *The X-ray Universe 2008* (2008 年 5 月 27〜30 日, Granada)

[38] Enoto, T., Tsuchiya, H., Yuasa, T., Yamada, S., Kato, H., Kawaharada, M., Kitaguchi, T., Kokubun, M., Okano, M., Nakamura, S., Nakazawa, K., & Makishima, K.: "Observations of high-energy gamma rays from winter thunderclouds", *International Congress on Plasma Physics 2008*, (2008 年 9 月 8〜12 日, 福岡)

[39] Yuasa, T., Nakazawa, K., Makishima, K., (7 名): "A simple super-resolution algorithm based on cross-correlation for sparsely sampled pulse waveforms", *IEEE Nuclear Science Symposium*, (2008 年 10 月 19〜25 日, Dresden)

[40] Yuasa, T., Kokuyama, W., Makishima, K., Nakazawa, K., (5 名): "A Portable SpaceWire/RMAP Class Library for Scientific Detector Read Out Systems", *International SpaceWire Conference*, (2008 年 11 月 4〜6 日, 奈良)

[41] Enoto, T.: "Suzaku observations of SGR 0501 +4516 and AXP 4U 0142+61", *Thirty Years of Magnetars: New Frontier* (2009 年 2 月 1〜8 日, Aspen)

[42] Enoto, T., Nakagawa, Y., Rea, N., Makishima, K., Esposito, P., Hurley, K., Yamada, S, Nakazawa, K, & Yamaoka, K., "Suzaku observations on hard X-rays of SGRs and AXPs", *Neutron Stars & Gamma Ray Bursts 2009*, (2009 年 3 月 30 日〜4 月 4 日, Alexandria, Egypt)

(国内会議)

- 日本物理学会・秋季大会（2008 年 9 月 20〜23 日、山形大学)

[43] 牧島一夫, 山田真也, 高橋弘充, 久保田あや, 堂谷忠靖, 海老沢研, 北本俊二, 根来均, 上田佳宏, 山岡和貴：「『すざく』衛星による Low-Hard 状態における CygX-1 の観測 (II)」、22pSH-6

[44] 榎戸輝揚, 牧島一夫, 中澤知洋, 国分紀秀, 川原田円, 柴崎徳明, 古徳純一：「『すざく』衛星による AXP 4U 0142+61 の硬 X 線放射の観測」、22pSH-8

[45] 湯浅孝行, 中澤知洋, 牧島一夫, 高橋忠幸, 能町正治, 高島健, 国分紀秀, 小高裕和, 萩原利士成, 安東正樹, 石徹白晃治, 穀山渉, 高橋弘充：「NeXT 衛星等に向けた SpaceWire I/F の開発」、22pSH-9

[46] 深沢泰司, 大杉節, 水野恒史, 片桐秀明, 高橋弘充, 奥村暁, 牧島一夫, (16 名)：「GeV ガンマ線観測衛星 GLAST の初期ステータス」、23aSH-1

[47] 奥村暁, 牧島一夫, 水野恒史, 片桐秀明, 河合誠之, 金井義和, 本田守弘, 釜江常好, Markus Ackermann, Seth Digel, Stefan Funk, 他 GLAST チーム：「GLAST 軌道上における宇宙線バックグラウンドの評価」、23aSH-2

[48] 上田剛, 榎戸輝揚, 中澤知洋, 三谷烈史, 高島健, 坂野井健, 氏家恵理子, 笠羽康正, 吉田和哉, 高橋幸弘, 森國城, 牧島一夫：「小型衛星による雷ガンマ線検出をめざした地球起源ガンマ線カウンターの開発」、23aSH-9

[49] 土屋晴文, 榎戸輝揚, 山田真也, 湯浅孝行, 川原田円, 北口貴雄, 国分紀秀, 加藤博, 岡野眞治, 中村聡史, 牧島一夫：「2007 年中における冬季雷雲からのガンマ線観測」、23aSH-12

[50] 西野翔, 深沢泰司, 林克洋, 中澤知洋, 田中孝明：「『すざく』衛星による Perseus 銀河団の温度構造解析」、22pSH-7

[51] 穀山渉, 安東正樹, 森脇成典, 石徹白晃治, 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, (9 名)：「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 VI（衛星への搭載)」、22pSG-6

- 日本天文学会・秋の年会（2007 年 9 月 11〜13 日、岡山理科大学)

[52] 牧島一夫：「『すざく』による銀河系内コンパクト天体の観測結果ハイライト」、B02a

[53] 中澤知洋, 川原田円, 北口貴雄, 奥山翔, 滝沢元和, 井上進, 深沢泰司, 松下恭子, 佐藤拓也, Craig Sarazin, Daniel R. Wik, Alexis Finoguenov, 牧島 一夫：「『すざく』が見た衝突銀河団の硬 X 線スペクトルとその磁場」、B22a

[54] 榎戸輝揚, 牧島一夫, 中澤知洋, 国分紀秀, 川原田円, 柴崎徳明, 古徳純一：「Anomaloux X-ray Pulsar 4U 0142+61 の非熱的な硬X線パルス放射の観測」、J46a

[55] 山田真也, 牧島一夫, 中澤知洋, 久保田あや, 高橋弘充, 堂谷忠靖, 海老沢研, 北本俊二, 山岡和貴,「すざく」Cyg X-1 GRO J1655-40 解析チーム：「『すざく』が切り開いたハード状態におけるブラックホールの新しい描像」、B03a

[56] 上原悠一, 中澤知洋, 山田真也, 牧島一夫：「X 線衛星『すざく』を用いた MCG-6-30-15 の広帯域スペクトルの解析」、S07a

[57] 奥山翔, 中澤知洋, 湯浅孝行, 北口貴雄, 牧島一夫：「ファイバーシンチレータと SSD を用いたγ線撮像検出器の開発」、W46a

[58] 高橋弘充, 白井裕久, 永江修, 深沢泰司, 北口貴雄, 牧島一夫：「『すざく』で観測したエディントン限界に近い低質量X線連星系の質量降着流」、B04a

[59] 玉川徹, 早藤麻美, 平賀純子, 馬場彩, 寺田幸功, 牧島一夫, 國枝秀世, 古澤彰浩, 上野大輔, 小澤碧, Jack Hughes, Una Hwang, ほか Suzaku Tycho チーム：「『すざく』による Tycho 超新星残骸の観測 – 粒子加速から元素合成まで」、B11a

[60] 大野雅功, 国分紀秀, 鈴木素子, 高橋忠幸, (19 名), 中澤知洋, 榎戸輝揚, 牧島一夫, (7 名)：「すざく衛星搭載 WAM によるガンマ線バーストの広帯域高感度観測」、B16a

[61] 寺田幸功, 守上浩市, 原山淳, 林多佳由, 石田学, 牧島一夫：「強磁場激変星みずがめ座 AE 星の降着流変動」、J43a

[62] 兵藤義明, 小山勝二, 上田佳宏, 湯浅孝行, 牧島一夫, 前田良知：「すざくによる低質量中性子星連星系 AX J1745.6–2901 の観測 II」、J45a

[63] 中川友進，三原建弘，吉田篤正，山岡和貴，杉田聡司，鈴木素子，中島基樹，村上敏夫，米徳大介，田代信，中澤知洋：「『すざく』衛星による軟ガンマ線リピータ SGR 1900+14/1806−20 の観測」、J49a

[64] 早藤麻美，玉川徹，上野大輔，古澤彰浩，國枝秀世，小澤碧，馬場彩，牧島一夫，Jack Hughes：「『すざく』でみる Tycho 超新星残骸の玉ねぎ構造」、K02a

[65] 増田智，簑島敬，下条圭美，寺田幸功，高橋忠幸，石川真之介，国分紀秀，渡辺伸，田島宏康，中澤知洋，奥山翔，S. Krucker，R. Lin，S. Christe，B. Ramsey，M. Gubarev，他 FOXSI チーム：「FOXSI ロケット実験計画の概要」、M59a

[66] 古澤彰浩，上野大輔，國枝秀世，早藤麻美，玉川徹，小澤碧，馬場彩，牧島一夫，Jack Hughes：「すざく衛星を用いた鉄輝線解析による Tycho 超新星残骸の構造解析」、Q36a

[67] 小波さおり，玉川徹，松下恭子，佐藤浩介，磯部直樹，千田篤史，早藤麻美，牧島一夫：「『すざく』で観測された近傍渦巻銀河 NGC4258 の星間ガスの重元素組成比」、R06a

[68] 川原田円，北口貴雄，中澤知洋，牧島一夫，山崎典子，太田直美，深沢泰司，松下恭子，佐藤浩介，大橋隆哉：「『すざく』衛星による MS 1512.4+3647 銀河団の重元素の研究」、T07a

[69] 菅原知佳，滝沢元和，中澤知洋，奥山翔：「すざく衛星による Abell 2319 銀河団ガスの温度構造とバルク運動の測定」、T10b

[70] 池尻祐輝，深沢泰司，深水浩司，片岡淳，戸泉貴裕，和田健介，中澤知洋，国分紀秀，高橋忠幸，田島宏康，森国城：「APD による NeXT 衛星軟γ線検出器 BGO アクティブシールドの光読み出し」、W29a

[71] 大杉節，深澤泰司，水野恒史，片桐秀明，(12 名)，牧島一夫，杉崎睦，福井康雄：「GLAST ガンマ線天文衛星の打ち上げ成功報告と LAT 望遠鏡の性能」、W41a

● 日本天文学会・春の年会（2009 年 3 月 24〜27 日、大阪府立大学)

[72] 牧島一夫：「ブラックホール連星の鉄輝線：真に広がっているか？」、A18a

[73] 中澤知洋：「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H (ex-NeXT) 搭載硬 X 線イメージャ(HXI) の開発の現状 (III)」、W61a

[74] 奥村曉，牧島一夫，釜江常好，Seth Digel，片桐秀明，林克洋，水野恒史，福井康雄，ほか Fermi/LAT チーム：「Fermi 衛星によるオリオン分子雲の観測」、Q17a

[75] 榎戸輝揚，中川友進，牧島一夫，山岡和貴，山田真也，中澤知洋，村上弘志，国分紀秀，坂本貴紀，吉田篤正：「『すざく』による軟ガンマ線リピーター SGR 0501+4516 の ToO 観測 (1)」、J14a

[76] 山田真也，牧島一夫，上原悠一，中澤知洋，高橋弘充，堂谷忠靖，久保田あや，上田佳宏：「『すざく』が捉えた Very High 状態： GX 339-4 の 広帯域 X 線観測」、J20a

[77] 上原悠一，山田真也，中澤知洋，寺島雄一，牧島一夫：「『すざく』による活動銀河核からの X 線放射の異なる変動成分への分解」、S04a

[78] 岩切渉，寺田幸功，三原建弘，牧島一夫，榎戸輝揚，中島基樹，Lorella Angelini：「『すざく』衛星による X 線連星 4U1626-67 のサイクロトロン共鳴吸収構造の観測」、J50a

[79] 山本堂之，中島基樹，藤井紫麻見，三原建弘，牧島一夫：「X 線連星パルサー 4U?0115+63 の 1999 年/2004 年アウトバースト時のサイクロトロン共鳴線の振る舞い」、J51a

[80] 山口弘悦，早藤麻美，玉川徹，牧島一夫，勝田哲，木村公，澤田真理，兵藤義明，小山勝二，森浩二：「『すざく』による大マゼラン星雲内超新星残骸 N103B の観測」、K09a

[81] 早藤麻美，玉川徹，吉井理恵，山口弘悦，平賀純子，望月優子，寺田幸功，馬場彩，高橋忠幸，内山泰伸，田中孝明，衣笠建三，牧島一夫：「『すざく』による超新星残骸の稀少元素探査 ～ ケプラー超新星残骸 ～」、K12b

[82] 水野恒史，林克洋，高橋弘充，片桐秀明，(7 名)，奥村曉，牧島一夫，福井康雄，林田将明，田島宏康，釜江常好，Seth Digel，ほか Fermi LAT collaboration：「フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡による、拡散γ線放射の観測」、Q16a

[83] 小波さおり，玉川徹，松下恭子，佐藤浩介，磯部直樹，瀬田裕美，松田桂子，牧島一夫：「『すざく』で観測された S0 銀河 NGC1316 の星間ガスの重元素組成比」、R11b

[84] 川原田円，北口貴雄，中澤知洋，牧島一夫，山崎典子，太田直美，深沢泰司，松下恭子，佐藤浩介，大橋隆哉：「『すざく』による MS 1512.4+3647 銀河団プラズマの重元素組成の研究」、T03a

[85] 小宮山円，松下恭子，佐藤浩介，大橋隆哉，山崎典子，竹井洋，中澤 知洋：「すざく衛星による Fornax 銀河団のオフセット観測」、T05a

[86] 菅原知佳，滝沢元和，中澤知洋，奥山翔：「すざく衛星による Abell 2319 銀河団の広帯域スペクトル解析」、T07a

[87] 真喜屋龍，戸谷友則，中澤知洋：「すざくによる EGRET 未同定天体の観測 ： 大規模構造形成に伴う非熱的放射の探査」、T08a

[88] 渡邉瑛里，中澤知洋，浜名崇，宮崎聡，岡部信広，滝沢元和，川原田円：「X 線と弱重力レンズによる ZwCl0823.3+4250 銀河団周辺の大規模構造フィラメントの解析」、T12b

[89] 大野雅功，国分紀秀，鈴木素子，高橋忠幸，(18 名)，中澤知洋，榎戸輝揚，牧島一夫，(9 名)：「『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)」、W40a

[90] 藤永貴久，尾崎正伸，馬場彩，堂谷忠靖，小高裕和，穴吹直久，高橋宏明，木村公，阪口塁，中嶋大，林田清，常深博，村上弘志，武井大，平賀純子，幸村孝由，渡辺辰雄，鶴剛，冨田洋，湯浅孝行：「SpaceWire を使った ASTRO-H SXI データ取得システムの構築」、W52b

● 日本物理学会・春の年会（2009 年 3 月 27〜30 日、立教大学）

[91] 水野恒史, 林克洋, 高橋弘充, 片桐秀明, (7 名), 奥村曉, 牧島一夫, 福井康雄, 田島宏康, 釜江常好, Seth Digel, ほか Fermi LAT Collaboration :「フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡で見た拡散 γ 線放射」、27aXD-10

[92] 山岡和貴, 杉田聡司, 田代信, 寺田幸功, (19 名), 中澤知洋, 榎戸輝揚, 牧島一夫, (9 名) :「『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 (V)」、28pSH-2

[93] 湯浅孝行, 中澤知洋, 牧島一夫, 高橋忠幸, 能町正治, 高島健, 国分紀秀, 小高裕和, 寺田幸功, 藤代厳, 程島文夫, 田苗明, 遠山正明 :「SpaceWire I/F を用いた衛星内時刻配信の検証」、28pSH-7

[94] 土屋晴文, 榎戸輝揚, 鳥居建男, 中澤知洋, 湯浅孝行, 福山太郎, 鳥井俊輔, 山口貴弘, 加藤博, 岡野眞治, 牧島一夫 :「高山における雷雲からの高エネルギー放射線の観測」、30aSP-8

[95] 国分紀秀, 高橋忠幸, 渡辺伸, 勝田隼一郎, 小高裕和, 石川真之介, 青野博之, 杉本宗一郎, 古関優, Peter von Ballmoos, 中澤知洋, 内山泰伸 :「ガンマ線レンズを用いた新世代ガンマ線検出システムの開発」、28aSH-3

[96] 常深博, 林田清, 山崎典子, 中澤知洋, 大橋隆哉, 深澤泰司, 鶴剛 :「高分解 X・ガンマ線撮像分光学の開拓」、30pSP-7

[97] 穀山渉, 安東正樹, 森脇成典, 石徹白晃治, 高橋走, 新谷昌人, 麻生洋一, 高島健, 中澤知洋, 高橋忠幸, 国分紀秀, 吉光徹雄, 小高裕和, 湯浅孝行, (10 名) :「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 VII (打ち上げと初期運用)」、30pSC-8

● その他の学会

[98] Enoto, T., Tsuchiya, H., Yamada, S., Yuasa, T., Kawaharada, M., Kitaguchi, T., Kokubun, M., Kato, H., Nakamura, S., & Makishima, K.: "Observations of high-energy gamma rays from winter thunderclouds on the Sea of Japan", 地球惑星合同大会 E207 セッション (2008 年 5 月 30 日 幕張)

[99] 榎戸輝揚, 三谷烈史, 中澤知洋, 牧島一夫, 坂野井健, 高島健, 吉田和哉, 高橋幸弘 :「SPRITE-SAT 搭載の小型ガンマ線検出器の開発と製作」、地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) (2008 年 10 月 9-12 日 仙台)

[100] 榎戸輝揚, 中川友進, 牧島一夫, 山岡和貴, 山田真也, 中澤知洋, 村上弘志, 国分紀秀, 坂本貴紀, 吉田篤正,「すざく」チーム :「すざく衛星を中心としたマグネター研究の最新成果 (1)」, 第 9 回宇宙科学シンポジウム (2009 年 1 月 6-7 日、JAXA 相模原)

[101] 榎戸輝揚, 三谷烈史, 上田剛, 牧島一夫, 坂野井健, 高橋幸弘, 高島健, 中澤知洋 :「雷雲ガンマ線の宇宙観測を狙う小型ガンマ線検出器の製作と今後」、第 9 回宇宙科学シンポジウム (2009 年 1 月 6-7 日、JAXA 相模原)

[102] 山田真也, 牧島一夫, 中澤知洋, 上原悠一, 高橋弘充, 堂谷忠靖, 北本俊二 :「『すざく』によるブラックホールの観測」、第 9 回宇宙科学シンポジウム (2009 年 1 月 6-7 日、JAXA 相模原)

[103] 山田真也 :「X 線で探る BH 時空 (2): 「すざく」衛星による最新結果」、第 2 回ブラックホール磁気圏勉強会, (2009 年 2 月 22-24 日、名古屋大学)

(セミナーなど)

[104] 牧島一夫 :「X線・ガンマ線で探る宇宙の高温・高エネルギー現象」、熊本大学理学部集中講義 (2008 年 7 月 22-24 日、熊本大学)

[105] 牧島一夫 :「牧島宇宙放射線研究室最終レビュー」(2008 年 8 月 4 日、 理化学研究所和光キャンパス)

[106] 榎戸輝揚, 土屋晴文, 湯浅孝行, 山田真也, 牧島一夫, & GROWTH Collaboration: 「雷雲ガンマ線の地上観測と粒子加速」、第 1 回宇宙天気サマースクール (2008 年 8 月 28-31 日、山梨清泉寮)

[107] 牧島一夫 :「『すざく』観測結果のハイライト III」、ビッグバン宇宙国際センター夏の学校 (2008 年 8 月 31 日、浅虫温泉)

[108] 山田真也 :「『すざく』が切り開いたハード状態におけるブラックホールの新しい描像」、宇宙高エネルギー物理学セミナー (2008 年 10 月 10 日、千葉大学)

[109] 牧島一夫 :「MAXI で解き明かす激動宇宙の姿」、第 29 回宇宙ステーション利用計画ワークショップ (2008 年 12 月 8 日、一橋記念講堂)

[110] 牧島一夫 :「極大からのアプローチ〜宇宙での元素合成を探る〜」、理研「物質の創成研究」終了シンポジウム (2008 年 12 月 22 日、 理化学研究所和光キャンパス)

[111] 牧島一夫 :「ブラックホールの素顔を暴く」、首都圏中高教員研修会 (2009 年 1 月 6 日、 理化学研究所和光キャンパス)

[112] 湯浅孝行 :「SpaceWire 標準組み込みソフトウェアの開発」、第三回 SpaceWire ユーザ会, (2009 年 1 月 21 日、JAXA 相模原)

6.2 高瀬研究室

核融合研究に使われるトカマク装置では，プラズマ中に流れる電流（プラズマ電流 $I_{\rm p}$）はプラズマ閉じ込めに不可欠である。通常のトカマクでは変流器の一次巻線にあたるセンターソレノイド（CS）の電流を変化させることで，二次巻線に相当するプラズマに電磁誘導で電流を駆動する。CS はトーラス中心部の貴重な空間を占有するため，これを用いずにプラズマを生成・維持することができれば装置の工学的制約が軽減されるため，炉の小型化が可能となり経済性が著しく改善される。当研究室で研究を行っている球状トカマク（ST）という配位では，CS の有無はプラントの経済性を大きく左右するため，最重要課題である。ST では高 β（β = プラズマ圧力/磁場圧力）のプラズマが得られるという利点があり，これは低磁場でも高いプラズマ圧力を達成できることを意味する。核融合出力密度はプラズマ圧力の 2 乗に比例するので，いかに高 β プラズマを安定に保てるかが重要な課題となる。本研究室では主に柏キャンパスの TST-2 球状トカマクを用い，複数のアプローチによりこれらの課題に取り組んでいる。

6.2.1 TST-2 実験

TST-2 は柏キャンパスに設置された ST 装置であり，プラズマ電流 100 kA 程度の ST プラズマを安定に生成できる。2008 年度は，主として 21 MHz の高周波（RF）パワーを用いた，ST プラズマの加熱実験と，高周波（21 MH および 2.45 GHz）を用いた自発的な電流，トカマク配位生成実験を行った。特に RF による ST 配位維持は世界で初めての成果である。また上記実験に必要な，電子温度・密度測定用のトムソン散乱計測器，線積分密度測定用のマイクロ波 (104 GHz および 140 GHz) 干渉計，周辺部の揺動測定用の静電プローブを整備し，高周波による可視発光強度の振動を測定するための高速発光システムの開発をおこなった。

高周波加熱実験

高次高調速波 (HHFW) は，イオンサイクロトロン周波数の高次高調波帯の波であり，高 β プラズマ中でも伝播可能のため，ランダウ減衰や走行時間減衰による電子加熱が期待できる。HHFW 実験では，一部の放電条件で，乱流密度揺動による散乱やパラメトリック崩壊不安定性 (PDI) によりプラズマ中心部への波動伝搬が制限される。図 6.2.10 では 21 MHz の HHFW(ポンプ波) の (a) 真空入射時と (b) プラズマ入射時の RF 磁気プローブで測定した周波数スペクトルを比較している。プラズマ入射ではポンプ波成分の有意な広がりが観測され，スペクトルはポンプ波強度によらないため，乱流による散乱に起因すると考えられる。プラズマ入射では，ポンプ波は低域サイドバンドとイオンサイクロトロン周波数帯準モード (ICQM) に崩壊する。低域サイドバンド波は別の HHFW もしくはイオンバーンスタイン波 (IBW) と考えられる（図 6.2.10(b)）[T. Oosako, et al., Nucl. Fusion (2009), in press]。

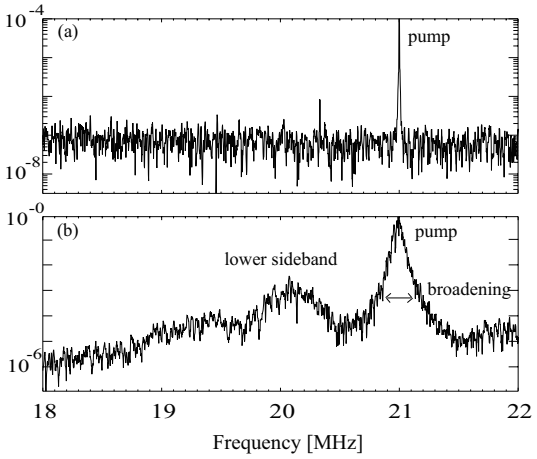

図 6.2.10: Comparison of frequency spectra during HHFW injection (a) without plasma and (b) with plasma.

真空容器内の赤道面外周に多数の RF 磁気プローブを設置し，HHFW の空間分布を調べた。図 6.2.11 は波動パワーのトロイダル分布を示す。アンテナから離れた位置で最大となり，アンテナに対して左右非対称の分布が見られる。アンテナで励起された HHFW がプラズマ中を伝播し吸収・減衰するため，HHFW 強度はアンテナ (トロイダル角 = 0°) 付近で最大となり離れるほど減少すると予測されたが，全く逆の結果が得られた。これは，波動伝播が一様等方ではなく，伝播経路を反映したものであることを示している。また PDI により励起されたサイドバンド波もポンプ波と類似した分布をもつことがわかった。

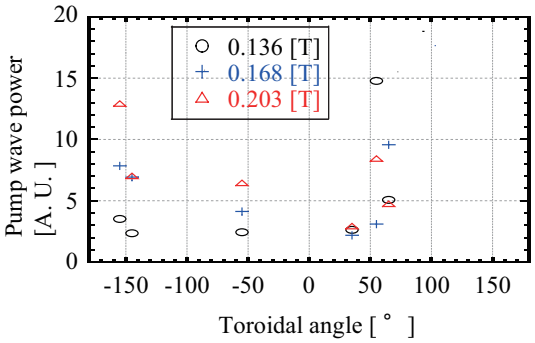

図 6.2.11: Toroidal distribution of the pump wave component.

波動伝播と揺動による散乱の相関を検証するため，多点に設置された RF 磁気プローブから代表的な 4 点 (青:トロイダル角 −9° トーラス外側，黒：−55° 外側，緑：155° 外側，赤：トーラス内側) を選び，周波数広がりの空間位置依存性を調べた（図 6.2.12，スペクトルは最大パワーで規格化してある）。周波数広がりは，アンテナから離れるほど広くなり，CS 側（プラズマを隔てたトーラス内側）で最も大きい。この結果は，ポンプ波がプラズマ中を進むにつれ散乱を重ね，周波数広がりが増大していくという描像で説明できる。さらに，周波数広がりが大きい 155° と CS で測定されたピーク周波数は 21 MHz から低周波側へシフトしていることが明らかになった。今後，周波数ピークシフトのパラメータ依存性を明らかにし，物理過程の解明を進める予定である。

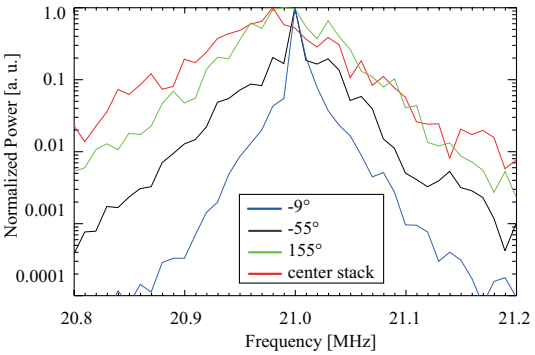

図 6.2.12: Frequency spectra around the pump wave frequency.

トムソン散乱による電子温度計測器を整備し，RF

による加熱効果の検証をおこなった [5]。0.45 J の Nd:YAG レーザーをプラズマに入射し，散乱光を球面ミラーで集光，ポリクロメーターで分光し，アバランシェフォトダイオード (APD) で検出する。電子温度の高周波入射パワー依存性を調べ，入射パワー 100 kW と 300 kW の間に温度上昇の閾値があることが判明した。また，入射終了後に電子温度の低下が観測された。計測点を増設して高温部と低温部を同時計測するために，より高出力（1.6 J）のレーザーの導入と，ポリクロメーターの増設に伴う APD の増幅器等の再設計をおこなっている。

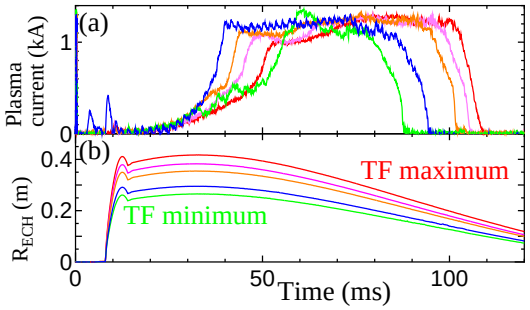

図 6.2.13: Time evolutions of (a) plasma current and (b) major radiaus of ECH layer R_{ECH}.

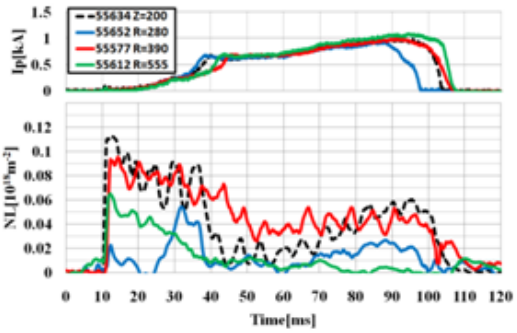

図 6.2.14: Time evolutions of line integrated densities (NL) along four paths.

高周波によるプラズマ生成実験

TST-2 では，2.45 GHz/5 kW のマグネトロンを用いた電子サイクロトロン共鳴加熱（ECH）による ST プラズマの生成実験をおこなっている [4, 9]。電磁波を用いた非誘導法によるトカマクプラズマの生成が可能となれば，CS 除去によるトカマク炉の小型化と定常維持へ大きく展望が拓ける。ECH により生成されたプラズマがトカマク配位に変化するまでの間に，プラズマ電流の増加率が急増する「電流ジャンプ」と呼ばれる現象が確認されており，その物理機構を明らかにするため，各種パラメータ依存性を調べた。ECH は磁気共鳴を用いるため，トロイダル磁場強度を変えると，共鳴層の大半径方向の位置 R_{ECH} が変化する。図 6.2.13 に電流波形のトロイダル磁場依存性を示す。加熱電力と垂直磁場は，時間的に一定に保たれている。加熱開始と共に漸増するプラズマ電流が，時刻 30–50 ms あたりから急増している。トロイダル磁場を弱めて，共鳴層を大半径内側に寄せると，電流ジャンプは早まる。電流ジャンプ後に，閉じた磁気面が形成されていることを，磁気計測に基づく平衡解析より確認した。この時のプラズマの密度変化を，大半径 (R = 280, 390, 555 mm) の 3 垂直経路，及び赤道面より (Z = 200 mm) の高さの 1 水平経路で，線積分電子密度（NL）をマイクロ波干渉計で計測し，電流ジャンプ前後の NL と平衡解析，CCD 画像を相互比較する事で電流ジャンプ前後の電子密度分布を明らかにした。ECH start-up 実験のプラズマ電流波形と 4 経路で計測された NL を図 6.2.14 に示す。Z=200 mm の経路で電流ジャンプ直後に NL が一旦減少し，その後増加している。プラズマが上下方向に一旦収縮し，その後上下方向へ広がったことを示唆している。プラズマ柱の中心に近い R=390 mm（プラズマ中心）の NL は，電流ジャンプ直後から放電終了時にかけて R=280，555 mm と比べて高い NL 値を示している。プラズマ柱中心部の電子密度が最も高くなっていると考えられる。

平衡解析より求めた磁気配位と CCD カメラ画像より得られた可視光発光分布を図 6.2.15 に示す。最外殻磁気面と発光領域の境界がよく一致し，プラズマの上下方向の収縮後に膨張する様子が確認された。NL 計測も考慮すると，電流ジャンプに伴い，プラズマは最外殻磁気面内部に凝縮すると考えられる。一方このプラズマ構造には，最外殻磁気面の外側に流れるプラズマ電流が大きく寄与すると考えられる。その影響を調べるため，電流注入の可能な LaB_6（六ほう化ランタン）電極をもつ電子銃を TST-2 に設置した。

6.2.2 UTST 実験

ST の高 β（β はプラズマ圧力の磁気圧に対する比）および高閉じ込め特性を活用すれば，小型装置で体積中性子源或いは発電実証を実現し，核融合開発の加速に貢献できる。ST の特徴である高 β を更に高めた「超高ベータ ST プラズマ」を生成・維持する新手法の開発を目的とし，新装置 UTST（図 6.2.16）を建設し，実験を開始した [27]。ST 核融合炉で採用されるためには，トーラス中心部の CS を用いない方法でなければならない。具体的には，真空容器外に配置された上限 2 対のコイルが作る磁気中性点（図 6.2.17 左）付近に 2 個の ST プラズマを生成し，軸対称合体させる。磁場強度は 0.1 T 程度であり，合体後には大半径 0.4 m，アスペクト比 1.4 程度，最大プラズマ電流 150 kA 程度の高ベータ ST プラズマ生成に成功した（図 6.2.17 右）。これは合体に伴う磁気リコネクション（磁力線の繋ぎ換え）による磁場から粒子へのエネルギー変換による加熱と考えられる。同規模の TS-4 装置では，イオン温度，電子温度，密度分布の実測により，イオン加熱を中心とする 4–5 MW の加熱を確認している。現状では高ベータの維持時間は数十アルフベン時間であるため，HHFW などの先進的 RF 手法および中性粒子ビームによる追加熱を導入中である [32]。

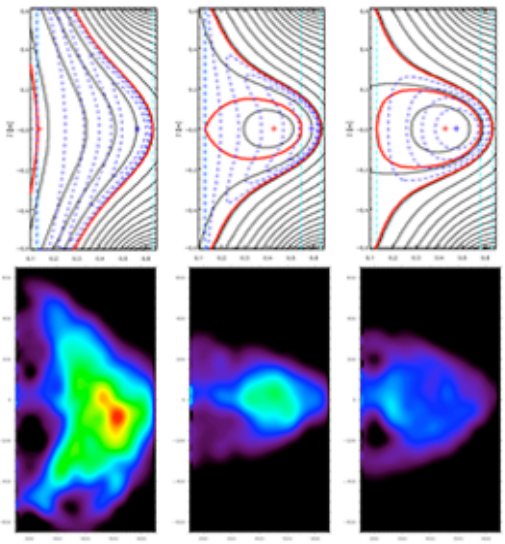

図 6.2.15: Magnetic flux surfaces (upper frames) and visible images (lower frames) at the beginning of current jump (30 ms), immediately after current jump (50 ms), and at the end of sustainment (80 ms). The red lines show flux surfaces which contact the inboard wall or the outboard limiter.

図 6.2.16: Newly constructed UTST device for ultra-high β ST plasma formation. The vertically oriented cylinder on the right is the UTST vacuum vessel, while the horizontally oriented cylinder on the left is the neutral beam injector.

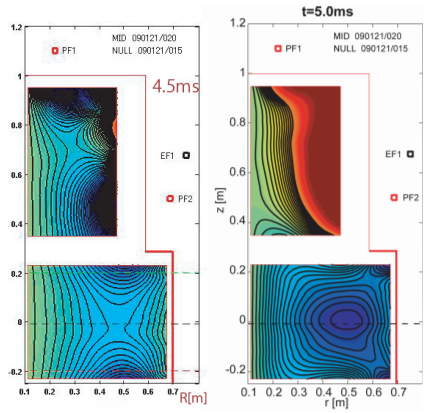

図 6.2.17: Constant flux surfaces without plasma (left) and with plasma formed by merging (right).

6.2.3 プラズマ乱流の研究

プラズマ乱流場における振動径電場の構造とダイナミクス

強い乱流状態にある磁場閉じ込めプラズマでは，乱流の非線形過程を通じてプラズマ輸送の促進あるいは抑制が起こり，自発的に秩序が形成される。本研究では輸送抑制効果の期待される測地線音波（GAM）と呼ばれる構造の非線形ダイナミクスを理論的に解析した。流体方程式を基礎に，乱流振幅モデルによるレイノルズ応力項を採用し，非線形効果は三次まで摂動的に導入した。その結果，GAM の二倍高調波，飽和振幅の解析的表現を得，JFT − 2M トカマクで得られた実験結果とよい一致を示し，レイノルズ応力モデルの妥当性を検証できた。さらに GAM 同士の非線形結合による低周波帯状流の励起を世界で初めて見出した [7, 14]。

乱流プラズマの非線形・非局所エネルギー伝達の観測

九州大学・核融合科学研究所との共同研究で，直線プラズマ装置にて多スケール乱流場の非線形エネルギー移送過程の実験研究を行った。多スケール乱流では，線形不安定な微視的乱流がさらに変調不安定性を起こし，別の微視的乱流や中間スケール揺動（例えば帯状流：木星などに見られる大域的な速度シア構造）に運動量を与え，周波数空間や実空間にエネルギーを分配する機構が存在する。乱流揺動による運動量輸送量（Reynolds 応力）を計測可能な静電プローブを開発し，実験解析をおこなった。乱流の質的変化（スペクトルの幅が狭いコヒーレントな揺動が複数共存する系から，幅が広がった広帯域揺動が卓越する系への遷移）が観測される臨界放電条件にて，微視的ドリフト波揺動（7–8 kHz）と低周波帯状流（〜0.4 kHz）の共存系を見出した。詳細な非線形解析の結果，ドリフト波の径方向波数が帯状流の周波数で変調され，ドリフト波の波面が規則的にたわ

み，理論で予測されたパラメトリック変調不安定性を実験で初めて観測した。また，バイスペクトル解析によってドリフト波間，ドリフト波と帯状流間の非線形エネルギー移送関数の符号を評価し，ドリフト波間では高調波への順カスケード，ドリフト波－帯状流間では帯状流強度の極大点で逆カスケードが起こっていることを突き止めた。さらに移送関数の符号が周波数空間・実空間内で変化し（図 6.2.18），帯状流を介した揺動の非局所的・非線形エネルギー伝達を世界で初めて発見した [10, 11, 15]。

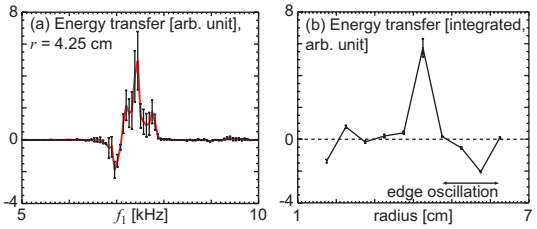

図 6.2.18: Nonlinear energy transfer functions between the drift wave and the zonal flow in (a) frequency space and (b) real space (integrated). Positive sign indicates transfer from the drift wave to the zonal flow.

6.2.4 共同研究

MAST における MHD 不安定性

ST における MHD 不安定性の一つとして磁気再結合現象 (IRE) が挙げられる。英国原子力機関（UKAEA）との共同研究で，球状トカマク装置 MAST において，IRE と磁気揺動の相関に焦点を当てた実験解析をおこなった。MAST では放電前半で小規模な IRE 及び後半にディスラプションを伴う大規模な IRE が頻繁に観測され，プラズマの性能を制限している。

小規模な IRE によるプラズマ崩壊直前には，磁気揺動及び軟 X 線放射強度分布に数 kHz の周波数を伴うのテアリングモードと 10 kHz 程度の別のモードが混在していることが新たに明らかになった。2 つのモードを仮定した，三次元ヘリカルフィラメントモデルでポロイダル断面の磁気揺動の構造を調べると，ポロイダル/トロイダルモード数 $m/n = 2/1$ のテアリングモードおよび $m/n = 5/2$ もしくは $m/n = 6/2$ の磁気揺動は両モード共に局所的に強め合っている部分があり，2 つのモードによる局所的な分布の変形が IRE の原因と示唆される結果を得た [H. Tojo, et al., Plasma Fusion Res. (2009), in press]。

大規模な IRE では磁気揺動に 100 kHz 程度の高周波成分が見え，その後軟 X 線放射強度分布は中心付近で減少する。この高周波数モードは高 n バルーニングモードのような圧力勾配駆動型不安定性と推定されているが，その実験検証を行った。まず圧力勾配の検証を行い，電子温度分布の時間発展から圧力勾配因子 $P_f = P_{\max}/L_{\rm FM}$ を求め，それが 3.1×10^4 Pa/m から 4.0×10^4 Pa/m まで増加することを確認した。またトロイダル方向に 10° 離れた 2 つの磁気コイルで測定した信号のクロスフェーズから n を求めた。100 kHz 程度に強い相関があり，クロスフェーズは最大で 70° と大きく，高 n(∼ 7) モードの存在が示唆された。さらにトーラス内側と外側の磁気揺動振幅を比較すると，外側の方が磁場の揺動振幅が強いことが判明した。これらの解析結果は，このモードが高 n バルーニングモードであることを支持するものである [6]。

JT-60U トカマクの高自発電流プラズマ

日本原子力研究開発機構の JT-60U トカマクにおいて，全プラズマ電流中のブートストラップ電流（BS 電流）が占める割合が 100%を超えること（BS オーバードライブ）を示唆する実験データが得られている。本実験では BS 電流以外の駆動電流の寄与を極力抑え，また垂直中性粒子入射を行いプラズマに粒子供給、加熱を行い、BS 電流によりプラズマを維持することに世界で初めて成功した。これまでの平衡解析に動的シュタルク効果計測による磁場ピッチ角分布データを反映させ，解析精度を向上させた。その結果，全電流中の BS 電流の占める割合が 100%を超えている事が示され，計測誤差を考慮しても BS オーバードライブが達成できていることを実証できた。

＜受賞＞

[1] 佐々木真，理学系研究科研究奨励賞，理学系研究科，東京大学大学院理学系研究科，平成 21 年 3 月 24 日

[2] 永島芳彦，第 3 回日本物理学会領域 2 若手奨励賞，日本物理学会，平成 21 年 3 月 27 日。

＜報文＞

(原著論文)

[3] A. Ejiri, T. Yamada, Y. Adachi, O. Watanabe and Y. Takase: “The Response of microwave reflectometry under generalized configuration”, Plasma Phys. Contr. Fusion **50** No. 6, 065003 (2008)

[4] J. SUGIYAMA, A. EJIRI, Y. TAKASE, et al.: “Electron Cyclotron Heating Start-Up Experiments on TST-2”, Plasma Fusion Res. **3**, 026 (2008).

[5] S. KAINAGA, A. EJIRI, Y. TAKASE, , et al.: “Development of a Compact Thomson Scattering System for the TST-2 Spherical Tokamak”, Plasma Fusion Res. **3**, 027 (2008).

[6] H. TOJO, M.P. GRYAZNEVICH, A. Ejiri, A. SYKES and Y. TAKASE: “Temporal Evolution of the Pressure Profile and Mode Behavior during Internal Reconnection Events in the MAST Spherical Tokamak”, Plasma Fusion Res. **3**, S1065 (2008).

[7] M. SASAKI, K. ITOH, A. EJIRI and Y. TAKASE: “Geodesic Acoustic Modes in Multi-Ion System”, Plasma Fusion Res. **3**, S1017 (2008).

[8] T. TOKUZAWA, A. EJIRI, K. KAWAHATA and LHD Experimental Group: “Observation of the Internal Structure of Energetic Particle-Driven MHD Modes in a Large Helical Device”, Plasma Fusion Res. **3**, S1064 (2008).

[9] O. WATANABE, A. EJIRI, T. YAMAGUCHI, et al.: “Plasma Current Sustainment by RF Power in ECH Start-up Plasma in the TST-2 Spherical Tokamak”, Plasma Fusion Res. **3**, 049 (2008).

[10] Y. Nagashima, S.-I. Itoh, S. Shinohara, et al.: “Coexistence of Zonal Flows and Drift-Waves in a Cylindrical Magnetized Plasma”, J. Phys. Soc. Jpn. **77** 114501 (2008).

[11] Y. NAGASHIMA, S.-I. Itoh, S. Shinohara, et al.: “Nonlinear energy transfer of drift-wave fluctuation in a cylindrical laboratory plasma”, Plasma Fusion Res. **3**, 056 (2008).

[12] Y. Adachi, A. Ejiri, Y. Takase, et al.: “Detection of a new parametric decay instability branch in TST-2 during high harmonic fast wave heating”, Rev. Sci. Instrum. **79**, 10F507 (2008).

[13] H. Tojo, A. Ejiri, M. P. Gryaznevich, Y. Takase, and Y. Adachi: “Poloidal mode analysis of magnetic probe data in a spherical tokamak configuration”, Rev. Sci. Instrum. **79**, 10F120 (2008).

[14] M. Sasaki, K. Itoh, Y. Nagashima, A. Ejiri, and Y. Takase: “Nonlinear self-interaction of geodesic acoustic modes in toroidal plasmas”, Phys. Plasmas **16**, 022306 (2009).

[15] Y. Nagashima, S-I. Itoh, S. Shinohara, et al.: “Observation of the parametric-modulational instability between the drift-wave fluctuation and azimuthally symmetric sheared radial electric field oscillation in a cylindrical laboratory plasma”, Phys. Plasmas **16**, No.2, 020706 (2009).

(学位論文)

[16] 佐々木真：“Structure and Dynamics of Oscillatory Radial Electric Field in Plasma Turbulence（プラズマ乱流場における振動径電場の構造とそのダイナミクス）”（博士論文）.

[17] 東條寛：“A Study of Magnetohydrodinamic Events Accompanying Magnetic Reconnection in Spherical Tokamak（球状トカマクプラズマにおける磁気リコネクションを伴う MHD 事象に関する研究）”（博士論文）.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[18] H. Tojo, et al.:“Poloidal Mode Analysis of Magnetic Probe Data in a Spherical Tokamak Configuration”: 17th High temperature Plasma Diagnostics, Albuquerque, New Mexico, USA May 11-15, 2008

[19] Y. Adachi, et al.:“Detection Of A New PDI Branch In TST-2 During High Harmonic Fast Wave Heating”: 17th High temperature Plasma Diagnostics, Albuquerque, New Mexico, USA May 11-15, 2008

[20] Y. Nagashima, et al.:“Coexistence of the drift wave spectrum and low-frequency zonal flow potential in cylindrical laboratory plasmas”: 35th Euro. Phys. Soc. Plasma Phys. Conf., Crete, Greece, June 9-13, 2008

[21] Y. Adachi, et al.:“Features of a New PDI Branch Observed in TST-2 During High Harmonic Fast Wave Injection”: The 35th IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS2008),Karlsruhe, Germany, June 15-19, 2008

[22] M.Sasaki, et al.:“Nonlinear Processes in Geodesic Acoustic Modes”: 2nd ITER International summer school (IISS 2008), Fukuoka, Jul.22-25, 2008

[23] Y. Nagashima, et al.:“Reynolds stress measurements for investigation of nonlinear processes of turbulence in the Large Mirror Device and Large Mirror Device-Upgrade”: International Congress on Plasma Physics (ICPP) 2008, Fukoka, Japan, Sep 8-12, 2008

[24] O. Watanabe, et al.:“Non-inductive plasma start-up and sustainment by wave heating at two frequencies in the TST-2 Spherical Tokamak”: International Congress on Plasma Physics (ICPP) 2008, Fukoka, Japan, Sep 8-12, 2008

[25] T. Oosako, et al.:“Fast Wave electron heating experiments focusing on competition betweendamping mechanisms on Large Helical Device”: 18th International Toki Conference (ITC18), Toki Dec.9-12, 2008 (P2-13)

[26] H. Tojo, et al.:“Features of High Frequency Mode during Internal Reconnection Events on MAST”: The Joint Meeting of 4th IAEATechnical Meeting on Spherical Tori and 14th Int. Workshop on Spherical Torus, Frascati, Roma, Oct. 7-10, 2008

[27] T. Yamada, et al.:“Initial Resutls from the UTST Spherical Tokamak”: The Joint Meeting of 4 th IAEATechnical Meeting on Spherical Tori and 14th Int. Workshop on Spherical Torus, Frascati, Roma, Oct. 7-10, 2008

[28] Y. Takase for the TST-2 Group:“Plasma Start-up, sustainement, and heating by RF waves in TST-2”: The Joint Meeting of 4 th IAEATechnical Meeting on Spherical Tori and 14th Int. Workshop on Spherical Torus, Frascati, Roma, Oct. 7-10, 2008

[29] A. Ejiri, et al.:“Non-inductive Plasma Current Start-up by EC and RF Power in the TST-2 Spherical Tokamak”:22nd IAEA Fusion Energy Conference, Geneva, Switzerland, Oct 13-18, 2008 (EX/P6-6)

[30] Y. Takase, et al.:“Parametric Decay Instability During High Harmonic Fast Wave Heating Experiments on the TST-2 Spherical Tokamak”:22nd

IAEA Fusion Energy Conference, Geneva, Switzerland, Oct 13-18, 2008 (EX/P6-27)

[31] A. Ejiri, et al.:“Equilibrium analysis of the start-up plasma in the TST-2 spherical tokamak”:8th Japan-Australia Plasma Diagnostics Workshop, Canberra and Murramarang, Australia, Feb. 2-5, 2009

[32] T. Oosako, et al.:“High Harmonic Fast Wave Experiments on TST-2 and UTST”: US-J and Korea-Japan RF plasma physic WS, Gifu, Japan, Mar. 16-18, 2009

招待講演

[33] K.Hanada, K.N.Sato, H.Zushi, ..., Y.Takase, ...,A.Ejiri, et al.:“Steady-state operation scenario and the first experimental result on QUEST”::18th International Toki Conference (ITC18), Toki Dec.9-12, 2008 (P2-13)

(国内会議)

一般講演

[34] 渡邉理他：”TST-2 球状トカマクにおける高周波による電流生成実験”:第 7 回核融合エネルギー連合講演会（青森）, 2008 年　6 月 19 日-21 日：19C-21

[35] 高瀬雄一他：”TST-2 における電流立ち上げ実験”：第 2 回 QUEST 研究会（春日）2008 年 7 月 25-26 日

[36] 江尻晶，高瀬雄一”電流立ち上げ配位における粒子軌道と電流のモデリング”：第 2 回 QUEST 研究会（春日）2008 年 7 月 25-26 日

[37] 江尻晶他：”TST-2 球状トカマク立ち上げ実験における MHD 不安定性”：日本物理学会第 63 回秋季大会（盛岡）2008 年 9 月 20 日-23 日：21pZH-10

[38] 花田和明，石黒正貴，崎村尚史，...，高瀬雄一，江尻晶他：”QUEST における閉磁気面形成シナリオ”：日本物理学会第 63 回秋季大会（盛岡）2008 年 9 月 20 日-23 日 21pZH-14

[39] 江尻晶他：”TST-2 球状トカマクにおける非誘導立ち上げプラズマの平衡解析”:プラズマ・核融合学会第 25 回年会（宇都宮）2008 年 12 月 2 日-5 日：2pB08

[40] 渡邉理他：”TST-2 球状トカマクにおける 21MHz 電磁波を用いた加熱電流駆動実験”:プラズマ・核融合学会第 25 回年会（宇都宮）2008 年 12 月 2 日-5 日：4aA01P

[41] 崎村尚史他：”QUEST における閉磁気面形成のためのオペレーション最適化について”:プラズマ・核融合学会第 25 回年会（宇都宮）2008 年 12 月 2 日-5 日：4aA09P

[42] 石黒正貴他：”CPD 及び QUEST における渦電流を考慮した磁気計測”:プラズマ・核融合学会第 25 回年会（宇都宮）2008 年 12 月 2 日-5 日：4aA13P

[43] 渡邉理他：”TST-2 球状トカマクにおける 21MHz 電磁波を用いた加熱電流駆動実験”「高性能ヘリカルプラズマに向けた先進ヘリカル研究の進展」「周辺プラズマ挙動と SOL，プラズマー壁相互作用」「核融合エネルギーフォーラム物理クラスター：周辺ペデスタルサブクラスター会合」（土岐）2009 年 1 月 6 日-7 日

[44] 江尻晶：”TST-2 球状トカマクにおける プラズマ立ち上げ実験”:自律燃焼系プラズマでの特性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（土岐）2009 年 1 月 8 日-9 日

[45] 高瀬雄一，TST-2　Group：”TST-2 における RF によるプラズマ立ち上げ”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」電気学会（土岐）2009 年 3 月 10 日-11 日

[46] 渡邉理：”X-BAND 表面波発振器の開発”：平成 21 年電気学会全国大会（北海道）2007 年 3 月 17 日-19 日：1-020, p.25

[47] 江尻晶，高瀬雄一：”スタートアッププラズマでの電場と粒子軌道”:第 3 回 QUEST 研究会（春日）2009 年 3 月 23,24 日

[48] 山口隆史他：”TST-2 におけるトムソン散乱計測と QUEST における計測の検討”:第 3 回 QUEST 研究会（春日）2009 年 3 月 23,24 日

[49] 佐々木真他：”GAM の非線形結合によるゾーナルフローの励起”：日本物理学会第年会 64 回年次大会（池袋）2009 年 3 月 27 日-30 日：27pXE-8

[50] 倉品博樹他：”TST-2 球状トカマクにおける 非誘導立ち上げプラズマの密度の振る舞い”：日本物理学会第年会 64 回年次大会（池袋）2009 年 3 月 27 日-30 日：28aXe-3

[51] 小林弘明他：”高次高調速波によるパラメトリック崩壊不安定性”：日本物理学会第年会 64 回年次大会（池袋）2009 年 3 月 27 日-30 日：27aXE-5

[52] 永島芳彦他：”高次高調速波入射時の波動の非線形解析”：日本物理学会第年会 64 回年次大会（池袋）2009 年 3 月 27 日-30 日：27aXE-6

[53] 東條寛　他：”Analysis of internal reconnection events in the MAST spherical tokamak”：日本物理学会第年会 64 回年次大会（池袋）2009 年 3 月 27 日-30 日：28pSA-5

招待講演

[54] 永島芳彦，山田幸太郎：”トロイダルプラズマ・基礎直線プラズマにおける乱流の非線形過程の実験的研究”:第 12 回若手科学者によるプラズマ研究会（原子力機構那珂）2009 年 3 月 16 日-18 日

[55] 永島芳彦：受賞記念講演”トロイダルプラズマ・基礎直線プラズマにおける乱流の非線形過程の実験的研究”：日本物理学会第年会 64 回年次大会（立教大学池袋）2009 年 3 月 27 日：27pXE-2

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。

重力波は光速度で伝搬する時空のひずみであり、超新星爆発や連星中性子星の合体などの非常に激しい天体現象にともなって発生する。また宇宙のごく初期に起源をもつ重力波も予想されており、将来的には重力波によって、電磁波では決して見ることができない宇宙の姿をとらえるようになると期待される。これらの重力波観測によって、新しい分野「重力波天文学」を確立することが現在の重力波研究の目的である。重力波を使って宇宙を見ることは、人類の新たな知の開拓につながる。

これまでの研究では、TAMA300 による重力波探査と、次世代レーザー干渉計 LCGT の開発が 2 つの主軸となっていた。最近これにくわえて、宇宙空間を利用した重力波検出計画が構想されるようになった。地上に干渉計を作る限り、基線長の制限や地面振動といった障害は避けることができない。しかし自由な宇宙空間ではこれらの制限が取り払われ、理想的な環境が期待できる。特に、地上では不可能な低周波の重力波検出が可能となることが大きな魅力である。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して、DECIGO によって巨大ブラックホールや宇宙初期のインフレーションに起源をもつ重力波をとらえようとする計画を推進中である。[36, 18, 50]

2008 年度は本研究室の穀山渉氏が執筆した修士論文によって理学系研究科研究奨励賞を受賞した。[1, 3]

6.3.1 地上レーザー干渉計重力波検出器

TAMA プロジェクトの現状

TAMA プロジェクトは、日本国内の関係機関が協力して基線長 300m のレーザー干渉計型重力波検出器 (TAMA300) を国立天文台三鷹キャンパス内に建設し、重力波観測を行う計画である。現在までに TAMA では、我々の銀河系内での連星中性子星合体のような重力波イベントがあれば十分検出可能な感度と安定度を達成している。これまで取得された 3000 時間以上におよぶデータは現在、連星中性子星の合体からのチャープ重力波、超新星爆発からのバースト重力波、パルサーからの連続重力波等を求めて解析が進められている。また、米欧の干渉計との同時観測を実施しているが、LIGO（米国）との共同観測で得られたデータの解析結果が既に公表されている。その他、散乱光雑音や電気系雑音、変調系雑音などを想定した雑音源検討の研究を実施している。現在は、われわれの研究室で基礎開発を行った SAS とよばれる次世代の高性能防振装置を TAMA に組み込むための作業を進めているところである。既に 4 台の SAS が設置されインストール作業が完了したため、低周波において一層の感度向上が見込まれる。[10, 25, 26, 44, 45]

次期大型レーザー干渉計計画 LCGT

日本のグループが中心となって進めている 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。

現在、LCGT の具体的な設計と、その実現のための要素技術の研究開発が日本の各機関で精力的に進められている。また CLIO とよばれる 100m のレーザー干渉計が神岡に作られ熱雑音の問題等の基礎的な実験を行っている。その中で、当研究室では、高性能防振装置の開発、干渉計方式の最適化の研究、干渉計制御方式の研究などが行なわれている。[5, 7, 23, 24, 47]

Caltech 40m レーザー干渉計

カリフォルニア工科大学では LIGO 計画のプロトタイプとして、基線長 40m の干渉計型重力波検出器の研究開発が進められている。この 40m プロトタイプ干渉計では、現在 advancedLIGO に向けた技術開発を行っている。

坪野研究室では、この 40m 干渉計に学生を派遣し LIGO グループと共同研究を行った。現地では主に、40m の主干渉計と入射レーザーのカップリングを用いた、鏡の角度揺らぎのキャリブレーションを行った。また、それと並行して入射レーザー系の調整、データ読み出しのデジタル系におけるバグフィックスなど、干渉計のオペレーションに対して広範に携わり、技術交流を行った。

6.3.2 宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO

DECIGO

DECIGO(DECi-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory) は，日本のグループが中心となって進め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 で得られる知見としては，初期宇宙からの重力波を観測することで得られる，インフレーションなどの宇宙創成期に対する知見，遠方の連星からの重力波を観測することで得られる，宇宙の加速膨張やダークエネルギーに対する知見，ブラックホール連星からの重力波を観測することで得られる，巨大ブラックホールの形成に対する知見などがある．これらの知見は従来の電磁波による観測では得ることのできないもの，もしくは，電磁波による観測とは相補的な知見になることが期待されている．

DECIGO は，2025 年ごろの観測を目指して，検討が進められている．[6, 8, 12, 13, 14, 16, 27, 28, 38, 43, 48]

DECIGO パスファインダー

宇宙空間レーザー干渉計型重力波検出器 DECIGO のような大型のミッションを実現させるためには，地上での入念な試験と共に，宇宙でしかできない試験を行うことや，各要素技術を宇宙実証することも不可欠である．そこで，DECIGO グループでは，DECIGO パスファインダー (DPF) と呼ばれる小型衛星を打ち上げ，軌道上での各種試験を行うと共に，実際の重力波観測も行うことも目指している．

DPF では，高度 500 km の地球周回軌道 (太陽同期極軌道) に投入される 300 kg 級の小型衛星を想定している．衛星内にはミッション機器として，ドラッグフリー制御によって衛星内に非接触保持された 2 つの試験質量 (鏡) と安定化レーザー光源，小型・低雑音スラスタを搭載する．これらの鏡で構成された基線長 30 cm のファブリ・ペロー干渉計の基線長変化を，安定化 Nd:YAG レーザー光源を用いて測定することで，0.1-1 Hz 付近での重力波観測を行う．DPF がターゲットとする周波数帯では，地上検出器では観測することのできないため，これまでに実際に重力波を観測した例は無い．その一方で，銀河中心ブラックホールの準固有振動や，中間質量ブラックホール合体からの重力波は，この周波数帯で放射されていることが予想されている．従って，DPF で得られた観測結果は，これまでにない貴重なものになると期待できる．

その一方で，DPF で用いられる技術は，安定な宇宙環境と安定なレーザー干渉計を用いた精密計測・制御技術，ドラッグフリー技術などであり，宇宙空間を用いた精密基礎物理実験，安定な時間・周波数基準，地球重力観測や，ドラッグフリーを用いたフォーメーションフライト技術などへの広い応用が考えられる．[4, 9, 15, 22, 29, 30, 31, 37, 42, 51, 52]

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-I) 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た．

この 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$_{\mu\nu}$) を開発した．この超小型重力波検出器は，小型であるために実際の重力波観測に十分な感度は実現できない (距離センサーによって感度が制限されており、0.1-1Hz 帯で $h \sim 10^{-6} - 10^{-7}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ 程度) が，試験質量変動の検出や非接触制御など，将来の本格的な検出器のための実証試験をする最初のステップとなる．また、先述の DECIGO Pathfinder で適用されるものとほぼ同等の機能部品を用いているため、それらによって構築されたシステムの宇宙実証を行う、という重要な役目も担っている。

SWIM$_{\mu\nu}$ は，80mm 立方程度の大きさのモジュール 2 つと制御用基板で構成されている．各モジュール内には，長さ 50mm, 質量 50g 程度の試験質量が非接触保持されており，その試験質量とフレームとの間の距離をフォトセンサーで読み取ることによって，衛星と試験質量の間の相対変動を検出できるようになっている．2 つのモジュール内の試験質量は互いに直交する方向に配置されており，重力波によってそれらが差動回転変動する効果を観測する，というのが重力波検出の原理になる．

2007 年度までで SWIM$_{\mu\nu}$ フライト品の設計・製作をほぼ完了しており、今年度はまずその環境試験 (振動試験・熱真空試験：4 月)、搭載ソフトウェアの開発と検証 (4 月)、SDS-1 衛星への取り付け (5 月) を行った。これで SWIM$_{\mu\nu}$ としての開発作業はほぼ終えたことになる。その後、SDS-1 衛星の総合システム試験に伴い、簡単な機能チェック (9 月・11 月) などを JAXA の協力のもと行い、打ち上げの準備が整えられた。

2009 年 1 月 23 日、SDS-1 は「いぶき (GOSAT)」衛星とともに H-IIA ロケットによって打ち上げられ、高度約 670km の太陽同期極軌道に投入された。SWIM の初めての運用は SDS-1 衛星の初期機能確認フェーズ中 (2 月) に行われ、電源の正常立ち上げ、SpaceWire 通信の成功など、SWIM の基本的な機能が正常であることを確認できた。さらに、SWIM$_{\mu\nu}$ の試験質量の非接触制御も成功し、「宇宙空間での重力波検出器の初めての動作」を達成した。その後の運用によっても、SWIM$_{\mu\nu}$ からは貴重で興味深いデータを収集しつづけている。これは、宇宙空間で重力波検出器を運用しはじめたということのみならず、超小型検出器を用いた軌道上実験が行えている、という点においても画期的であるといえる。2009 年度も引き続き、SWIM$_{\mu\nu}$ の運用・データ取得・解析などを行っていく予定である。[19, 20, 21, 32, 35, 40, 41, 53]

6.3.3 磁気浮上型重力波検出器の開発

超伝導磁気浮上型重力波検出器の開発

低周波重力波にはブラックホール合体や初期宇宙に天文学的-宇宙論的に非常に興味深い重力波源があ

る。しかし、現在の地上レーザー干渉計型重力波検出器は懸架系の共振周波数がその観測帯域の下限を制限する。そこで、我々はねじれ型という新しいタイプの重力波検出器を提案した。これは、棒状試験質量が重力波による潮汐力で回転する効果から重力波を検出する装置である。このねじれ型重力波検出器の原理感度は懸架系の散逸による熱雑音で決まる。すなわち、棒状回転子の支持の選択がねじれ型重力波検出器の最重要課題である。
我々は、棒状回転子の支持法として超伝導磁気浮上 (超伝導体の完全反磁性とピン止め特性) を利用することで、現実的な大きさの棒状回転子 (20cm, 180g) を支持した状態で、Q=4000 という低散逸を実現できることを明らかにした。この値は、ほかの支持法 (例えばワイヤーによる中心支持) では実現困難な値である。さらに、我々はこの散逸をもとに、大型化棒状回転子 (2m, 180g) を用いることで重力波に対する感度 $3\times10^{-14}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$@0.1Hz を原理的に実現できることを明らかにした。この感度は銀河中心でのブラックホール起源の重力波を十分に検出できるものである 。現在は、この熱雑音で決まる原理感度に現実的な種々の雑音 (地面振動、センサ雑音、超伝導効果、冷凍機振動) を超えて到達可能であることを確認するための検証実験を進行中である。[2, 17, 33, 39]

磁気浮上の研究

高性能防振装置を使用した場合，振動振幅が微小であるため，支持に用いるワイヤーの内部摩擦や弾性の影響で防振比が制限されてしまう場合がある．そこで，本研究室では，被防振体を非接触で磁石浮上支持することで，摩擦や，弾性による復元力の影響を排除した高性能捩れ振り子の開発を行っている．永久磁石とコイルを用いて能動制御によって支持する方法と，超伝導体を用いて支持する方法のそれぞれを行い，その特性評価を行った．超伝導体による支持に関しては，磁石の形状や配置などの条件を変えた測定結果と，理論計算による予測値の定量的な評価を行い，それらが良く一致することを確認した．

6.3.4 精密計測の研究

光ファイバーを用いたレーザー安定化

LCGT のような大型干渉計の光学素子の変動を抑えるための制御や DECIGO のような宇宙干渉計では，アラインメントのずれの影響を受けにくく，かつ高い安定度を持つレーザー光源が不可欠となる．そこで，当研究室では光ファイバ光学系を用いたレーザーの安定化実験を行なっている．レーザー光源や安定化のためのレファレンス共振器等を全て光ファイバを用いて構成することで，環境の変化や外乱に対する耐性の強い安定化光源が実現できる事が期待できるのである．

当研究室では，光ファイバで構成された光共振器を基準として光ファイバ結合のレーザー光源の周波数を安定化する実験，また，光ファイバ結合された音響光学変調器 (AOM) を用いた光強度安定化実験を行なっている．この研究の結果, 従来の空間光を用いた方法では制御の難しかった 1 Hz 帯において, 周波数・強度をそれぞれ $20\mathrm{Hz}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$, $3\times10^{-7}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ まで安定化することに成功した．周波数安定化に関しては, NASA, ESA の宇宙干渉計計画である LISA の 1 Hz における要求を満たす値である。現在, さらなる安定度の向上に向けて研究を継続中である．[11, 34, 46]

スクイーズド光を用いたレーザー干渉計の高感度化

現在、レーザー干渉計型重力波検出器の高周波帯における感度はレーザーの散射雑音によって制限されている。散射雑音とは、レーザー光源から発せられる光子数の統計的な揺らぎにより、レーザーパワーが変動する雑音であり、干渉計の出力ポートから入射する真空場と入射光の干渉として記述することができる。散射雑音を低減するには、入射レーザーの光子数を増加させ、統計的揺らぎを相対的に小さくする方法が有効であるが、この方法では入射レーザーパワーの増大に伴い、光学系に対する熱的な悪影響が現れる。また、光子数の統計的揺らぎは光の入射パワー P_{in} に対して $1/\sqrt{P_{\mathrm{in}}}$ で減少するため、入射パワー増大による散射雑音の低減には自ずと限界が現れる。

散射雑音は真空場と入射レーザーの干渉であるから、真空場の代わりにスクイーズド光を導入することでも散射雑音を低減できることが知られている。この手法は、将来の重力波検出器の感度向上には不可欠の技術と考えられている。

坪野研究室では、スクイーズド光を用いたレーザー干渉計型重力波検出器の感度向上の実証研究を行っている。2008 年度には工学系研究科物理工学専攻の古澤研究室と共同で、古澤研究室にて PPLN 結晶を用いたスクイーズド光の生成実験を行った。

＜**受賞**＞

[1] 穀山渉, 理学系研究科研究奨励賞, 東京大学理学系研究科, 2009 年 3 月 23 日

＜**報文**＞

(原著論文)

[2] Akiteru Takamori, Akito Araya, Yuji Otake, Koji Ishidoshiro, Masaki Ando: R&D Status of a New Rotational Seismometer Utilizing the Flux Pinning Effect of a Superconductor Bull. Seism. Soc. America, (in press).

[3] S.Takayoshi, W.Kokuyama, H.Fukuyama: The boiling suppression of liquid nitrogen, Cryogenics, **49** (2009), 221-223.

[4] Masaki Ando, Seiji Kawamura, Shuichi Sato, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono, Akito Araya, Ikkoh Funaki, Kunihito Ioka, Nobuyuki Kanda, Shigenori Moriwaki, Mitsuru Musha, Kazuhiro Nakazawa, Kenji Numata, Shin-ichiro Sakai, Naoki

Seto, Takeshi Takashima, Takahiro Tanaka, *et al.*, DECIGO pathfinder, Class. Quantum Grav. **26** (2009) 9 184013.

[5] Akutsu T, Ando M, Haruyama T, Kanda N, Kuroda K, Miyoki S, Ohashi M, Saito Y, Sato N, Shintomi T, Suzuki T, Tagoshi H, Takahashi H, Tatsumi D, Telada S, Tomaru T, Uchiyama T, Yamamoto A, Yamamoto K, Search for continuous gravitational waves from PSR J0835-4510 using CLIO data, Class. Quantum Grav. **25** (2008) 18 094019.

[6] S Kawamura, M Ando, T Nakamura, K Tsubono, T Tanaka, I Funaki, N Seto, K Numata, S Sato, K Ioka, N Kanda, T Takashima, K Agatsuma, T Akutsu, T Akutsu, Koh-Suke Aoyanagi, K Arai, Y Arase, A Araya, H Asada, Y Aso, T Chiba, T Ebisuzaki, M Enoki, Y Eriguchi, M-K Fujimoto, R Fujita, M Fukushima, T Futamase, K Ganzu, T Harada, T Hashimoto, K Hayama, W Hikida, Y Himemoto, H Hirabayashi, T Hiramatsu, F-L Hong, H Horisawa, M Hosokawa, K Ichiki, T Ikegami, K T Inoue, K Ishidoshiro, H Ishihara, T Ishikawa, H Ishizaki, H Ito, Y Itoh, S Kamagasako, N Kawashima, F Kawazoe, H Kirihara, N Kishimoto, K Kiuchi, S Kobayashi, K Kohri, H Koizumi, Y Kojima, K Kokeyama, W Kokuyama, K Kotake, Y Kozai, H Kudoh, H Kunimori, H Kuninaka, K Kuroda, K-i Maeda, H Matsuhara, Y Mino, O Miyakawa, S Miyoki, M Y Morimoto, T Morioka, T Morisawa, S Moriwaki, S Mukohyama, M Musha, S Nagano, I Naito, N Nakagawa, K Nakamura, H Nakano, K Nakao, S Nakasuka, Y Nakayama, E Nishida, K Nishiyama, A Nishizawa, Y Niwa, M Ohashi, N Ohishi, M Ohkawa, A Okutomi, K Onozato, K Oohara, N Sago, M Saijo, M Sakagami, S-i Sakai, S Sakata, M Sasaki, T Sato, M Shibata, H Shinkai, K Somiya, H Sotani, N Sugiyama, Y Suwa, H Tagoshi, K Takahashi, K Takahashi, T Takahashi, H Takahashi, R Takahashi, R Takahashi, A Takamori, T Takano, K Taniguchi, A Taruya, H Tashiro, M Tokuda, M Tokunari, M Toyoshima, S Tsujikawa, Y Tsunesada, K-i Ueda, M Utashima, H Yamakawa, K Yamamoto, T Yamazaki, J Yokoyama, C-M Yoo, S Yoshida and T Yoshino, The Japanese space gravitational wave antenna - DECIGO, Journal of Physics: Conference Series **122** (2008) 012006.

[7] K Agatsuma, R Takahashi, K Arai, D Tatsumi, M Fukushima, T Yamazaki, M K Fujimoto, Y Arase, N Nakagawa, A Takamori, K Tsubono, K Kuroda, M Ohashi, R Desalvo, A Bertolini, S Marka and V Sannibale, Control system for the seismic attenuation system (SAS) in TAMA300, Journal of Physics: Conference Series **122** (2008) 012013.

[8] S Kawamura, M Ando, T Nakamura, K Tsubono, T Tanaka, I Funaki, N Seto, K Numata, S Sato, K Ioka, N Kanda, T Takashima, K Agatsuma, T Akutsu, T Akutsu, K-s Aoyanagi, K Arai, Y Arase, A Araya, H Asada, Y Aso, T Chiba, T Ebisuzaki, M Enoki, Y Eriguchi, M-K Fujimoto, R Fujita, M Fukushima, T Futamase, K Ganzu, T Harada, T Hashimoto, K Hayama, W Hikida, Y Himemoto, H Hirabayashi, T Hiramatsu, F-L Hong, H Horisawa, M Hosokawa, K Ichiki, T Ikegami, K T Inoue, K Ishidoshiro, H Ishihara, T Ishikawa, H Ishizaki, H Ito, Y Itoh, S Kamagasako, N Kawashima, F Kawazoe, H Kirihara, N Kishimoto, K Kiuchi, S Kobayashi, K Kohri, H Koizumi, Y Kojima, K Kokeyama, W Kokuyama, K Kotake, Y Kozai, H Kudoh, H Kunimori, H Kuninaka, K Kuroda, K-i Maeda, H Matsuhara, Y Mino, O Miyakawa, S Miyoki, M Y Morimoto, T Morioka, T Morisawa, S Moriwaki, S Mukohyama, M Musha, S Nagano, I Naito, N Nakagawa, K Nakamura, H Nakano, K Nakao, S Nakasuka, Y Nakayama, E Nishida, K Nishiyama, A Nishizawa, Y Niwa, M Ohashi, N Ohishi, M Ohkawa, A Okutomi, K Onozato, K Oohara, N Sago, M Saijo, M Sakagami, S-i Sakai, S Sakata, M Sasaki, T Sato, M Shibata, H Shinkai, K Somiya, H Sotani, N Sugiyama, Y Suwa, H Tagoshi, K Takahashi, K Takahashi, T Takahashi, H Takahashi, R Takahashi, R Takahashi, A Takamori, T Takano, K Taniguchi, A Taruya, H Tashiro, M Tokuda, M Tokunari, M Toyoshima, S Tsujikawa, Y Tsunesada, K-i Ueda, M Utashima, H Yamakawa, K Yamamoto, T Yamazaki, J Yokoyama, C-M Yoo, S Yoshida and T Yoshino, The Japanese space gravitational wave antenna; DECIGO, Journal of Physics: Conference Series **120** (2008) 032004.

[9] M Ando, S Kawamura, T Nakamura, K Tsubono, T Tanaka, I Funaki, N Seto, K Numata, S Sato, K Ioka, N Kanda, T Takashima, K Agatsuma, T Akutsu, T Akutsu, K-s Aoyanagi, K Arai, Y Arase, A Araya, H Asada, Y Aso, T Chiba, T Ebisuzaki, M Enoki, Y Eriguchi, M-K Fujimoto, R Fujita, M Fukushima, T Futamase, K Ganzu, T Harada, T Hashimoto, K Hayama, W Hikida, Y Himemoto, H Hirabayashi, T Hiramatsu, F-L Hong, H Horisawa, M Hosokawa, K Ichiki, T Ikegami, K T Inoue, K Ishidoshiro, H Ishihara, T Ishikawa, H Ishizaki, H Ito, Y Itoh, S Kamagasako, N Kawashima, F Kawazoe, H Kirihara, N Kishimoto, K Kiuchi, S Kobayashi, K Kohri, H Koizumi, Y Koima, K Kokeyama, W-Kokuyama, K Kotake, Y Kozai, H Kudoh, H Kunimori, H Kuninaka, K Kuroda, K-i Maeda, H Matsuhara, Y Mino, O Miyakawa, S Miyoki, M Y Morimoto, T Morioka, T Morisawa, S Moriwaki, S Mukohyama, M Musha, S Nagano, I Naito, N Nakagawa, K Nakamura, H Nakano, K Nakao, S Nakasuka, Y Nakayama, E Nishida, K Nishiyama, A Nishizawa, Y Niwa, M Ohashi, N Ohishi, M Ohkawa, A Okutomi, K Onozato, K Oohara, N Sago, M Saijo, M Sakagami, S-i Sakai, S Sakata, M Sasaki, T Sato, M Shibata, H Shinkai, K Somiya, H Sotani, N Sugiyama, Y Suwa, H Tagoshi, K Takahashi, K Takahashi, T

Takahashi, H Takahashi, R Takahashi, R Takahashi, A Takamori, T Takano, K Taniguchi, A Taruya, H Tashiro, M Tokuda, M Tokunari, M Toyoshima, S Tsujikawa, Y Tsunesada, K-i Ueda, M Utashima, H Yamakawa, K Yamamoto, T Yamazaki, J Yokoyama, C-M Yoo, S Yoshida and T Yoshino, DECIGO pathfinder, Journal of Physics: Conference Series **120** (2008) 032005.

[10] R Takahashi, K Arai, D Tatsumi, M Fukushima, T Yamazaki, M-K Fujimoto, K Agatsuma, Y Arase, N Nakagawa, A Takamori, K Tsubono, R DeSalvo, A Bertolini, S M´arka, V Sannibale and the TAMA Collaboration, Operational status of TAMA300 with the Seismic Attenuation System (SAS), Class. Quantum Grav. **25**-11 (2008) 114036.

[11] Kakeru Takahashi, Masaki Ando and Kimio Tsubono, Stabilization of Laser Intensity and Frequency Using Optical Fiber, Journal of Physics: Conference Series **122** (2008) 012016.

(会議抄録)

[12] 安東正樹, 川村静児, 高橋龍一, 中村卓史, 坪野公夫, 田中貴浩, 瀬戸直樹, 沼田健司, 船木一幸, 森本睦子, 佐藤修一, 他, 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO, 第 52 回宇宙科学技術連合講演会 (2008 年 11 月 7 日 淡路夢舞台国際会議場, 兵庫).

[13] 安東 正樹, 川村 静児, 中村 卓史, 坪野 公夫, 瀬戸 直樹, 長野 重夫, 田中 貴浩, 石川 毅彦, 植田 憲一, 武者 満, 佐藤 孝, 細川 瑞彦, 森脇 成典, 高島 健, 沼田 健司, 他, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画, 第 6 回宇宙科学シンポジウム (2008 年 1 月 9 日 宇宙科学研究本部 相模原, 神奈川).

[14] 安東 正樹, 川村 静児, DECIGO ワーキンググループ: 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO, 低推力・連続加速を用いた宇宙ミッションに関する研究会 (2007 年 11 月 2 日 東京国際フォーラム, 有楽町).

[15] Masaki Ando and DECIGO Pathfinder working Group: DECIGO Pathfinder, International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (Sept. 11, 2007, Sendai, Japan).

[16] Masaki Ando, *et al.*, DECIGO: the Japanese Space Gravitational Wave Antenna, 11th Marcel Grossmann Meeting on General Relativity (July 23 - 29, 2007, Freie Universität Berlin).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[17] Koji Ishidoshiro: Development of a low-frequency gravitational-wave detector using magnetically-levitated torsion antenna, 1st International LISA-DECIGO workshop, Sagamihara Campus (November, 2008, ISAS/JAXA, Japan)

[18] Masaki Ando, Seiji Kawamura, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono, Takahiro Tanaka, Ikkoh Funaki, Naoki Seto, Kenji Numata, Shuichi Sato, Nobuyuki Kanda, Takeshi Takashima, Kunihito Ioka, *et al.*, DECIGO Pathfinder, 7th International LISA Symposium (16-20 June, 2008, Barcelona, Spain).

(国内雑誌)

[19] 穀山渉, 安東正樹: 衛星搭載用超小型重力波検出器とその微小重力環境による動作実験, 日本マイクログラビティ応用学会誌, **26** (2009), 36-42.

(学位論文)

[20] 穀山渉: 衛星搭載用超小型重力波検出器の開発, 2008 年度修士論文

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[21] Wataru Kokuyama, Masaki Ando, Shigenori Moriwaki, Koji Ishidoshiro, Kakeru Takahashi, Akito Araya, Yoichi Aso, Takeshi Takashima, Kazuhiro Nakazawa, Tadayuki Takahashi, Motohide Kokubun, Tetsuo Yoshimitsu, Hirokazu Odaka, Takayuki Yuasa, Takehiko Ishikawa, Teruaki Enoto, Keiko Kokeyama, Shin-ichiro Sakai, Shuichi Sato, Akiteru Takamori, Kimio Tsubono, Tomoaki Toda, Tatusaki Hashimoto, Ayako Matsuoka: SWIMmn: An Ultra-Small Gravitational-Wave Detector With SpaceCube2 on a JAXA's 100kg-Class Satellite, International SpaceWire Conference 2008 (Nov. 4-6 2008, Nara, Japan).

招待講演

[22] Masaki Ando, Seiji Kawamura, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono, Takahiro Tanaka, Ikkoh Funaki, Naoki Seto, Kenji Numata, Shuichi Sato, Nobuyuki Kanda, Takeshi Takashima, Kunihito Ioka, *et al.*, DECIGO Pathfinder, 1st International LISA-DECIGO Workshop (November 12-13, 2008, JAXA/ISAS, Sagamihara, Japan).

(国内会議)

一般講演

[23] 宮川治, 我妻一博, 内山隆, 大橋正健, 黒田和明, 斎藤陽紀, 三代木伸二, 森岡友子, 寺田聡一, 山元一広, 山本明, 佐藤伸明, 鈴木敏一, 都丸隆行, 春山富義, 新冨孝和, 早河秀章, 新谷昌人, 高森昭光, 新井宏二, 川村静児, 辰巳大輔, 安東正樹, 神田展行, 田越秀行, 高橋弘毅, 中谷一郎, David Barker, Rolf Bork, Daniel Sigg, Jay Heefner, Alan Weinstein, 山本博章, 低温レーザー干渉計 CLIO(19), 日本物理学会 2009 年年次大会（2009 年 3 月、立教大学、池袋）.

[24] 我妻一博，大橋正健，内山隆，三代木伸二，宮川治，寺田聡一，山元一広，川村静児，黒田和明，斎藤陽紀，森岡友子，山本明，春山富義，鈴木敏一，佐藤伸明，都丸隆行，新冨孝和，早河秀章，新谷昌人，高森昭光，新井宏二，辰巳大輔，安東正樹，神田展行，田越秀行，高橋弘毅，中谷一郎，低温レーザー干渉計 CLIO(20)，日本物理学会 2009 年年次大会（2009 年 3 月、立教大学、池袋）．

[25] 辰巳大輔，新井宏二，高橋竜太郎，我妻一博，和泉究，若林野花，石崎秀晴，福嶋美津広，山崎利孝，高森昭光，A. Bertolini，R. DeSalvo，麻生洋一，佐藤修一，常定芳基，長野重夫，安東正樹，三代木伸二，森脇成典，神田展行，武者満，藤本眞克，川村静児，三尾典克，大橋正健，黒田和明，坪野公夫，干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 XXIII（干渉計開発），日本物理学会 2009 年年次大会（2009 年 3 月、立教大学、池袋）．

[26] 高橋竜太郎，辰巳大輔，新井宏二，我妻一博，和泉究，若林野花，石崎秀晴，福嶋美津広，山崎利孝，高森昭光，A. Bertolini，R. DeSalvo，麻生洋一，佐藤修一，常定芳基，長野重夫，安東正樹，三代木伸二，森脇成典，神田展行，武者満，藤本眞克，川村静児，三尾典克，大橋正健，黒田和明，坪野公夫，TAMA Collaboration，干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 XXIV（観測），日本物理学会 2009 年年次大会（2009 年 3 月、立教大学、池袋）．

[27] 川村静児，安東正樹，瀬戸直樹，佐藤修一，船木一幸，神田展行，中村卓史，坪野公夫，沼田健司，田中貴浩，井岡邦仁，高島健，新谷昌人，坂井真一郎，中澤知洋，長野重夫，武者満，森脇成典，青柳巧介，我妻一博，浅田秀樹，麻生洋一，新井宏二，池上健，石川毅彦，石崎秀晴，石徹白晃治，石原秀樹，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，岡田則夫，小野里光司，河島信樹，川添史子，雁津克彦，木内建太，岸本直子，工藤秀明，國中均，國森裕生，黒田和明，小泉宏之，洪鋒雷，郡和範，穀山渉，苔山圭以子，古在由秀，小嶌康史，固武慶，小林史歩，西條統之，阪上雅昭，阪田紫帆里，佐合紀親，佐々木節，佐藤孝，柴田大，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，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，中須賀真一，中野寛之，中村康二，中山宜典，西澤篤志，西田恵里奈，西山和孝，丹羽佳人，能見大河，橋本樹明，端山和大，原田知広，疋田渉，姫本宣朗，平林久，平松尚志，福嶋美津広，藤田龍一，藤本眞克，二間瀬敏史，細川瑞彦，堀澤秀之，前田恵一，松原英雄，蓑泰志，宮川治，三代木伸二，向山信治，森岡友子，森澤理之，森本睦子，柳哲文，山川宏，山崎利孝，山元一広，横山順一，吉田至順，吉野泰造，若林野花，スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (17)：設計・計画，日本物理学会 2009 年年次大会（2009 年 3 月、立教大学、池袋）．

[28] 瀬戸直樹，川村静児，安東正樹，佐藤修一，船木一幸，神田展行，中村卓史，坪野公夫，沼田健司，田中貴浩，井岡邦仁，高島健，新谷昌人，坂井真一郎，中澤知洋，長野重夫，武者満，森脇成典，青柳巧介，我妻一博，浅田秀樹，麻生洋一，新井宏二，池上健，石川毅彦，石崎秀晴，石徹白晃治，石原秀樹，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，岡田則夫，小野里光司，河島信樹，川添史子，雁津克彦，木内建太，岸本直子，工藤秀明，國中均，國森裕生，黒田和明，小泉宏之，洪鋒雷，郡和範，穀山渉，苔山圭以子，古在由秀，小嶌康史，固武慶，小林史歩，西條統之，阪上雅昭，阪田紫帆里，佐合紀親，佐々木節，佐藤孝，柴田大，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，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，中須賀真一，中野寛之，中村康二，中山宜典，西澤篤志，西田恵里奈，西山和孝，丹羽佳人，能見大河，橋本樹明，端山和大，原田知広，疋田渉，姫本宣朗，平林久，平松尚志，福嶋美津広，藤田龍一，藤本眞克，二間瀬敏史，細川瑞彦，堀澤秀之，前田恵一，松原英雄，蓑泰志，宮川治，三代木伸二，向山信治，森岡友子，森澤理之，森本睦子，柳哲文，山川宏，山崎利孝，山元一広，横山順一，吉田至順，吉野泰造，若林野花，スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (18)：サイエンス，日本物理学会 2009 年年次大会（2009 年 3 月、立教大学、池袋）．

[29] 安東正樹，川村静児，瀬戸直樹，佐藤修一，船木一幸，神田展行，中村卓史，坪野公夫，沼田健司，田中貴浩，井岡邦仁，高島健，新谷昌人，坂井真一郎，中澤知洋，長野重夫，武者満，森脇成典，青柳巧介，我妻一博，浅田秀樹，麻生洋一，新井宏二，池上健，石川毅彦，石崎秀晴，石徹白晃治，石原秀樹，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，岡田則夫，小野里光司，河島信樹，川添史子，雁津克彦，木内建太，岸本直子，工藤秀明，國中均，國森裕生，黒田和明，小泉宏之，洪鋒雷，郡和範，穀山渉，苔山圭以子，古在由秀，小嶌康史，固武慶，小林史歩，西條統之，阪上雅昭，阪田紫帆里，佐合紀親，佐々木節，佐藤孝，柴田大，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，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，中須賀真一，中野寛之，中村康二，中山宜典，西澤篤志，西田恵里奈，西山和孝，丹羽佳人，能見大河，橋本樹明，端山和大，原田知広，疋田渉，姫本宣朗，平林久，平松尚志，福嶋美津広，藤田龍一，藤本眞克，二間瀬敏史，細川瑞彦，堀澤秀之，前田恵一，松原英雄，蓑泰志，宮川治，三代木伸二，向山信治，森岡友子，森澤理之，森本睦子，柳哲文，山川宏，山崎利孝，山元一広，横山順一，吉田至順，吉野泰造，若林野花，スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (19)：パスファインダー，日本物理学会 2009 年年次

大会（2009 年 3 月、立教大学、池袋）.

[30] 若林野花，大渕喜之，岡田則夫，鳥居泰男，江尻悠美子，鈴木理恵子，上田暁俊，川村静児，新谷昌人，安東正樹，佐藤修一，菅本晶夫，DECIGO pathfinder のための試験マスモジュールの構造設計・解析，日本物理学会 2009 年年次大会（2009 年 3 月、立教大学、池袋）.

[31] 佐藤修一，鳥居泰男，若林野花，江尻悠美子，鈴木理恵子，上田暁俊，川村静児，新谷昌人，安東正樹，大渕喜之，岡田則夫，DECIGO pathfinder のための試験マスモジュールの開発 (2)，日本物理学会 2009 年年次大会（2009 年 3 月、立教大学、池袋）.

[32] 穀山渉，安東正樹，森脇成典，石徹白晃治，高橋走，新谷昌人，麻生洋一，高島健，中澤知洋，高橋忠幸，国分紀秀，吉光徹雄，小高裕和，湯浅孝行，石川毅彦，榎戸輝揚，苔山圭以子，坂井真一郎，佐藤修一，高森昭光，坪野公夫，戸田知朗，橋本樹明，松岡彩子，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 VII (打ち上げと初期運用)，日本物理学会 2009 年年次大会（2009 年 3 月、立教大学、池袋）.

[33] 石徹白晃治，安東正樹，高森昭光，坪野公夫，磁気浮上を利用した低周波重力波検出器の開発 I，日本物理学会 2009 年年次大会（2009 年 3 月、立教大学、池袋）.

[34] 高橋走，安東正樹，坪野公夫，光ファイバーを用いたレーザー光源の強度・周波数安定化 VI，日本物理学会 2009 年年次大会（2009 年 3 月、立教大学、池袋）.

[35] 穀山渉, 安東正樹, 森脇成典, 石徹白晃治, 高橋走, 新谷昌人, 麻生洋一, 高島健, 中澤知洋, 高橋忠幸, 国分紀秀, 吉光徹雄, 小高裕和, 湯浅孝行, 石川毅彦, 榎戸輝揚, 苔山圭以子, 坂井真一郎, 佐藤修一, 高森昭光, 坪野公夫, 戸田知朗, 橋本樹明, 松岡彩子: SWIM 搭載にむけた超小型重力波検出器の開発 III, 第 8 回宇宙科学シンポジウム (2009 年 1 月 7 日, JAXA 宇宙科学研究本部).

[36] 安東 正樹, 重力法則の検証実験, 京都大学教室発表会 (2009 年 3 月 5 日, 京都大学)

[37] 安東正樹，川村静児，高橋龍一，中村卓史，坪野公夫，田中貴浩，瀬戸直樹，沼田健司，船木一幸，森本睦子，佐藤修一,，他，小型重力波観測衛星 DPF, 宇宙科学シンポジウム (2008 年 1 月 9 日, 宇宙科学研究本部).

[38] 安東正樹，川村静児，高橋龍一，中村卓史，坪野公夫，田中貴浩，瀬戸直樹，沼田健司，船木一幸，森本睦子，佐藤修一，他，宇宙重力波望遠鏡 DECIGO, 第 52 回 宇宙科学技術連合講演会 (2008 年 11 月 07 日 淡路夢舞台国際会議場, 兵庫).

[39] 石徹白晃治，安東正樹，高森昭光，坪野公夫，磁気浮上を利用した低周波重力波検出器の開発 II，日本物理学会 2008 年秋季大会（2008 年 9 月、山形大学、山形）.

[40] 穀山渉，安東正樹，森脇成典，石徹白晃治，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，高橋走，坪野公夫，戸田知朗，橋本樹明，松岡彩子，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 VI（衛星への搭載），日本物理学会 2008 年秋季大会（2008 年 9 月、山形大学、山形）.

[41] 湯浅孝行，中澤知洋，牧島一夫，高橋忠幸，能町正治，高島健，国分紀秀，小高裕和，萩原利士成，安東正樹，石徹白晃治，穀山渉，高橋弘充，NeXT 衛星等に向けた SpaceWire I/F の開発，日本物理学会 2008 年秋季大会（2008 年 9 月、山形大学、山形）.

[42] 安東正樹，川村静児，瀬戸直樹，佐藤修一，田中貴浩，神田展行，船木一幸，中村卓史，坪野公夫，沼田健司，高島健，井岡邦仁，青柳巧介，我妻一博，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，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，小野里光司，河島信樹，川添史子，雁津克彦，木内建太，岸本直子，工藤秀明，國中均，國森裕生，黒田和明，小泉宏之，洪鋒雷，郡和範，穀山渉，苔山圭以子，古在由秀，小嶌康史，固武慶，小林史歩，西條統之，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，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，谷口敬介，樽家篤史，千葉剛，辻川信二，常定芳基，徳田充，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，橋本樹明，端山和大，原田知広，疋田渉，姫本宣朗，平林久，平松尚志，福嶋美津広，藤田龍一，藤本眞克，二間瀬敏史，細川瑞彦，堀澤秀之，前田恵一，松原英雄，蓑泰志，宮川治，三代木伸二，向山信治，武者満，森岡友子，森澤理之，森本睦子，森脇成典，柳哲文，山川宏，山崎利孝，山元一広，横山順一，吉田至順，吉野泰造，スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 XV（設計・計画・パスファインダー），日本物理学会 2008 年秋季大会（2008 年 9 月、山形大学、山形）.

[43] 瀬戸直樹，川村静児，安東正樹，佐藤修一，田中貴浩，神田展行，船木一幸，中村卓史，坪野公夫，沼田健司，高島健，井岡邦仁，青柳巧介，我妻一博，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，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，小野里光司，河島信樹，川添史子，雁津克彦，木内建太，岸本直子，工藤秀明，國中均，國森裕生，黒田和明，小泉宏之，洪鋒雷，郡和範，穀山渉，苔山圭以子，古在由秀，小嶌康史，固武慶，小林史歩，西條統之，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，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，谷口敬介，樽家篤史，千葉剛，辻川信二，常定芳基，徳田充，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，橋本樹明，端山和大，原田知広，疋田渉，姫本宣朗，平林久，平松尚志，福嶋美津広，藤田龍一，藤本眞克，二間瀬敏史，細川瑞彦，堀澤秀之，前田恵一，松原英雄，蓑泰志，宮川治，三代木伸二，向山信治，武者満，森岡友子，森澤理之，森本睦子，森脇成典，柳哲文，山川宏，山崎利孝，山元一広，横山順一，吉田至順，吉野泰造，スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 XVI（サイエンス），日本物理学会 2008 年秋季大会（2008 年 9 月、山形大学、山形）.

[44] 新井宏二，辰巳大輔，高橋竜太郎，我妻一博，和泉究，若林野花，石崎秀晴，福嶋美津広，山崎利孝，高森昭光，A. Bertolini，R. DeSalvo，麻生洋一，佐藤修一，常定芳基，長野重夫，安東正樹，三代木伸二，森脇成典，神田展行，武者満，藤本眞克，川村静児，三尾典克，大橋正健，黒田和明，坪野公夫，TAMA Collaboration，干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 XXI（干渉計開発），日本物理学会 2008 年秋季大会（2008 年 9 月、山形大学、山形）.

[45] 辰巳大輔，新井宏二，高橋竜太郎，我妻一博，和泉究，若林野花，石崎秀晴，福嶋美津広，山崎利孝，高森昭光，A. Bertolini，R. DeSalvo，麻生洋一，佐藤修一，常定芳基，長野重夫，安東正樹，三代木伸二，森脇成典，神田展行，武者満，藤本眞克，川村静児，三尾典克，大橋正健，黒田和明，坪野公夫，TAMA Collaboration，干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 XXII（観測），日本物理学会 2008 年秋季大会（2008 年 9 月、山形大学、山形）.

[46] 高橋走，安東正樹，坪野公夫，光ファイバーを用いたレーザー光源の強度・周波数安定化，日本物理学会 2008 年秋季大会（2008 年 9 月、山形大学、山形）.

[47] 内山隆，大橋正健，三代木伸二，寺田聡一，山元一広，黒田和明，我妻一博，斎藤陽紀，森岡友子，山本明，春山富義，鈴木敏一，佐藤伸明，都丸隆行，新冨孝和，早河秀章，新谷昌人，高森昭光，辰巳大輔，安東正樹，神田展行，田越秀行，高橋弘毅，低温レーザー干渉計 CLIO(17)，日本物理学会 2008 年秋季大会（2008 年 9 月、山形大学、山形）.

[48] 石徹白 晃治: 宇宙用信号処理・通信システム II, 第 6 回 DECIGO ワークショップ, (2008 年 4 月, 国立天文台)

招待講演

[49] 安東正樹，光技術と重力・重力波, グローバル COE オープニングシンポジウム (2009 年 2 月 18 日, 京都大学百周年時計台記念館).

[50] 安東正樹，重力波天文学, (2008 年 11 月 26, 27 日, 京都大学).

[51] 安東正樹，川村静児，高橋龍一，中村卓史，坪野公夫，田中貴浩，瀬戸直樹，沼田健司，船木一幸，森本睦子，佐藤修一，他，DECIGO パスファインダー (設計・計画), 第 6 回 DECIGO ワークショップ (2008 年 4 月 16 日, 国立天文台, 三鷹).

[52] 穀山渉: 宇宙用信号処理・通信システム ，第 6 回 DECIGO ワークショップ (2008 年 4 月 18 日, 国立天文台).

(セミナー)

[53] 安東正樹, 穀山渉，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，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，橋本樹明超小型宇宙重力波検出器 SWIMmn, 2008 年度中間発表会 (2009 年 03 月 17 日, 天体核研究室, 京都大学).

6.4 佐野・原田研究室

佐野・原田研究室では、熱平衡から遠く離れた系に起こる自発的な秩序形成や乱れの現象に潜む法則を実験的・理論的に解明することを目的としている。そのために非線形動力学や非平衡熱統計力学の手法と概念を用いるとともに、新たな方法論の構築も目指している。

非平衡状態において自発的にパターンや乱れが生じる現象は、近年急速に発達した分野であるカオスやパターン形成、フラクタルなどの研究以前からも流体現象においてその存在が広く知られていた。しかし、非線形力学系における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、流体力学的現象がより具体的かつ新たな枠組みで捉えられるとともに、さらに大きなクラスである非線形力学系が持つ一般的性質の一つとして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現象の動力学は共通した面を持っており、系の詳細によらず統一的に議論し扱うことが可能である。以上に加えて近年では，平衡から遠く離れた系に対する統計力学についても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、普遍性だけではくくりきれない多様性と新奇な現象が発見される宝庫でもある。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ている。

2008 年度は、原田崇広講師が 2008 年 10 月 1 日付けで着任した.

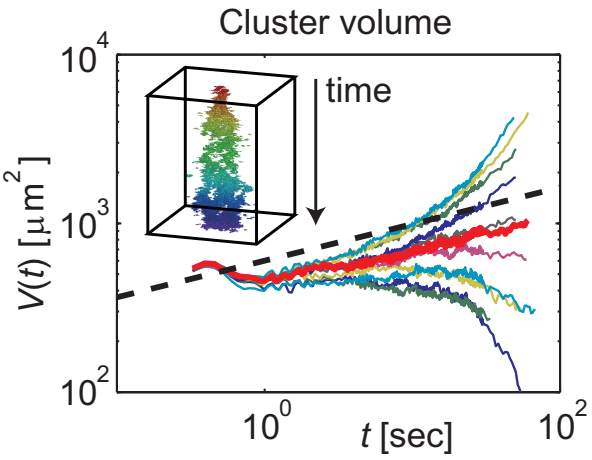

図 6.4.19: DSM2 乱流の臨界拡がり。転移点（太線）では体積は冪的に成長し、その傾きは DP の臨界指数（破線）と一致する。挿図は転移点より上での DSM2 クラスター成長の様子。

6.4.1 非線形非平衡系の物理

非平衡系の相転移：Directed Percolation 転移の動的臨界現象の普遍性

吸収状態、すなわち、入ったら二度と出てこられない状態への相転移は、浸透現象・触媒反応・伝染病の蔓延など多種多様な現象で見られると考えられており、殆どの場合にそれらは Directed Percolation (DP) クラスと呼ばれる単一の臨界現象を示すことが理論的にも数値的にも確立されている。DP クラスの臨界現象は実験的には長らく確たる証拠が存在しなかったが、近年当研究室は、液晶電気対流の 2 種類の乱流間 (DSM1-DSM2) で見られる吸収状態転移は独立な静的臨界指数が全て DP と一致しており、従って DP クラスに属することを発見した [81, 83, 84]。

一方で、DSM1-DSM2 転移の動的臨界現象の検証は未完であった。動的臨界現象の普遍性は非平衡相転移の特徴であり、特に DP クラスがもつとされる特殊な時間反転対称性（rapidity 対称性）を実験的に検証することには大いなる意義がある。そこで本研究室では、パルスレーザーを用いて DSM2 乱流を人工的に核生成し、その「臨界拡がり」を測定した。その結果、生じたクラスターの残存確率、体積、二乗半径の全てが冪的時間変化を示し、臨界指数のみならず、普遍スケーリング関数も DP クラスと一致することを確認した。これにより、DSM1-DSM2 転移において、動的臨界現象も含めた完全な DP 臨界現象の実験的検証がなされたこととなる [51, 84]。

摂動不安定性によるカオス時空ダイナミクスの特徴付け

カオスの本質はその不安定性にあり、摂動の指数関数的成長の速さを表す Lyapunov 指数を用いて様々な性質を調べる、所謂 Lyapunov 解析がカオスの主流の研究手法となっている。本研究室では、ごく最近大自由度系でも計算可能となった各不安定性モード固有の摂動方向を表す Lyapunov ベクトルにいち早く着目し、Lyapunov 指数と Lyapunov ベクトルの双方を用いた新たな Lyapunov 解析により時空カオスの特徴付けを行った。

その結果、新たな Lyapunov 解析は、非平衡特有の統計力学的現象である集団挙動を構成するモードを Lyapunov ベクトルの非局在性という形で明確に捉えられることが判明した [28, 45, 79, 80, 82]。さらに我々は、Lyapunov ベクトルの双曲性を調べることにより、散逸のある時空カオス軌道がたかだか有限次元の多様体に収まって発展していることを示すことにも成功した [7, 46, 82]。以上の成果は、Lyapunov ベクトルを併せた Lyapunov 解析が大自由度カオスの統計力学的性質を研究する上で強力な手段であることを実証するものである。

トポロジカル欠陥の流体力学応答

トポロジカル欠陥構造は、超伝導体におけるマイスナー効果や超流体における渦糸のように、さまざまな物理に登場して興味深い現象を生み出す。液晶は、それらのなかでも、直接実空間で観察できるよいモデルである。しかし、欠陥のダイナミクスの実験的測定例はまだ少ない。我々は、流れ場の中で欠陥がどのように応答するかを理解すべく、マイクロ流路・流体セルを用意し、その中で欠陥の伸張、収縮を計測した（図 6.4.20）。その結果、欠陥の形状は、歪みの弾性トルクと流れからうける粘性的トルクの釣り合いで決まることを見出した。のみならず、流路の形状を変えて実験することにより、欠陥に蓄えられたエネルギーの大きさを統一的に評価することに成功した。これは、非平衡系の液晶中の欠陥を非接触で操作・測定した初めての例と考えられる。[16, 25, 49]

相転移を伴う熱乱流現象の実験

熱対流に関する研究は理論・実験共に数多く行われてきたが、それらの内の多くが気相あるいは液相のみの単相流体を取り扱ったものであり、気液相転移（気化・沸騰・凝縮）を伴う 2 相共存系についての物理学的側面からの研究はあまり例を見なかった。このような系は潜熱による熱輸送が存在することから、系の実効的な熱伝導率が非常に大きく、工業的にはヒートパイプと呼ばれる熱交換器で実現されているものであり、現在でも実用性・効率を主眼とした研究が盛んに行われ数多くの経験則が存在する。しかしながら、沸騰を伴う場合の熱流と温度差（液体

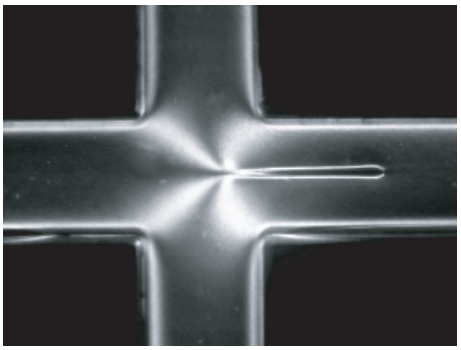

図 6.4.20: 十字流路中で伸張するトポロジカル欠陥

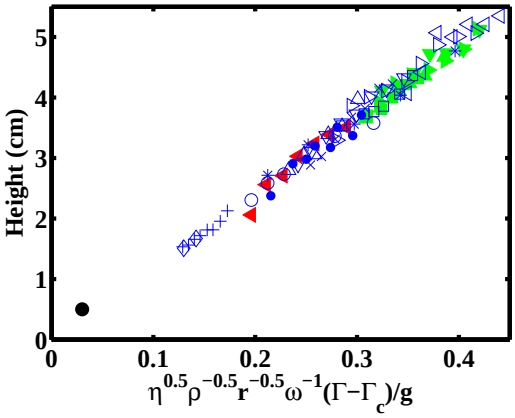

図 6.4.21: 対流の大きさに対するスケーリング。シリコンオイルの粘性、粒径、加振強度、加振周波数、平均の密度に対するスケーリングを得た。

の飽和温度と伝熱面温度との差）の関係という簡単な関係にすら、理論的な理解はないのが現状である。そこで、未だ解明には至っていない気液相転移を伴う系における様々な基本問題に対する理解を深めることを目的として、本研究では工業的には重力還流型ヒートパイプと呼ばれるシステムを製作し、純水を作動液として実験を行っている。システムは熱伝導率を向上させることを意識して設計されたものでないが、実効的な熱伝導率は水の２００倍にも上ることから、この系の熱流における潜熱の寄与が大きいことがわかる。現在は熱流と温度差の関係における潜熱の寄与の理解を中心に研究を行っている [54].

Wet granular matter の動力学と不安定性

鉛直加振下における Wet granular matter の動力学の実験は幾つかあり、コーンスターチ懸濁液系において stable hole, delocalized hole と呼ばれる界面の不安定性が報告されており、ブロンズ懸濁液系において heaping, cracking という界面の不安定性が発見されている。また本研究では、鉛直加振下のシリコンオイルとガラスビーズ懸濁液系において界面の変形が穴に成長し界面全体に広がっていく不安定性 (Expanding hole) を発見した。鉛直加振下における Wet granular matter の界面不安定性の機構の解明が本研究の目標である。本研究では、Expanding hole に注目しシリコンオイルとガラスビーズ懸濁液系において実験を行った。まず粒子径を $0.05mm$?$0.8mm$, シリコンオイルの粘性を $1.5cSt$?$1000cSt$ と大きくパラメーターを変えることで, 粒径とシリコンオイルの粘性に対する相図を得た [52]。次に、擬一次元系による実験により Expanding hole の周りには対流が出来ていることを示し、この対流の大きさに対するスケーリングを発見した (図 6.4.21)。またこのスケーリングを説明するモデルを立て、粘性応力の重要性を示した [44]。現在以上の実験と平行して shear thickening, dilation に着目し Wet granular matter のレオロジー測定を行っている。

粘弾性物質におけるロール構造

我々は、これまで粘弾性物質を垂直加振させると境界なしでロール状の対流的運動が生じることを観測しており、そのロール構造の発生機構を理解するためにいくつかの実験を行った。ある加振閾値を超えるとロール構造は発生し、ロールの起きる点に向かって形状の変化が顕著に見られる。その形状の変化は粘弾性液滴（PEO 水溶液）の応答の時間遅れによって生じると考え、加振プレートとゲルとの位相差の変化に着目した。結果、位相差はロール形成の直前に大きく縮まっていることが明らかになった。位相差 δ と剛性率 G の関係を表す Loss Factor $\tan\delta = G''/G'$ (G'：貯蓄剛性率、G''：損失剛性率) を考慮すると、これはエネルギー散逸の減少がロール形成を引き起こしていると解釈される（図 6.4.22)。
さらに、ロール構造を選択する理由として、acoustic streaming (AS) 現象と対応付けした。振動によって定常流が生じる現象としては、溶液内で物体を振動させた時に発生する流れである AS が古くから知られている。そこで、PEO で満たした容器内で板を水平方向に振動させたところ、ロール構造が確認された。PEO 水溶液内で AS 実験を行うと、ロール構造と大域的流れが生じることがわかった。AS の流速を測定したところ、理論値との良い一致が得られ、水平板上のロール構造の流速に関しても AS の効果を考えることにより、新しい知見が得られた。

微小な物理系に対する測定の一般論

生体分子の一分子計測技術は，生体分子の機能を明らかにするうえで基盤的技術となりつつある．これまで装置や新規プローブ開発などに多大な努力が払われてきたものの，実験的に得られたデータを適切に処理し，そこから有用な情報を引き出すための

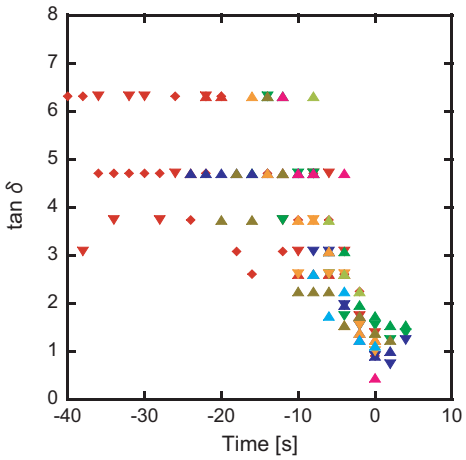

図 6.4.22: Loss factor の変化。ロールが形成する直前で Loss factor が減少する様子。（ロール開始点：Time 0）

処方箋については，まだまだ研究の余地が残されている．我々は，生体高分子に比較的大きなプローブを取り付けた場合のプローブの挙動に関する計測データのみから，直接観察されない分子の物性値を推定するという逆問題に，ベイズ推定の枠組みに従って一般的に取り組んだ．その結果，計測時間が無限に長い極限では，一部の自由度についての計測からだけでも系のパラメータを全て正確に決定できることを明らかにした．さらに，計測時間が有限の場合では，プローブの選択によっては精度の良い推定が極めて困難になるという一種の転移現象が起こることを見いだした [33, 61]．我々の提案した手法は，標準的な従来法に比べて概して優れた推定値を与えることが明らかになりつつある．今後，提案した手法の有効性を実験的にも証明していくことが課題である．

非平衡系における揺らぎと応答のエネルギー論

一般に系にエネルギーを注入して平衡から遠く離れた非平衡状態におくと，揺動散逸定理としてよく知られている揺らぎと応答の間の関係は成立しなくなる．我々はこれまでの研究において，このような揺動応答関係の破れの度合いが，系が熱浴に散逸するエネルギーの大きさに直接関係づけられることを明らかにしてきた [c.f., T. Harada and S.-i. Sasa, Phys. Rev. Lett. 95, 130602 (2005)]．これまでの研究では，系の力学的自由度, e.g., 速度, に関する揺動応答関係の破れに注目していたが，最近になって，多体系の速度場のような場の量に関しても，同様の等式が成立することが明らかになった [5, 78, 64]．今回新たに導かれた等式を用いると，速度場に関する揺動応答関係の破れの計測から，全系のエネルギー散逸を計算することが可能になる．特に，散逸に対してエントロピー生成率の寄与を取り入れることが可能になったのが，これまでの結果と異なる点である．今後，この研究を発展させることにより，これまで様々な著者により議論されてきた，非平衡系における揺動応答関係の破れの物理的意義を統一的観点から理解することが可能になるかもしれない．

6.4.2 非平衡ソフトマターの物理

非平衡下のエントロピー力を利用した光トラップ

温度勾配により物質が輸送される現象は古くから熱泳動現象として知られ、線形非平衡熱力学の教科書に現れるトピックである。我々は水溶液中で局所的に急激な温度勾配を形成し、しかも温度差は小さく留めることができる方法を開発し、制御された勾配下でナノ粒子や蛍光標識したＤＮＡの単一粒子、単分子の熱泳動現象を観測した。その結果、この方法が単分子 DNA を移動させたり引き伸ばす方法として使えることを見出した [3]。さらに、溶液中に高分子をわずかに溶解させると通常のレーザーピンセットではトラップできない不定形のコロイド粒子や DNA 分子、さらには細胞までがトラップできる現象を発見した（図 6.4.23）。現在そのメカニズムの解明と熱揺らぎの中で動作する分子機械への応用に向け、研究を進めている。

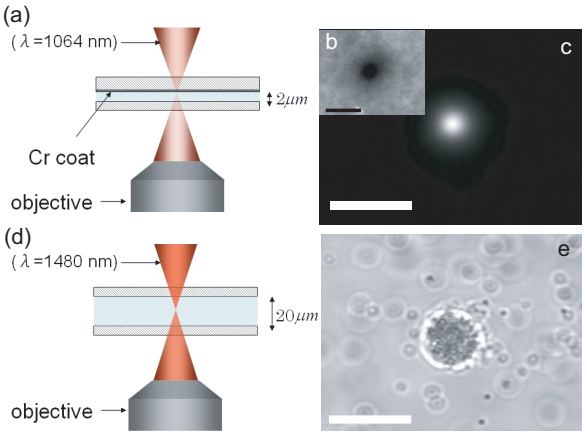

図 6.4.23: 非平衡を利用した新しいマイクロマニピュレーション：(a)2 次元トラップ用セットアップ I、(b)100nm 蛍光粒子（水中）、(c)100nm 蛍光粒子（高分子溶液中）、(d)3 次元トラップ用セットアップ II、 (e)500nm 蛍光粒子（高分子溶液中）

タンパク質１分子の構造変性機構

生体内の多くのタンパク質は、一度変性しても可逆的に元の固有構造に折りたたまれることが知られている。しかしその変性過程において、タンパク質がどのような変性経路を通るのかという問題は未だ解決していない。1 本のアミノ鎖が固有構造を自発的に形成するメカニズムを理解する上で、変性の中

間状態を明らかにする重要な課題である。これまでの研究では、バルクによる測定が主流であり１分子レベルの確率的な変性過程の詳細な情報を得ることが難しい、という課題があった。そこで、我々は原子間力顕微鏡（ＡＦＭ）を用いることにより、タンパク質１分子の変性を力学的に制御し、中間状態の検出と構造変化のダイナミクスを調べる実験を行った。本研究では、これまでの研究でよく性質の知られている Staphylococcal nuclease（SNase）というタンパク質を用いている。SNase はβ領域とα領域からなるドメイン構造を形成し、化学的な要因による変性では準安定状態のない二状態遷移を示すことが知られている。それに対し、我々は SNase を両末端から伸張して力学的に変性させることにより、複数の準安定な中間状態が存在することを確認した。また、一度伸張したタンパク質を段階的に緩和させる手法により、変性状態から天然構造へと折り畳まれる過程を観測することに成功した。その結果、SNase の変性過程は準安定な部分構造が独立的にふるまうことで、複数の並列な変性経路が確率的に存在しうることを明らかにした。また、緩和過程は変性過程と比べるとより規則的であり、経路の並列性が小さいことが確認された。我々の結果は、理論的に示唆されていたタンパク質の変性経路の「並列性」を直接的に示す証拠であり、タンパク質の構造変性は１分子レベルでは部分的な構造変化のアンサンブルとして表される性質が大きいことがわかった [2]。

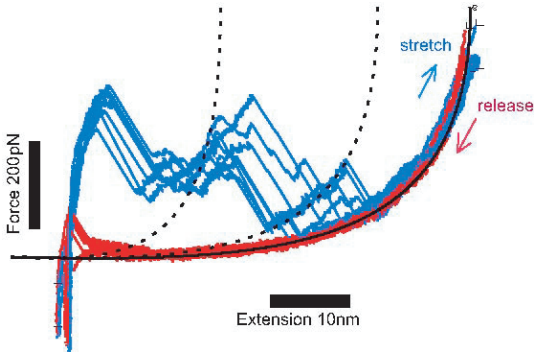

図 6.4.24: AFM により SNase の両端を固定して伸張・緩和をくり返したときに見られる伸張距離-負荷応答の関係。伸張過程において複数の中間構造が見られた。伸張過程ごとに負荷ピークは確率的に現れているが、いくつかの共通する中間構造が見られることが分かった。曲線は worm-like-chain モデルによるフィッティングを表している。

動的な非一様を持つ高分子の吸着相転移

生体高分子は、多種の蛋白質などと相互作用することにより内部に非一様性を有している。それは、分子全体の構造と強い相関を持ち、さらに生体機能へとつながっていることが知られている。しかも、非一様性、つまり分子内の配列は一般的に動的に変化し、新しい環境に適応する。ここでは、親水性と疎水性との二状態の間を確率的に遷移するモノマーからなる二状態高分子の吸着・脱着相転移について理論的に調べ、シミュレーションとの比較を行った。その結果、実効的な吸着エネルギーを定義することによって、不均一高分子の吸着の問題を一様高分子の問題に置き換えることができることが可能であることを示すことができた。[9, 30, 31, 48]

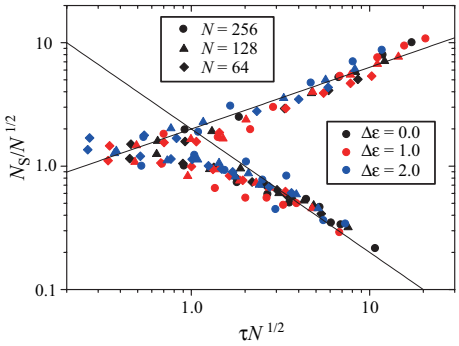

図 6.4.25: 非一様高分子の吸着相転移。実効的な吸着エネルギー τ を定義することによって、吸着するモノマー数 N_S が、高分子の長さ N や非一様性 $\delta\epsilon$ に依存せず同じ線上にプロットできる。実線は、一様高分子の臨界指数。

6.4.3 生命現象の物理

6.4.4 細胞運動の力学的特性の解明

近年の分子生物学の発展により細胞運動に関連する要素の同定が進んでいる一方、その物理的な性質・原理にはいまだ不明な点が多い。本研究では細胞運動を物理的に記述することを目指して、細胞が基質に及ぼす力の測定を行った。

細胞が発生させる力場と運動との関係を調べるためには、系の制御可能なパラメータを変化させ、そのダイナミクスのパラメータ依存性を調べる手法が有効である。細胞運動のモデル細胞である細胞性粘菌を用い細胞?基質間の接着強度を変えて細胞の速度・力場を測定し、その結果、細胞の速度と力場の絶対値に正の相関があることを見出した [59]。現在のところ同様の力測定を行った先行研究はほとんどなく、それらは本研究で用いた細胞に比べて 100 倍程度も遅い細胞を対象としたものである (Christianne Gaudet, et al. 2003 Biophysical Journal)。

先行研究で用いられている運動性が低い細胞では運動の詳細な解析が困難であるため、本研究では運動性の高い細胞の接着強度?力場の関係を初めて測定した。さらに細胞の形・運動についての解析も進めている [1]。本研究の結果を詳細に解析し、力場の非

対称性や形・運動との相関を調べることで、力場と形の変化・運動との定量的な関係が明らかになることが期待される。

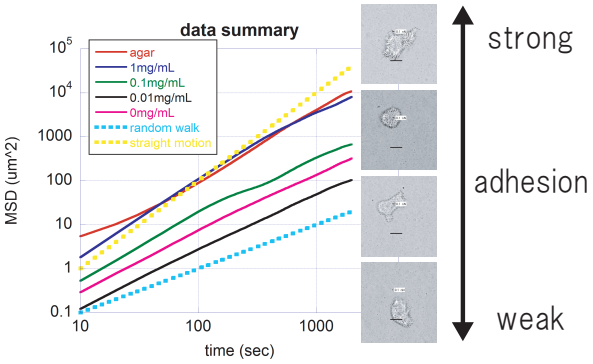

図 6.4.26: 細胞の速度および力場の接着強度依存性

6.4.5 ゼブラフィッシュ黒色素胞におけるモーター分子の役割

細胞内の輸送はいくつかの異なる機能をもつモータータンパク質によって担われており、外部刺激によってモーターの活性が制御され、細胞内の適切な方向への輸送が行われると考えられている。しかし、異なるモーター間の活性の「切換え（switch）」がどのように行われているのかについては多くが解明されていない。これまで黒色素胞などを用いた研究により、微小管をレールとする逆向きのモーターであるキネシンとダイニンの間に、協同的な切換えのメカニズムが存在することが示されている。このことはモータータンパク質に相互作用を介した自律的な制御メカニズムが存在することを示唆している。我々は真行寺研究室（東大・生物科学専攻）との共同研究により、ゼブラフィッシュの黒色素胞（Melanophore）における顆粒の輸送現象を、１細胞・１顆粒のレベルで観測し、画像解析を行うことにより、３種類のモータータンパク質の役割とそれぞれの相互作用について研究を行った。これまで顆粒の拡散過程は、キネシンからミオシンによる輸送への単純な移行であり、細胞内 cAMP 濃度によってモーター活性が制御されていると考えられていた。しかし我々は解析の結果から、３種類のモーターが積極的に活性を保ちながら顆粒が拡散されることを明らかにした。また latrunculin 処理細胞との比較から、微小管とアクチンのそれぞれをレールとするモーター分子の切換えに、ダイニンが「橋渡し」の役割を果たすことを示唆する結果を得た。異なる種類のモーターによって担われる細胞内輸送において、各々のモーターが非生産的な綱引きをすることなく効率的な輸送を実現させるためには、cAMP などの外的制御だけではなく、モーター間の相互作用を介した自律的制御機構が存在すると考えられる。我々の結果は、ダイニンの活性制御が自律的制御にとって重要であることを示している。

6.4.6 バクテリアの分化により形成される周期的コロニーパターン

寒天培地上でバクテリアを培養すると、バクテリアの細胞集団がマクロなパターンを作り出すことが知られている。寒天培地に含まれる寒天濃度と栄養濃度やバクテリアの種類によって、さまざまなパターンが形成される。その中でも同心円状パターンは各種バクテリアに見られ、実験・理論の両面から研究されているが、本質的な形成機構はまだ解明されていない。バクテリアは体の表面に 5〜10 本生えたべん毛を使って運動する。同心円パターンは細胞の分裂・成長・運動とともにコロニーの界面に細胞密度の濃淡部分が周期的に現れることにより形成される。寒天培地上では、細胞密度などの条件により、バクテリアが運動性の高い swarm 状態と運動性のない swim 状態の２つの形態に分化・脱分化することが知られており、近年の研究で細胞の分化・脱分化とコロニー界面の周期的な成長との関係が示唆されている。
本研究は、寒天培地上での個々のバクテリアの分化・脱分化を可視化することにより、分化・脱分化が起こる要因を明らかにすることを目的としている。

6.4.7 細胞機能の揺らぎとパターン形成

細胞の機能の一般的性質や，個々の細胞の機能と細胞集団のパターン形成との関係を明らかにするための実験的研究を行った．細胞の機能に関しては，細胞の機能に対する制御メカニズムの一般的性質にアプローチするため，細胞機能の遅いダイナミクスに注目して研究を行った．題材として，心筋細胞の初代培養系を用いて実験を行った．心筋細胞は比較的よく研究されていて種々の機能の分子的実体が分かっていることや，末端文化細胞で細胞分裂しないために，定常条件下で細胞の機能を長時間計測するのに適した細胞であるなど，本研究を行う上でいくつかの重要なメリットを持っている．我々は，単離した心筋細胞を定常条件下で培養し，自発的な拍動タイミングの揺らぎを単一細胞レベルで広帯域にわたって計測した．その結果，短い時間スケールにおいては細胞の拍動にはいくつかの特徴的なダイナミクス（定常的拍動やバーストなど）が見られ，また長時間スケールでは $1/f^{\beta}$ ノイズ ($\beta \approx 1$) 一般的に見られることが分かった [6]．このような性質は，細胞の結合数や，環境の温度を変化させた場合にも維持されていることが分かり [77, 69]，また，心室由来・心房由来のどちらの細胞においても見られた [73]．この事から，長時間スケールにおける細胞機能のべき的相関は，ある程度一般的な性質であることが示唆された．これまでの研究では，こうした長時間相関が生み出される原因についてはよく分かっておらず，過去における膨大な分子的知見と結びつけていくことは今後の課題である．

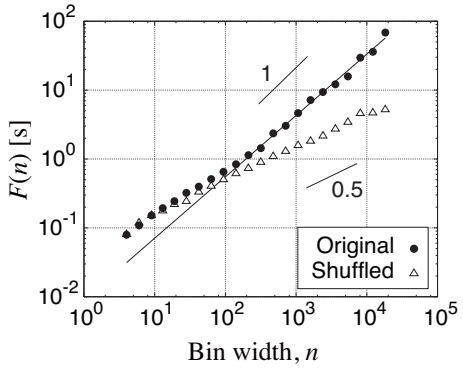

図 6.4.27: 単一心筋細胞の拍動タイミングの揺らぎ解析．Detrended fluctuation analysis (Peng *et al.* 1994) と呼ばれる手法を用いて，拍動時間間隔の時系列の自己相関を調べる．10^2 beats よりも大きな時間スケールで $1/f$ 揺らぎが観測されている．

また，細胞集団におけるパターン形成現象に関しても研究を行った．心筋細胞をコラーゲンコートした基板上に播種すると，時間の経過と共に細胞同士が凝集し，同期して拍動するクラスターを形成する現象を見いだし，そのメカニズムを調べた．その結果，細胞の周期的拍動を阻害した条件下では，クラスター形成が進行しないことや，細胞と基板との接着の強さを変化させることによって，凝集の挙動が変化し，細胞と基板の接着が弱い方がクラスターが形成されやすいことなどが分かった．また細胞密度と形成されるクラスターのサイズとの間に正の相関が認められた．こうした結果から，細胞の自発的収縮によって発生する張力を介して細胞同士が引っ張りあうことがクラスター形成の駆動力になっていることが示唆される [4]．こうした知見は，細胞の力学的性質が組織の形態形成に対して重要な役割を持ちうることを示している．今後このような知見をベースにして，組織の形態形成を細胞の力学から理解することや，細胞の力学的性質を変えることによって組織の形態を制御する方法を開発することなどが重要な課題である．

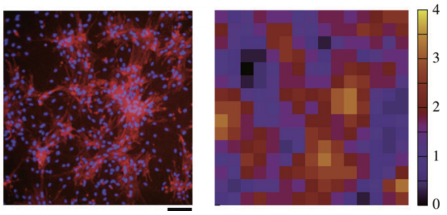

図 6.4.28: 心筋細胞集団が自発的に形成するクラスター構造．一様な密度で播種された細胞集団が数日の時間スケールでクラスター構造を形成する．左は，心筋細胞のアクチン繊維と核を染色した図，右は同じ視野における細胞の核密度分布．スケールバーは 100 μm を表す．

＜報文＞

(原著論文)

[1] Yusuke T. Maeda, Junya Inose, Miki Y. Matsuo, Suguru Iwaya, Masaki Sano, Ordered Patterns of Cell Shape and Orientational Correlation during Spontaneous Cell Migration, PLoS ONE 3 (11), e3734 (2008).

[2] Takaaki Ishii, Yoshihiro Murayama, Atsuto Katano, Kosuke Maki, Kunihiro Kuwajima, Masaki Sano, Probing force-induced unfolding intermediates of a single staphylococcal nuclease molecule and the effect of ligand binding, Biochemical and Biophysical Research Communications 375, 586 (2008).

[3] H.R. Jiang, H. Wada, N. Yoshinaga, and M. Sano, Manipulation of Colloids by Nonequilibrium Depletion Force in Temperature Gradient, Phys. Rev. Lett. (2009) (accepted).

[4] T. Harada, A. Isomura, and K. Yoshikawa, Contraction-induced cluster formation in cardiac cell culture, Physica D, 237, 2787-2796 (2008).

[5] T. Harada, Macroscopic expression connecting the rate of energy dissipation with the violation of the fluctuation response relation, Physical Review E, 79, 030106(R) (2009).

[6] T. Harada, T. Yokogawa, T. Miyaguchi and H. Kori, Singular behavior of slow dynamics of single excitable cells, Biophysical Journal, 96, 255-267 (2009).

[7] Hong-liu Yang, Kazumasa A. Takeuchi, Francesco Ginelli, Hugues Chaté, and Günter Radons: Hyperbolicity and the effective dimension of spatially extended dissipative systems, Physical Review Letters, 102, 074102 (2009).

[8] Natsuhiko Yoshinaga: Folding and unfolding transition in a single semiflexible polymer, Phys. Rev. E, 77, 061805 (2008) .

[9] Natsuhiko Yoshinaga, Efim Kats and Avraham Halperin: On the Adsorption of Two-State Polymers, Macromolecules, 41, 7744 (2008).

(会議抄録)

[10] Proceedings

[11] S. Tatsumi and M. Sano, Validation of "Heat Bath" effect in a vertically vibrated granular systems, Journal of The Japan Society of Microgravity Application, in press.

[12] S. Tatsumi, Y. Murayama, and M. Sano, Experimental Study of the Freely Evolving Granular Gas under Microgravity Condition, AIP Conf. Proc. Volume 1027, pp. 923-925, July 7 (2008), THE XV INTERNATIONAL CONGRESS ON RHEOLOGY: The Society of Rheology 80th Annual Meeting

(国内雑誌)

[13] 原田崇広, 分子機械のゆらぎと応答のエネルギー論, 生物物理, 49, 88-89 (2009).

(学位論文)

[14] 辰巳創一: 粉体系の動力学と不安定性に関する実験的研究 (Experimental Study of Dynamics and Instabilities in Granular Systems)（博士論文）.

[15] 石井孝明: Study on Stochastic Transitions in Proteins: Mechanical Folding and Unfolding of a Single Protein and The Switching Movement of Melanosomes（博士論文）.

[16] 黒田真史: 液晶中のトポロジカル欠陥のダイナミクスと流体力学応答 (Hydrodynamic Response and Dynamics of Topological Defect in Liquid Crystals)（修士論文）.

[17] 鈴木量: Mechanism of Convection-like Rolls Induced by Vertical Vibration of Viscoelastic Materials（修士論文）.

(著書)

[18] T. Harada, Intelligence from physics of living systems, in "Human and Artificial Intelligent Systems" (eds. H. Ogura and C. Araki), Sankeisha, Aichi, Japan (2008).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[19] H.R. Jiang: Optothermal manipulation of colloids, International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter 2-5 June 2008, Kyoto, Japan.

[20] T. Ishii: Probing force-induced folding-unfolding transition of a single protein, International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter, 2-5 June 2008, Kyoto, Japan.

[21] R. Suzuki, S. Tatsumi, and M. Sano：Convection-like rolls induced by vertical vibration of viscoelastic fluids, International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter, 2-5 June 2008, Kyoto, Japan.

[22] Masaki Sano, H.R. Jiang, and S. Toyabe: Nonequilibrium thermodynamics of colloid polymer mixture, International Workshop on Bio-Soft Matter 2008, Jun. 10, 2008, Tokyo, Japan.

[23] Yoshihiro Murayama and M. Sano: Irreversible force response of a single condensed DNA, International Workshop on Bio-Soft Matter 2008, Jun. 9, 2008, Tokyo, Japan.

[24] Soichi Tatsumi and M. Sano: Slow relaxation in a mono-disperse granular system in quasi-2D vibrated, International Workshop on Bio-Soft Matter 2008, Jun. 9, 2008, Tokyo, Japan.

[25] Masafumi Kuroda and Masaki Sano: Dynamical Behavior of Topological Defects in the Shear Flow Field, International Workshop on Bio-Soft Matter 2008, Jun. 9, 2008, Tokyo, Japan.

[26] R. Suzuki and M. Sano: Effect of viscoelasticity on convection-like rolls induced by vertical vibration, International Workshop on Bio-Soft Matter 2008, Jun. 9, 2008, Tokyo, Japan.

[27] H.Ebata, S.Tatsumi, M.Sano, Instability of vertically vibrated paste surface, 9-10, June 2008, International Workshop on Bio-Soft Matter 2008, The University of Tokyo, (poster).

[28] K. A. Takeuchi, Francesco Ginelli, and Hugues Chaté: Detection of collective modes using Lyapunov vector analysis, The 3rd KIAS Conference on Statistical Physics, Nonequilibrium Statistical Physics of Complex Systems, Jul. 1-4, 2008, Seoul, Korea.

[29] S. Tatsumi, Y. Murayama, and M. Sano, Experimental Study of the Freely Evolving Granular Gas under Microgravity Condition, THE XV INTERNATIONAL CONGRESS ON RHEOLOGY: The Society of Rheology 80th Annual Meeting, July 7, 2008, Monterey, U.S.A.

[30] Natsuhiko Yoshinaga: Dynamic Core-Shell Structures in Two-State Polymersr, International Workshop on Bio-Soft Matter, Sep. 9-10 2008, Tokyo, Japan.

[31] Natsuhiko Yoshinaga: Two-state polymers: conformational transition and adsorption, Jülich Soft Matter Days, Nov. 11-14 2008, Bonn, Germany.

[32] Hirokazu Tanimoto, Fumi Kano, Masayuki Murata, Dynamics of ATF4 feedback module under different celluler stress, International Workshop on Bio-Soft Matter, Jun. 9-10, 2008, Tokyo, Japan

[33] M. Miyazaki and T. Harada, Bayesian Estimation for Hidden Information of a Single Molecular Motor, Biophysical Society 53rd Annual Meeting, Feb. 38 - Mar. 4, Boston, USA.

[34] T. Harada, T. Yokogawa, T. Miyaguchi and H. Kori, Long-term correlation of the beat rate of single cardiac muscle cells, The second annual q-bio conference on cellular information processing, Aug. 6-9, 2008, Santa Fe, USA.

[35] T. Harada, T. Yokogawa, T. Miyaguchi and H. Kori, Long-term correlation in the beat rate of single cardiac muscle cells, The international symposium of non-equilibrium soft matter, Jun. 2-5, 2008, Kyoto, Japan.

招待講演

[36] M. Sano, H.R. Jiang, and S. Toyabe: Control of colloids by thermophoresis driven depletion force: Experiments and thermodynamic formalism, International symposium on Non-Equilibrium Soft Matter, June 4, 2008, Kyoto, Japan.

[37] M. Sano, H.R. Jiang, and S. Toyabe: Nonequilibrium thermodynamics of colloid polymer mixture, International Workshop on Bio-Soft Matter, June 10, 2008, Tokyo, Japan.

[38] M. Sano, H.R. Jiang, and S. Toyabe: Nonequilibrium fluctuations and statistical laws in externally controlled colloidal systems, The 5th International Conference on Nonlinear Science, Dynamis Days in Asia Pacific (DDAP5), Sept. 11, 2008, Nara, Japan.

[39] M. Sano : Out of equilibrium microsystems: making micro-swimmers and wheels, Self-organization and dynamics of active matters, Jan. 30, 2009, Paris, France.

[40] M. Sano, Y. Maeda, and M. Matsuo: Coordination of Cell Shape and Motility in Spontaneous Cell Migration, Sapporo Winter School 2009, PART II Nonequilibrium Pattern Formation in Chemical and Biological Systems, 10-14 Feb., 2009, Sapporo, Japan.

[41] M. Sano: Novel Interactions and Dynamics in Complex Fluids: From Colloidal Particles to Liquid Crystal and DNA Molecules, the IAS seminar series on Soft Matter, March 11, 2009, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong.

[42] H.R. Jiang: Enhanced optothermal manipulation for colloidal objects, International Workshop on Bio-Soft Matter 2008, Jun. 9, 2008, Tokyo, Japan.

[43] T. Harada, Energetics of fluctuations and response in nonequilibrium Langevin systems, International workshop on Bio-soft matter, Jun. 9-10, Tokyo, Japan.

(国内会議)

一般講演

[44] 江端宏之, 辰己創一，佐野雅己,「鉛直加振下でのペースト界面の不安定化 」，2008 年 9 月 20 日，日本物理学会 2008 年秋季大会，岩手大学，(口頭発表)

[45] 竹内一将，Francesco Ginelli，Hugues Chaté：Lyapunov ベクトルで捉える大自由度力学系の集団挙動モード，日本物理学会 2008 年秋季大会（岩手大学） 2008 年 9 月 20-23 日.

[46] 竹内一将，Francesco Ginelli，Hugues Chaté：Lyapunov モードの双曲性と大自由度散逸系の有効次元，日本物理学会 2008 年秋季大会（岩手大学） 2008 年 9 月 20-23 日.

[47] 辰己創一, 佐野雅己:「加振された擬二次元単一分散粉体系における中距離秩序の発現 II」, 日本物理学会 2008 秋季大会, 2008 年 9 月 20 日, 岩手大学

[48] 義永那津人, D. J. Bicout, E. I. Kats, A. Halperin:「Dynamic Core-Shell Structures in Two-State Polymers」, 日本物理学会 2008 秋季大会, 2008 年 9 月 20 日, 岩手大学

[49] 黒田真史, 佐野雅己:「流れ場におけるトポロジカル欠陥のダイナミクス」, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 22 日, 岩手大学.

[50] 義永那津人:「Thermophoresis and induced flow near surface on colloids under temperature gradient」, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 29 日, 立教大学

[51] 竹内一将，黒田真史，佐野雅己： 液晶乱流の吸収状態転移における臨界拡がりと対称性，日本物理学会 2009 年年次大会（立教大学） 2009 年 3 月 27-30 日.

[52] 江端宏之, 辰己創一，佐野雅己:「Wet granular matter の対流的不安定性とそのレオロジー特性」，2009 年 3 月 27 日，日本物理学会 第 64 回年次大会，立教大学，(口頭発表)

[53] 鈴木量、辰己創一、佐野雅己：「粘弾性物質におけるロール構造とその発生機構」、2009 年 3 月 27?30 日、日本物理学会　第 64 回年次大会、立教大学

[54] 松井裕太郎、佐野雅己：「気液相転移を伴う熱対流実験」、日本物理学会：第６４回年次大会、2009 年 3 月 27?30 日、立教大学

[55] 佐野雅己:「コロイド・高分子混合系の非平衡熱力学と実験」, 特定領域研究「ソフトマター物理」, A03 班 2008 年度班会議・一般公開研究会, 2008 年 5 月 17 -18 日, 東京大学, 東京.

[56] 佐野雅己:「自己駆動粒子系のダイナミクス　?ナノ粒子から歩行者まで? 」, 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会, 2008 年 12 月 12 日, 東北大学.

[57] 佐野雅己:「差異・パターン形成と拡散方程式の現在」, パネルディスカッション, RIMS 共同研究「離散力学系の分子細胞生物学への応用数理」, 2009 年 1 月 5 日, 京都大学理学部 3 号館, 京都.

[58] 佐野雅己, 江宏仁, 義永那津人, 和田浩史:「Manipulation of Colloids by Thermophoresis driven Diffusiophoresis - Hydrodynamic Effect and Scaling Relation -」, 特定領域研究「ソフトマター物理」: 第 3 回領域研究会, 2009 年 1 月 7 -9 日, 九州大学西新プラザ, 福岡.

[59] 谷本博一，佐野雅己：「細胞の力と運動の関係は接着の強さによってどう変わるか？」, 定量的生物学研究会，2009 年 1 月 10-12 日，東京大学

[60] 杉浦晴香、佐野雅己：「バクテリアのコロニーパターンの形成メカニズム」, 定量生物学の会第一回年会、2009 年 1 月 10 日-12 日、東京大学

[61] 宮崎牧人, 原田崇広:「隠れた自由度を持つ物理系に対するパラメータ推定法」, 日本物理学会：第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 27 -30 日，立教大学, 東京.

[62] 尾関晃, 原田崇広: 「培養心筋細胞のペーシングにおける刺激波形の効果」, 定量生物学の会: 第一回キャラバン, 2009 年 3 月 14 -15 日, 国立遺伝学研究所, 静岡.

[63] 宮崎牧人: 「一分子計測におけるシステムパラメータのベイズ推定法」, 京都大学 GCOE オープニングシンポジウム, 2009 年 2 月 16 -18 日, 京都大学, 京都.

[64] 原田崇広: 「微小な非平衡系における逆問題」, 古典および量子ダイナミクス・非平衡統計力学に関するワークショップ, 2009 年 3 月 1 -3 日, 学士会館, 東京.

[65] 原田崇広: 「一分子計測における逆問題: ベイズ的アプローチ」, バイオ操作→ 1 分子研究会, 2009 年 1 月 31 日, 理化学研究所横浜研究所　免疫・アレルギー科学総合研究センター, 神奈川.

[66] 宮崎牧人, 原田崇広: 「プローブの軌跡からシステムのパラメータを推定する方法」, 定量生物学の会: 第 1 回年会, 2009 年 1 月 10 -12 日, 東京大学, 東京.

[67] 尾関晃, 原田崇広: 「培養心筋細胞の電気刺激に対する応答性と刺激波形の効果」, 定量生物学の会: 第 1 回年会, 2009 年 1 月 10 -12 日, 東京大学, 東京.

[68] 宮崎牧人, 原田崇広: 「プローブの軌道からシステムのパラメータを推定する方法」, 生体運動研究合同班会議, 2009 年 1 月 9 -10 日, 東京大学, 東京.

[69] 原田崇広: 「細胞機能の遅いダイナミクス」, 特定領域研究「ソフトマター物理」: 第 3 回領域研究会, 2009 年 1 月 7 -9 日, 九州大学西新プラザ, 福岡.

[70] 原田崇広, 横川知美, 宮口智成, 郡宏: 「単一興奮性細胞の遅い揺らぎのダイナミクス」, 日本生物物理学会: 第 46 回年会, 2009 年 12 月 3 -5 日, 福岡国際会議場, 福岡.

[71] 宮崎牧人, 原田崇広: 「分子モーターの軌道の効率的なベイズ推定法」, 日本生物物理学会: 第 46 回年会, 2009 年 12 月 3 -5 日, 福岡国際会議場, 福岡.

[72] 土山典子, 原田崇広: 「分子モーターの processivity と消費エネルギーについての理論的研究」, 日本生物物理学会: 第 46 回年会, 2009 年 12 月 3 -5 日, 福岡国際会議場, 福岡.

[73] 横川知美, 原田崇広: 「心房筋及び洞房結節細胞の拍動数に見られるゆらぎの性質」, 日本生物物理学会: 第 46 回年会, 2009 年 12 月 3 -5 日, 福岡国際会議場, 福岡.

[74] 尾関晃, 原田崇広: 「培養心筋細胞のペーシングにおける刺激波形の効果」, 日本生物物理学会: 第 46 回年会, 2009 年 12 月 3 -5 日, 福岡国際会議場, 福岡.

[75] 原田崇広, 横川知美, 宮口智成, 郡宏: 「心筋細胞の自発的拍動に見られる遅いダイナミクス」, 日本物理学会: 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 20 -23 日, 岩手大学, 岩手.

[76] 原田崇広: 「非平衡条件下のコロイド分散系における揺らぎと応答の関係」, 特定領域研究「ソフトマター物理」, A03 班 2008 年度班会議・一般公開研究会, 2008 年 5 月 17 -18 日, 東京大学, 東京.

招待講演

[77] 原田崇広: 「細胞機能の遅いダイナミクス」, 定量生物学の会: 第 1 回年会, 2009 年 1 月 10 -12 日, 東京大学, 東京.

[78] 原田崇広: 「微小な非平衡系の揺らぎと応答のエネルギー論」, 日本物理学会: 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 20 -23 日, 岩手大学, 岩手.

[79] 竹内一将, Francesco Ginelli, Hugues Chaté：カオスの摂動敏感依存性で捉える結合振動子の集団挙動, リズム現象の研究会 IV（お茶の水女子大学） 2009 年 1 月 23-24 日.

(セミナー)

[80] K. A. Takeuchi: Détection des modes collectifs dans les systèmes dynamiques par l'analyse de Lyapounov, Commissariat à l'Énergie Atomique, Instability and Turbulence Group セミナー, 2008 年 4 月 8 日.

[81] K. A. Takeuchi: Directed Percolation Criticality in Turbulent Liquid Crystals, Institut des Systèmes Complexes, Paris Ile-de-France セミナー, 2008 年 6 月 7 日.

[82] 竹内一将：Lyapunov ' ベクトル' 解析 - 協同現象 および 散逸系の有効自由度を捉える -, 東京大学 佐々研究室 セミナー, 2008 年 7 月 22 日.

[83] K. A. Takeuchi: Directed percolation criticality in turbulent liquid crystals, Nancy University, Statistical Physics Group セミナー, 2009 年 2 月 9 日.

[84] K. A. Takeuchi: Criticalité de la Percolation Dirigée et Hystérésis dans les Cristaux Liquides Turbulents, Commissariat à l'Énergie Atomique, Servide de Physique de l'État Condensé セミナー, 2009 年 2 月 18 日.

[85] 江端宏之, 辰己創一, 佐野雅己, 鉛直加振下のペースト界面の不安定性と粘性応力の関連性について, 2008 年 10 月 24 日, 鳥取非線形研究会, 鳥取大学, (口頭発表)

[86] 義永那津人: Thermophoresis and induced flow near surface under temperature gradient, 京都大学 基礎物理学研究所 物性談話会, 2009 年 3 月 18 日

[87] 佐野雅己:「液晶における乱流間転移と Directed Percolation Universality」, 中央大学物理学科, 2008 年 7 月 3 日.

[88] 佐野雅己:「液晶における乱流間転移と Directed Percolation Universality」, 京都大学物理学第一教室談話会, 2008 年 7 月 8 日.

[89] Masaki Sano: 明治大学グローバル COE プログラム、Advanced Mathematical Sciences I, Nonlinear Dynamics and Pattern Formation, 23 Nov., 2008, Tokyo.

[90] H.R. Jiang, Dynamical responses of soft matter to temperature gradients, the IAS seminar series on Soft Matter, March 11, 2009, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong.

(その他)

[91] 佐野雅己: 集中講義「物理学特別講義第一」、中央大学大学院理工学研究科, 2008 年 6 月 30?7 月 3 日.

[92] 佐野雅己: 集中講義「ミクロ非平衡物理学」、京都大学大学院理学研究科, 2008 年 7 月 7?9 日.

6.5 山本研究室

【はじめに】星および惑星系の形成は宇宙における最も基本的な構造形成過程の 1 つであり、観測的にも理論的にも活発な研究が行われている。また、我々の太陽系の起源、生命の起源との関連でも注目されるテーマである。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）によって研究している。

新しい星は、星と星の間に漂うガスと塵からなる希薄な雲（星間雲）が重力収縮して形成される。星間雲の中でも密度が比較的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直接の現場である。星間分子雲の主成分は水素分子であるが、その中には様々な原子・分子が僅かに存在している。これらの微量分子の組成は、星間分子雲やその中での星形成過程を克明に記憶している。即ち、微量分子の組成を調べることにより、現在の物理状態だけでなく、星間分子雲や星形成領域の「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含む多面的アプローチにより、星・惑星系形成とそこでの物質進化の理解を目指している。

【なぜ電波か】星間分子雲の温度はおよそ 10 K 程度と非常に低い。この「宇宙の中でも最も低温の天体」を調べるには、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いので、極めて透過力が高い。厚い星間分子雲に包まれた星形成の現場でも、電波では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。それらの高感度観測により、星・惑星系形成の物理過程のみならず、そこでの物質進化も捉えることができるのである。

【ALMA（アルマ）に向けて】近年、センチ波、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ン受信機の実現がその技術的背景にある。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、星形成から惑星系形成に至る進化を追う場合、感度、分解能の点でまだまだ不十分なことが多い。それらを解決するのが ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) である。南米チリの標高 5000 m のアタカマ高原に 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）を建設するもので、日本、北米、欧州の共同プロジェクトとして建設が進んでいる。建設は順調で、2012 年から本格運用を予定している。ALMA は桁外れの感度と解像度により、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】一方、テラヘルツ帯は電波と赤外線との中間にあたり、まだ、観測的研究が十分に行われていない波長域である。この領域には C^+, N^+ などのよく知られた原子スペクトル線の他、CH, H_2D^+, HD_2^+ などの基本的分子のスペクトル線が存在する。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根源を掴むことができると期待されている。世界的には Herschel 宇宙赤外線望遠鏡が近い未来に打ち上げられる予定で、これによりテラヘルツ帯観測のフロンティアが開かれるであろう。本研究室では、それとは相補的な地上大口径望遠鏡による高分解能観測を目指して、独自の技術開発を進めている。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、テラヘルツ天文学の創生に寄与したいと考えている。

6.5.1 星形成領域の観測研究

低質量星形成領域における化学的多様性の発見

原始星円盤から原始惑星系円盤への物質進化は、惑星環境の多様性や生命の起源などとも関連する重要な分野であり、活発な研究が進められている。近年、太陽質量程度の原始星において、$HCOOCH_3$ や $(CH_3)_2O$ などの大型有機分子が電波観測によって検出され話題となった。このような分子が検出される天体をホットコリノ (hot corino) 天体と呼ぶ。かなり複雑な有機分子が原始星円盤で検出されたことは、隕石などで見つかる先太陽系有機分子との関係でも注目された。この発見により、原始星円盤の化学組成の一般的特徴が把握されたかに思われていた。

ところが、昨年度、我々はまったく異なる化学組成をもつ低質量原始星 L1527 を発見した。この天体では、上記のような大型有機分子は検出されず、一方で C_4H_2 などの様々な炭素鎖分子が原始星近傍の暖かくて高密度な領域に豊富に存在している。そこでは、CH_4 の星間塵マントルからの蒸発をきっかけとして炭素鎖分子が爆発的に形成されているものとみられる。我々はこれを Warm Carbon-Chain Chemistry (WCCC) と名付けた。通常、炭素鎖分子は星形成以前の若いコアで豊富に存在し、星形成領域では少なくなる。従って、上記の発見は大変な驚きであった。

WCCC 現象が L1527 に特有かどうか調べるために、我々は、16 個の星形成領域について、国立天文台 45 m 電波望遠鏡と Mopla 22 m 電波望遠鏡を用いて炭素鎖分子のサーベイ観測を行った。その結果、おおかみ座において、L1527 と酷似した天体 IRAS15398-3359 を発見した。さらに、CCH 分子の高励起輝線観測などにより、それが間違いなく第二の WCCC 天体であることを確認した。この他にも、部分的に上記の特徴を満たす天体がいくつか見つかった。これらのことから、WCCC 現象は L1527 に特有ではなく、程度の差はあれ星形成領域における一般現象であることがわかった。また、複雑な有機分子が検出され

る星形成領域（hot corino 天体）では一般に WCCC 現象は弱い傾向が見られた。

このような化学組成の多様性は、分子雲の形成から原始星の形成に至るまでのタイムスケールの違いで説明できる。もし、原始星に至る時間が短く、自由落下に近い場合には、星間塵マントル上でより効率よく CH_4 が形成され、WCCC 天体となる。この場合、形成された原始星の周囲にも炭素鎖分子がある程度残される。一方、星形成に至るタイムスケールが長いと、星間塵上にはむしろ CH_3OH や複雑な有機分子が作られる。この場合、hot corino 天体となる。一般に星形成に至る時間の違いを調べることは非常に難しいが、それには化学組成による診断が非常に有効であることがわかった。[3][10][11]

WCCC 天体 L1527 における重水素化物の観測

星間分子雲コアにおいて、分子の重水素濃縮度は、コアの進化に伴って高くなることが知られている。そこで、スペインの IRAM 30 m 望遠鏡、および米国の GBT 100 m 望遠鏡を用いて、WCCC 天体である L1527 に対して重水素化物の探査を行った。その結果、l-C_3D, C_4D, C_4HD, DC_3N, DC_5N, and c-C_3HD を検出した。なかでも l-C_3D と C_4HD は宇宙空間での初めての検出である。一方で、CH_3OH の重水素化物である CH_2DOH は高感度観測にもかかわらず検出されなかった。これらの分子における重水素濃縮度は、2 %から 7 %、もしくはそれ以下であり、星なしコア TMC-1 での値と比べるとやや高くなっている。一方、hot corino 天体では、CH_3OH や H_2CO などの分子で数 10 %に達する著しい濃縮が知られており、それと比べると L1527 での重水素濃縮度は星形成領域としては低いことがわかった。この事実は、WCCC 天体である L1527 が hot corino 天体よりも短いタイムスケールで形成された可能性を強く支持する。[4][14]

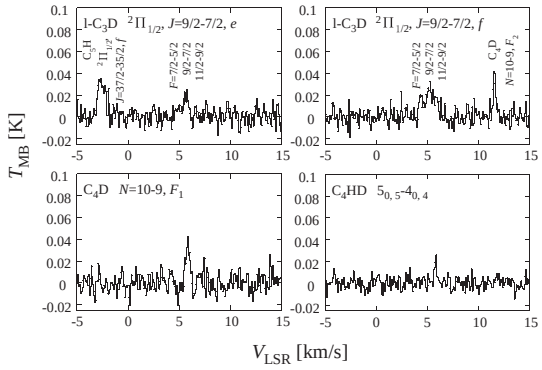

図 6.5.29: Spectral Line Profiles of l-C_3D, C_4D, and C_4HD in L1527

L1527 における HC_5N 高励起輝線の干渉計観測

昨年度、我々は、国立天文台 45 m 望遠鏡を用いた観測で、炭素鎖分子 HC_5N の高励起輝線 ($J = 32 - 31$) を L1527 において検出した。この輝線は上位準位のエネルギーが 67 K と高いことから、高温高密度な領域だけから放射される。一般に炭素鎖分子は星なしコアに豊富に存在しているが、そのような場合は上記のような高励起の輝線は非常に弱い。したがって、その検出は、L1527 において、HC_5N が原始星のごく近傍に存在していることを意味する。そこで、原始星周辺における HC_5N の分布を明らかにするため、欧州のミリ波干渉計 PdBI を用いて HC_5N 高励起輝線の高感度観測を行った。その結果、図 2 に示すように、原始星周りに数百 AU のスケールで集中していることがわかった。hot corino 天体では、大型有機分子が原始星周りの 200 AU 程度の領域に分布しているが、一方で WCCC 天体 L1527 では炭素鎖分子 HC_5N が原始星周辺の同程度の大きさの領域に存在しており、原始星円盤の化学組成には明らかに多様性があることが確認された。

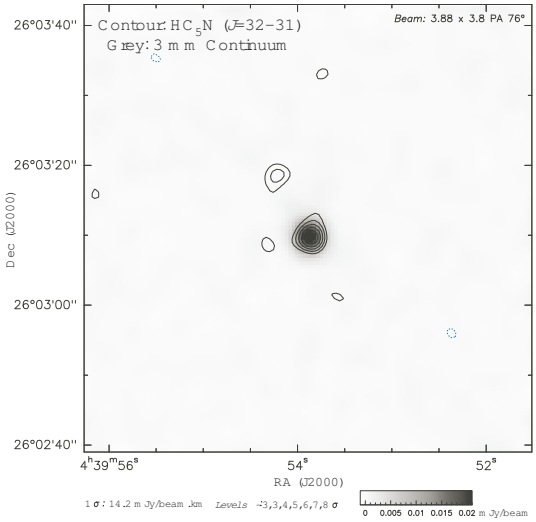

図 6.5.30: Distribution of $HC_5N(J = 32 - 31)$ in L1527

WCCC 天体近傍での炭素鎖分子の分布

上述のように、WCCC 天体と hot corino 天体の違いはコア収縮のタイムスケールにより生じると考えられる。もしそうであれば、原始星の近傍にはまだ炭素鎖分子が取り残されており、化学的に若いコアが存在してもよい。実際、WCCC 天体 L1527 の近くには若い星なしコア TMC-1 がある。同じように もう一つの WCCC 天体 IRAS15398-3359 の近くにも同様な星なしコアが存在するかどうかを調べるために、国立天文台 45 m 電波望遠鏡を用いて、IRAS15398-3359 の周囲を CCS や C_4H、HC_3N でマッピングした。

その結果、原始星から約 2′ 程度西側に離れた位置に炭素鎖分子が豊富に存在する星なしコアを発見した。HN_2^+ で見ると、原始星周囲では 8 K もの強度があるのに対して、星なしコアでは 2 K 程度であり、化学進化があまり進んでいないことがわかる。一方、C_4H、HC_3N、HC_5N などの炭素鎖分子は原始星周囲でも星なしコアでも同程度の強度を示す。これは原始星周辺で炭素鎖分子の再生成、つまり WCCC に起因すると考えられる。

CCH 分子の統計平衡励起計算

CCH は最も基本的な炭素鎖分子で、多くの天体で観測される。この分子は不対電子を持っているため、スペクトル線は超微細構造分裂を示す。CCH のスペクトル線は光学的に厚い場合が多く、フォトントラッピングの影響で LTE 近似が成り立たない可能性がある。そこで、超微細構造準位を考慮した統計平衡励起計算を行った。CCH の衝突レートは報告されてないので、近い大きさの分子である HCN の衝突レートを適用した。超微細構造準位間の衝突レートについては、IOS 近似で計算した。回転準位としては、$N = 10$ まで考慮した。

計算結果を、我々が国立天文台 45 m 電波望遠鏡などで観測した結果と比較したところ、これまで LTE 近似では説明できなかった超微細構造のスペクトル強度パターンを説明できた。また、光学的厚みにより励起温度が大きく変わることが確認された。これは、例えば、^{13}CCH、C^{13}CH の励起温度と CCH の励起温度が同じであると単純に仮定できないことを意味する。CCH 分子の存在量を求める上で、統計平衡計算が不可欠であることがわかった。[18]

NGC2264MMS3 の高分解能ミリ波観測

NGC2264 は太陽系近傍の星形成領域であり、その中に、強いミリ波源 MMS3 がある。MMS3 は非常に若い大質量原始星と考えられており、ホットコアを特徴づける分子 $HCOOCH_3$ も検出されている。この領域では、CS 輝線の観測で双極分子流が報告されているが、空間分解能が悪いため駆動源を特定するに至っていなかった。そこで、ハワイ・マウナケアにある SMA（サブミリ波干渉計）を用いて、MMS3 領域の双極分子流の高分解能観測を行った。

CO(J=2-1; 231 GHz) および CH_3OH(J_k=5$_k$-4$_k$; 242 GHz) の輝線で、MMS3 を駆動源とするコンパクトな双極分子流の検出に成功した。力学的年齢は 10^2〜10^3 年程度と非常に若い。Sptizer 衛星で赤外線源が見えないことを考え併せると、MMS3 は Class 0 相当の大質量原始星という、非常に珍しい天体である可能性が高まった。さらに、CH_3OH と CO の分布の違いから、CH_3OH は CO より外側のポスト・ショック領域で多いことがわかった。一方で、$HCOOCH_3$ の分布と双極分子流の分布には直接的関係が見られず、むしろ、$HCOOCH_3$ は双極分子流と垂直な方向に存在していた。この状況は、典型的大質量星形成領域である Orion-KL の構造と類似している。[22]

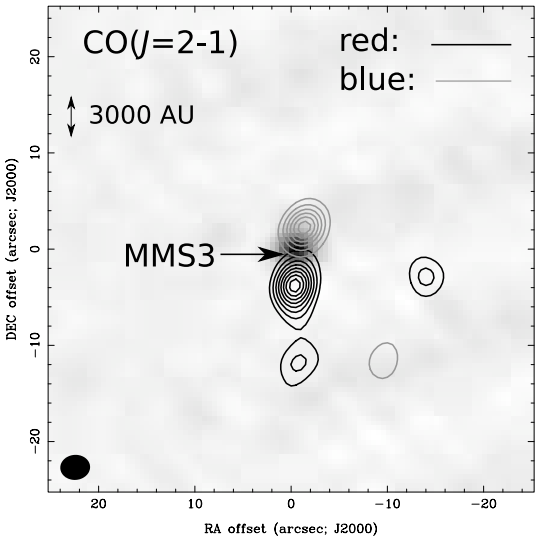

図 6.5.31: Molecular Outflow Associated with High Mass Class 0 Candidate, NGC2264MMS3

HCL2 領域における CH の分布

希薄な星間雲から星間分子雲が作られるとき、炭素の主要形態は C^+ から C、そして CO へと変化する。以前、我々は、富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いた炭素原子輝線（CI）の観測で、おうし座の Heiles Cloud 2 (HCL2) 領域でそのような系統的変化が起きていることを示した。CI は HCL2 の南側で強く (CI ピーク)、C^{18}O は北側（TMC-1 リッジ）で強い。このことは北から南に向けて分子雲形成が起きていることを意味する。このことを裏付けるために、我々は、同領域において C から CO を生成する際の反応中間体である CH 分子のスペクトル線 (3.3 GHz) をドイツ Effelsberg の 100 m 電波望遠鏡で観測した。

その結果、CH の分布は HCL2 領域の全体に広がっており、C^{18}O と CI ピークをつなぐ構造をしていることがわかった。まさに C と CO の架け橋となっており、上記の分子雲形成過程を支持する。CI ピーク周辺では CH のスペクトル線幅は 3 km/s 程度であるのに対し、TMC-1 リッジでは、その成分は弱くなり、細い (0.5 km s^{-1}) 成分が重なって現れた。細い成分は、CCS などのスペクトル線幅とほぼ同じである。一方、星がすでに形成されている北側の領域では、細い成分のみが検出された。即ち、星間分子雲の中でのコア形成に伴って、線幅の広い成分がなくなり、細い成分が卓越してくる。これは、コア形成に伴う星間乱流の散逸を見ているものと考えられる。

6.5.2 低質量星形成領域のラインサーベイ

一つの天体で広い周波数帯域をくまなく観測し、どのようなスペクトル線が検出されるかを先入観なく調べることをラインサーベイという。我々は、昨年度から、国立天文台 45 m 電波望遠鏡の Legacy プ

ロジェクトのひとつであるラインサーベイプロジェクト（代表：高野秀路（国立天文台））の一翼を担い、WCCC 天体である L1527、および L1157 の衝撃波領域についてサーベイを行っている。

低質量原始星 L1527

L1527 において、rms(T_{mb}) 雑音で 5 mK から 9 mK という高感度観測を行ったところ、50 mK 以下の強度で非常に多くのスペクトル線が検出された。CCS の高励起輝線、HC_3N の ^{13}C 同位体、CCCO など様々な炭素鎖分子のスペクトル線を検出した。特に CCCO はこれまで星なしコア TMC-1 でしか検出されたことがなく、非常に興味の持たれる結果である。また、HC_5N の高励起輝線が 4 本検出された。これらの強度を 1 温度の LTE モデルにあてはめたところ、最も高励起なスペクトル線 ($J = 41 - 40$, E_u=110 K) の強度が他の 3 本から予想される強度よりも有意に強いことがわかった。そこで、$J = 41 - 40$ のデータを外して温度を求めたところ、16.2 ± 0.4 K となった。一方、励起の高い順に 2 本のスペクトル線を取り出して温度を求めると、55.6^{+40}_{-16} K と非常に高い値となる。このことは、HC_5N が L1527 原始星のエンベロープからディスク部分へと連続して分布していることを示している。

L1157 衝撃波領域

L1157 の衝撃波領域は、Class 0 原始星 IRAS 20386 +6751 からの双極分子流が周囲の分子雲と衝突して形成されたものである。そこでは、CH_3OH 輝線が強く検出されており、衝撃波による温度上昇で星間塵マントルの蒸発が起こっていると考えられる。

観測した周波数帯域はわずか 3.6 GHz であるが、長時間積分の結果 3 mK 程度 (T_A^*) の rms 雑音を達成した。CH_3CHO、$HCOOCH_3$、HCOOH のような有機分子が検出され、衝撃波領域においても有機分子が豊富に存在することがわかった。衝撃波領域の年齢を考えると、それらは気相で生成したものではなく、星間塵マントル中にすでに生成していたものと考えられる。また、重水素化メタノール CH_2DOH も検出された。これらの分子と CH_3OH の存在比は、低質量星形成領域における値とは大きく異なり、むしろ大質量星形成領域の値に近い。このことから、大質量星形成領域において衝撃波がより強く化学組成に影響を与えている可能性が示唆される。[8][19]

6.5.3 テラヘルツ帯観測技術の開拓

テラヘルツ帯における観測を行うためには、テラヘルツ帯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 (Superconductor Insulator Superconductor) 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 以下では量子雑音限界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）ミクサ素子に注目している。HEB ミクサ素子は電磁波の吸収による超伝導状態の破壊を利用し、受信信号と局部発振信号の「うなり」〈中間周波信号〉に伴う電力変化をバイアス電流の変化として鋭敏に検知するものである。そのためには、超伝導体をサブミクロンサイズの大きさにすること、そして、素子内に生じた熱電子を「うなり」の周期よりも早く冷却し、超伝導状態を回復させる必要がある。この冷却メカニズムには、(1) 熱電子の拡散によって電極に逃がす方法（拡散冷却）と、(2) フォノンとの相互作用を介して基板に逃がす方法（格子冷却）の 2 つがある。我々は、Nb を用いた拡散冷却型 HEB ミクサ素子と、NbTiN 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。[9][20][24]

NbTiN を用いた HEB ミクサ素子の開発

本研究室では、研究室内のクリーンブースに HEB ミクサ素子製作に必要な装置群を導入し、独自の技術で HEB ミクサの製作方法の確立を目指してきた。昨年度までに、NbTiN HEB ミクサで 800 GHz における雑音温度として 500 K という性能を達成した。これは導波管型としては世界水準の雑音性能である。

本年度は、その成果を踏まえ、目標としている 1.5 THz 帯の NbTiN HEB ミクサの開発を行った。導波管とのマッチングを調べるために、国立天文台の松尾宏氏の協力を得て、フーリエ変換分光器を用いて HEB ミクサの高周波応答を調べた。応答のピークは設計した最適周波数（1.5 THz）よりも 0.2 THz ほど低周波数にずれていたが、1.5 THz 帯においてもある程度応答が見られた。そこで、1.5 THz 帯において受信機雑音温度を測定したところ、1700 K が得られた。これは導波管型としては世界の他の研究グループと並ぶ結果である。これにより、テラヘルツ帯観測の実現に一歩踏み出すことができた。

上記の実験で用いた HEB ミクサ素子は、いずれも 12 nm の膜厚の NbTiN 薄膜を使っている。これは格子冷却を考えると最適値よりもかなり厚い。それにもかかわらず上記の性能が達成されたことは、格子冷却とともに拡散冷却が協奏的に働いていることを示唆する。我々の素子製作プロセスでは、超伝導薄膜 (NbTiN) と電極 (Au/Ti) を同時製膜している。そのため、両者の間に酸化膜が生じにくく、効率よい拡散冷却を実現できている可能性がある。格子冷却と拡散冷却をともに用いる複合冷却は、HEB ミクサの可能性をさらに高める方法として注目されており、本研究の結果はその意味でも重要な成果と言える。[2][5][13]

AlN 緩衝層による NbTiN, NbN 薄膜の改善

HEB ミクサの心臓部は超伝導薄膜のマイクロブリッジである。先に述べたように本研究室では超伝導物質に Nb, NbTiN を用いたミクサの開発を行っている。バルクの NbTiN は 16 K の転移温度をもつが、スパッタ法によって成膜した薄膜の場合、この値より大幅に低い値を示す。今回我々は、NbTiN の膜質を改善する目的で、基板と NbTiN 薄膜の間に緩衝層として AlN を用いる実験を行った。

AlN は窒素ガス中で Al をスパッタして成膜する。スパッタ時のパラメータを変化させて様々な条件で AlN を成膜し、その結晶性を X 線で調べた結果、ある条件下では 002 面に配向して成膜されていることがわかった。この AlN を緩衝層にして NbTiN を成膜し、常温抵抗率、転移温度を調べた。すると、8 nm 厚の NbTiN で 8.4 K から 11.0 K へ転移温度が上昇した。また、抵抗率も約 20 %程度低下した。同様の改善が NbN でもみられるかどうか調べた。すると 10 nm 厚で転移温度が 6.9 K から 11.4 K へ、6 nm 厚では 6.1 K から 9.8 K へ大幅に上昇することがわかった（図 4）。また抵抗率も共に約 20 %低下した。NbN は石英基板上に成膜した場合、超伝導特性が非常に悪いことが知られている。しかし、AlN 緩衝層を導入することで HEB ミクサとして十分な超伝導特性を示すことがわかった。[25]

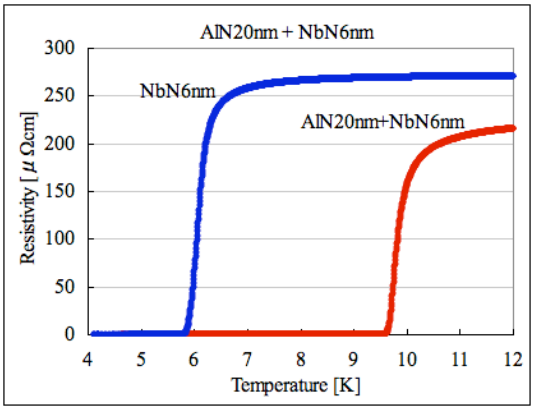

図 6.5.32: R-T Curve for Ultrathin NbN Films with and without AlN Buffer Layer

NbTiN を用いた準光学 HEB ミクサの開発

導波管を用いたミクサではビームパターンを正確に決めることができるという利点があるが、周波数が高くなるにつれ導波管の微細な加工技術が必要となる。また、それにともないミクサ素子の大きさも小さくなり、薄く研磨する必要も出てくる。そのような困難を回避するため、準光学型のミクサ素子の開発を進めている。我々の準光学型 HEB ミクサはツインスロットアンテナを搭載しており、その設計値により感度を持つ周波数帯を変えることができる。そこで、フーリエ変換型分光器（FTS）を用いてツインスロットアンテナの設計値の違いによる HEB ミクサの周波数感度特性を調べた。これにより、目的とする周波数帯に感度を持つ HEB ミクサの製作が可能となった。[21]

HEB ミクサ性能の動作温度依存性

機械式冷凍機では比較的容易に動作温度を変化させられることを活かして、温度変化に対する性能の振る舞いを評価している。昨年度、NbTiN を用いた格子冷却型 HEB ミクサ素子で、800 GHz 帯での測定を行い、動作温度に対する受信機雑音温度の変化は、概ね古典的な HEB ミクサの理論で説明できることを示した。 異なる超伝導物質での性能の振る舞いは、動作メカニズムの違いを反映することが期待されるので、NbTiN と比較するために、本年度は、拡散冷却型とされる Nb を用いた HEB 素子でも同様の実験を行った。Nb では受信機雑音温度が 3000 K 程度と性能が悪いこと、出力が不安定で性能評価が困難となる動作点の範囲が広いため、十分なデータが得られなかった。

そこで、800 GHz 帯の局部発振器 2 つを用いて差周波の強度を測定する実験を行った。この方法では、中間周波数に大きな出力が得られるため、不安定な動作点でも測定が可能となる。雑音温度の絶対値を評価することは難しいが、相対的な性能変化を追うことができた。Nb の場合、動作温度の上昇に伴う出力の変化が単調ではなく、2 つの成分が現れている可能性があることがわかった。[6][12][17]

量子カスケードレーザーの開発

1.5 THz よりも高い周波数では、局部発振器 (LO) も課題となってくる。将来、受信機の高周波化を行うための足がかりとして、テラヘルツ帯での局部発振器として有望視されている量子カスケードレーザー (QCL) の開発研究に本年度から着手した。この研究は、情報通信研究機構の入交芳久氏、関根徳彦氏、寶迫巌氏との共同研究である。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Sakai, T., Sakai, N., Kamegai, K., Hirota, T., Yamaguchi, N., Shiba, S., and Yamamoto, S., “A Molecular Line Observation Toward Massive Clumps Associated with Infrared Dark Clouds”, ApJ, 678, 1049-1069 (2008).

[2] Jiang, L., Shiba, S., Shimbo, K., Sakai, N., Yamakura, T., Sugimura, M., Ananthasubramanian, P.G., Maezawa, H., Irimajiri, Y., and Yamamoto, S.,“ Development of THz Waveguide NbTiN HEB Mixers ”, IEEE Trans. Appl. Supercond. in press.

[3] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T. Burton, M. & Yamamoto, S. “Discovery of the Second Warm-Carbon-Chain-Chemistry Source, IRAS15398-3359 in Lupus”, ApJ, in press (2009)

[4] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., & Yamamoto, S. “Deuterated Molecules in Warm Carbon Chain Chemistry: The L1527 Case”, submitted to ApJ (2009)

(会議抄録)

[5] Jiang, L., Shiba, S., Shimbo, K., Sugimura, M., Ananthasubramanian, P.G., Maezawa, H., Irimajiri, Y., Shi, S.C., and Yamamoto, S., “Development of 0.8 THz and 1.5 THz Waveguide HEB Mixers”, Proc. 19th International Symposium on Space Terahertz Technology, 409 (2008).

[6] Shiba, S., Shimbo, K., Jiang, L., Sakai, N., Sugimura, M., Maezawa, H., and Yamamoto, S. ”Temperature Dependence of HEB Mixer Performance”, Proc. 19th International Symposium on Space Terahertz Technology, 59 (2008).

(学位論文)

[7] 坂井南美、”Discovery of Warm Carbon Chain Chemistry in Low-Mass Star Forming Region and Its Astrophysical Implication” 博士論文, 2008 年 9 月

[8] 杉村美佳、「低質量原始星 L1157 の衝撃波領域におけるスペクトル線サーベイ」、修士論文、2009 年 3 月

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[9] Yamamoto, S., “Developmental Study of Superdonducting Hot-Electron Bolometer Mixers for Terahertz Astronomy”, International Symposium on Terahertz between Japan and Swaden, Tokyo, May 28-29, 2008.

一般講演

[10] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S. “Warm Carbon-Chain Chemistry Discovered in L1527”, Molecular Universe, Arcachon, France, May 5-8, 2008

[11] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S. “Deuterated Molecules in Warm Carbon-Chain Chemistry: The L1527 Case”, Chemical Diagnostics in Star-Forming Region, Tokyo, March 5-6, 2009

[12] Shiba, S., Shimbo, K., Jiang, L., Sakai, N., Sugimura, M., Maezawa, H., and Yamamoto, S. ”Temperature Dependence of HEB Mixer Performance”, 19th Internarional Symposium on Space Terahertz Technology, Groningen, The Netherlands, April 18-30, 2008

[13] Jiang, L., Shiba, S., Shimbo, K., Sugimura, M., Ananthasubramanian, P.G., Maezawa, H., Irimajiri, Y., Shi, S.C., and Yamamoto, S., “Development of 0.8 THz and 1.5 THz Waveguide HEB Mixers”, Proc. 19th International Symposium on Space Terahertz Technology, Groningen, The Netherlands, April 18-30, 2008

(セミナー)

[14] Sakai, N. “Warm Carbon-Chain Chemistry Discovered in L1527” (Sep. 16, 2008, Bonn Univ., Germany)

[15] Yamamoto, S. “Carbon Chains in Molecular Clouds” (Sep, 26, 2008, MPI, Heidelberg, Germany)

[16] 坂井 南美: 「低質量星形成領域における「暖かい炭素鎖化学」の発見とその宇宙物理学的意義」、天文学教室談話会、東京大学、2008 年 11 月 18 日）

(国内会議)

一般講演

[17] 芝 祥一、新保 謙、蒋 玲、前澤 裕之、山本 智、「Nb HEB ミクサ性能の動作温度依存性」、第 69 回応用物理学会 3a-ZM-11、中部大、2008 年 9 月 2-5 日

[18] 猿渡修、坂井南美、山本智、廣田朋也、「超微細構造を考慮した CCH 分子の統計平衡励起計算」、日本天文学会秋季年会 Q29a、岡山理科大、2008 年 9 月 11 日

[19] 杉村美佳、酒井剛、梅本智文、高野秀路、坂井南美、山本智、他 NRO ラインサーベイプロジェクトメンバー、「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 Q30a、（同上）

[20] 山本智、新保謙、芝祥一、L. Jiang、坂井南美、杉村美佳、森田将、椎野竜哉、山倉鉄矢、前澤裕之、入交芳久、P. Ananthasubramainan、「テラヘルツ帯超伝導ホットエレクトロン・ボロメータミクサ受信機の開発」、日本天文学会秋季年会 V63a、（同上）

[21] 山倉鉄矢、中井直正、瀬田益道、前澤裕之、水野亮、長濱智生、芝祥一、新保謙、山本智、「準光学型ホットエレクトロンボロメータミクサの開発」、日本天文学会秋季年会 V64a、（同上）

[22] 猿渡修、坂井南美、酒井剛、S.-Y. Liu、Y.-N. Su、山本智、「大質量「class 0」候補天体 NGC2264MMS3 の高分解能ミリ波観測」、日本天文学会春季年会 P31a、大阪府立大、2009 年 3 月 26 日

[23] 坂井南美、酒井 剛、廣田朋也、Michael Burton、山本 智: 「Discovery of the Second Warm-Carbon-Chain-Chemistry Source, IRAS15398-3359 in Lupus」、日本天文学会春季年会 P32a、（同上）

[24] 山本智、L. Jiang、椎野竜哉、芝祥一、新保謙、杉村美佳、坂井南美、山倉鉄矢、前澤裕之、入交芳久、P. Ananthasubramainan、「テラヘルツ帯超伝導ホットエレクトロン・ボロメータミクサ受信機の開発（2)」、日本天文学会春季年会、（同上）

[25] 椎野竜哉、轟孔一、N.D. Minh、J. Ling、芝祥一、鵜澤佳徳、前澤裕之、坂井南美、山本智：「AlN 緩衝層を用いた NbN, NbTiN 薄膜の超伝導転移温度の改善」、2009 年春期応用物理関係者連合講演会、筑波大、2009 年 3 月 30 日-4 月 2 日、30aP19-10

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) 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、(3) 高次の非線形過程 (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、(4) アト秒領域の現象の観測とその解明を中心に活発な研究活動を展開している。

始めに、分子の配列と配向の意味を定義する。分子の頭と尻尾を区別せずに分子軸や分子面を揃えることを配列 (alignment) と呼び、頭と尻尾を区別して揃えることを配向 (orientation) と呼ぶ。英語では混乱はないが、日本語では歴史的経緯からしばしば逆の訳語が使用されて来たので注意する必要がある。また、実験室座標系で分子の向きを規定する三つのオイラー角のうち、一つを制御することを 1 次元的制御と呼び、三つとも制御することを 3 次元的制御と呼ぶ。以下に、研究内容の経緯とともに、本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新展開

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った多くの実験を格段に明瞭な形で行うことが出来る。そればかりでなく、化学反応における配置効果を直接的に調べることができるのを始めとし、物理現象における分子軸や分子面とレーザー光の偏光方向との相関や分子軌道の対称性や非対称性の効果を直接調べることができるなど、全く新しい実験手法を提供できる。実際、配列した分子試料の有効性は、I_2 分子中の多光子イオン化過程を、時間依存偏光パルスを用いて最適制御することに成功したり [T. Suzuki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 133005 (2004)]、配列した分子中からの高次高調波発生実験において、電子のド・ブロイ波の打ち消しあいの干渉効果を観測することに成功したり [T. Kanai *et al.*, Nature (London) **435**, 470 (2005)] するなどの、本研究室の最近の成果でも実証されている。

分子の配向制御については、静電場とレーザー電場の併用により、既に 1 次元的および 3 次元的な分子の配向が可能であることの原理実証実験に成功した。これらの実験は、分子の回転周期に比べてレーザー光のパルス幅が十分長い、いわゆる断熱領域で行われたものである。この場合、分子の配向度は、レーザー強度に追随して高くなり、レーザー強度が最大のときに配向度も最大となる。一方、光電子の観測や高精度の分光実験では、高強度レーザー電場が存在しない状況で試料分子の配向を実現することが望まれる。本研究室では、静電場とレーザー電場の併用による手法が断熱領域で有効なことに着目し、分子の回転周期 $T_{\rm rot}$ に比べて立ち上がりのゆっくりしたパルスをピーク強度付近で急峻に遮断することにより、断熱領域での配向度と同等の配向度を高強度レーザー電場が存在しない状況下で実現する全く新しい手法を提案した [Y. Sugawara *et al.*, Phys. Rev. A **77**, 031403(R) (2008)]。昨年度、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。

今年度は、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初めて成功した。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、真空チェンバーの相互作用領域に導いた。典型的なピーク強度は各波長について、1×10^{12} W/cm^2 である。分子試料には He で 5%希釈された OCS 分子を用い、パルスバルブを用い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 $\sim 7\times10^{14}$ W/cm^2) を集光照射することにより、OCS 分子を多価イオン化し、クーロン爆裂で生成されるフラグメントイオンの角度分布を観測した。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 $\phi = 0$ とするとき、CO^+ フラグメントのイオン画像は、上側の強度が高くなっているのに対し、S^+ フラグメントのイオン画像は、下側の強度が高くなっていることが確認できた。また、$\phi = \pi$ のときは、$\phi = 0$ のときと逆に、CO^+ フラグメントのイオン画像は、下側の強度が高くなっているのに

対し、S^+ フラグメントのイオン画像は、上側の強度が高くなっていることが確認できた。さらに、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、CO^+ フラグメントと S^+ フラグメントの $\langle\cos\theta\rangle$ が、2π を周期として互いに逆位相で変化している様子が確認できた。これらの観測結果は、高強度非共鳴 2 波長レーザー電場を用いて、OCS 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。現在、試料分子の初期回転温度を下げたり、2 波長レーザー光の強度を上げて配向度の増大を図るとともに、OCS 以外の分子を試料とし、非共鳴過程を利用していることによる汎用性の実証を進めている。本成果は分子の配向制御の手法として、静電場を使用しない初めての手法が開発されたことを意味し、その意義は、極めて大きい。化学反応における立体ダイナミクス、分子内電子の立体ダイナミクス、アト秒科学、表面科学、分子スイッチなどへの応用が期待される。さらに、本手法で達成された配向度を数値シミュレーションの結果と比較することにより、これまで理論化学計算でしか評価することができなかった分子の超分極率を初めて実験的に評価できる手法として利用できる可能性があり、理論化学計算で得られた結果の妥当性の評価にも役立つと期待される。

上記の 2 波長レーザー電場を用いた分子配向制御の実験は、ナノ秒レーザーパルスを用いて、いわゆる断熱領域で行われたものであり、分子配向はナノ秒レーザー電場中で実現する。次なる課題はレーザー電場だけでなく静電場も存在しない完全にフィールドフリーな条件下で分子配向を実現することである。この目的を実現するために、本研究室では先に、ピーク強度付近で急峻に遮断される高強度非共鳴 2 波長レーザー電場を用いる手法を新たに提案し、数値計算により、この手法の有効性を明らかにするとともにその背景となる物理について考察した [M. Muramatsu *et al.*, Phys. Rev. A **79**, 011403(R) (2009)]。今後、2 波長レーザー光に対するプラズマシャッター技術を開発し、完全にフィールドフリーな条件下での分子配向制御の実現を目指す。

6.6.2 長波長レーザー電場の併用による高次の和・差周波発生

本研究室では先に、高次高調波発生の基本波として用いるフェムト秒 Ti:sapphire レーザー光 (波長 $\lambda \sim 800$ nm) よりも波長が長く、強度が 2 桁以上低く、それ自身の高調波は発生しないナノ秒 Nd:YAG レーザー光 ($\lambda = 1064$ nm) を併用すると、YAG レーザー光の光子が 1 つあるいは 2 つ関与した和周波や差周波が高効率で発生することを見出した [Y. Nomura *et al.*, Phys. Rev. A **75**, 041801(R) (2007)]。併せて行った理論計算に基づいて、高調波発生のための基本波よりも長波長側に高次の和周波や差周波の発生効率を著しく高める波長領域があることも指摘した。

昨年度は、パルス幅 60 fs 程度の光パラメトリック増幅器 (OPA) からの出力である波長 1300 nm の光を併用し、高次の和周波と差周波の発生について実験的および理論的研究を行った。60 fs 程度のパルス幅の利用により、ナノ秒 YAG レーザー光のときと比べ、媒質が絶縁破壊を起こす強度を大きく高めることができ、高調波発生用の Ti:sapphire レーザー光の強度と同程度の強度を利用することができるようになった。実際、800 nm 光と 1300 nm 光の強度がともに 1.0×10^{14} W/cm^2 で両者の偏光が平行のとき、最大 8 光子の 1300 nm 光が関与する高次の和周波や差周波を観測できた。2 波長 Lewenstein モデルに基づいて、任意の偏光の組み合わせや非摂動的な強度の光を併用する場合にも適用できるなどの改良を加えたモデルを構築し、実験結果の特徴を説明することができた。また、800 nm 光と 1300 nm 光の偏光が直交しているときに、1300 nm の光子が奇数個関与する和周波よりも偶数個関与する和周波の方が高効率に発生することを実験で初めて検証した。これは、パリティー保存の性質から発生する和周波の偏光が決まることを反映した結果であり、非摂動論的領域における高次の非線形光学効果における極めて重要な結果である。

本年度は、光パラメトリック増幅器の出力が波長可変であることを生かして、高次の和周波や差周波出力に対する併用する長波長パルスの波長依存性を調べた。本研究では、Ti:sapphire レーザーパルスと OPA パルスの偏光方向を平行にして実験を行った。実験では、OPA の波長 λ_2 が 600 nm – 1500 nm の範囲の六つの波長を用い、和・差周波スペクトルを観測した。OPA の強度はほぼ一定になるように努めたが、完全に一致させることは困難であった。この OPA 強度の違いを規格化して和・差周波発生の効率の波長依存性の情報を抽出する為に、以下のような独自の解析手法を導入した。まず、波長 $\lambda_2 \sim 1300$ nm の OPA パルスを用い、Ti:sapphire パルスの強度 $I_1 \sim 1\times10^{14}$ W/cm^2 に対して摂動的な強度 ($I_2 \leq 2\times10^{12}$ W/cm^2) の関数として和・差周波強度を観測したところ、I_2 の増大とともに、OPA 光子をより多く含む和周波や差周波が順に増大する様子が観測された。この結果をレート方程式に基づくモデルで解析したところ、実験結果をよく再現し、その妥当性が確認できた。レート方程式を解くと、関与する OPA 光子数の隣合う和周波の強度比が、$I_{2\mathrm{SF}}/I_{1\mathrm{SF}} = kF/2$ (ここで、$I_{2\mathrm{SF}}$ および $I_{1\mathrm{SF}}$ は、それぞれ OPA 光子を 2 つおよび 1 つ含む和周波強度、k は効率に相当する係数、F は OPA の強度に比例する光子数密度である) のように表すことができる。このため、OPA 強度に比例する光子数密度で和周波の強度比を規格化すれば効率に相当する係数 k の比較が可能になる。

こうして、各 OPA 波長について関与する OPA 光子数の隣合う和周波の規格化された強度比 $I_{2\mathrm{SF}}/I_{1\mathrm{SF}}$ を直近の Ti:sapphire パルスの高調波次数の関数としてプロットすると、Ti:sapphire パルスの波長 $\lambda_1 \sim 800$ nm よりも長い (短い) OPA 波長の場合には高調波次数の増大とともに、ほぼ指数関数的に増大 (減少) することが明らかになった。そこで、さらにその傾きを OPA パルスの波長 λ_2 の関数としてプロットすると、λ_2 の増大とともに、単調増加することが確認でき、λ_2 の増大とともに、より高次の高調波領域に向かって和周波の発生効率が増大することが確認

できた。これらの一連の観測および解析結果は定性的に以下のように理解することができる。実験では主としていわゆる short trajectory を選択する位相整合条件を採用したが、この場合、高調波次数が高いほどトンネルイオン化した電子波束の飛行時間は単調に増大する。したがって、Ti:sapphire パルスの波長 $\lambda_1 \sim 800$ nm よりも長波長の OPA パルスが存在すると電子波束が同一方向に加速される時間が長くなり、和周波や差周波の効率的な発生に寄与すると考えることができる。実験では、二つの波長は整数比でなく、また相対位相もロックされていないので、相対位相については平均されたものを観測していることになるが、長波長の OPA パルスが存在すると電子波束が同一方向に加速される時間が長くなる機会が確率的に増大するはずであり、上記の説明は定性的には妥当であると考えられる。本研究で得られた知見は、高次高調波や高次の和・差周波発生のより深い理解に資するのみならず、2 波長レーザーパルスを用いたカットオフ近傍の極端紫外〜軟X線パルスの高出力化の観点からも重要である。

6.6.3 高次高調波スペクトルを用いた希ガス原子イオンの再結合断面積の評価

近年、配列した分子中からの高次高調波スペクトルを用いた分子軌道のイメージングに関する研究が大変注目を集めている。多くの場合、イメージングの為の解析に際し、再衝突電子波束として平面波が用いられているが、1 keV 程度以下の高調波の光子エネルギーに対しては、平面波近似の妥当性が問題視されることが多い。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。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。

本研究では、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)]。高調波スペクトルの観測においては、位相整合条件や再吸収の影響が極力低減された単一原子応答を反映した高調波スペクトルを観測することが本質的に重要であり、できるだけ希薄な希ガス媒質を用いるとともに、位相整合条件の設定に注意を払った。まず、フェムト秒 Ti:sapphire レーザー増幅システムからの出力 (波長 $\lambda \sim 800$ nm) を用いて実験を行ったところ、上記の手続きで評価した再結合断面積が理論計算から求められたものとよく一致することが確認できた。特に、Ar を媒質とした場合、光子エネルギー ~ 50 eV 近傍に、Ar 原子の構造に由来する Cooper minimum に対応する極小値が確認できた。Kr や Xe にも Cooper minimum に対応する極小値の存在が知られているが、今回の実験で観測された高調波スペクトルはそれらのエネルギー領域には達しておらず、直接確認することはできなかった。

再結合断面積の評価に上記の手続きを適用する場合、高調波発生用の基本波として特定の波長を使用する必要はないはずである。そこで、光パラメトリック増幅器からの出力 ($\lambda \sim 1300$ nm) を用いた高調波スペクトルの観測も行った。長波長の基本波を用いた場合、高調波発生のスケーリング則から高調波信号は一般に微弱になる。このため、800 nm の基本波を用いた場合よりも高い媒質密度を用いる必要があった。その結果、Ar や Kr を用いた場合には、光子エネルギー ~ 35 eV 程度までの低エネルギー領域では媒質による再吸収の効果が見られたものの、Ar における Cooper minimum の存在も含め、800 nm の基本波を用いた場合と両立し、理論計算の結果ともよく一致する結果が得られることが確認できた。今後、この手法を分子にも適用できるように理論計算の進展が期待される。

本研究は、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 博士との共同研究である。

6.6.4 その他

本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。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神谷隆之君、鈴木美大君 (以上夏学期)、グウェンタンフク君、若月琢馬君 (以上冬学期) の活躍によるものである。グウェンタンフク君は、平成 20 年度理学部学修奨励賞を受賞した。

なお、本年度の研究活動は、科学研究費補助金、基盤研究 (A)、「配列または配向した分子中からの高次高調波発生とその物理」(課題番号 19204041、研究代表者：酒井広文) によって行われた。また、年度の後半には、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」からも支援を受けた。ここに記して謝意を表する。

＜受賞＞

[1] 碁盤晃久、理学系研究科研究奨励賞（修士）、2009 年 3 月.

[2] 加藤康作、理学部学修奨励賞、2009 年 3 月.

[3] 大口雄一郎、「2 波長を用いた高次和・差周波発生とその偏光依存性」(共同研究者: 峰本紳一郎、酒井広

文)、第 24 回 (2008 年春季) 応用物理学会講演奨励賞、2008 年 9 月.

[4] 碁盤晃久、「レーザー電場のない状況下での分子配向」(共同研究者: 峰本紳一郎、酒井広文)、第 13 回レーザー学会優秀論文発表賞、2008 年 5 月.

＜報文＞

(原著論文)

[5] Akihisa Goban, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Laser-Field-Free Molecular Orientation," Phys. Rev. Lett. **101**, 013001 (4 pages) (2008).

[6] Masahiro Muramatsu, Masafumi Hita, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Field-free molecular orientation by an intense nonresonant two-color laser field with a slow turn on and rapid turn off," Phys. Rev. A **79**, 011403(R) (4 pages) (2009). Selected for Virtual Journal of Ultrafast Science, Vol. 8, No. 2 (2009).

[7] Shinichirou Minemoto, Toshihito Umegaki, Yuichiro Oguchi, Toru Morishita, Anh-Thu Le, Shinichi Watanabe, and Hirofumi Sakai, "Retrieving photorecombination cross sections of atoms from high-order harmonic spectra," Phys. Rev. A **78**, 061402(R) (4 pages) (2008). Selected for Virtual Journal of Ultrafast Science, Vol. 8, No. 1 (2009).

[8] Shinichirou Minemoto, Tsuneto Kanai, and Hirofumi Sakai, "Alignment dependence of the structural deformation of CO_2 molecules in an intense femtosecond laser field," Phys. Rev. A **77**, 041401(R) (4 pages) (2008). Selected for Virtual Journal of Ultrafast Science, Vol. 7, No. 5 (2008).

[9] Yu Sugawara, Akihisa Goban, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Laser-field-free molecular orientation with combined electrostatic and rapidly-turned-off laser fields," Phys. Rev. A **77**, 031403(R) (4 pages) (2008). Selected for Virtual Journal of Ultrafast Science, Vol. 7, No. 4 (2008).

(著書)

[10] Hirofumi Sakai, "Molecular manipulation techniques and their applications," Advances in Multi-Photon Processes and Spectroscopy, Vol. 18, Edited by S. H. Lin, A. A. Villaeys, and Y. Fujimura, pp. 107-131, World Scientific (2008).

(国内雑誌)

[11] 酒井広文、レーザ電場のない条件下での気体分子の配向制御、レーザ加工学会誌、**16**, No. 1 (3 ページ) (2009).

(学位論文)

[12] 大口雄一郎、「2 波長レーザー光を用いた高次和・差周波発生」、修士論文、2009 年 3 月.

[13] 小田啓太、「2 波長レーザー電場を用いた気体分子の配向制御」、修士論文、2009 年 3 月.

[14] Akihisa Goban, "Laser-Field-Free Molecular Orientation," Master's thesis, March 2009.

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[15] Hirofumi Sakai, "Laser-Field-Free Molecular Orientation," XXVI International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC 2009), Michigan, U.S.A., July 22-28, 2009.

[16] Hirofumi Sakai, "Controlling the molecular orientation in the laser-field-free condition," The Second Conference on Ultra-Fast Dynamic Imaging of Matter, Ischia, Italy, April 30-May 3, 2009.

[17] Hirofumi Sakai, "Recent progress in the control of molecular orientation," RIKEN International Symposium on Attosecond Science, Wako, Japan, April 3, 2009.

[18] Hirofumi Sakai, "Recent progress in laser-induced molecular orientation," The 1st Shanghai Tokyo Advanced Research Symposium on Ultrafast Intense Laser Science, Tokyo, Japan, February 11-13, 2009.

[19] Hirofumi Sakai, "Laser-field-free molecular orientation," The International Conference on Multiphoton Processes (ICOMP) XI, Heidelberg, Germany, September 18-23, 2008.

一般講演

[20] Akihisa Goban, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Laser-field-free molecular orientation," The 2008 Multiphoton Processes Gordon Research Conference, New Hampshire, U.S.A., June 8-13, 2008.

(国内会議)

招待講演

[21] 酒井広文、「レーザー光を用いた分子配向制御の新展開」、物性研究所短期研究会、第 2 回極限コヒーレント光科学ワークショップ「極限波長領域における光科学の新展開」、柏、2009 年 3 月 2-3 日.

[22] 酒井広文、「レーザー光を用いた分子操作技術とその応用」、「原子構造体・クラスタービームテクノロジー」に関する先導的研究開発委員会第 8 回委員会、東京、2008 年 5 月 8 日.

[23] (応用物理学会講演奨励賞受賞記念講演) 大口雄一郎、峰本紳一郎、酒井広文、「2 波長を用いた高次和・差周波発生」、2008 年 (平成 20 年) 秋季第 69 回応用物理学会学術講演会、中部大学、2008 年 9 月.

一般講演

[24] 峰本紳一郎、梅垣俊仁、大口雄一郎、森下亨、Anh-Thu Le、渡辺信一、酒井広文、「高次高調波発生による希ガス原子の電子再結合断面積の評価」、2009 年 (平成 21 年) 春季第 56 回応用物理学関係連合講演会、筑波大学筑波キャンパス、2009 年 3 月.

[25] 小田啓太、峰本紳一郎、日田真史、酒井広文、「非共鳴二波長レーザー電場による分子配向制御」、2009 年 (平成 21 年) 春季第 56 回応用物理学関係連合講演会、筑波大学筑波キャンパス、2009 年 3 月.

[26] 梅垣俊仁、森下亨、峰本紳一郎、大口雄一郎、Anh-Thu Le、渡辺信一、酒井広文、「高次高調波スペクトルからの原子構造の抽出」、日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学池袋キャンパス、2009 年 3 月.

[27] 大口雄一郎、峰本紳一郎、酒井広文、「2 波長レーザー光による高次の和・差周波発生 I: 偏光依存性」、レーザー学会学術講演会第 29 回年次大会、徳島大学常三島キャンパス、2009 年 1 月.

[28] 大口雄一郎、峰本紳一郎、酒井広文、「2 波長レーザー光による高次の和・差周波発生 II: 波長依存性」、レーザー学会学術講演会第 29 回年次大会、徳島大学常三島キャンパス、2009 年 1 月.

[29] 小田啓太、峰本紳一郎、日田真史、村松雅弘、酒井広文、「完全にフィールドフリーな分子配向制御のための 2 波長プラズマシャッター技術の開発」、レーザー学会学術講演会第 29 回年次大会、徳島大学常三島キャンパス、2009 年 1 月.

[30] 梅垣俊仁、森下亨、峰本紳一郎、大口雄一郎、Anh-Thu Le、渡辺信一、酒井広文、「高次高調波スペクトルからの原子構造の抽出」、東京農工大学・電気通信大学第 5 回合同シンポジウム「ナノ未来材料とコヒーレント光科学」、電気通信大学、2008 年 12 月.

[31] 峰本紳一郎、大口雄一郎、酒井広文、「2 波長レーザー光による高次和・差周波の観測と偏光依存性」、日本物理学会 2008 年秋季大会、岩手大学上田キャンパス、2008 年 9 月.

[32] 小田啓太、峰本紳一郎、村松雅弘、酒井広文、「分子配向制御のための 2 波長レーザー光のプラズマシャッター技術の開発」、2008 年 (平成 20 年) 秋季第 69 回応用物理学会学術講演会、中部大学、2008 年 9 月.

セミナー

[33] 大口雄一郎、「2 波長を用いた高次和・差周波発生」、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所、2008 年 9 月.

[34] 村松雅弘、小田啓太、「整形された高強度非共鳴 2 波長レーザーパルスによるフィールドフリーな条件下での分子配向」、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所、2008 年 9 月.

[35] 酒井広文、「レーザー光を用いた分子操作技術とその応用 —現状と展望—」、東京大学本郷キャンパス、2008 年 8 月.

6.7 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．昨年度より，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開始した．このため，神経細胞の活動を光技術と遺伝子工学とを組み合わせた手法を用いて可視化・操作する実験を進めている。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．

6.7.1 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。特に、バイオイメージング、電気生理学等の生物物理学的諸技術を用い、機能的側面と、形態的側面の両方向からシナプス形成の分子機構を理解することを目標としている。

標的選択過程における双方向認識機構の解明（高坂洋史、能瀬聡直）

神経細胞は、多数の細胞集団の中からシナプス接続する相手の細胞（標的細胞）を見つけ出す。神経細胞と標的細胞との間の正確な接続は、標的認識分子という目印となるタンパク質の細胞特異的な発現によって実現される。神経細胞が長い軸索を伸長させて標的細胞を探索する一方、標的細胞側は神経細胞の軸索が到着するのを待っている。そのため、従来、標的選択過程は、神経細胞が主体的に行なうものだと考えられてきた。しかし、実際に生体内で進行する標的選択過程のダイナミクスは、可視化が容易ではないため、明らかになっていない。本研究では、ショウジョウバエ神経筋結合の標的選択過程をモデルとして、標的細胞の役割の解析を行なった。

生体内で進行する標的選択過程を可視化するために、異なるスペクトル特性を持つ蛍光タンパク質 YFP と CFP を用いて二色ライブイメージングを行なった。

神経細胞に YFP、標的細胞（筋肉細胞）に CFP を発現させ、ショウジョウバエ胚（卵）内部の神経系を共焦点レーザー顕微鏡を用いて経時撮影した。以前 GFP のみを用いた単色でのライブイメージングで、標的細胞が微小突起を伸縮させていることが明らかになっていたが、本研究の二色のイメージングでも同様の構造が検出された。今回は更に、神経細胞と標的細胞をそれぞれ異なる色で可視化しているため、神経細胞の成長円錐と標的細胞の微小突起とが接触した後、それぞれがどのように形態変化するのかを区別して追跡することができた。まず、標的細胞の微小突起は、神経細胞の軸索と接触すると集積することが観察された。一方、神経細胞の成長円錐は、標的細胞の突起と接触すると形態変化することが観察された。以上の観察結果は、神経細胞の成長円錐と標的細胞の微小突起は、互いに相手を認識し合って形態変化を起こしていることを示している。特に、標的細胞の微小突起との接触によって成長円錐が形態変化を起こしたことから、標的細胞の微小突起はダイナミックに伸縮して神経細胞に何らかのシグナルを提示していることが示唆される。

我々は以前、標的細胞の微小突起の先端に標的認識分子カプリシャスが集積することを見出した。上述のライブイメージングから標的細胞が成長円錐に対して何らかのシグナルを提示していることが示唆されたため、このシグナルがカプリシャスであることが予想される。そこで、カプリシャス変異体における、標的選択過程、及び引き続いて進行するシナプス形成過程を解析した。成長円錐と標的細胞の微小突起との接触を調べたところ、カプリシャス変異体で減少していることが明らかになった。また、その後に起こる成長円錐と微小突起の形態変化も、カプリシャス変異体で遅くなっていた。さらに、最終的に形成されるシナプスの大きさがカプリシャス変異体で小さくなっていた。このことは、カプリシャスを介した認識が、標的選択過程とその後のシナプス形成過程に重要であることを示唆している。特に、カプリシャスは標的細胞の微小突起に集積していることから、標的細胞がダイナミックに目印を提示して標的選択過程に関わるという機構が示唆される。従来、標的選択過程は神経細胞側によるものであると考えられてきたが、本研究は標的細胞側にもダイナミックな機構があることを明らかにした。このような神経細胞と標的細胞との間の双方的に機構が、標的選択を確実に行なうために重要であることが示唆される。

カプリシャスの欠失はシナプス形成に異常をもたらすが、その効果はそれほど大きくはない。それは、カプリシャスと同じ機能を持つ他の分子が、機能を補完しているために、カプリシャス単独の欠失では効果が表現型として現れにくいからであると考えられる。そこで、我々は、カプリシャスと類似の構造を持つ Tartan タンパク質に注目した。Tartan は、カプリシャスと同じロイシンリッチリピートファミリーに属するタンパク質で、カプリシャスとのアミノ酸配列の相同性が高い。カプリシャス遺伝子と Tartan 遺伝子の両方を欠失した二重変異体を用いて、標的選択過程を解析した。すると、成長円錐と標的細胞の微小突起の接触、形態変化、シナプスの大きさ全てにおいて、カプリシャス単独の変異体よりも大きな異常が現れた。特に、一部の試料（５１サンプル中７サンプル）では、シナプスが形成されないという異常が観察された。このことは、カプリシャスと Tartan による双方向認識機構が、標的選択過程において必須であることを示唆している。正しい神経配線は、動物にとって重要であるため、標的選択過程は、様々な機構が相補的に働いていると考えられる。本研究では、カプリシャスと Tartan による認識が、標的認識過程において主導的な役割を果たしていることを明らかにした。

シナプス形成過程において神経支配により発現制御される遺伝子の同定と機能解析（福井愛、外江岳、能瀬聡直）

シナプスの形成過程においては、神経細胞（シナプス前細胞：プレ）とその標的細胞（シナプス後細胞：ポスト）が互いに互いの分化を誘導し合うことでシナプス構造が形成されることが分かっている。中でも特に重要なプロセスであると考えられているのが、遺伝子の発現制御を介したプロセスである。その理由は、遺伝子の発現変化によってシナプス構造を長期的に安定化することが可能だからである。しかし、実際にどのような遺伝子が発現制御されているのか、さらにそれらの遺伝子がシナプス形成においてどのような役割を持っているのかは、ほとんど明らかになっていない。そこで我々は、特に、プレによってポスト内で発現レベルが制御され、シナプス形成を誘導する働きを持つ遺伝子を同定することを試みた。モデルとして用いたショウジョウバエの神経筋結合系においては、運動神経がプレにあたり、それに支配される筋肉細胞がポストにあたる。シナプス形成過程において、運動神経支配（プレ）依存的に筋肉細胞（ポスト）内で発現量が変化している遺伝子を同定するために、まず、神経の支配を受けている筋肉細胞（野生型のシナプス形成後の時期の胚の筋肉）と支配を受けていない筋肉細胞（野生型のシナプス形成前の時期の胚、及び神経支配が欠失した変異体の胚の筋肉）で、全遺伝子の発現パターンを比較した。この比較解析は、それぞれの胚からマイクロピペットで単離した筋肉細胞を用いて、DNA Microarray で筋肉細胞内での全遺伝子の発現レベルを比較することで行なった。DNA Microarray とは細胞内の全遺伝子の発現量を一度に検出できる技術である。比較解析の結果、神経支配により筋肉細胞内で発現制御される遺伝子を 82 個同定することに成功した。この中には、転写因子などの遺伝子発現に関わる分子や、細胞表面分子などの細胞間相互作用に関わる因子など、シナプス構造の形成や制御に関わると期待される遺伝子が多く含まれていた。そこで、これらの遺伝子の中でも特に重要な機能をしていることが期待される遺伝子を、遺伝子の既知の機能や蛋白質ドメインから絞り込み、シナプス形成における機能を調べるための解析を行った。このため、遺伝子の欠失や RNA 干渉法により遺伝子の機能を阻害した時、逆に GAL4-UAS システムを用いて遺

伝子を過剰発現した時に、3 齢幼虫での神経終末の形態に異常が起こるかを観察した。約 50 遺伝子を解析した結果、現在までに 4 遺伝子について、シナプス結合部のサイズに異常が生じることが定量的に示された。従って、これらの遺伝子は、シナプス形成過程でシナプスのサイズを調節する重要な役割を担っていることが示唆された。また、上記の 4 遺伝子とは異なる表現型を示す興味深い遺伝子として、転写因子 lola を同定した。RNA 干渉法を用いてよる lola の機能を筋肉において阻害した個体は、シナプス部の神経伝達物質受容体の量が減少する表現型を示した。さらにリアルタイム PCR を用いた解析によって、受容体の発現が転写レベルで減少している事が判明した。従って lola は神経伝達物質受容体の転写レベルを調節する働きを持つ事が示唆される。神経伝達物質受容体の発現量を制御することは、シナプス強度を変化させ、神経活動によって筋肉細胞に伝えられる情報量を調節することに繋がる。従って、lola がシナプスの可塑的変化（神経活動の度合いに応じてシナプス強度が変化する現象）のメカニズムに関わることが期待される。現在、神経活動が過剰になった変異体を用いて、神経活動の度合いと lola の発現や機能との関係を調べている。今後は、lola を含めてシナプス形成に機能していることが判明した遺伝子について、その上流・下流で働く分子を探索し、遺伝子発現制御によって誘導されるシナプス形成メカニズムの全体像に迫る予定である。また、神経活動と遺伝子発現との関係を調べることで、記憶や学習に関わるとされているシナプス可塑性との共通のメカニズムを探索できると考えている。本研究は本学先端科学技術研究センター、油谷浩幸教授との共同研究である。

6.7.2 シナプス特異性を決める分子の同定と機能解析

発生過程において神経細胞はいかにして、その行き先を正しく見つけだすのだろうか。われわれは、神経細胞を個々に見分けて、その配線（軸索）ができる過程を詳しく調べることができる、ショウジョウバエの神経系をモデル系として、この問題にアプローチしている。今年度は以下のような研究を行った。

Toll の機能解析：標的認識過程における抑制因子とその転写制御機構（稲木美紀子、新座（亀田）麻記子、能瀬聡直）

神経結合形成時の標的認識には、カプリシャス分子や Wnt4 分子など、いくつかの標的認識分子が働いていることを明らかにしてきた。しかしながら、特定の細胞にのみ発現し、神経投射の特異性を決める標的認識分子がいかにして発現制御されているのか、その分子機構は未だほとんど解明されていない。そこで、異なる運動神経細胞 RP5 及び RP1 によりそれぞれ支配されている 2 つの筋肉、筋肉 12 及び筋肉 13 に焦点をあて、全遺伝子を解析できる DNA マイクロアレイを用いて単一細胞レベルでの遺伝子発現を解析し、特定の細胞にのみ発現する標的認識分子とその転写を制御する分子を同定しようと試みた。

マイクロアレイ及び生体での発現解析の結果から、我々は Toll 遺伝子に着目した。Toll は、昆虫から哺乳動物まで広く保存され、生体内の様々な過程で重要な役割を果たす LRR ファミリーに属する膜タンパク質である。今回の実験により、Toll は M13 に発現しているが、M12 ではほとんど発現していないことが示された。また、観察の結果、Toll の機能欠失変異体では、筋肉 12 の神経終末が小さくなる一方、筋肉 13 では神経終末が大きくなることが明らかになった。逆に、Toll を M12 で異所的に発現すると、M12 の終末形成が阻害された。これらの結果から、Toll は筋肉 13 で発現し、筋肉 12 に投射すべき運動神経細胞に対し阻害的に働きかけることにより、それらが正しい標的細胞と結合するよう制御していることが示唆された。

この Toll 遺伝子を転写制御する分子として、Tey を新たに見出した。tey 遺伝子は筋肉 12 に特異的に発現しており、その機能欠失変異体では、Toll の異所発現で観察されたのと同様に M12 の終末形成が減弱していた。この変異体において、Toll の発現を調べたところ、本来 Toll が発現しない M12 にも Toll が発現していることが分かった。逆に、tey が本来発現していない M13 において tey を強制発現させた場合、M13 における Toll の発現が抑制され、同時に神経投射にも異常が生じることが明らかになった。ここで tey と同時に Toll も強制発現させると、神経投射異常はほとんど見られなくなった。これらのことから、Tey は M12 において Toll を抑制的に転写制御し、標的認識分子を特異的なパターンで発現させることで、神経投射の特異性を決定していることが示唆された。

6.7.3 神経回路の形成と可塑性の研究

これまでの研究により、神経回路のひとつの素子、すなわち、神経細胞と標的間の配線の形成について、その分子機構を明らかにしてきた。今後、得られた知見をもとに、素子の研究を素子が集まった回路の研究へと発展させたい。そのため、運動制御回路の形成と可塑性の解析を開始した。研究はまだ始まったばかりだが、今後、神経活動イメージングや光による神経活動操作等の新技術とショウジョウバエの発達した遺伝学とを組み合わせた研究を進めることにより、神経回路形成の原理を明らかにしたいと願っている。

ぜん動運動を制御する中枢パターン生成回路（CPG）の可塑的変化の解析（太知ゆかり、高坂洋史、能瀬聡直）

中枢パターン生成回路（CPG,central pattern generator）は、生体内に存在し、歩行や呼吸などの定型

運動を生成する神経回路である。CPG によって規定される運動パターンは、感覚入力によって時々刻々調整されることで状況にあった行動が行われると考えられる。感覚入力が、実行中の運動の調整をすることは明らかになっているが、感覚入力の経験が、長期的に CPG による運動特性に影響を与えるかどうかは明らかになっていない。そもそも、感覚入力に限らず、神経細胞の活動履歴が、運動出力にどのような影響を与えるかはほとんど不明である。そこで、我々は、CPG によって制御されるショウジョウバエのぜん動運動をモデルに、CPG の可塑性（神経活動の状況に応じて回路が調整されること）の解析を行なった。

CPG の可塑性を解析するために、運動出力パターンを決めている神経細胞の同定を試みた。このため、温度依存的に神経伝達を阻害する shibire タンパク質を用い特定の神経細胞の活動を阻害し、運動特性に変化が現れるかを観察した。、その結果、GABA 作動性神経細胞、または、感覚神経細胞の活動を阻害するとぜん動運動の特性が変化することを見出した。したがって、GABA 作動性神経細胞と感覚神経細胞が運動パターンの生成に関与していることが明らかになった。

前年度に我々は、ぜん動運動の発達過程を解析した。その結果、孵化直後にぜん動運動の速度が早くなることを明らかにした。このことは、孵化直後に神経回路の発達が進行していることを示唆する。回路の成熟が進行する発達期は、神経回路が柔軟に変化するため、可塑的変化が起こりやすいことが予想される。そこで、孵化直後に、先ほど同定した GABA 作動性神経細胞や感覚神経細胞の神経活動を一時的に阻害することによって、運動特性に長期的な変化が現れるかどうかを検討した。

孵化直後 2 時間の間、GABA 作動性神経細胞の活動を阻害した。阻害後に 2 時間回復させたのち、その幼虫のぜん動運動の速度を測定した。すると、野生型の速度にくらべて、一過的に GABA 作動性神経細胞を阻害した個体では速度が速くなった。このことは、孵化直後の活動阻害が CPG 出力に可塑的な変化を誘導したことを示唆する。次に感覚神経細胞に同様の処理を行なったところ、今度は、ぜん動運動が遅くなった。以上のことは、CPG に可塑的な変化が生じることを示している。ショウジョウバエモデル系を使って、CPG の可塑的変化を作りだすことに成功したので、今後、回路の可塑的変化に関する細胞・分子機構の解明を進めていく予定である。

ぜん動運動を制御する中枢パターン生成（CPG）回路のシナプス構造可塑性の解析（奥沢暁子、太知ゆかり、高坂洋史、能瀬聡直）

CPG（central pattern generator）回路は、中枢神経系に存在し歩行や呼吸などの定型運動を生成する局所神経回路である。CPG は単独で運動を制御しうるが、感覚入力からのフィードバック制御をうけることで、より状況に適した出力が行われる。前項で示したように、我々は、ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動を用いて、CPG 回路出力が可塑的変化をすることを明らかにした。ショウジョウバエ幼虫のぜん動運動は、孵化前後に速くなる。孵化直後の一定期に特定の感覚神経細胞の活動を人工的に阻害すると、その後数時間にわたってぜん動運動の速度の上昇が抑えられる。これらの結果は、孵化直後の感覚神経細胞の活動が、運動特性に長期的な可塑的変化を与えることを示している。そこで、本研究では、運動の可塑的変化メカニズムを回路構造レベルで明らかにするために、中枢神経系内のシナプス構造の可視化とその可塑性の解析を試みた。

運動出力変化に伴うシナプス構造の可塑的変化は、中枢神経系内のどのシナプスで起こっているかは自明ではない。そこでまず、感覚神経が中枢神経系内で形成するシナプスの解析から行なった。中枢神経系は神経筋結合系と異なり、神経細胞やシナプス構造が密集しているため、個々のシナプス構造を区別して可視化するのは容易ではない。そこで本研究では、遺伝学的手法を用いて、特定の感覚細胞だけで特異的に蛍光たんぱく質 GFP を発現させ、抗体染色法を用いて蛍光イメージングを試みた。その結果、感覚神経の中枢神経内でのシナプスを選択的に可視化することに成功した。次に、この可視化手法を用いて、孵化前後のぜん動運動速度上昇期における感覚神経のシナプスの発達を解析した。その結果、孵化前後で構造が大きく変化していた。このことは、ぜん動運動の速度変化と感覚神経シナプスの発達過程に相関があることを示唆する。

運動速度の発達に伴って、感覚神経の中枢内シナプスの構造が変化していたことから、孵化直後の神経活動制御による運動の可塑的変化も、中枢内のシナプス構造変化に由来することが予想される。現在、孵化直後に感覚神経を一時的に強制阻害した際に、感覚神経が中枢系へ情報を受け渡す場であるシナプス部の構造に変化が現れるかどうかを解析している。構造に可塑性が存在し、さらにその可塑性が運動特性の可塑性と密接に結びついていることが示されれば、CPG のフィードバック制御の形成機構の解明につながると考えられる。

シナプス接続マーカー GRASP を用いた回路内シナプス接続の可視化（奥沢暁子、高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直）

中枢神経系では、複雑に配線された神経細胞同士が、シナプス構造を介して情報を伝えることによって機能を生み出している。例えば、ショウジョウバエ幼虫の中枢神経系の腹部神経節では、数千から数万個の神経細胞がネットワークを形成している。神経回路の動作原理を明らかにするためには、個々の神経細胞がどのような神経細胞をシナプス結合しているのかを明らかにする必要があるが、中枢神経系内でのシナプス接続の様子はほとんど明らかになっていない。その理由としてまず、中枢神経系内では神経細胞やシナプスが密集していて、個々のシナプスを区別することが難しいことがあげられる。さらに、仮にシナプスが区別できてもどの神経細胞間に

形成されたものか判別することが難しい。このような困難を克服するために、我々は、配置や樹状突起の形態が明らかになっている運動神経細胞を用いて、中枢神経系内で運動神経細胞に接続する神経細胞の探索を試みた。

探索にはシナプス部を特異的に可視化するGRASPと呼ばれる技術を用いた。蛍光たんぱく質GFPを二つに分けてその各断片を別々の神経細胞に発現させる。各断片単独では、蛍光性が失われているが、各断片を発現する細胞が近接していると、細胞間で断片が結合しGFPが再構成されて蛍光性を回復する。そのため、GRASPの断片を発現した細胞間でシナプスができているかを、GFPの蛍光によって検出することができる。本実験では、シナプス後細胞としてぜん動運動に関わる運動神経細胞を用いて、GRASPの断片を発現させた。シナプス前細胞の候補であるGABA作動性神経やコリン作動性神経等の様々な神経群にもう一方のGRASP片を発現させることで、運動神経と接続している神経の同定を試みている。運動神経細胞を制御する神経細胞を同定することにより、運動制御回路を構成する神経細胞を明らかにすることができると考えている。

カルシウムイメージングを用いた神経回路の活動可視化（仁井理恵（新領域）、高坂洋史、能瀬聡直）

神経回路は神経細胞集団から構成される。個々の神経細胞の神経活動の時空間的なパターンが神経回路全体の機能を生み出していると考えられる。神経回路全体の挙動を明らかにするためには、複数の神経細胞の活動の様子を同時に測定する必要がある。神経細胞集団の活動を測定する方法としてカルシウムイメージング法がある。細胞内のカルシウム濃度は普段は低く（100nM）保たれているが、神経活動によって細胞内のカルシウム濃度は一過的に急上昇する。したがって、細胞内カルシウム濃度を蛍光プローブを用いて経時的に測定することにより、神経活動の時空間的パターンを間接的に捉えることが可能である。

本研究では、測定の対象としてショウジョウバエ幼虫腹部神経節（中枢神経系）を用い、ぜん動運動を制御する神経回路に着目した。ぜん動運動は一方向性に伝わる筋収縮の波なので、腹部神経節においても一方向性に伝搬する波が生成されることが予想される。伝搬波の生成機構を細胞レベルで明らかにすることによって、神経回路が機能を生み出すしくみが明らかになることが期待される。

まず、腹部神経節におけるカルシウムイメージング法の確立に取り組んだ。カルシウム濃度依存的に蛍光特性が変わるプローブが複数開発されている。蛍光色素のRhod2,XRhod1や、蛍光タンパク質プローブのCameleon, GCaMPなどを用いた。各々のプローブで可視化した細胞に対して、高カリウムイオン濃度溶液や、神経伝達物質投与によって神経活動を誘導し、プローブの蛍光強度の経時的測定を行なった。その結果、Rhod2とGCaMPについて、蛍光強度の経時的変化を捉えることに成功した。

Rhod 2は、細胞内においてミトコンドリアへ局在することが知られている。したがって、検出した蛍光強度変動が、ミトコンドリアの代謝に由来することが考えられた。そこで、ミトコンドリアの代謝阻害剤を用いたところ、Rhod2の蛍光変動が消失した。したがって、Rhod2の蛍光強度変動は、ミトコンドリア代謝であることが明らかになったため、神経細胞活動の検出には、他のプローブを用いることにした。

GCaMPは、カルシウム濃度依存的に蛍光強度が変化する蛍光タンパク質である。遺伝学的手法を用いて、特定の神経細胞にGCaMPを発現させたところ、神経伝達物質投与に応じて、神経回路全体で蛍光強度の時空間的変動が検出された。特に、一方向的に伝搬する一過的なカルシウム濃度上昇が検出された。さらに伝搬速度が、解剖した幼虫内で伝わる筋収縮の伝搬速度に近い値であった。以上のことは、ぜん動運動出力を生み出す際に中枢神経系内で伝搬する神経活動パターンを、カルシウムイメージング法によって検出できたことを示唆する。神経回路活動の検出法が確立できたので、今後は薬理学的手法や外科的処理法を用いて、時空間パターン生成のネットワーク機構について研究を進める予定である。

6.7.4 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。
・特定領域研究「分子脳科学」、計画研究
「特異的シナプス形成過程に関与する分子の同定と動態観察」
（研究代表者：能瀬聡直）
・基盤研究（B）
「神経活動依存的な遺伝子発現誘導とシナプス構築の分子機構」
（研究代表者：能瀬聡直）

＜報文＞

(原著論文)

[1] Kohsaka, H. and Nose, A. Target recognition at the tips of postsynaptic filopodia: accumulation and function of Capricious. Development 136, 1127-1135 (2009).

(総説)

[2] Nose, A. Synaptic Specificity. In “Encyclopedia of Neuroscience ”, Springer Berlin Heidelberg (2008).

[3] Lu,B, Wang, K.H and Nose, A. Molecular mechanisms underlying neural circuit formation. Curr. Opin. Neuro.Biol., in press.

(国内雑誌)

[4] 能瀬聡直、稲木美紀子、新座（亀田）麻記子. 神経特異結合の分子機構－負のシグナルによる標的決定 蛋白質・核酸・酵素 53, 531-536 (2008).

[5] 高坂洋史、能瀬聡直. シナプス形成過程の生体内可視化　実験医学 26, 179-186 (2008).

[6] 能瀬聡直、高坂洋史.　生体内におけるシナプス形成過程の可視化　Medical Technology 36, 1114-1115 (2008).

(学位論文)

[7] 太知ゆかり：ぜん動運動を制御する神経回路の形成と可塑性の解析（修士論文）

[8] 外江岳：シナプス形成過程において神経支配依存的に発現制御される遺伝子の機能解析（修士論文）

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[9] Kohsaka, H. and Nose, A.: Dynamisms of postsynaptic filopodia during target recognition of Drosophila Neuromuscular Junction NeuroFly2008 “12th European Drosophila neurobiology conference” 2008.9.6-10. Wurzburg, Germany

[10] Fukui, A., Tonoe, G., Inaki, M., Aburatani, H. and Nose, A.: Single-cell analysis of innervation-dependent gene expression during synaptogenesis NeuroFly2008 “12th European Drosophila neurobiology conference” 2008.9.6-10. Wurzburg, Germany

(国内会議)

一般講演

[11] Kohsaka, H. and Nose, A.: Dynamisms of postsynaptic filopodia during target recognition of Drosophila Neuromuscular Junction. 第３１回日本神経科学大会、2008.7.9-11、東京

[12] Fukui, A., Tonoe, G., Inaki, M., Aburatani, H. and Nose, A.: Single-cell analysis of innervation-dependent gene expression during synaptogenesis. 第３１回日本神経科学大会、2008.7.9-11、東京

[13] 太知ゆかり、高坂洋史、能瀬聡直: Formation and plasticity of neural circuits regulating peristaltic movements.　日本生物物理学会第４６回年会　2008.12.3-5、福岡

[14] 外江岳、福井愛、稲木美紀子、油谷浩幸、能瀬聡直: シナプス形成過程において神経支配依存的に発現制御される遺伝子の機能解析. 第31回日本分子生物学会年会・第 81 回日本生化学会大会　合同大会、 2008.12.10、神戸

[15] 福井愛、外江岳、稲木美紀子、油谷浩幸、能瀬聡直: 特異的シナプス形成過程に関与する分子の同定と動態観察. 統合脳５領域「平成 20 年度　冬の合同班会議・シンポジウム」　2008.12.14

[16] 高坂洋史、太知ゆかり、能瀬聡直: ショウジョウバエのぜん動運動の発達と可塑性. 定量生物学の会第１回年会　2009.1.10-12、東京

招待講演

[17] 高坂洋史: 生体内でシナプスができるところを見る　金沢大学革新脳科学 COE シンポジウム　Neurobiology of Drosophila 2008.8.21 Kanazawa

[18] Nose, A., Inaki, M., Shinza-Kameda, M.: Generation of synaptic specificity by repulsion 第 31 回日本分子生物学会年会・第 81 回日本生化学会大会　合同大会　シンポジウム、2008.12.10、神戸

(新聞報道)

[19] 日経産業新聞（2009 年 3 月 9 日 11 面）　神経をつなぐ仕組み　双方の細胞で認識　東大、再生医療に応用も

[20] 科学新聞（2009 年 3 月 13 日 7 面）神経回路を正しく接続　双方向探索機構　解明

[21] 日刊工業新聞 News ウェーブ 21（2009 年 3 月 24 日 31 面）神経回路形成は双方向―東大、標的細胞観察し発見

6.8 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．20 年度から数年に渡る研究テーマは，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．20 年度行った主な研究は、（１）筋収縮を行うミオシン分子の複数が発する力や弾性率を Å 精度で測定し、筋収縮機構の解明の一助とした。（２）細胞を立体的に観察するための装置を開発した。（３）細胞内タンパク質を１分子イメージングするための新しい方法として、細胞外の量子ドットを細胞内に導入する方法を確立し、細胞内分子運動を計測した。（４）マウスの脳から組織を取り出し、繊毛の運動を観察した。（５）マウスに埋め込んだがん細胞が転移する様子のイメージングに成功した。

6.8.1 複数分子の研究：骨格筋モータータンパク質の自己組織化に伴う単一分子特性の向上

筋肉では、モータータンパク質ミオシンとレールタンパク質アクチンが自己組織化により数百分子からなるフィラメント重合体を形成する．筋収縮時にはミオシン分子がアクチンと相互作用し，滑り力を

発生する。筋収縮の分子メカニズム解明と、分子から個体に至る階層における構造と機能のつながりを理解するためには、「ミオシン各１分子が収縮力発生にどのように関わっているか？」を理解することが大変重要である。この問題を解明するため、ミオシン１分子の計測がこれまでおこなわれ，ミオシンは5-15nm 動いた後に解離し、最大で 3-6pN の力を出し、エネルギー効率が 10-20%であることが判明している。しかし、これらの値は筋肉の数百 nm の運動や効率 50%を説明することができなかった。我々は，この差がフィラメント化により生じたと考え、本研究では天然に近い構造を有したフィラメント上において、ミオシン１分子の力学特性を解明した。フィラメント自己組織化の条件を検討し，機能的なミオシン分子数が 2-6 分子しかないフィラメントを作製した。このフィラメント上におけるミオシン１分子の動きと力を、レーザートラップナノメトリーにより計測した。その結果、ミオシンは１回の力発生で 5nm 動きこれを何回も繰り返し数百 nm 運動し、最大 12pN の力を発生した．このときの最大効率は 50%程度と見積もられた．運動距離や効率が筋肉で得られた値に合致したことから，筋肉内でのミオシン１分子の基本特性が 5nm 変位と 12pN の力であることが明らかとなった。したがって、ミオシン１分子の機能は、複数分子を含むフィラメント化で、向上することが示唆された。これは、力を出していない Fig １のグレー色のミオシン分子がアクチンと結合し、アクチンの解離を抑え、力を出すピンク色のミオシンが最大力を発揮出来る状態を作っているためと考えた。このモデルではグレー色ミオシンが内部抵抗となれば，力やエネルギー効率が下がるはずである．モデルを検証するために，量子ドットを用いてミオシンの極微小の伸びと抵抗の関係を測定できるように蛍光顕微鏡を改良した．その結果，量子ドットの蛍光像の位置検出精度を、0.8nm まで上げることに成功した。今後は、この装置でミオシン１分子の伸びと抵抗の関係を計測し、モデルを検証する。

6.8.2 細胞観察装置：４焦点顕微鏡開発

昨年度開発した３次元単一分子のイメージング装置（図）をさらに数倍厚い試料（細胞全体）でも観察できるように改良した．従来の，共焦点顕微鏡と対物レンズの移動を組み合わせて３次元像を得る方法の欠点は，速度が遅いことである．例えばビデオレートで１枚の共焦点像を取得して，１０枚から３次元像を得ると１立体当たり 330ms を要する．これを解決するための方法として，２焦点光学系を昨年開発した．この装置で観察できる範囲は厚さ 1-2mm 程度なので，細胞全体を一度に観察することが困難である．この困難を克服した新しい装置を新たに開発した．

6.8.3 細胞：量子ドットの細胞内導入

量子ドット-タンパク質複合体を細胞に導入する新しい方法が確立した．市販 DNA をトランスフェクション

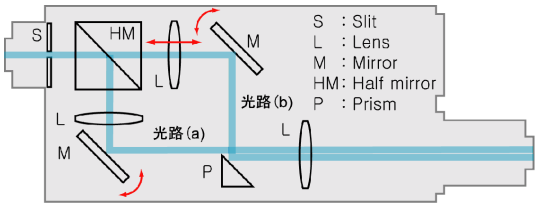

図 6.8.33: 光学顕微鏡に設置する２焦点変換ユニット

させる試薬（FuGENE—HM）にファロイジン，微小菅抗体やキネシンを結合した量子ドット（QD）を混ぜて，これを培養細胞に導入することに成功した．ファロイジンー QD はアクチンに結合し，抗体ー QD はや微小管に結合することが確認された．モータータンパク質キネシンは，微小管上を動いた．細胞内のキネシンの最大運動速度は，精製したキネシンを用いた In vitro motility assay における最大速度の約２倍もあった．これは，微小菅が重合脱重合によって動くため，その上で動くキネシンは微小管の速度が加算されたためであることが示唆された．この方法のマウスへの応用も試みている．

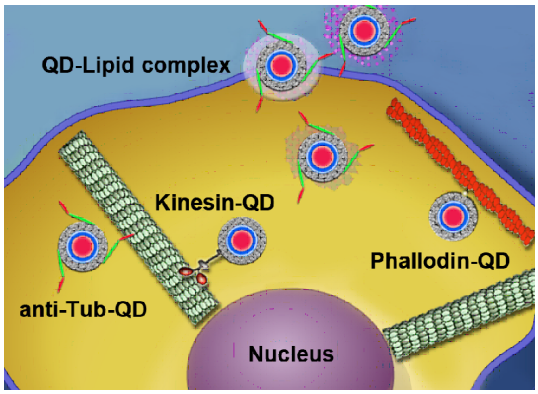

図 6.8.34: 量子ドットが細胞内に導入される過程

6.8.4 マウスから取り出した組織：マウス側脳室繊毛 (Extro Vivo) のナノメートル運動解析

哺乳類の脳では、脳室下層にある繊毛の運動が脳脊髄液の循環など重要な機能を果たしている。これまで繊毛運動は微分干渉法観察が行われてきたが、スライス画像が得にくいという問題点があった。今回我々は共焦点顕微鏡を用いて厚さ２ mm 程度の光学スライス像を得た。さらに非常に高い時間分解能で繊毛運動解析を行えるよう装置の改良を行った。実験では、マウス脳の組織切片（厚さ 0.2mm）を作製し、細胞膜に結合する有機蛍光分子 (PKH: Sigma)、および直

径100nmのポリスチレン蛍光ナノ粒子（Fluosphere: Invitrogen）の吸着を用いて標識した。この試料を独自の光学系と高速共焦点ユニット(CSU22:横河電機)、高速EMCCDカメラ(DU860: Andor)を組み合わせた装置を用いて、25 ℃の条件下で1.1msのフレームレートで蛍光観察を行った。細胞膜を標識した試料では繊毛全体の形状観察を行い、蛍光ナノ粒子を標識した試料では各フレームの蛍光スポットをガウス関数でフィッティングすることで、繊毛運動の軌跡を解析した。繊毛運動のビート周波数は生後6日～成体マウスで11～14Hzであった。また、繊毛の運動様式には生後日数により特徴的な波形が観察された。今回の結果で蛍光共焦点観察が繊毛運動の解析に応用可能であることが示された。微分干渉法とは異なり透過光照明が不要なためマニピュレータやピペットによる上部からの操作が容易になることからも、有用性が高いと考えられる。

6.8.5 マウス内：マウスIn vivoイメージングで観えてきた癌転移の仕組み

がんの最も脅威な点の１つは転移能である。転移性がん細胞は細胞運動によって原発巣から血管に向かって腫瘍間質中を移動し、血管内に浸潤する。その後、血流に乗り他組織の血管内壁へ接着し、血管外へ再浸潤することで転移する。これまで、がん転移を細胞レベルで解析する研究は、技術的な困難さから人口的な培養条件下 (in vitro) で主に行われてきた。しかし、血管や3次元的細胞間相互作用が存在する腫瘍組織 (in vivo) は、環境がin vitroと大きく異なるため、がん転移機構を本質的に理解し治療に役立てるには、生きた腫瘍内のがん細胞動態を可視化する技術 (in vivo イメージング) が必要となる。我々は20nmの位置精度でin vivoイメージングできる共焦点顕微鏡を独自開発した。転移性ヒト乳がん細胞を免疫不全マウスの皮下に埋めこんで腫瘍を作製した後、膜蛋白質抗体と量子ドット (蛍光性ナノ粒子) の結合物をマウス血管内に注入し、転移性がん細胞の膜を特異的に標識した。蛍光標識されたがん細胞の形態を上記イメージング装置で可視化し解析を行った。解析は、がん転移過程を踏まえ「腫瘍間質中の細胞」、「血流中の細胞」、「血管内壁への接着細胞」の順で行った。解析の結果、(1) 腫瘍間質中において、血管近傍のがん細胞は血管方向へ向かって浸潤突起を特異的に形成するが、血管より遠方の細胞ではこのような仮足様構造は観られなかったこと、(2) 血流中のがん細胞は血管径に応じて形態を巧みに変化させ移動すること、(3) 血管内壁へ接着したがん細胞は仮足を形成し70nm/sの速度で内壁上を移動すること、などを明らかにすることができた。以上のことはin vitro解析のみからでは理解することが難しく、本in vivoイメージング法が、がん転移機構の本質的な理解を達成する上で非常に有用な方法であることを示している。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Watanabe S., T.M. Watanabe, O. Sato, J. Awata, K. Homma, N. Umeki, H. Higuchi, R. Ikebe, and *M. Ikebe. Human Myosin Vc is a Low Duty Ratio Nonprocessive Motor. J. Biol. Chem. 283, 10581-10592 (2008)

[2] Kaya, M., Leonard, T.R. and Herzog, W. Premature deactivation of soleus during the propulsive phase of cat jumping. Journal of Royal Society Interface 5, 415-426 (2008)

[3] Sazaki, G., M.Okada, T. Matsui, T. Watanabe, H. Higuchi, K. Tsukamoto and K. Nakajima. Single-Molecule Visualization of Diffusion at the Solution-Crystal Interface. Crtstal Growth and Design. 8, 2024-2031 (2008)

[4] Yoo J., T. Kambara, K. Gonda, and *H. Higuchi. Intracellular imaging of targeted proteins labeled with Quantum Dots. Exp Cell Res. 314, 3563-3569 (2008)

[5] Takeda M., H. Tada, H Higuchi, Y. Kobayashi, M. Kobayashi, Y. Sakurai, T. Ishida and N. Ohuchi. In vivo single molecular imaging and sentinel node navigation by nanotechnology for molecular targeting drug-delivery systems and tailor-made medicine. Breast Cancer15:145-152 (2008)

[6] Mikhailenko, S. V., Oguchi, Y., Ohki T., Shimozawa, T., Olivares, A. O., De La Cruz, E. M. and Ishiwata, S. How load and the nucleotide state affect the actin filament binding mode of the molecular motor myosin V. J. Korean Phys. Soc. 53(3) 1726-1730(2008)

[7] Furuta A., T. Yagi, H. Yanagisawa, H. Higuchi, and *R. Kamiya. Systematic comparison of In vitro motile properties between chlamydomonas wild-type and mutant outer arm dyneins each lacking one of the three heavy chain. J. Biol. Chem. 284, 5927-5935 (2009).

[8] Shimozawa T. and Ishiwata S. Mechanical Distortion of Single Actin Filaments Induced by External Force: Detection by Fluorescence Imaging. Biophys J. 96(3):1036-44(2009)

(国内雑誌)

[9] 樋口秀男 「蛍光性量子ドットのバイオ・医療イメージングへの応用」実験医学 26 No17 （増刊）125-131, (2008)

[10] 武田元博、樋口秀男, 権田幸祐、大内憲明「がん分子イメージングの新展開」癌と化学療法 35,1277-1280,(2008.8)

[11] 石渡信一、小口祐伴、Sergey V. Mikhailenko、大木高志、下澤東吾、大山廣太郎、鈴木団. 光による生物システムの操作と計測：１分子と細胞. Microoptics News. 26(3) 55-60 (2008)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[12] Motoshi Kaya and Hideo Higuchi. Stroke size and force of single skeletal myosins determined by optical trap measurement on myosin assembly. Gordon research conference. New London, USA . 2008.7.

[13] Taketoshi Kambara, J. Yoo, , K. Gonda and Hideo Higuchi. Intracellular imaging of motor proteins with Quantum Dots in living cells. Gordon research conference. New London, USA . 2008.7.

招待講演

[14] Higuchi, H: Single molecule imaging of motor proteins in vitro and in vivo. International Softmater symposium. Tokyo. 2008, 6.

[15] Higuchi, H.: Step size of dynein determined by woking and fluctuation distances. Gordon research conference. New London, USA . 2008.7.

[16] Higuchi, H.: Step size and force generated by motor protein dynein. 236th National Meeting & Exposition of the American Chemical Society. Philadelphia, USA. 2008. 8.

[17] Motoshi Kaya: Powerstroke distance and load-dependent step size of single skeletal myosins. 2nd International Symposium on Bio-nanosystems. Tokyo, Japan. 2008.10.

[18] Higuchi, H.: Myosin, kinesin and dynein in vitro and cells. 2nd International Symposium on Bio-nanosystems. Tokyo, Japan. 2008.10.

[19] Higuchi, H.: Imaging of stepwise motility of single motor molecules in living cells. 39th NIPS International Symposium & 7th OIB Symposium. Okazaki, Japan. 2008.11.

[20] Higuchi, H.: Motility of single molecules of dynein, kinesin, and myosin in vitro and in cells. Symposium on the MESO CONTROL of the cells, by the cells, for the cells. Kyoto, Japan. 2009. 1.

[21] Higuchi, H.: Cargo Transport by Single Molecular Motors. The Biophysical Society's 53rd Annual Meeting. Boston, USA. 2009. 3.

(国内会議)

一般講演

[22] Yoo, J., Kambara, T., Gonda, K., and Higuchi, H. (2008) Intracellular imaging of targeted proteins labeled with quantum dots. The 46th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, 48, S42 (1P-135). Fukuoka, Japan. 2008.12.

招待講演

[23] Higuchi, H.: Molecular mechanism of dynein motility in vitro and cells. The 46th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan. Fukuoka, Japan. 2008.12.

[24] 樋口秀男: 力発生時のミオシンフィラメント内分子力学. 生体運動研究合同班会議 2009. 東京. 2009.1.

(セミナー)

[25] 茅元司: 組換単頭ダイニン２分子のステップサイズは広く分散するー実験的解析および理論的解析. 第３回ダイニン分子研究会. 下田　2008.6.

[26] 樋口秀男: 第３回ダイニン分子研究会. 下田 2008.6.

[27] Higuchi, H.: Step size and stiffness of single molecules of skeletal myosin II and cytoplasmic dynein. Univ. Pennsylvania, USA, 2008.8.

[28] 樋口秀男: in vivo ナノイメージング技術の開発と生体運動機構の解明. CREST 生命現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術 中間報告会. 大阪 2008.10.

[29] 樋口秀男：メディカルバイオエレクトロニクス教育拠点特別講演 東北大学、2008 年 12 月

＜その他＞

(特許)

[30] 権田幸祐、樋口秀男、大内憲明、武田元博　国際出願特許：PCT/JP2009/055479「がん細胞運動およびがん細胞浸潤抑制剤」2009 年 3 月

(新聞報道)

[31] 伊豆新聞「東大大学院教授に就任　世界最高制度で分子の挙動観察」2008.6.25

7　技術部門

7.1　技術部門

（大塚、佐伯、藤代、山本、＊樫村、＊＊南城、＊＊阿部）

＊再雇用職員、＊＊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。12 月から試作室に技術補佐員の阿部を迎えた。技術部門の担当教員（坪野、相原、早野、岡本、杉浦（地惑））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。

7.1.1　実験装置試作室（大塚、南城、阿部）

利用状況

2008 年 4 月から 2009 年 3 月までの、実験装置試作室の主な利用状況は以下のとおりである。

- 物理教室製作件数（195 件）
- 設計及び部品等の問い合わせ（46 件）
- 外注発注（30 件）
- 他教室等からの作業依頼及び問い合わせ（27 件）　主な依頼者（5 月祭、生物科学　寺島研、地球惑星科学　杉浦研、吉川研、船守研、松本研、横山（裕）研、田中研、化学専攻山内研　付属地殻化学実験施設森研　素粒子物理国際センター　医学系研究科構造生理学　河西研）

工作実習

物理学教室及び地球惑星科学所属の大学院修士 1 年生を対象として、6 月 2 日から 6 月 23 日まで下記の内容で工作講習会を行なつた。

- 参加人員：41 名
- 実習内容
  1. 実験用機器・部品等の製作に必要な設計・製図の基礎
  2. 測定器（ノギス、マイクロメーター等）の使い方
  3. ケガキ、ポンチ、タツプ、ダイス、の使い方
  4. 材質別による刃物の選定及び使用方法
  5. 旋盤、フライス盤、ボール盤、シャーリング（切断機）の使用方法

7.1.2　安全衛生・薬品管理（佐伯、山本）

安全衛生管理（佐伯）

- 物理学専攻の安全衛生管理
- 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

薬品管理（山本）

- 実験廃棄物処理 45 件
- 水銀系廃棄物処理 3 件
- 労働安全衛生法指定化学物質使用量調査 4 月、7 月、10 月、翌 1 月
- PRTR 法指定化学物質調査 5 月
- 不明廃液等リスト作成 174 件
- 薬品管理システム (UTCRIS) の試薬等の一括管理 17 研究室

高圧ガス管理（山本）

- 高圧ガス貯蔵量削減対策 WG メンバー

実験機器管理（山本）

- X 線回折装置 3 台の定期点検 (漏洩放射線測定) 10 月

7.1.3　IT 関連業務（藤代）

- 専攻内各サーバ運用
- サーバ機器交換（web, mail, 学務 DB）
- 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

- 情報基盤センターの迷惑メール対策試行運用に参加
- 学務システム運用
- 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

7.1.4 学生実験（佐伯、藤代、山本、樫村）

- 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 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。
- 学生実験　(山本)
  3 年生夏学期の物理学実験 I の放射線の技術指導をした。
- 学生実験　(山本)
  3 年生夏学期の物理学実験 I の X 線回折の技術指導をした。
- 学生実験 II(山本)
  3 年生冬学期の物理学実験 II の分光測定の技術指導をした。
- 3 年生実験（物理学実験 I、II）のテーマの振り分け（樫村）
- 4 年生の研究室 (特別実験と理論演習) の振り分け（樫村）

7.1.5 学生実習（佐伯）

当教室の大学院生を対象として、下記の内容で生物物理学実習を行った。

- 実習内容
  1. 基本操作（ピペットマンの使い方、生物試料の扱い方と廃棄の仕方、試薬の調製等）
  2. 遺伝子（形質転換、プラスミドの調製、プラスミドの濃度測定と電気泳動、コンピテントセルの作製）

7.1.6 研究支援（佐伯）

- モーター蛋白質であるキネシンの変異体作製、大腸菌での発現、精製、活性測定

＜報文＞

[1] 平成 20 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、2009 年 3 月）.

＜学術講演＞

(国内会議)

一般講演

[2] 中村　敬、友寄克亮、槇　亙介、佐伯喜美子、桑島邦博：相同蛋白質のフォールディング機構：ヤギ・α-ラクトアルブミンとイヌミルクリゾチームの比較研究、日本生物物理学会第 46 回年会（福岡国際会議場、2008 年 12 月 3 日〜12 月 5 日）.

[3] 佐伯喜美子：キネシンの変異体の作製・大腸菌による発現と精製、第 20 回生物学技術研究会（岡崎コンファレンスセンター、2009 年 2 月 19 日-20 日）.

II

Summary of group activities in 2008

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 Nuclear Structure group (T. Otsuka and N. Shimizu), nuclear structure physics is studied theoretically in terms of the quantum many-body problem. The major subjects are the structure of unstable exotic nuclei, shell model calculations including Monte Carlo Shell Model, reactions between heavy nuclei, Bose-Einstein condensation, symmetries and quantum chaos, etc.

The structure of unstable nuclei is the major focus of our interests, and examples of the current subjects are the disappearance of conventional magic numbers and appearance of new ones, as studied extensively by using the Monte Carlo Shell Model. These phenomena are due to the change of the shell structure (shell evolution), and are largely due to nuclear forces such as the tensor force and the three-body force. A part of the review can be found in [1], while many papers with strong impacts have been published by our group in recent years. Effects on magnetic properties are discussed for exotic carbon isotopes [2].

A entirely new research project of the year is the mean-field based formulation of the Interacting Boson Model [3]. The mean-field models are good in obtaining intrinsic density ditributions, whereas the Interacting Boson Model is good for describing properties of excited states. We combined these two methods so that both merits can be utilized. The future of this project is quite promising.

The cluster structure can be stabilized by excess neutrons, as we have shown for 14C some years ago. This property has been shown to persist to 13C [4].

We have proposed a new type of ab initio calculations. This method is designed for the description of heavier nuclei.

We are working on the relation between symmtries and quantum chaos.

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. Highlights in research activities of this year are listed below.

1. Lattice QCD studies of hadron structure [5]
2. Lattice QCD study of the nuclear force [6]
3. Lattice QCD study of the quark-gluon plasma [7]
4. Phase transition in high density quark matter [8]

5. Confinement in Yang-Mills theory [9]

6. Hadrons in nuclear medium [10]

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, (2) transport description of hadrons and their dissipation [11] (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) electromagnetic probes of the quark-gluon plasma [12].

References

[1] T. Otsuka, T. Suzuki and Y. Utsuno: "Exotic nuclei and Yukawa's forces", Nucl. Phys. A **805** 127C–136C (2008)

[2] T. Suzuki and T. Otsuka: "Exotic Magnetic Properties in C-17", Phys. Rev. C **78**, 061301 (2008)

[3] K. Nomura, N. Shimizu, and T. Otsuka: "Mean-Field Derivation of the Interacting Boson Model Hamiltonian and Exotic Nuclei", Phys. Rev. Lett. **101** 142501 (2008)

[4] T. Yoshida, N. Itagaki, and T. Otsuka: "Appearance of cluster states in C-13", Phys. Rev. C **79**, 034308 (2009)

[5] S. Sasaki and T. Yamazaki, "Nucleon form factors from quenched lattice QCD with domain wall fermions", Phys. Rev. **D78**, 014510 (2008).

[6] H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda, "Hyperon-Nucleon Force from Lattice QCD", Phys. Lett. **B673**, 136 (2009).

[7] S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno, and T. Umeda (WHOT QCD Coll.), "Fixed Scale Approach to Equation of State in Lattice QCD", Phys. Rev. **D79**, 051501 (2009).

[8] N. Yamamoto, "Instanton-induced crossover in dense QCD", JHEP **0812**, 060 (2008).

[9] T. Kanazawa, "A theorem concerning twisted and untwisted partition functions in U(N) and SU(N) lattice gauge theories", Phys. Lett. **B670**, 421 (2009).

[10] D. Jido, T. Hatsuda and T. Kunihiro, "In-medium Pion and Partial Restoration of Chiral Symmetry", Phys. Lett. **B670**, 109 (2008).

[11] T. Hirano, U. Heinz, D. Kharzeev, R. Lacey, and Y. Nara : "Mass ordering of differential elliptic flow and its violation for ϕ mesons", Phys. Rev. C **77**, 044909 (2008).

[12] F.-M. Liu, T. Hirano, K. Werner, and Y. Zhu : "Centrality-dependent Direct Photon $p_{\rm t}$ Spectra in Au+Au Collisions at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) energy $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV", Phys. Rev.C **79**, 014905 (2009).

2 Theoretical Particle and High Energy Physics Group

Research Subjects: The Unification of Elementary Particles & Fundamental Interactions

Member: Tsutomu Yanagida, Yutaka Matsuo, Koichi Hamaguchi
Yosuke Imamura, Teruhiko Kawano, Taizan Watari

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. Superstring Theory.
   - 1.1 M-theory and 3-algebra [12] [21] [22] [23] [27] [40]
   - 1.2 M2-branes and Superconformal Chern-Simons theories [18] [24] [28] [31] [32] [34] [38]
   - 1.3 Gauge theories and gauge/string duality [9] [17] [26]
   - 1.4 String field theory [11] [15]
2. High Energy Phenomenology.
   - 3.1 Phenomenology of beyond the standard models [3] [8] [14] [19] [29] [30] [2] [4] [25] [5] [6] [7] [10] [13]
   - 3.2 Dark matter and Cosmic rays [33] [36] [39] [41] [37]
   - 3.3 String inspired models [1] [16] [35] [20]

References

[1] Y. Nakayama, M. Yamazaki and T. T. Yanagida, "Moduli Stabilization in Stringy ISS Models," Phys. Lett. B **663**, 281 (2008).

[2] T. Kawano, "Chaotic D-Term Inflation," Prog. Theor. Phys. **120**, 793 (2008).

[3] K. Hamaguchi, S. Shirai and T. T. Yanagida, "Determining the mass for an ultralight gravitino at LHC," Phys. Lett. B **663**, 86 (2008).

[4] K. Kadota, T. Kawano and M. Yamaguchi, "New D-Term Chaotic Inflation in Supergravity and Leptogenesis," Phys. Rev. D **77**, 123516 (2008).

[5] M. Kuriyama, H. Nakajima and T. Watari, Phys. Rev. D, in press, [arXiv:0802.2584 [hep-ph]].

[6] M. Ibe, Y. Nakayama and T. T. Yanagida, "Conformal Supersymmetry Breaking and Dynamical Tuning of the Cosmological Constant," Phys. Lett. B **668**, 28 (2008).

[7] S. Asai, T. Moroi and T. T. Yanagida, "Test of Anomaly Mediation at the LHC," Phys. Lett. B **664**, 185 (2008).

[8] F. Takahashi, T. T. Yanagida and K. Yonekura, "Gravitational Waves as a Probe of the Gravitino Mass," Phys. Lett. B **664**, 194 (2008).

[9] M. Yamazaki, "Brane Tilings and Their Applications," Fortsch. Phys. **56**, 555 (2008).

[10] M. Ibe, Y. Nakayama and T. T. Yanagida, "Conformal Gauge Mediation and Light Gravitino of Mass $m_{3/2}O(10)$ eV," Phys. Lett. B **671**, 378 (2009).

[11] T. Kawano, I. Kishimoto and T. Takahashi, "Gauge Invariant Overlaps for Classical Solutions in Open String Field Theory," Nucl. Phys. B **803**, 135 (2008).

[12] P. M. Ho, R. C. Hou and Y. Matsuo, "Lie 3-Algebra and Multiple M2-branes," JHEP **0806**, 020 (2008).

[13] J. Hisano, M. Nagai, S. Sugiyama and T. T. Yanagida, "Upperbound on Squark Masses in Gauge-Mediation Model with Light Gravitino," Phys. Lett. B **665**, 237 (2008).

[14] K. Hamaguchi, E. Nakamura, S. Shirai and T. T. Yanagida, "Strongly Interacting Gauge Mediation at the LHC," JHEP **0807**, 107 (2008).

[15] T. Kawano, I. Kishimoto and T. Takahashi, "Schnabl's Solution and Boundary States in Open String Field Theory," Phys. Lett. B **669**, 357 (2008)

[16] H. Hayashi, R. Tatar, Y. Toda, T. Watari and M. Yamazaki, Nucl. Phys. B **806**, 224 (2009).

[17] T. Fujimori, M. Nitta, K. Ohta, N. Sakai and M. Yamazaki, "Intersecting Solitons, Amoeba and Tropical Geometry," Phys. Rev. **D 78**, 105004 (2008).

[18] H. Fuji, S. Terashima and M. Yamazaki, "A New N=4 Membrane Action via Orbifold," Nucl. Phys. **B 810**, 354-368 (2009).

[19] K. Hamaguchi, E. Nakamura and S. Shirai, "A Measurement of Neutralino Mass at the LHC in Light Gravitino Scenarios," Phys. Lett. B **666**, 57 (2008).

[20] R. Tatar and T. Watari, "GUT Relations from String Theory Compactifications," Nucl. Phys. B **810**, 316 (2009).

[21] P. M. Ho and Y. Matsuo, "M5 from M2," JHEP **0806** (2008) 105.

[22] P. M. Ho, Y. Imamura and Y. Matsuo, "M2 to D2 revisited," JHEP **0807**, 003 (2008).

[23] P. M. Ho, Y. Imamura, Y. Matsuo and S. Shiba, "M5-brane in three-form flux and multiple M2-branes," JHEP **0808**, 014 (2008).

[24] "On the moduli space of elliptic Maxwell-Chern-Simons theories," Y. Imamura, K. Kimura, Prog. Theor. Phys. **120** (2008) 509,

[25] T. Kawano and M. Yamaguchi, "Reheating in Chaotic D-Term Inflation," Phys. Rev. D **78**, 123511 (2008).

[26] Y. Hatsuda and R. Suzuki, "Finite-Size Effects for Multi-Magnon States," JHEP **0809** (2008) 025.

[27] C. S. Chu, P. M. Ho, Y. Matsuo and S. Shiba, "Truncated Nambu-Poisson Bracket and Entropy Formula for Multiple Membranes," JHEP **0808**, 076 (2008).

[28] "N=4 Chern-Simons theories with auxiliary vector multiplets," Y. Imamura, K. Kimura, J. High Energy Phys. **10** (2008)040,

[29] S. Asai, Y. Azuma, O. Jinnouchi, T. Moroi, S. Shirai and T. T. Yanagida, "Mass Measurement of the Decaying Bino at the LHC," Phys. Lett. B **672**, 339 (2009).

[30] S. Shirai, F. Takahashi, T. T. Yanagida and K. Yonekura, "Gauge Mediation with Sequestered Supersymmetry Breaking," Phys. Rev. D **78**, 075003 (2008).

[31] K. Ueda and M. Yamazaki, "Toric Calabi-Yau four-folds dual to Chern-Simons-matter theories,", JHEP12(2008)045.

[32] Y. Imamura, K. Kimura, "Quiver Chern-Simons theories and crystals," J. High Energy Phys. JHEP10(2008)114.

[33] C. R. Chen, F. Takahashi and T. T. Yanagida, "Gamma rays and positrons from a decaying hidden gauge boson," Phys. Lett. B **671**, 71 (2009).

[34] M. Yamazaki, "Octonions, G_2 and generalized Lie 3-algebras," Phys. Lett. **B 670**, 215-219 (2008).

[35] L. J. Hall, M. P. Salem and T. Watari, "Neutrino mixing and mass hierarchy in Gaussian landscapes," Phys. Rev. D **79**, 025010 (2009).

[36] C. R. Chen, F. Takahashi and T. T. Yanagida, "High-energy Cosmic-Ray Positrons from Hidden-Gauge-Boson Dark Matter," Phys. Lett. B **673**, 255 (2009).

[37] K. Hamaguchi, E. Nakamura, S. Shirai and T. T. Yanagida, "Decaying Dark Matter Baryons in a Composite Messenger Model," to appear in Phys. Lett. B, arXiv:0811.0737 [hep-ph].

[38] Y. Imamura and S. Yokoyama, "N=4 Chern-Simons theories and wrapped M5-branes in their gravity duals," to appear in Prog. of Theor. Phys. arXiv:0812.1331 [hep-th].

[39] K. Hamaguchi, S. Shirai and T. T. Yanagida, "Cosmic Ray Positron and Electron Excess from Hidden-Fermion Dark Matter Decays," Phys. Lett. B **673**, 247 (2009).

[40] P. M. Ho, Y. Matsuo and S. Shiba, "Lorentzian Lie (3-)algebra and toroidal compactification of M/string theory," JHEP **0903**, 045 (2009).

[41] S. Shirai, F. Takahashi and T. T. Yanagida, "Decaying Hidden Gaugino as a Source of PAMELA/ATIC Anomalies," to appear in Phys. Lett. B, arXiv:0902.4770 [hep-ph].

3 Sakai (Hideyuki) Group

Research Subjects: Experimental Nuclear Physics

Member: Hideyuki Sakai, Kentaro Yako

We are aiming to explore nuclear structure as well as nuclear reaction mechanisms by using an intermediate energy beam from accelerators. Particular emphasis is placed on the study of the spin degrees of freedom in nuclei. Our expertise is various "spin-polarizations": spin-polarized beams ($\vec{p}$, $\vec{n}$ and $\vec{d}$), spin-polarized targets ($\vec{p}$ and $^3\vec{\mathrm{He}}$), and spin-polarization analysis of reaction products ($\vec{p}$, $\vec{n}$ and $\vec{d}$).

Major activities during the year are summarized below.

ICHOR project: Isospin-spin responses in CHarge-exchange exOthermic Reactions

—SHARAQ spectrometer

Spin-isospin response of nucleus is a unique excitation mode since it is related with mesons in nuclei and consequently it provides valuable information on nuclear forces. So far the research has been performed by using endothermic reactions by a stable beam such as (p,n) or (n,p), which is inevitably accompanied by a finite momentum transfer to nucleus. Such reactions hamper the study of spin-isospin responses in highly excited regions. We will try to overcome this difficulty by using exothermic reactions by an unstable beam such as (^{12}N, ^{12}C) or (^{12}B, ^{12}C). With this new experimental means, we pursue the study of spin-isospin responses in the highly excited region. Aiming to identify new spin excitation modes, we are constructing a high energy resolution spectrometer SHARAQ dedicated to the exothermic reactions by unstable beams. In this year, we completed the construction of SHARAQ and performed a commissioning by using the $T = 3.6$ GeV ^{14}N-beam. It was found out that (1) all the beam counters and the focal-plane detectors work fine, (2) the dispersion of SHARAQ is $(x|\delta) = 6.8$ m, consistent with the design value, and (3) the dispersion-matching technique is successuly applied (See Fig. 2.1.1).

—First experiment at SHARAQ: Measurement of isovector monopole resonance—

The isovector spin-monopole resonance (IVSMR) has long been a major topic in the study of spin-isospin responses in nuclei. The IVSMR is the $2\hbar\omega$ transition with $\Delta L = 0$, $\Delta S = 1$, and $\Delta T = 1$. Since the IVSMR is a breathing mode with spin and isospin changes, it can be related to the nuclear matter compressibility with spin and isospin degrees of freedom. In spite of the importance of the IVSMR, the experimental information is currently scarce. There are some experimental hints on the IVSMR for the β^- (or (p,n)) side, but few for the β^+ (or (n,p)) side. Therefore, we will try to establish the IVSMR by observing it in the β^+ channel, in which the physical background due to Gamow-Teller excitations are suppressed by excess neutrons. Our plan is to use a slightly exothermic reaction of $(t, ^3\mathrm{He})$. The triton beam of $T_t = 900$ MeV is produced by injecting the primary α beam onto a ^{9}Be target. The triton beam is acromatically transported to the SHARAQ target position and hits the ^{208}Pb or ^{90}Zr target. We proposed the beam time of 9 days and it was fully approved. The beam time is scheduled in 2010.

4 Hayano Group

Research Subjects: Precision spectroscopy of exotic atoms and nuclei

Member: Ryugo S. Hayano and Takatoshi Suzuki

1) Precision laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms at CERN's antiproton decelerator

Determination of proton-to-electron mass ratio 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.

Further improvements using Doppler-free spectroscopy In order to further improve the antiprotonic helium laser spectroscopy precision, we have developed, in 2008, three different methods to suppress the Doppler widths. They are, (1) two-color two-photon, (2) two-color saturation, and (3) single-color saturation methods. Sub- Doppler widths were observed in all these methods. By further refining one of these in coming years will make it 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).

2) 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 hydrogen The SIDDHARTA (Silicon Drift Detector for Hadronic Atom Research by Timing Application) project is currently in progress at the DAΦNE e^+e^- ring collider in LNF, Italy. Low energy kaons from DAΦNE beam line are stopped in a gaseous hydrogen target to produce the kaonic hydrogen atom. And the K-series x rays of the atom will be measured to a precision of a few eV to determine the shift and width of kaonic hydrogen 1s-level with the best accuracy ever.

X-ray spectroscopy of kaonic helium 3 The kaonic helium 3 2p-level shift measurement, in addition to that of kaonic helium 4 given by KEK-PS E570, will give much more strong constraint to the kaon-nucleas interaction. The J-PARC E17, which is the first experiment to be carried out at J-PARC hadron hall, will start the kaonic helium 3 measurement in fiscal year 2009 at K1.8BR beamline. Construction of the beamline detectors, CDS (Cylindrical Detector System), ^{3}He target, and R&D of a new type of SDD are in progress.

3) Study of kaonic nuclei

Study of kaonic nucleus via the stopped K^- reaction on helium 4 In the $^4\mathrm{He}(K^-_{stopped}, YN/Yd)$ spectra measured in the KEK-PS E549, we have observed unresolved wide strength 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, and the finalization of spectrum normalization, including the neutron detection efficiency study, is in progress to conclude the interesting problem.

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 $^3\mathrm{He}(K^-, n/p)$ reaction to search for K^-pp and K^-pn. E15 is a kinematically complete experiment in which all reaction products are detected exclusively, and it aims to provide decisive information on the nature of the simplest kaonic nuclei. The experimental devices, which have many common parts with those used for E17, are now under construction, and the experiment is currently scheduled in year 2010$\sim$2011.

4) Precision spectroscopy of pionic atoms

Precision spectroscopy of the 1s level of pionic atoms using the (d,^{3}He) reaction is a powerful method to study the $\langle q\bar{q}\rangle$ condensate, and to understand why the proton is so heavy compared to its constituents, the u, d quarks. A new experimental setup based on a dispersion-matched optics is being constructed at the BigRIPS facility of RIBF, and presently we are preparing the test experiment of the optics planned in May, 2009.

5 Ozawa Group

Research Subjects: Experimental study of non-perturbative QCD

Member: Kyoichiro Ozawa

We have three research activities.

- Study of quark-gluon-plasma and hadronic matter under high-temperature and high density condition at Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at Brookhaven National Laboratory
- Study of mechanism of hadronic mass generation at J-PARC

Study of quark-gluon-plasma at RHIC

In 6 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, properties of heavy flavor at dense matter have great interests, since heavy flavor has relatively large mass and be expected to have different behavior compared to light quarks. As a baseline measurements, we obtained cross section of charm and bottom generation separately in p+p collisions using two separated methods. We obtain the charm production cross section of $\sigma_{cc} = 544 \pm 39(\text{stat}) \pm 142(\text{syst}) \pm 200(\text{model})$ μb from dilepton invariant mass distribution. In addtion, we also measure a charm production cross section using single electron measurements and electron hadron correlation and we obtain the charm production cross section of and $\sigma_{cc} = 567 \pm 57(\text{stat}) \pm 224(\text{syst})$ μb. They are consistent with each other. The bottom production cross section of $\sigma_{bb} = 3.2 + 1.2 - 1.1$ (stat) $+1.4 - 1.3$ (syst) μb is also obtained. This is the first measurments at the current collision energy.

Study of mechanism of hadronic mass generation at J-PARC

Recently, the chiral property of QCD in hot($T \neq 0$) or dense($\rho \neq 0$) nuclear matter has attracted wide interest in the field of hadron physics. The dynamical breaking of chiral symmetry in the QCD vacuum induces an effective mass of quarks, known as constituent quark mass, which then determines the known mass of all the hadrons. In hot and/or dense matter, this broken 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 experimet 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 pricisely and compare with the theoretical predictions. We are also able to use larger and smaller nuclear targets as lead and proton, For this experimetn, new detector based on Gas Electron Multiplier (GEM), which is originally developped at CERN, is under developping. Using GEM, we are imvestigating 2 dimentional tracker for high rate counting. A prototype is reconstructed and reasonable signals are observed. An test experiment is performed at FUJI test beam line at KEK and detailed evaluation of postion resolution is done using an electron beam. As shown in Fig. 2.1.4, a position resolution of 100 μm is obtained.

In another experiment, 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 $\omega \to \pi^0\gamma$ mode. Such exclusive measurement can supply essential information to establish partial restoration of the chiral symmetry in nucleus. New neutron counter using TOF method is developped. The design of the neutron counter is shown in Fig. 2.1.5. Timing resolution of the counter is tested and we obtained 50 ps.

6 Komamiya group

Research Subjects: (1) Preparation for an accelerator technology and an experiment for the International linear e^+e^- collider ILC; (2) Data analysis for the BES-II experiment at BEPC-I, and TOF detector construction for BES-III experiment at BEPC-II; (3) Detector development for studying gravitational quantum effects and searching for new medium range force using ultra-cold neutron beam; (4) Preparation for physics analyses in the ATLAS experiment at the LHC pp collider; (5) Data analyses for the OPAL experiment at the LEP e^+e^- collider;

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. 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. Also beam position monitors with a nano-meter position accuracy were developed with the KEK accelerator laboratory. Also we have been studying possible physics scenario and the large detector concept (ILD) for an experiment at ILC.

2) 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 $J\psi$ decay using 5.8M BES-II J/ψ events. Now BEPC-II is operating smoothly and BES-III detector ia taking large samples of ψ' and J/ψ data.

3) Detector development for studying gravitational quantum bound states and searching for new medium range force using ultra-cold neutron beam: A detector to measure gravitational bound states of ultra-cold neutrons (UCN) is under way. We decided to use CCD's for the position measurement of the UCN's. The CCD is going to be covered by a Li layer to convert neutron to charged nuclear fragments. The simulation studies on the quantum effects of UCN in a narrow slit with 100 [μ] height is also done. In 2008 we tested our neutron detector at ILL Grenoble. In 2009 we will start the first experiment at ILL.

4) ATLAS experiment at LHC: The epoc of new paradigm for particle physics is going to open with the experiments at LHC. LHC is going to be operated in 2009. The ATLAS detector is ready. Some of our students work on the preparation for physics analysis at LHC. Search for supersymmetric particles with the missing transverse energy, and detector related and physics background are under study.

5) OPAL experiment at LEP: It is the experiment at the highest energy e^+e^- collider LEP of CERN. The data taking with the OPAL detector was completed in the end of 2000. Important physics subjects at LEP are (a) Higgs boson searches, (b) Supersymmetric particle searches and (c) W-boson physics. We have extensively searched for the Higgs boson at LEP. The Higgs boson was driven to a narrow mass range of 114-160 GeV. For supersymmetric particles searches the lower mass limit of the lightest neutralino, which is the most important candidate of the dark matter material, was set to be 38.0 GeV. The W boson mass was determined to be 80.412 ± 0.042 GeV (statistical and systematic errors combined).

7 Minowa-Group

Research Subjects: Experimental Particle Physics without Accelerators

Member: MINOWA, Makoto and INOUE, Yoshizumi

Various kinds of astro-/non-accelerator/low-energy particle physics experiments have been performed and are newly being planned in our research group.

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 4 T superconducting magnet with an effective length of 2300 mm and PIN photodiodes as x-ray detectors. By now, we put upper limits of $g_{a\gamma\gamma} < (5.6\text{–}13.4) \times 10^{-10}\mathrm{GeV}^{-1}$ to axion - photon coupling constant for the axion mass $m_a < 0.27$ eV and 0.84 eV $< \mathrm{m_a} <$ 1.00 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 1 eV upward.

An experiment is being prepared for a search for hidden photons kinetically mixing with the ordinary photons. The existence of the hidden photons and other hidden sector particles is predicted by extensions of the Standard Model, notably the ones based on string theory. The hidden 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. We plan to piggyback such a chamber onto the Sumico helioscope and track the sun to search for the hidden photons coming from the sun. We estimate that this kind of simple hidden photon detector is able to explore a parameter region of mixing angle vs. hidden photon mass beyond the existing limits.

An R and D project of a resonance ionization mass spectroscopy, RIMS, is running aiming at neutrino detection by a trace analysis of an exotic atomic element produced by charged current interaction of an electron neutrino or an anti-electron neutrino on a nucleus in the target material. We first started with an analysis of metal contamination on a silicon wafer, which is a big issue in contemporary semiconductor industry and could potentially be improved by a use of RIMS. We introduced a blue LASER diode for the resonant excitation and a red LASER diode for the ionization, and successfully showed the effectiveness of the method by detecting a small amount of potassium vapor with a higher detection efficiency than the conventional ICP-mass spectroscopy. A clear discrimination of ^{39}K, ^{40}K and ^{41}K was demonstrated with a help of isotope shifts of the atomic levels. A hyperfine splitting of the 4s1/2 ground level was also observed clearly in each potassium isotope.

We also started a new R and D study of a compact mobile anti-electron neutrino detector with plastic scintillator 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 done a performance test of a plastic scintillator module, which is to be used as a building block of the detector. The basic design has been mostly completed with a help of computer simulation program.

Another long-running project of our group is the direct experimental search for supersymmetric neutralino dark matter. The search has been suspended for the improvement of the CaF_2(Eu) scintillation detector in order to get still higher sensitivity for the possible feeble neutralino signals. The improvement includes the pulse shape analysis for the discrimination between nuclear recoil events and electron recoil events. We are also studying a possibility of wavelength discrimination for the scintillation light. Furthermore, a new attempt is made to use quantum dots in the liquid scintillator to be deployed in the dark matter search. A quantum dot is a semiconductor whose excitons are confined in all three spatial dimensions. Upon excitation, it emits almost monochromatic light with a wavelength depending on its size. Its high quantum efficiency and tunable wavelength would be the advantage in making the scintillator. The scintillation light is confirmed in our preliminary experimental study by gamma-ray excitation.

8 Aihara Group

Research Subjects: Study of CP-Violation and Search for Physics Beyond the Standard Model in the B Meson System (Belle), Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment (T2K), Dark Energy Survey at Subaru Telescope (Hyper Suprime-cam), and R&D for Hybrid Photodetectors and the ILC Silicon Detector Concept (SiD).

Staff Members: H. Aihara, M. Iwasaki, H. Kakuno, T. Abe, N. Hastings and T. Uchida

One of the major research activities has been a study of CP-violation in the B meson system using the KEK B-factory (KEKB). This past year we presented a measurement of CP violating asymmetries in the neutral B meson decaying to $K^0_S K^+ K^-$. It was based on a data sample containing 657M $B\bar{B}$ pairs. By newly employing the time-dependent Dalitz plot analysis to the B^0 decays with $K^0_S K^+ K^-$ final state, we directly measure the CP-violating phases in each significant decay channel, considering the interferences between them and potentially resolving two-fold ambiguity in the weak phases that arises in quasi-two-body time-dependent CP analyses. Evidence for CP violation at a significance of 3.9σ is found in the $B^0 \to \phi K^0_S$ decay and the result is consistent with the Standard Model expectation. We have also started to design a silicon vertex detector and the interaction region for the KEKB luminosity upgrade.

We have been working on the instrumentation of J-PARC beamline for T2K long baseline neutrino oscillation experiment. In particular, we have constructed and installed the position (Eelectrostatic) and profile (Segmentd Secondary Emission) monitors for the primary proton beams.

We have successfully developed 13-inch hybrid photodetector combining a large-format phototube technology and avalanche diode as photo-electron multiplier. This device can be deployed for large water Cherenkov detectors, envisioned as the next generation proton-decay/neutrino detectors,

As an observational cosmology project, we are involved in building a 1.5 Giga pixel CCD camera (Hype Suprime-Cam) to be mounted on the prime focus of the Subaru telescope. With this wide-field camera, we plan to conduct extensive wide-filed 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.

SiD is a detector concept based on silicon tracking and a silicon-tungsten sampling calorimeter, complemented by a powerful pixel vertex detector, and outer hadronic calorimeter and muon system. Optimized forward detectors are deployed. In order to meet the ILC physics goals, we have designed the general purpose detector taking full advantage of the silicon technology. We have submitted Letter of Intent for SiD to ILC Research Director for validation of the detector concept.

1. Y. Nakahama, Ph.D.thesis “Measurement of CP -Violating Asymmetries in the Flavor-Changing Neutral Current Decays of the B Meson, ” March, 2009.

2. T. Abe, ”R&D status of large aperture Hybrid Avalanche Photo Detector,” The 1st international conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP09), March 12-17, 2009, Tsukuba

3. H. Miyatake, T. Uchida, H. Fujimori, S. Mineo, H. Nakaya, H. Aihara, S. Miyazaki, ”Prototype Readout Module for Hyper Suprime-Cam” ‘ 2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record ’, IEEE, 737-741, 2008.

9 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. $H \to \gamma\gamma$, $\tau\tau$ and WW are the promising channels. We are contributes on these three modes.
  - 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.
  - Missing Et and jet calibration: We are working on performance of the mET and jet calibration of the ATLAS detector.
  - Extra-dimension If the extra-dimension is compactified at a few TeV scale, Mini-black hole and KK excitation are interesting signals. We are study on these physics at the ATLAS experiments and have shown the ATLAS has good performance.
- (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 (>100W) stable sub THz RF source
  - Spin-rotation of positronium

10 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 fractional quantum Hall effect**, for which we envisage a **materials design for correlated electron systems** and novel **non-equilibrium** phenomena should be realised. Studies in the 2008 academic year include:

- Superconductivity in repulsively interacting electron systems
  - — Superconductivity in iron-oxypnictides with a disconnected Fermi surface [1-3]
- Physics of Graphene
  - — Quantum Hall effect in graphene: Topological aspects[4], edge states, Landau-level laser[5]
  - — Photovoltaic Hall effect in graphene[6]
- Electron correlation effects in strong magnetic fields
  - — Electron-molecule picture for quantum dots in magnetic fields [7]
- Non-equilibrium and nonlinear phenomena in correlated electron systems
  - — Landau-Zener tunnelling in the breakdown of Mott's insulator [8,9]
  - — Correlated electrons in intense laser lights[10,11]

— Dynamics of superfluid-Mott insulator transition in cold atoms in optical lattices[12]

[1] K. Kuroki, S. Onari, R. Arita, H. Usui, Y. Tanaka, H. Kontani and H. Aoki: Unconventional pairing originating from disconnected Fermi surfaces in superconducting $LaFeAsO_{1-x}F_x$, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 087004 (2008) [erratum: *ibid* **102**, 109902(E) (2009)].

[2] W. Malaeb, T. Yoshida, T. Kataoka, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita, H. Aoki, Y. Kamihara, M. Hirano, H. Hosono: Electronic Structure and Electron Correlation in $LaFeAsO_{1-x}F_x$ and $LaFePO_{1-x}F_x$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77**, 093714 (2008).

[3] H. Aoki: Unconventional superconductivity originating from disconnected Fermi surfaces in the iron-based compound, *Physica B* **404**, 700 (2009); K. Kuroki and H. Aoki: Unconventional pairing originating from disconnected Fermi surfaces in the iron-based superconductor, *Physica C, special edition on superconducting pnictides* (2009), in press; H. Aoki: Model construction and pairing symmetry for the iron-based oxypnictides, *Proc. 21st Int. Symposium. on Superconductivity*, Tsukuba, Oct. 2008, in press.

[4] Y. Hatsugai, T. Fukui and H. Aoki: Topological low-energy modes in $N = 0$ Landau levels of graphene — a possibility of a quantum-liquid ground state, *Physica E* **40**, 1530 (2008).

[5] T. Morimoto, Y. Hatsugai and H. Aoki: Cyclotron emission and radiation in graphene, *Phys. Rev. B* **78**, 073406 (2008).

[6] T. Oka and H. Aoki: Photovoltaic Hall effect in graphene, *Phys. Rev. B* **79**, 081406(R) (2009) [erratum: *ibid* **79**, 169901(E) (2009)].

[7] P.A. Maksym, Y. Nishi, D.G. Austing, T. Hatano, L.P. Kouwenhoven, H. Aoki, S. Tarucha: Accurate model of a vertical pillar quantum dot, *Phys. Rev. B* **79**, 115314 (2009).

[8] T. Oka and H. Aoki: Nonequilibrium quantum breakdown in a strongly correlated electron system, in *Quantum Percolation and Breakdown* [*Lecture Notes in Physics* **762**, 251 (Springer Verlag, 2009)].

[9] P. Werner, T. Oka and A. J. Millis: Diagrammatic Monte Carlo simulation of non-equilibrium systems, *Phys. Rev. B* **79**, 035320 (2009).

[10] T. Oka and H. Aoki: Photo-induced Tomonaga-Luttinger-like liquid in a Mott insulator, *Phys. Rev. B* **78**, 241104(R) (2008).

[11] N. Tsuji, T. Oka and H. Aoki: Correlated electron systems periodically driven out of equilibrium: Floquet + DMFT formalism, *Phys. Rev. B* **78**, 235124 (2008).

[12] N. Horiguchi, T. Oka and H. Aoki: Non-equilibrium dynamics in Mott-to-superfluid transition in Bose-Einstein condensation in optical lattices, *Proc. LT25*, Amsterdam 2008 [*J. Phys.: Conf. Ser.* **150**, 032007 (2009)].

11 Miyashita Group

Research Subjects: Statistical Mechanics, Phase Transitions, Quantum Spin systems,

Quantum Dynamics, Non-equilibrium Phenomena

Member: Seiji Miyashita and Keiji Saito

1. Novel Quantum States, Excited States, and Quantum Dynamics

In strongly interacting quantum systems, various interesting phases appear in the ground state. The coherent motion of quantum mechanics exhibits various characteristics which would play important roles in control of quantum information processing. We have studied such novel quantum phases and quantum responses. Parts of the subject are studied as an activity of the JST CREST project (Quantum-mechanical cooperative phenomena and their applications).

We studied the properties of the super-solid state. We performed quantum Monte Carlo simulation (stochastic series expansion method) on the soft-core Hubbard model in a three-dimensional lattice (simple cubic), and observed successive phase transitions of the solid order and of the super-fluidity at finite temperatures. We also studied the ground state phase diagram as a function of the density of the particles. We found that the super-solid phase exists in a less-filled region, which has been denied in two-dimensional systems.

We study the magnetism of itinerant electron system on a lattice by using the Hubbard model. When an electron is removed from the half-filled state, the total spin of the system changes from zero to the maximum value if the lattice satisfies a certain condition (Nagaoka-ferromagnetism). We demonstrated an adiabatic change of this transition. Moreover we studied magnetic states of itinerant systems with larger spins, e.g. $S = 1$ (Boson) and $3/2$ (Fermion), etc. These new magnetic phenomena could be realized in the optical lattice of the laser cooled atom systems.

We also studied nontrivial degeneracy of eigen-energies as a function of the transverse field in uniaxial large spins with terms of the single-ion type anisotropy which are models for single-molecular magnets. This degeneracy has been interpreted as an interference of the Berry phase. We showed that this degeneracy can be attributed to a parity symmetry of terms for the anisotropy. We also studied the distribution of the degenerate points in the parameter space of higher order terms for the anisotropy.

We studied the dynamics of magnetization under swept-field in the transverse Ising model, and found a kind of quantum spinodal decomposition phenomena with a collaboration of Professor Hans De Raedt of Groningen University and Professor Bernard Barbara of the Louis N´eel laboratory. In order to explain the size-independence of the magnetization process in fast sweepings, we introduced a new perturbation scheme for fast swept systems.

The transverse field is used in the quantum annealing to find the ground state of complicated systems. We studied the relation between the quantum fluctuation and the thermal fluctuation.

Besides the above topics, we studied control of photon state in micro-cavity with atom beams by studying a time-dependent Jaynes-Cummings model, and investigated the effect of observation on the photon state. We also studied generalized Yang-Baxter relation in large spin system with uniaxial anisotropy.

2. Phase Transition in Spin-Crossover Materials

We pointed out that the difference of the sizes of the high-spin (HS) and the low-spin (LS) states causes lattice distortions which interact through the elastic interaction. We found that the critical property of this model belongs to the universality class of the mean-field model. We also found that its dynamical critical properties are described by the corresponding mean-field theory (i.e., in the long-range interaction model) as well as the static critical property. We studied the excitation process from LS state to HS state at a low temperature by photo-irradiation. We found a threshold of the strength of the irradiation, below which the system stays in LS state and above which it jumps up to HS state. This threshold behavior can be regarded as a kind of spinodal phenomena. In short range model, the spinodal phenomenon is a crossover because the nucleation process smears a sharp transition in the relaxation time even in the infinite lattice. On the other hand, the present model exhibits threshold behavior as a true critical dependence. In order to analyze the scaling property of this singularity we studied the spinodal phenomena in a long-range-interaction system and obtained a finite scaling formula.

3. Formulations of Non-equilibrium Statistical Physics

We studied the formulism of time-evolution equation in contact with the thermal bath, and pointed out that the reduced density matrix of the equilibrium state of the total system gives the steady state of the reduced time-evolution equation. However, we also pointed out that the steady state of the quantum master equation obtained by the perturbation agrees with the reduced density matrix of the equilibrium state of the total system only in the leading order of the perturbation. That is, it only guaranties the zero-th order in the diagonal element, and the second order in the off-diagonal elements.

We also constructed concrete formula for the complex admittance which expresses the line shapes of the electron spin resonant (ESR). We also studied fundamental mechanisms and statistical properties of the heat conductivity.

12 Ogata Group

Research Subjects: Condensed Matter Theory

Member: Masao Ogata, Youichi Yanase

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
  The t-J model as a mechanism for the oxide high-T_c superconductors.[1]
  Mott metal-insulator transition and superconductivity.
- New superconductor: Iron-pnictide
  New mechanism for iron-pnictide superconductivity, "unscreening" effect of Coulomb interaction.[2]
  Normal-state spin dynamics of five-band model for iron pnictides.[3]
- Organic conductors
  Dimensional crossover and superconductivity in quasi-one-dimensional organic conductors.[4]
  Novel spin-liquid state in an organic system induced by one-dimensionalization.
  Static nonequilibrium state of the competing charge orders under an electric field.[5]
- Theories of anisotropic superconductivity
  Superconductivity and antiferromagnetism in a non-centrosymmetric system.[6]
  FFLO superconductivity near an antiferromagnetic quantum critical point.[7]
  Anderson localization and superconductivity fluctuation in an impurity band.[8]
- Interband effects of magnetic field on Hall effects for Dirac fermion systems. [9]
- Electronic and spin states in frustrated systems
  Four-state classical Potts model with a novel type of frustrations as a model for rattling.
  Ground states of the frustrated quasi-two-dimensional Hubbard model.[10]
- Kondo effect and heavy fermion systems
  Fermi surface reconstruction with Kondo screening at quantum critical point.[11]
- Two-dimensional ^{3}He system on graphite
  A new quantum liquid realized in the two-dimensional t-J-K model with ring-exchange interaction.[12]
- Microscopic theory for the magnetic domain wall driving.[13]

[1] M. Ogata and H. Fukuyama: Rep. Prog. Phys. **71**, 036501 (2008).
[2] Y. Fuseya, T. Kariyado, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 023703 (2009).
[3] T. Kariyado and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 043708 (2009).
[4] T. Aonuma, Y. Fuseya and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 034722 (2009).

[5] E. Yukawa and M. Ogata: submitted to J. Phys. Soc. Jpn..
[6] Y. Yanase and M. Sigrist: J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 124711 (2008).
[7] Y. Yanase: J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 063705 (2008).
[8] Y. Yanase and N. Yorozu: J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 034715 (2009).
[9] Y. Fuseya, M. Ogata and H. Fukuyama: Phys. Rev. Lett. **102**, 066601 (2009).
[10] T. Yoshikawa and M. Ogata: to appear in Phys. Rev. B **79**, (2009).
[11] H. Watanabe and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 024715 (2009).
[12] Y. Fuseya and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 013601 (2009).
[13] D. Matsubayashi, M. Udagawa and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 033703 (2009).

13 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 beoynd the limitation of classical MD and DFT.

Our research subjects in FY2008 were as follows:

- Applications of first-principles electronic structure calculation
  - Electronic structure of GaN and its interface
  - Stability and band profile of a SiON insulating layer on SiC(111)
  - Chemisorption mechanism of an SO_2 molecule on Ni
  - Two-Electron Reduction of a Rh-Mo-Rh Dithiolato Complex
  - Oxygen vacancy and hydrogen impurities in $BaTiO_3$
  - 3D C60 polymer
  - Phonon and thermodynamic properties of SiO_2 and TiO_2
- New methods of electronic structure calculation
  - First-principles wavefunction theory for solids based on the transcorrelated method
  - Electronic structure calculation of proteins based on the fragment molecular orbital method

14 Fujimori Group

Research Subjects: Photoemission Spectroscopy of Strongly Correlated Systems

Member: Atsushi Fujimori and Teppei Yoshida

We study the electronic structures of strongly correlated systems using high-energy spectroscopic techniques such as photoemission spectroscopy, x-ray absorption spectroscopy and x-ray magnetic circular dichroism using synchrotron radiation. We investigate mechanisms of high-temperature superconductivity

[1], metal-insulator transitions, giant magnetoresistance, carrier-induced ferromagentism, spin/charge/orbital ordering in strongly correalted systems such as transition-metal oxides [2], magnetic semiconductors [3], and their interfaces.

[1] W. Malaeb, T. Yoshida, T. Kataoka, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, H. Usui, K. Kuroki, R. Arita, H. Aoki, Y. Kamihara, M. Hirano, and H. Hosono: Electronic Structure and Electron Correlation in $LaFeAsO_{1-x}F_x$ and $LaFePO_{1-x}F_x$, J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 093714–1-4.

[2] K. Ebata, M. Takizawa, A. Fujimori, H. Kuwahara, Y. Tomioka and Y. Tokura, Chemical Potential Landscape in Band-Filling and Bandwidth-Control of Manganites: Photoemission Spectroscopy Measurements, Phys. Rev. B **78** (2008) 020406(R)–1-4, *selected for an Editor's Choice.*

[3] Y. Takeda, M. Kobayashi, T. Okane, T. Ohkochi, J. Okamoto, Y. Saitoh, K. Kobayashi, H. Yamagami, A. Fujimori, A. Tanaka, J. Okabayashi, M. Oshima, S. Ohya, P.N. Hai and M. Tanaka: Nature of Magnetic Coupling between Mn Ions in As-Grown $Ga_{1-x}Mn_xAs$ Studied by X-Ray Magnetic Circular Dichroism, Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 247202–1-4.

15 Uchida Group

Research Subjects: High-T_c superconductivity

Member:Uchida Shin-ichi (professor), Kojima Kenji M. (research associate)

1. Project and Research Goal

The striking features of low-dimensional electronic systems with strong correlations are the "fractionalization" of an electron and the "self-organization" of electrons to form nanoscale orders. In one dimension (1D), an electron is fractionalized into two separate quantum-mechanical particles, one containing its charge (holon) and the other its spin (spinon). In two dimensions (2D) strongly correlated electrons tend to form spin/charge stripe order.

Our study focuses on 1D and 2D copper oxides with various configurations of the corner-sharing CuO_4 squares. The common characteristics of such configurations are the quenching of the orbital degree of freedom due to degraded crystal symmetry and the extremely large exchange interaction (J) between neighboring Cu spins due to large $d-p$ overlap (arising from 180 °Cu-O-Cu bonds) as well as to the small charge-transfer energy. The quenching of orbitals tends to make the holon and spinon to be well-defined excitations in 1D with quantum-mechanical character, and the extremely large J is one of the factors that give rise to superconductivity with unprecedentedly high Tc as well as the charge/spin stripe order in 2D cuprates. The experimental researches of our laboratory are based upon successful synthesis of high quality single crystals of cuprate materials with well-controlled doping concentrations which surpasses any laboratory/institute in the world. This enables us to make systematic and quantitative study of the charge/spin dynamics by the transport and optical measurements on the strongly anisotropic systems. We also perform quite effective and highly productive collaboration with world-leading research groups in the synchrotron-radiation, μSR and neutron facilities, and STM/STS to reveal electronic structure/phenomena of cuprates in real- and momentum-space.

2. Accomplishment

(1) Ladder Cuprate

Significant progress has been made in the experimental study of a hole-doped two-leg ladder system $Sr_{14-x}Ca_xCu_{24}O_{41}$ and undoped $La_6Ca_8Cu_{24}O_{41}$:

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, $Sr_{14}Cu_{24}O_{41}$, compound in the inelastic light scattering (with G. Blumberg, Bell Lab.), microwave and nonlinear conductivity (with A. Maeda and H. Kitano, U. of Tokyo), and inelastic X-ray scattering (with P. Abbamonte and G. A. Sawatzky).

4) In the undoped compound $La_6Ca_8Cu_{24}O_{41}$ spin thermal conductivity is remarkably enhanced to the level of silver metal along the ladder-leg direction due to the presence of a spin gap and to a ballistic-like heat transport characteristic of 1D.

(2) Observation of Two Gaps, Pseudogap and Superconducting Gap, in Underdoped High-T_c Cuprates.

The most important and mysterious feature which distinguishes cuprate from conventional superconductors is the existence of " pseudogap " in the normal state which has the same d-wave symmetry as the superconducting gap does. We employed c-axis optical spectrum of $Yba_2Cu_3O_{6.8}$ as a suitable probe for exploring gaps with d-wave symmetry to investigate the inter-relationship between two gaps. We find that the two gaps are distinct in energy scale and they coexist in the superconducting state, suggesting that the pseudogap is not merely a gap associated with pairs without phase coherence, but it might originate from a new state of matter which competed with d-wave superconductivity.

(3) Nanoscale Electronic Phenomena in the High-T_c Superconducting State

The STM/STS collaboration with J. C. Davis' group in Cornell Univ. is discovering numerous unexpected nanoscale phenomena, spatial modulation of the electronic state (local density of states, LDOS), in the superconducting CuO_2 planes using STM with sub-Å resolution and unprecedentedly high stability. These include (a) "+" or "×" shaped quasiparticle (QP) clouds around an individual non-magnetic Zn (magnetic Ni) impurity atom, (b) spatial variation (distribution) of the SC gap magnitude, (c) a "checkerboard" pattern of QP states with four unit cell periodicity around vortex cores, and (d) quantum interference of the QP. This year's highlights are as follows:

1) Granular structure of high-Tc superconductivity

The STM observation of "gap map" has been extended to various doping levels of $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$. 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.

16 Hasegawa Group

Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics

Members: Shuji HASEGAWA and Toru HIRAHARA

Topics in our research group are (1) electronic/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 on semiconductor surfaces and nano-scale phases. Peculiar atomic arrangements and surface electronic states, characteristic of the surface superstructures and ultra-thin films, on semiconductor surfaces, are our platforms for studying physics of atomic-scale low-dimensional systems by using ultrahigh vacuum experimental techniques such as electron diffraction, scanning electron microscopy, scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy, *in-situ* 4-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-4-point probes, and surface mageto-optical Kerr effect measurements. Main results in this year are as follows.

(1) Surface electronic transport: Kondo effect and RKKY interaction in surface-state conduction. Surface-state conductivity of topological insulators. Metal-insulator transitions, hopping conduction, and a Mott insulator in surface states. Quantitative evaluation of surface-state conductivity from Fermi surface mapping. Quasi-ballistic transport at a Fe-silicide nanowires.

(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 Pb, Bi, and Ag 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), Magneto-optical Kerr effect apparatus. Magneto-resistance with micro-four-point probes apparatus.

[1] K. He, T. Hirahara, T. Okuda, S. Hasegawa, A. Kakizaki, and I. Matsuda: *Spin-polarization of quantum well states in Ag films induced by Rashba effect at surface*, Physical Review Letters **101**, 107604 (Sep, 2008).

[2] H. Morikawa, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Absence of Charge-Density Waves on the Dense Pb/Ge(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ Surface*, Physical Review B **77**, 193310 (May 2008).

[3] T. Hirahara, T. Komorida, A. Sato, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, K. He, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Manipulating quantum-well states by surface alloying: Pb on ultrathin Ag films*, Physical Review B **78**, 035408 (Jul 2008).

[4] C. Liu, I. Matsuda, S. Yoshimoto, T. Kanagawa, and S. Hasegawa: *Electronic Transport of Au-Adsorbed Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Ag Surface: Metallic Conduction and Localization*, Physical Review B **78**, 035326 (Jul, 2008).

[5] N. Miyata, K. Horikoshi, T. Hirahara, S. Hasegawa, C. M. Wei, and I. Matsuda: *Electron Transport Property of Quantum-Well States in Ultrathin Pb (111) Films*, Physical Review B **78**, 245405 (Dec, 2008).

[6] M. D 'angelo, K. Takase, T. Hirahara, S. Hasegawa, and I. Matsuda: *Conductivity of the Si(111)7×7 dangling-bond state*, Physical Review B **79**, 035318 (Jan, 2009).

[7] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *Localization and Hopping Conduction at Glass and Crystal Phases of Monatomic Au Layers on Silicon Surface*, Physical Review B **79**, 085317 (Feb, 2009).

[8] T. Hirahara, K. Miyamoto, A. Kimura, Y. Niinuma, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, T. Nagao, I. Matsuda, S. Qiao, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, and S. Hasegawa: *Origin of the surface-state band-splitting in ultrathin Bi Flms: From a Rashba effect to a parity effect*, New Journal of Physics **10**, 083038 (Aug, 2008).

[9] Y. Kakefuda, K. Narita, T. Komeda, S. Yoshimoto, and S. Hasegawa: *Self-assembled Nanowire Arrays of Gold Nanoparticles*, Applied Physics Letters **93**, 163103 (Oct, 2008).

[10] C. Liu, I. Matsuda, T. Hirahara, S. Hasegawa, J. Okabayashi, S. Toyoda, and M. Oshima: *Band-bending inhomogeneity of Au adsorbed Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Ag evaluated with Si 2p core-level spectra*, Surface Science **602**, 3316 (Sep, 2008).

[11] Y. Nakayama, I. Matsuda, S. Hasegawa, and M. Ichikawa: *Growth, Quantum confinement and Transport mechanisms of Ge nanodot arrays formed on a SiO_2 monolayer* (Review), e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **6**, 191 (Aug, 2008).

17 Fukuyama Group

Research Subjects: Low Temperature Physics (Experimental):

Two-dimensional (2D) quantum fluids and solids with strong correlations and frustration,

Low temperature scanning tunneling microscopy and spectroscopy of 2D electron systems (2DES) and exotic superconductors.

Member: Hiroshi Fukuyama, Tomohiro Matsui

Our current interests are (i) new quantum phases with strong correlations and frustration in 2D ^{3}He, (ii) novel phenomena in Graphene, a single sheet of graphite, and (iii) Kosterlitz-Thouless transitions in 2D superconductors. We are investigating these phenomena at ultra-low temperatures down to 50 μK, 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. **Novel quantum phases in 2D ^{3}He:**

   We are studying novel quantum phases in the second layer ^{3}He adsorbed on graphite preplated with monolayer ^{4}He. ^{3}He atoms localize at a commensurate 4/7 density ($\rho_{4/7} = 6.8\mathrm{nm}^{-2}$) of the first layer. We made heat capacity measurements of this system in a wide temperature range of $0.3 < T < 80$ mK revealed various quantum phases exist at densities below and above $\rho_{4/7}$.

(a) **Various quantum phases at densities higher than the commensurate 4/7 phase**
In a relative density region of $1 \leq n \equiv \rho/\rho_{4/7} \leq 1.2$, newly added atoms form a degenerated self-bound Fermi liquid (puddles) of a density of 1.2 nm^{-2} in the third layer. This is in clear contrast to the absence of the gas-liquid transition in the first- and second-layers on graphite. It is followed by a first-order phase transition between the 4/7 phase and a high-density ferromagnetic incommensurate phase in the second layer. The coexistence region is from $n = 1.2$ to 1.4. Above $n = 1.4$, the pure incommensurate phase appears where the multiple-spin exchanges up to the six-spin exchange compete each other resulting in the frustrated ferromagnetism. We found that the three spin exchange tends to dominate with increasing density from quantitative analyses of the measured temperature dependences of heat capacities.

(b) **Zero-point vacancy phase at densities lower than the 4/7 phase**
At densities just below the 4/7 phase, on the other hand, the zero-point vacancies (ZPVs) are supposed to exist from our previous heat-capacity measurements. The ZPVs are atomic vacancies which exist stably and hop on crystalline lattice cites even at absolute zero. The spin-spin relaxation time (T_2) in this phase were measured with the spin-echo technique of pulsed-NMR in a longer time span than our previous measurements. We found that the echo amplitude decays exponentially with two time constants. Our analysis shows that such a non-single-exponential decay is not due to macroscopic two-phase coexistence between the 4/7 phase and a low density fluid phase but to the mosaic angle spread of the graphite substrate.

2. **STM/STS studies of graphene:**

Graphene is a monatomic sheet of carbon atoms in which the atoms are densely packed in a honeycomb lattice. The charge carriers behave as massless Dirac fermions due to the unique linear dispersion relation, which results in unusual electronic properties such as anomalous integer quantum-Hall-effect and weak anti-localization, *etc.*

We are studying two kinds of graphene samples, i.e., exfoliated graphene and epitaxial graphene. The exfoliated graphene is fabricated by exfoliating a graphite crystal on an insulating SiO_2 substrate, while the epitaxial graphene is epitaxially grown on an SiC surface.

(a) **STM studies of exfoliated graphene**
We fubricated a micro-structure of evaporated Au film around an exfoliated graphene sample to guide an STM tip successfully to the sample surface. Thanks to such a micro-structure, we succeeded in obtaining atomically resolved STM images of graphene with either hexagonal or triangular lattices in the ambient condition. However, it was found that we need to develop more careful cleaning process of resist residue after the micro-fabrication to obtain more reliable STM images.

(b) **LEED and STM studies of epitaxial graphene on SiC**
Graphene samples are fubricated on an Si-*rich* phase of 6H-SiC substrate by successive falsh-annealing up to 1600 K. LEED measurements of the resultant sample surfaces show clear diffraction spots of a few layers of graphene together with those of SiC, which indicates that flat graphene layers have been grown on SiC to some macroscopic extent. In fact, graphene regions with the $6\sqrt{3} \times 6\sqrt{3}$ structure, which is known to be characteristic of a few layer graphene on SiC, are observed at places with STM at $T = 79$ K .

18 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. Strongly correlated two dimensional systems:
   We performed systematic magnetotransport measurements on a very high mobility Si 2DES in the vicinity of the coincidence of the spin-up and spin-down LLs with $n = 0$ and 1, respectively.

   At low temperatures, the resistance peak having a strong anisotropy shows large hysteresis which is attributed to the Ising quantum Hall ferromagnetism. The peak is split into two peaks in the paramagnetic regime. A mean field calculation for the peak positions indicates that electron scattering is strong when the pseudospin is partially polarized. We also study the current-voltage characteristics which exhibit a wide voltage plateau. [Toyama *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 016805 (2008).]

   We study magnetotransport in a high mobility Si two-dimensional electron system by *in situ* tilting of the sample relative to the magnetic field. A pronounced dip in the longitudinal resistivity is observed during the Landau level crossing process for noninteger filling factors. Together with a Hall resistivity change which exhibits the particle-hole symmetry, this indicates that electrons or holes in the relevant Landau levels become localized at the coincidence where the pseudospin-unpolarized state is expected to be stable.

2. 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.

   Low-temperature Hall measurements have been performed on two-dimensional electron gases (2DEGs) induced by deposition of Cs or Na on *in situ* cleaved surfaces of *p*-type InAs. The surface donor level, at which the Fermi energy of the 2DEG is pinned, is calculated from the observed saturation surface electron density using a surface potential determined self-consistently. The results are compared to those of previous photoelectron spectroscopy measurements. [Minowa *et al.*, Phys. Rev. B **77**, 233301 (2008).]

   Magnetotransport measurements have been performed on two-dimensional electron gases formed at InAs(110) surfaces covered with a submonolayer of Fe. Hysteresis in the magnetoresistance, a difference in remanent magnetoresistance between zero-field-cooling procedures and field-cooling procedures, and logarithmic time-dependent relaxation after magnetic field sweep are clearly observed at 1.7 K for a coverage of 0.42 monolayer. These features are associated with spin-glass ordering in the Fe film. [Mochizuki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 267204 (2008).]

19 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: 1)optically excited high density electron-hole systems in semiconductors, low dimensional systems such as 2) carbon nanotubes, 3) quasi-1D organic conductors, 4)superconductors, and 5) multi-ferroic materials. In order to investigate the role of electron correlations in the excited state as well as the ground state, we are focusing on the low energy electromagnetic responses in terahertz(THz) (1THz∼4meV) frequency range where quasi-particle excitations and various collective excitations exist. A novel experimental technique such as THz Faraday rotation spectroscopy is also developed to study the optical responses of quantum Hall system and also anomalous Hall effect in ferromagnets.The research summary in this year is as follows.

1. **High density electron-hole system :**

   Photo-excited electron-hole(e-h) system in semiconductors exhibits various phases depending on their density and temperature, such as exciton gas, e-h plasma, e-h droplets(EHD). At low temperature,

excitonic Bose Einstein condensation, or e-h BCS state is anticipated to exist. To investigate such variety of phases in e-h systems, we have developed a broadband terahertz spectroscopy technique which can directly access to the many-body electron correlation with ps temporal resolution. We applied the scheme to Si, the most well-known material which is also attractive for the study of high density e-h phenomena due to relatively long carrier lifetime and also due to the existence of electron-hole droplets. The formation dynamics of excitons is revealed by the 1s-2p Lyman transition of exciton that exist at 3THz. Formation of EHD is also studied through the observation of surface plasmon resonance(SPR) that exists in THz frequency range. The spatial condensation mechanism of EHD shows the spinodal decomposition behavior.

2. **Quasi-1D organic conductor :**

   We have studied the optical responses of quasi-1D organic conductor $(TMTSF)_2PF_6$ which shows metal-insulator transition below 12K accompanied by spin density wave formation. Since the single particle excitation energy in SDW phase is located in terahertz frequency range, it is possible to investigate the dynamics of SDW phase under photo-excitation by terahertz time domain spectroscopy. We have developed a reflection type optical-pump and THz-probe measurement system with diffraction-limitted spatial resolution, which allows one to measure small samples less than 1mm that is typical for organic conductor single crystals. After the ultrafast optical pulse excitation, a clear SDW gap collapse and revival is observed, of which relaxation time shows a slowing down behavior towards the transition temperature.

3. **THz Hall effect in ferromagnets and quantum Hall system**

   Transmission type terahertz polarization spectroscopy setup combined with a 7T superconductor magnet was developed to investigate the complex diagonal and off diagonal conductivity of materials. By using the developed system, we have measured the THz-Faraday rotation signal a perovskite itinerant ferromagnet, $SrRuO_3$ to reveal the origin of anomalous Hall effect. The results are interpreted in terms of Berry phase curvature of Bloch electron. The technique is also applied to 2 DEG system of a GaAs/AlGaAs heterostructure to study the quantum Hall effect.

References

[1] S. Watanabe, R. Kondo, S. Kagoshima, and R. Shimano: Spin-density-wave gap in $(TMTSF)_2PF_6$ probed by reflection-type terahertz time domain spectroscopy, Phys. Stat. Solidi(b) **245**, 2688 (2008)

[2] T. Suzuki and R. Shimano: Formation dynamics of excitons and electron-hole droplets in Si probed by THz time domain spectroscopy. Proceedings of International Conference of Quantum Electronics(IQEC)2009 (in press).

[3] Y. Takahashi, N. Kida, Y. Yamasaki, J. Fujioka, T. Arima, R. Shimano, S. Miyahara, M. Mochizuki, N. Furukawa, and Y. Tokura: Evidence for an electric dipole active continuum band of spin excitations in multiferroic $TbMnO_3$,Phys. Rev. Lett.**101**, 187201 (2008).

[4] N. Kida, Y. Ikebe, Y. Takahashi, J. P. He, Y. Kaneko, Y.Yamasaki, R. Shimano, T. Arima, N. Nagaosa and Y. Tokura: Electrically driven spin excitation in a ferroelectric magnet $DyMnO_3$, Phys. Rev. B**78**, 104414 (2008).

20 Theoretical Astrophysics Group

Research Subjects: Particle Astrophysics, Relativistic Astrophysics, Physics of Supernovae and High Density Matter, Observational Cosmology

Member: Katsuhiko Sato, 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; we therefore place particular emphasis on the following three areas of research - “Physics of the Early Universe”, “Observational Cosmology”, and “Paricle and Nuclear Astrophysics”. Let us delve into the specifics of these areas below.

The understanding of the very early universe saw a sort of renaissance in 1980's by applying the ideas of particle physics around the epoch close to the Planck time, of which the prime example is the inflationary universe scenario. On the basis of such recent development, "Physics of the Early Universe" aims at describing the birth of the universe within the language of physics. Our group activities include inflationary universe models, cosmological phase-transition and topological defects, big-bang nucleosynthesis, the cosmic no-hair conjecture and the fundamental problem of general relativity.

"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.

"Particle and Nuclear Astrophysics" explores the interfaces between particle physics, nuclear physics, and astrophysics. We place particular attention on the physics of supernovae. This includes a rich variety of micro- and macro-physics, for example, neutrino transport, equation of state of high density matter, r-process nucleosynthesis, convective instability, fast rotation of a stellar core, strong magnetic field, gravitational radiation, and so on. In particular, the mechanism of the Type II supernovae itself has not been properly explained for more than 40 years. It is, therefore, important to make clear the physics of supernova phenomena not only for astrophysics but also for other fields of elementary physics. We are currently working on the multi-dimensional aspects of supernovae such as rotating core collapse, asymmetric neutrino emission, convective energy transfer near the neutrino sphere, possibility of r-process nucleosynthesis in the hot bubble region, and gravitational radiation from an asymmetrically bouncing core. Additionally, we have also recently been working on the effects of magnetic fields and those of nuclear structural transitions on the explosion mechanism.

Let us summarize this report by presenting recent titles of the doctor and master theses in our group;
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 planetrary systems – perturbative approach and application to the detection of planetary rings
- Stability of flux compactifications and de Sitter thermodynamics
- Study of core-collapse supernovae in special relativistic magnetohydrodynamics
- Spectroscopic Studies of Transiting Planetary Systems
- The relation of the Galactic extinction map to the surface number density of galaxies
- Brane Inflation in String Theory

2006

- Numerical studies on cosmological perturbations in braneworld

- Inflationary braneworld probed with primordial black holes
- Galaxy Biasing and Higher-Order Statistics
- Probing circular polarization of Gravitational Wave Background with Cosmic Microwave Background Anisotropy
- Gravitational Collapse of Population III Stars

2005

- Brane gravity and dynamical stability in warped flux compactification
- Neutrino Probes of Galactic and Cosmological Supernovae
- Detectability of cosmic dark baryons through high-resolution spectroscopy in soft X-ray band
- Propagation of Ultra-High Energy Cosmic Rays in Cosmic Magnetic Fields
- The study of nuclear pasta investigated by Quantum Molecular Dynamics

2004

- Strong Gravitational Lenses in a Cold Dark Matter Universe
- Effect of Rotation and Magnetic Field on the Explosion Mechanism and Gravitational Wave in Core-Collapse Supernovae
- "Bulk Fields in Braneworld"
- "Gravitational collapse and gravitational wave in the brane-world"
- Magnetohydrodynamical Simulation of Core-Collapse Supernovae
- A Search for the Atmospheric Absorption in the Transiting Extrasolar Planet HD209458b with Subaru HDS
- Baryogenesis and Inhomogeneous Big Bang Nucleosynthesis
- The large-scale structure of SDSS quasars and its cosmological implication

2003

- Non-Gravitational Heating of Galaxy Clusters in a Hierarchical Universe
- Discoveries of Gravitationally Lensed Quasars from the Sloan Digital Sky Survey
- One, Two, Three – measuring evolved large scale structure of the Universe
- Higher-order Statistics as a probe of Non-Gaussianity in Large Scale Structure
- Primordial black holes as an imprint of the brane Universe
- Probing the Extra Dimensions with Gravitational Wave Background of Cosmological Origin

21 Murao Group

Research Subjects: Quantum Information Theory

Member: Mio Murao, Peter Turner

Quantum information processing seeks to perform tasks which are impossible or not effective with the use of conventional classical information, by using quantum information described by quantum mechanical states. Quantum computation, quantum cryptography, and quantum communication have been proposed and this new field of quantum information processing has developed rapidly especially over 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:

- Remote extraction and destruction of asymmetrically spread qubit information [1]
- Thermal robustness of multipartite entanglement of 1-D spin 1/2 XY model [2,3]
- Group theoretical study of quantum reference frames [4,5,6,7]
- Authorized quantum computation [8]
- Geometric analysis of multipartite entanglement of symmetric states
- Nonlocality of Bipartite Unitary Operations
- Reference-frame-free communication with quantum spins
- Operational indistinguishability in quantum tomography
- Maximum-likelihood and Bayesian reconstruction schemes in quantum measurement tomography
- Altering descriptions of unitaries in mesurement-based quantum computation

Please refer our webpage: http://www.eve.phys.s.u-tokyo.ac.jp/indexe.htm

References

1. Y. Ogata and M. Murao, *Remote extraction and destruction of spread qubit information*, Phys. Rev. A **77**, 062340 (2008)
2. Y. Nakata, D. Markham, and M. Murao, *Thermal enhancement of entanglement sensitivity to the phase diagram in XY model*, Int. J. Quantum Information **6**, 751-757 (2008)
3. Y. Nakata, D. Markham, and M. Murao, *Thermal robustness of multipartite entanglement of the 1-D spin 1/2 XY model*, Phys. Rev. A **79**, 042313 (2009)
4. R. B. A. Adamson, P. S Turner, M. W. Mitchell, A. M. Steinberg, *Detecting hidden differences via permutation symmetries*, Phys. Rev. A. **78**, 033832 (2008)
5. Z. Shaterzadeh Yazdi, P. S. Turner, B. C. Sanders, *SU(1,1) symmetry of multimode squeezed states*, J. Phys. A: Math. Theor. **41**, 055309 (2008)
6. S. D. Bartlett, T. Rudolph, R. W. Spekkens, P. S. Turner, *Quantum communication using a bounded-size quantum reference frame*, arXiv:0812.5040 (quant-ph)
7. G. Gour, B. C. Sanders, R. W. Spekkens, P. S. Turner, *Overcoming time reversal superselection: reference frames and resources*, arXiv:0811.3980 (quant-ph)
8. Y. Tanaka and M. Murao, *Authorized quantum computation*, arXiv:0903.2088 (quant-ph)

22 Ueda Group

Research Subjects: Bose-Einstein condensation, Fermionic superfluidity, cold molecules, mesurement theory, quantum information, quantum control

Member: Masahito Ueda and Yuki Kawaguchi

We study theory of ultracold atoms and quantum information. In the former, we study Bose-Einstein condensation and Fermi superfluidity. In the latter, we study quantum information, quantum measurement, and are exploring information thermodynamics which investigates the thermodynamic energy cost on quantum information processing.

22.1 Knots in a Spinor Bose-Einstein Condensate

Topological objects are conjectured to play important roles in the formation of our universe. Among them, knot solitons have recently aroused the interest of cosmologists since Faddeev and Niemi suggested that knots might exist as stable solitons in a three-dimensional classical field theory. Knots are different from other familiar topological defects, such as vortices, monopoles, and skyrmions, in that knots are characterized by a linking number, or a Hopf invariant, while the others are characterized by winding numbers. Though there are many theoretical studies on knots, little is known about how to create such knots experimentally. In Ref. [1], we have shown that atomic BECs offer an ideal testing ground for investigating the dynamic creation and destruction of knots. In particular, we have shown that knots of spin textures can be created in the polar phase of a spin-1 BEC by using conventional magnetic field configurations, and proposed possible experimental schemes for generation and probe of knots.

22.2 Heteronuclear Fermionic Superfluids with Spin Degrees of Freedom

We present a theory of spinor superfluidity in a two-species heteronuclear ultracold fermionic atomic gas consisting of arbitrary half-integer spin and spin one-half atoms. In particular, we focus on the magnetism of the superfluid phase and determine the possible phases in the absence of a magnetic field. Our work demonstrates similarities between heteronuclear fermionic superfluids and spinor Bose-Einstein condensates at the mean-field level. Possible experimental situations are discussed [2].

22.3 d-Wave Collapse and Explosion of a Dipolar Bose-Einstein Condensate

We investigate the collapse dynamics of a dipolar condensate of ^{52}Cr atoms when the s-wave scattering length characterizing the contact interaction is reduced below a critical value. A complex dynamics, involving an anisotropic, d-wave symmetric explosion of the condensate, is observed. The atom number decreases abruptly during the collapse. We find good agreement between our experimental results and those of a numerical simulation of the three-dimensional Gross-Pitaevskii equation, including contact and dipolar interactions as well as three-body losses. The simulation indicates that the collapse induces the formation of two vortex rings with opposite circulations [3].

22.4 Miminal Energy Cost for Thermodynamic Information Processing

One of the pioneering work which related information to thermodynamics is Landauer's principle. It states that, in erasing H nat ($= H/\ln 2$ bit) of the Shannon information from a memory, at least $k_{\rm B}TH$ of heat should be dissipated into the environment with the same amount of work being performed on the memory. However, the proof of the Landauer's principle in terms of statistical mechanics was given in 2000, and the proof is valid only for symmetric memories. We have derived the minimal work that needs to be performed on a memory for information erasure. The lower bound of the work $W_{\rm eras}$ for the erasure is given by $W_{\rm eras} \geq k_{\rm B}TH - \Delta F$, where $-\Delta F$ is the free-energy difference of the memory during the erasure.

For the special case of the symmetric memory (i.e., $\Delta F = 0$), we obtain $W_{\rm eras} \geq k_{\rm B}TH$ in agreement with the Landauer's principle. However, when $\Delta F \neq 0$, the information erasure with $W_{\rm eras} < k_{\rm B}TH$, in particular with $W_{\rm eras} = 0$, is possible. We have also constructed a model in which the Landauer's principle for information erasure fails for an asymmetric memory. Moreover, we have derived the fundamental lower bound of the work $W_{\rm meas}$ for measurement: $W_{\rm meas} \geq -k_{\rm B}T(H-I)+\Delta F$, where I is the mutual information that is obtained by the memory during the measurement. The mutual information satisfies $0 \leq I \leq H$. For the special case of the error-free measurement ($I = H$) and the symmetric memory ($\Delta F = 0$), this inequality reduces to $W_{\rm meas} \geq 0$. In our inequalities, the information contents I and H and thermodynamic variables are treated on an equal footing. Our results are consistent with the second law of thermodynamics, and constitute a informatic generalization of the second law.

[1] Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda, *Knots in a Spinor Bose-Einstein Condensate,* Phys. Rev. Lett. **100**, 180403 (May 2008); Erratum: Phys. Rev. Lett. **101**, 029902(E) (Jul. 2008).

[2] D. B. M. Dickerscheid, Y. Kawaguchi, and M. Ueda, *Heteronuclear fermionic superfluids with spin degrees of freedom,* Phys. Rev. A **77**, 053605 (May 2008).

[3] T. Lahaye, J. Metz, B. Fröhlich, T. Koch, M. Meister, A. Griesmaier, T. Pfau, H. Saito, Y. Kawaguchi, and M. Ueda, *d-Wave Collapse and Explosion of a Dipolar Bose-Einstein Condensate,* Phys. Rev. Lett. **101**, 080401 (Aug. 2008). [See also viewpoint commentary Physics 1, 13 (2008) by M. Lewenstein]

23 Makishima Group & Nakazawa Group

Research Subjects: High Energy Astrophysics with Energetic Photons using Scientific Satellites, Development of Cosmic X-Ray/γ-Ray Instruments

Member: Kazuo Makishima, Kazuhiro Nakazawa

We study cosmic and related high-energy phenomena in the X-ray and γ-ray frequencies, mainly using scientific satellites.

The *Suzaku* and *Fermi* satellites: We utilize the X-ray satellite *Suzaku* and the gamma-ray mission *Fermi* [7], launched in July 2005 and June 2008, respectively. For the former, we developed the Hard X-ray Detector (HXD), working in 10–600 keV, in collaboration with several domestic and US groups [2].

Physics of Compact Objects: Mass accretion onto compact objects provides our favorite research subject. Utilizing wide-band *Suzaku* spectra, we are constructing a unified "cool disk plus hot corona" view of mass-accreting black holes, including stellar-mass ones [1], ULX objects [3], and active galactic nuclei [4]. Our *Suzaku* observations of several "magnetars" have revealed unusual hard X-ray components, extending to $\sim$ 100 keV with very flat spectra [6]. This phenomenon is expected to provide a valuable probe into physics under extremely strong magnetic fields, exceeding the critical field (4.4×10^{13} G) at which the Landau-level separation for electrons becomes equal to $m_{\rm e}c^2$.

Plasma Heating and Particle Acceleration: The universe is full of processes of plasma heating and particle acceleration. The extended hard X-ray emission, which we detected from the Galactic center region, suggests the presence of ubiquitous particle acceleration in the interstellar space. Our search for non-thermal emission from merging clusters of galaxies have led to an unexpected discovery of unusually hot thermal emission [5]. *Fermi* observations of molecular clouds revealed gamma-ray emission arising from the decay of π^0 particles, which are produced by cosmic-ray hadrons. The *Suzaku* HXD has been shown to have a potential to detect neutrons produced in large solar flares.

Particle Acceleration in Thunderclouds: From thunderclouds along the Japan Sea and at high mountains, we detected nearly ten events of gamma-ray showers. Some of them last only for < 1 second, while others for 1–2 minutes. The gamma-ray spectrum extends to 10 MeV, and is sometimes accompanied by electrons. Intense electric fields in thunderclouds are considered to accelerate electrons to relativistic energies, which then emit gamma-rays.

Future Instrumentation: In collaboration with many domestic and foreign groups, we are developing a successor to *Suzaku*, *ASTRO-H* (previously called *NeXT*). Scheduled for launch in 2013, it will carry out hard X-ray imaging observations and high-resolution X-ray spectroscopy. Our effort includes the development of "SpaceWire" technology, large BGO scintillators, and double-sided Si-strip detectors.

1. Makishima, K., Takahashi, H., Yamada, S., Done, C., Kubota, A., Dotani, T., Ebisawa, K., Itoh, T., Kitamoto, S., Negoro, H., Ueda, Y., & Yamaoka, K.: "Suzaku Results on Cygnus X-1 in the Low/Hard State", *Publ. Astr. Soc. Japan* **60**, 585-604 (2008)
2. Fukazawa, Y., Mizuno, T., Watanabe, S., Kokubun, M., (13 co-authors), Enoto, T., Kitaguchi, T., Makishima, K., Nakazawa, K., Uehara, Y., Yamada, S., Yuasa, T., (6 co-authors): "Modeling Reproducibility of Suzaku HXD PIN/GSO Background", *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, S17-S33 (2009)
3. Miyawaki, R., Makishima, K., Yamada, S., Gandhi, P., Mizuno, T., Kubota, A., Tsuru, T. G., & Matsumoto, H.: "Suzaku Observations of M 82 X-1 : Detection of a Curved Hard X-Ray Spectrum", *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, S263-S278 (2009)
4. Yamada S., Itoh T., Makishima K., & Nakazawa K.: "Suzaku Results on the Obscured Low-Luminosity Active Galactic Nucleus in NGC 4258", *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 309-319 (2009)
5. Nakazawa, K., Sarazin, C. L., Kawaharada, M., Kitaguchi, T., Okuyama, S., & Makishima, K., (7 co-authors): "Hard X-ray Properties of the Merging Cluster Abell 3667 as Observed with Suzaku", *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 339-355 (2009)
6. Enoto, T., (7 co-authors), Makishima, K., Mereghetti, S., Murakami, H., Nakazawa, K., Sakamoto, (7 co-authors): "Suzaku Observation of the New Soft Gamma Repeater SGR 0501+4516 in Outburst", *Astrophys. J.* **693**, L122-L126 (2009)
7. Abdo, A.A., (118 co-authors), Okumura, A., (65 co-authors): "The Fermi Gamma-Ray Space Telescope Discovers the Pulsar in the Young Supernova Remnant CTA 1", *Science*, **322**, 1218-1221 (2009)

24 Takase Group

Research Subjects: High Temperature Plasma Physics Experiments, Spherical Tokamak, 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 a high beta plasma using a variety of approaches.

Formation, heating and sustainment of the TST-2 spherical tokamak plasma

It is crucially important for ST to develop a scenario of plasma formation, heating and sustainment without the use of the central solenoid (CS). The physics of noninductive plasma initiation by RF power is being investigated on TST-2. Plasma is initiated and a small plasma current is formed by injection of microwave power at 2.45 GHz, which is resonant with electron cyclotron gyration. Once the plasma current reaches a threshold level, closed flux surfaces are formed spontaneously and the plasma current increases abruptly (current jump). Sustainment of the plasma current by radio-frequency power at 21 MHz was also demonstrated for the first time. Plasma heating by the high harmonic fast wave (HHFW) at 21 MHz is being investigated. A degradation of the heating efficiency was observed when a nonlinear process known as parametric decay was observed. The probes far from the exciting antenna detected stronger pump wave and broader frequency spectrum than probes near the antenna. The high beta plasma produced in ST is highly autonomous. Spontaneous deformation of the plasma by an instability and subsequent recovery are observed. This process involves nonlinear coupling of multiple modes leading to reconnection of magnetic field lines, and is called the internal reconnection event (IRE).

Formation of Ultra-High Beta Plasma by Plasma Merging

A new ST device, UTST, aiming at formation of ultra-high beta plasma by plasma merging, is now in operation. Two ST plasmas are formed by induction from external coils. Strong ion heating due to magnetic reconnection is expected to form one ST plasma with very high beta (30–50%). It is challenge to maintain the plasma in such a state for long enough time (exceeding the energy confinement time) after reconnection is over. This is planned to be accomplished by innovative methods of heating and current drive using RF waves (such as the HHFW) and neutral beam injection.

Collaborations

Collaborative experiments are being carried out on the JT-60U tokamak at Japan Atomic Energy Agency (JAEA). Plasma current sustainment by the bootstrap current, driven spontaneously by the pressure gradient, was demonstrated for the first time. Collaborations with larger ST devices NSTX (USA) and MAST (UK), as well as a high magnetic field tokamak device Alcator C-Mod (USA) are also being carried out. Experiments and data analysis focusing on the IRE were performed on MAST (Culham Lab., UK). The poloidal structure of the modes obtained from the three dimensional filamentary model showed coupling of multiple modes and suggested local deformation of the plasma which leads to collapse through magnetic reconnection. In a collaboration with Kyushu University and National Institute for Fusion Science, parametric-modulational interaction between the drift-wave fluctuation (7–8 kHz) and the azimuthally-symmetric sheared radial electric field structure (∼0.4 kHz) was observed in a cylindrical laboratory plasma. Bispectral analysis showed that nonlinear energy transfers from the drift wave to the sheared radial electric field occur.

25 Tsubono Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Gravitational Wave, Laser Interferometer

Member: Kimio TSUBONO and Masaki ANDO

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. Now the detection of the gravitational waves is one of the biggest challenges in the field of physics and astronomy.

TAMA300 is a 300-m baseline laser interferometric gravitational wave detector constructed in Mitaka. We started the operation of the detector in 1999. The achieved sensitivity, $h \sim 3 \times 10^{-21}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ at 700Hz to 1.5kHz, is sufficient to catch possible gravitational wave events in our galaxy. We can operate the detector for over 24 hours stably and continuously, and have accumulated over 3,000 hours data. We are now analyzing the obtained data searching for the gravitational waves from coalescing binaries, supernovae and pulsars. We are expecting to start the Japanese large-scale laser interferometer, LCGT, soon.

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 have just stared the theoretical and technical investigation for the realization of the DECIGO space detector.

We summarize the subjects being studied in our group.

- Ground based laser interferometric gravitational wave detectors
  - Current status of TAMA project
  - Study of the next-generation laser interferometer, LCGT
  - Caltech 40-m laser interferometer
- Space laser interferometer

  - Space laser interferometer, DECIGO
  - DECIGO pathfinder, DPF
  - Small size detector, SWIM

- Development of a gravitational wave detector using magnetic levitation
  - Gravitational wave detector using superconducting magnetic levitation
  - Experiments using permanent magnets

- Study of the precise measurements
  - Laser stabilization using optical fiber
  - Laser interferometer using squeezed light

references

[1] Masaki Ando, Seiji Kawamura, Shuichi Sato, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono, Akito Araya, Ikkoh Funaki, Kunihito Ioka, Nobuyuki Kanda, Shigenori Moriwaki, Mitsuru Musha, Kazuhiro Nakazawa, Kenji Numata, Shin-ichiro Sakai, Naoki Seto, Takeshi Takashima, Takahiro Tanaka, *et al.*, DECIGO pathfinder, Class. Quantum Grav. **26** (2009) 9 184013.

[2] Kakeru Takahashi, Masaki Ando and Kimio Tsubono, Stabilization of Laser Intensity and Frequency Using Optical Fiber, Journal of Physics: Conference Series **122** (2008) 012016.

26 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. Yusuke T. Maeda, Junya Inose, Miki Y. Matsuo, Suguru Iwaya, Masaki Sano, Ordered Patterns of Cell Shape and Orientational Correlation during Spontaneous Cell Migration, PLoS ONE 3 (11), e3734 (2008).
2. Takaaki Ishii, Yoshihiro Murayama, Atsuto Katano, Kosuke Maki, Kunihiro Kuwajima, Masaki Sano, Probing force-induced unfolding intermediates of a single staphylococcal nuclease molecule and the effect of ligand binding, Biochemical and Biophysical Research Communications 375, 586 (2008).
3. H.R. Jiang, H. Wada, N. Yoshinaga, and M. Sano, Manipulation of Colloids by Nonequilibrium Depletion Force in Temperature Gradient, Phys. Rev. Lett. (2009) (accepted).
4. T. Harada, A. Isomura, and K. Yoshikawa, Contraction-induced cluster formation in cardiac cell culture, Physica D, 237, 2787-2796 (2008).
5. T. Harada, Macroscopic expression connecting the rate of energy dissipation with the violation of the fluctuation response relation, Physical Review E, 79, 030106(R) (2009).
6. T. Harada, T. Yokogawa, T. Miyaguchi and H. Kori, Singular behavior of slow dynamics of single excitable cells, Biophysical Journal, 96, 255-267 (2009).
7. Hong-liu Yang, Kazumasa A. Takeuchi, Francesco Ginelli, Hugues Chaté, and Günter Radons: Hyperbolicity and the effective dimension of spatially extended dissipative systems, Physical Review Letters, 102, 074102 (2009).
8. Natsuhiko Yoshinaga: Folding and unfolding transition in a single semiflexible polymer, Phys. Rev. E, 77, 061805 (2008) .
9. Natsuhiko Yoshinaga, Efim Kats and Avraham Halperin: On the Adsorption of Two-State Polymers, Macromolecules, 41, 7744 (2008).

27 Yamamoto Group

Research Subjects: Submillimeter-wave and Terahertz Astronomy, Star and Planet Formation, Chemical Evolution of Interstellar Molecular Clouds, Development of Terahertz Detectors

Member: Satoshi Yamamoto and Nami Sakai

Molecular clouds are birthplaces of new stars and planetary systems, which are being studied extensively as an important target of astronomy and astrophysics. Although the main constituent of molecular clouds is a hydrogen molecule, various atoms and molecules also exist as minor components. The chemical composition of these minor species reflects formation and evolution of molecular clouds as well as star formation processes. It therefore tells us how a particular star has been formed. We are studying star formation processes from such a unique viewpoint.

Since the temperature of a molecular cloud is as low as 10 K, an only way to observe its physical structure and chemical composition is to observe the radio wave emitted from atoms and molecules. In particular, there exist a number of atomic and molecular lines in the millimeter to terahertz region, and we are observing them with various radio telescopes such as Nobeyama 45 m telescope and IRAM 30 m telescope.

We have recently established a new chemistry occurring in the vicinity of a newly born star, which is called Warm Carbon Chain Chemistry (WCCC). We have found high abundances of various carbon-chain molecules in a lukewarm region near the protostar in L1527. This is very surprising, because carbon-chain molecules are known to exist in the early stages of cold starless cores. In WCCC, carbon-chain molecules are produced by gas phase reactions of CH_4 which is evaporated from ice mantles. Existence of WCCC clearly indicates a chemical variety of low-mass star forming regions, which would probably reflect a variety of star formation.

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 diffusion cooled HEB mixer using Nb and the phonon cooling HEB mixer using NbTiN in our laboratory. Our NbTiN mixer shows the noise temperature of 1700 K at 1.5 THz, which is well comparable to the results reported by other groups. We are also studying bath-temperature dependence of the noise temperature in order to explore the mixing mechanism of the HEB mixer.

[1] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., "Abundant Carbon-Chain Molecules toward the Low-Mass Protostar IRAS04368+2557 in L1527 ", ApJ, 672, 371 (2008)

28 Sakai (Hirofumi) Group

Research Subjects: Experimental studies of quantum optics and atomic/molecular 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) Controlling quantum processes in atoms and molecules using shaped ultrafast laser fields. (3) High-intensity laser physics typified by high-order nonlinear processes (ex. multiphoton ionization and high-order harmonic generation). (4) Ultrafast phenomena in atoms and molecules in the attosecond time scale. A part of our recent research activities is as follows:

(1) Laser-field-free molecular orientation [1]

We demonstrate laser-field-free molecular orientation with the combination of a weak electrostatic field and an intense nonresonant rapidly turn-off laser field, which can be shaped with the plasma shutter technique. We use OCS molecules as a sample. Molecular orientation is adiabatically created in the rising part of the laser pulse, and it is found to revive at around the rotational period of an OCS molecule with the same degree of orientation as that at the peak of the laser pulse in the virtually laser-field-free condition. This accomplishment means that a new class of molecular sample has become available for various applications.

(2) Field-free molecular orientation by an intense nonresonant two-color laser field with a slow turn on and rapid turn off [2]

We propose a practical and versatile technique to achieve completely field-free molecular orientation with an intense, nonresonant, two-color laser field with a slow turn on and rapid turn off. The technique is based on the combined effects of both anisotropic polarizability interaction and anisotropic hyperpolarizability interaction. Using a FCN molecule as a sample, we show that the orientation achieved adiabatically by the peak of the laser pulse can be successfully revived at the rotational period of the molecule with the same degree of orientation. The crucial importance of the sufficiently slow turn on of the laser pulse is emphasized to achieve the highest possible degree of orientation.

(3) Retrieving photorecombination cross sections of atoms from high-order harmonic spectra [3]

We observe high-order harmonic spectra generated from a thin atomic medium, Ar, Kr, and Xe, by intense 800-nm and 1300-nm femtosecond pulses. A clear signature of a single-atom response is observed in the harmonic spectra. Especially in the case of Ar, a Cooper minimum, reflecting the electronic structure of the atom, is observed in the harmonic spectra. We successfully extract the photorecombination cross sections of the atoms in the field-free condition with the help of an accurate recolliding electron wave packet. The present protocol paves the way for exploring ultrafast imaging of molecular dynamics with attosecond resolution. This work is the collaboration with Drs. Toshihito Umegaki, Toru Morishita, and Shinichi Watanabe from University of Electro-Communications, and Dr. Anh-Thu Le from Kansas State University.

(4) Alignment dependence of the structural deformation of CO_2 molecules in an intense femtosecond laser field [4]

Alignment dependence of structural deformation in the production process of multiply charged CO_2 molecules in an intense femtosecond laser field has been revealed by using aligned sample molecules. Our properly ordered observations clarify that the structural change takes place in the charge state of CO_2^{2+}. The bending angle decreases monotonically from the maximum value of 24° with the laser polarization parallel to the molecular axis to the minimum value of 16° with the polarization perpendicular to the molecular axis. The alignment dependence is discussed in terms of the field-induced nonadiabatic transition between the lowest two adiabatic states formed by the coupling between the electronically excited and the ground states of CO_2^{2+} ions.

[1] A. Goban, S. Minemoto, and H. Sakai, Phys. Rev. Lett. **101**, 013001 (2008).

[2] M. Muramatsu, M. Hita, S. Minemoto, and H. Sakai, Phys. Rev. A **79**, 011403(R) (2009).

[3] S. Minemoto, T. Umegaki, Y. Oguchi, T. Morishita, A.-T. Le, S. Watanabe, and H. Sakai, Phys. Rev. A **78**, 061402(R) (2008).

[4] S. Minemoto, T. Kanai, and H. Sakai, Phys. Rev. A **77**, 041401(R) (2008).

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: Myosin, kinesin and dynein in in vitro and cells

Member: Hideo Higuchi and Motoshi Kaya

Motor proteins, myosin, kinesin, and dynein, play roles in cell motility, vesicle transport, mitosis, and muscle contraction. To understand the molecular mechanisms of the motility, an in vitro motility assay and methods for detecting single molecules of purified motor proteins were developed Single kinesin-1, Cytoplasmic dynein and myosin-V move processively using 8, 8 and 36 nm steps, respectively, at a maximum velocity of 900, 800 and 500 nm/s and produce stall forces of 8, 8 and 2.5 pN. The movements of kinesin, dynein, and myosin V and VI have been explained by a‘‘ hand-over-hand ’’model. Physiological conditions in the cell environment are very different from those in in vitro assays. Therefore, it is crucial to measure the molecular functions of motor proteins in cells. We observed the transport of vesicles including Quantum dots after the endocytosis in cells under a fluorescence microscope. The vesicles moved along the membrane by transferring actin filaments and were then rapidly transported toward the nucleus along microtubules. The movement of the vecicles transported by myosin VI interacting with actin filaments consisted of 29- and 15-nm steps. The vesicles were then transported toward or away from the nucleus with successive 8-nm steps. Kinesin and dynein showed an interesting behavior of “ Stop and Go ” whereby they came to be almost paused briefly and then moved once again . This is in direct contrast to the smoothly continuous movement of them in an in vitro assay. Maximum velocity of kinesin in cells was faster than that in the in vitro assay. These results suggest that intracellular movements of motors are different from those in the in vitro assay.

[1] Watanabe S., T.M. Watanabe, O. Sato, J. Awata, K. Homma, N. Umeki, H. Higuchi, R. Ikebe, and *M. Ikebe. Human Myosin Vc is a Low Duty Ratio Nonprocessive Motor. J. Biol. Chem. 283, 10581-10592 (2008)

[2] Kaya, M., Leonard, T.R. and Herzog, W. Premature deactivation of soleus during the propulsive phase of cat jumping. Journal of Royal Society Interface 5, 415-426 (2008)

[3] Sazaki, G., M.Okada, T. Matsui, T. Watanabe, H. Higuchi, K. Tsukamoto and K. Nakajima. Single-Molecule Visualization of Diffusion at the Solution-Crystal Interface. Crtstal Growth and Design. 8, 2024-2031 (2008)

[4] Yoo J., T. Kambara, K. Gonda, and *H. Higuchi. Intracellular imaging of targeted proteins labeled with Quantum Dots. Exp Cell Res. 314, 3563-3569 (2008)

[5] Takeda M., H. Tada, H Higuchi, Y. Kobayashi, M. Kobayashi, Y. Sakurai, T. Ishida and N. Ohuchi. In vivo single molecular imaging and sentinel node navigation by nanotechnology for molecular targeting drug-delivery systems and tailor-made medicine. Breast Cancer15:145-152 (2008)

[6] Mikhailenko, S. V., Oguchi, Y., Ohki T., Shimozawa, T., Olivares, A. O., De La Cruz, E. M. and Ishiwata, S. How load and the nucleotide state affect the actin filament binding mode of the molecular motor myosin V. J. Korean Phys. Soc. 53(3) 1726-1730(2008)

[7] Furuta A., T. Yagi, H. Yanagisawa, H. Higuchi, and *R. Kamiya. Systematic comparison of In vitro motile properties between chlamydomonas wild-type and mutant outer arm dyneins each lacking one of the three heavy chain. J. Biol. Chem. 284, 5927-5935 (2009).

[8] Shimozawa T. and Ishiwata S. Mechanical Distortion of Single Actin Filaments Induced by External Force: Detection by Fluorescence Imaging. Biophys J. 96(3):1036-44(2009)

III

2008年度 物理学教室全般に関する報告

1　学部講義概要

1.1　2年生 冬学期

1.1.1　電磁気学Ⅰ：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 ミンコフスキー時空

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、静磁場に対するマクスウェル方程式

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、磁場に対するマクスウェル方程式

5.8 4元ポテンシャルの導入

5.9 物質中の電場、磁場、マクスウェル方程式

5.10 電磁場テンソルの導入

1.1.2　解析力学・量子力学Ⅰ： 常行 真司

1. ニュートンの法則からラグランジュ形式へ

1.1 ニュートンの法則

1.2 ガリレイ変換

1.3 オイラー-ラグランジュ方程式

1.4 一般化座標と拘束条件

1.5 ダランベールの原理

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力

4.2 ローレンツ力

4.3 摩擦のある系

5. ハミルトン形式と正準変換

5.1 ルジャンドル変換

5.2 ハミルトニアンと位相空間

5.3 正準方程式

5.4 正準変換と母関数

5.5 正準変換の例

5.6 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. 量子論の誕生

6.1 黒体輻射とエネルギー量子の発見

6.2 光電効果

6.3 原子のエネルギー準位の量子化

6.4 コンプトン効果

6.5 ド・ブロイ仮説と物質波

7. シュレーディンガー方程式

7.1 弦を伝わる横波の波動方程式

7.2 固有振動とフーリエ級数展開

7.3 電子の波動方程式

7.4 ポテンシャルがある場合のシュレーディンガー方程式

7.5 波動関数の規格化と確率解釈

7.6 時間に依存しないシュレーディンガー方程式

7.7 物理量の期待値と演算子

7.8 ハイゼンベルクの不確定性関係

8. １次元量子系

8.1 無限に深い井戸型ポテンシャル

8.2 深さが有限な井戸型ポテンシャル中の束縛状態

8.3 ポテンシャル障壁：非束縛状態とトンネル効果

8.4 深さが有限な井戸型ポテンシャル中の非束縛状態

8.5 1 次元調和振動子

8.6 波動関数の時間発展

8.7 波動関数の規格化

9. 物理量と期待値

9.1 物理量と演算子

9.2 物理量の期待値

9.3 エルミート演算子

9.4 物理量の行列表現

9.5 交換関係

9.6 ブラとケット

1.1.3 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

1.1.4 物理実験学 ： 早野 龍五、岡本 徹

1. 序論

1.1 実験物理学者の心得

1.2 歴史的に重要な実験

2. 単位系と基本物理定数

2.1 単位系の定義

2.2 基本定数の測定法に関する概論

3. 実験の基礎

3.1 電気回路

3.2 試料作成技術

3.3 実験環境技術

4. 各種の計測法

4.1 電気伝導測定

4.2 磁気測定

4.3 放射線測定器

4.4 加速器

4.5 回路、コンピューターの利用

5. 誤差論

5.1 誤差の分類

5.2 誤差伝播の法則

5.3 最小二乗法

1.2 3年生 夏学期

1.2.1 電磁気学 II: 酒井広文

1. 電磁場の基本法則

1.1 電場と磁場

1.2 Coulomb の法則

1.3 Faraday の電磁誘導の法則

1.4 Ampère の法則

1.5 電荷保存則と変位電流

1.6 Maxwell の方程式

1.7 電磁ポテンシャルとゲージ変換

1.8 エネルギー保存則

1.9 運動量保存則

2. 静止物質中の Maxwell 方程式

2.1 静止物質中の電磁場

2.2 静止物質中の Maxwell 方程式

2.3 Ohm の法則

2.4 エネルギー保存則

3. 静電場

3.1 静電場の基本方程式

3.2 電荷分布が与えられたときの静電場

3.3 静電場の多重極展開

3.4 静電場のエネルギーと Thomson の定理

3.5 導体系の静電場と Green の相反定理

3.6 誘電体中の Gauss の法則

3.7 誘電体の境界条件

3.8 境界値問題

4. 定常電流

4.1 定常電流の基本方程式

4.2 定常電流による静磁場の決定

4.3 ベクトルポテンシャルの多重極展開

4.4 定常電流による磁場のエネルギー

4.5 定常電流の分布

4.6 Joule 熱最小の定理

5. 静磁場

5.1 静磁場の基本方程式

5.2 永久磁化

5.3 境界条件

6. 電磁波

6.1 真空中の電磁波の基本法則

6.2 真空中の電磁波 (平面波解)

6.3 誘電体中の電磁波

6.4 導体中の電磁波

1.2.2 量子力学 II ： 宮下精二

1. ３次元の量子力学と角運動量

1.1 中心場中の定常状態の Schrodinger 方程式の解

1.2 軌道角運動量と球面調和関数

1.3 角運動量の諸性質とスピン

1.4 角運動量の合成、LS 結合

1.5 水素原子

1.6 ３次元調和振動子

2. 近似法

2.1 縮退のない場合

2.2 縮退のある場合

2.3 時間による摂動

2.4 WKB 近似

2.5 量子ダイナミックス

1.2.3 現代実験物理学Ｉ ： 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；ＣＴ，リソグラフィ、宇宙X線

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. 多様な実験手法

3.1 顕微鏡

3.2 分光法

3.3 伝導

4. 磁場を利用する実験技術

4.1 磁場の発生

4.2 SQUID と MEG

4.3 NMR と MRI

5. 電磁波を利用する実験技術術

5.1 光源技術

5.2 ポンプ・プローブ分光

5.3 X 線散乱

6. 粒子線を利用する実験技術

6.1 電子線散乱

6.2 光電子分光

6.3 中性子散乱

6.4 μSR

1.3 3年生 夏学期

1.3.1 物理数学２： 松尾 泰

1. Fourier 変換を用いた偏微分方程式の解法

1.1 Fourier 級数と Fourier 変換の復習

1.2 偏微分方程式の分類

1.3 Fourier 変換を用いた解法

1.4 Green 関数

2. 直交多項式

2.1 直交多項式の分類

2.2 Rodrigues の公式

2.3 直交多項式が満たす微分方程式

2.4 母関数

2.5 漸化式

3. 回転群

3.1 Legendre 陪関数

3.2 球面調和関数

3.3 回転群の表現

3.4 スピノル表現と群の大域的構造

4. 超幾何関数

4.1 確定特異型微分方程式

4.2 超幾何関数

4.3 合流型超幾何関数

4.4 直交多項式との関係

5. Bessel 関数

5.1 Bessel 関数

5.2 直交性と漸化式

5.3 積分表示

5.4 球 Bessel 関数

1.3.2 統計力学Ｉ ： 佐野 雅己

1. 熱力学

1.1 熱力学法則

1.2 熱力学関数

2. 統計力学の基礎と適用

2.1 統計力学の原理

2.2 ミクロカノニカル分布

2.3 カノニカル分布

2.4 グランドカノニカル分布

2.5 理想気体 (単原子分子、２原子分子)

2.6 磁性

2.6 固体の比熱

2.7 高分子鎖とゴム弾性

3. 量子統計力学

3.1 量子統計の考え方

3.2 理想フェルミ気体

3.3 理想ボース気体

3.4 縮退したフェルミ気体

3.5 固体の比熱

3.6 黒体輻射

3.7 ボース・アインシュタイン凝縮

1.4 3年生 冬学期

1.4.1 物理数学 III ： 村尾 美緒

1. 郡論の基礎

1.1 群の定義と種類

1.2 部分群・群表・組み換え定理

1.3 剰余類・共役類・類演算子

1.4 不変部分群・剰余類群・準同型定理

2. 対称群

2.1 置換・巡回・互換・交代群

2.2 ケーリーの定理

2.3 分割と共役類・巡回構造

3. 有限群の表現論

3.1 表現と既約表現

3.2 不変部分空間・シューアの補題・表現の直交性

3.3 指標の第一種直交性・正則表現

3.4 指標の第二種直交性・既約表現の個数

3.5 直積表現と対称性

4. リー群とリー代数

4.1 リー群・線形変換群

4.2 リー代数

4.3 群の大局的構造・連結コンパクト群・普遍被覆群

4.4 リー群の例　O(3), SU(2), SO(3)

4.5 リー代数の表現 (SO(3) を例として)

5. 群論の応用:　量子力学への応用

5.1 量子力学と対称性の群論的考察

5.2 角運動量の合成

6. ユークリッド空間における微分形式

6.1 外積

6.2 微分形式

1.4.2 量子力学 III ： 初田哲男

1. 散乱の量子論

1.1 １次元の散乱問題と３次元への拡張

1.2 リップマン-シュヴィンガー方程式

1.2 微分断面積と散乱振幅

1.3 部分波振幅と位相差解析

1.4 S 行列、光学定理、ボルン展開

1.5 低エネルギーでの共鳴散乱

1.6 高エネルギーでのアイコナール近似と回折散乱

2. 多粒子系の量子論

2.1 波動関数の対称性と統計

2.2 対称化および反対称化された波動関数

2.3 ハートリー・フォック近似

2.4 第二量子化と場の演算子

2.5 多粒子系における相関関数

3. 経路積分による量子論

3.1 １粒子問題

3.2 停留位相法と半古典近似

3.3 有限温度への拡張

1.4.3 流体力学： 高瀬 雄一

1. 流体の性質とその記述

1.1 流体の定義

1.2 流れを表す量

1.3 運動の調べ方

2. 流体の基礎方程式

2.1 Euler の連続方程式と運動方程式

2.2 Lagrange の連続方程式と運動方程式

2.3 状態方程式

2.4 境界条件

3. 流れの記述

3.1 流線・粒跡線・流条線

3.2 渦運動と渦なし運動

3.3 運動方程式の第一積分

3.4 Bernoulli の定理

3.5 Lagrange の渦定理

4. 完全流体の渦なし運動

4.1 Laplace 方程式

4.2 2 次元の渦無し運動

4.3 縮まない流体と流れの関数

4.4 複素速度ポテンシャル

4.5 等角写像

4.6 3 次元の渦無し運動

5. 完全流体の渦運動

5.1 渦運動

5.2 速度の不連続面

5.3 わき出し分布と渦分布

5.4 有限翼と U 字管

6. 粘性流体

6.1 Navier-Stokes 方程式

6.2 境界層

6.3 平行流

6.4 回転流

7. 波動

7.1 水波

7.2 音波

7.3 高速気流

7.4 衝撃波

8. 不安定性

8.1 非圧縮定常流の安定性

8.2 Kelvin-Helmholtz 不安定性

8.3 Rayleigh-Taylor 不安定性

8.4 平行流の安定性

9. 乱流

9.1 アンサンブル平均

9.2 一様乱流

9.3 Kolmogorov スケーリング

9.4 非一様乱流

1.4.4 現代実験物理学 II ： 蓑輪　眞、小沢　恭一郎

1. 誤差と統計処理の方法

2. 同軸ケーブルとインピーダンス整合

3. 物理量の測定

4. 振動現象の物理学

5. ラザフォード散乱と断面積

6. 粒子と物質の相互作用

7. 粒子検出器

8. 加速器

1.4.5 電磁気学 III ： 内田 慎一

1. 電磁波の放射

電磁、遅延ポテンシャル

双極子放射

2. 光学

電磁波の反射・屈折・回折

空洞共振器、導波路

3. 荷電粒子の運動と電磁波

運動する荷電粒子がつくる電磁場

相対論的運動がつくる電磁波

ー軌道放射

ーチェレンコフ放射

1.4.6 生物物理学：能瀬聡直、佐野雅己

1. 序：生物物理学とは何か

生きている状態とは、生命の特徴、生命の起源、細胞の組成と構成要素

2. 蛋白質の構造

アミノ酸の特性と化学構造、蛋白質の立体構造

3. 遺伝子と組み換え DNA 技術

遺伝情報の流れ、遺伝子クローニング技術、個体レベルの遺伝子操作技術、ゲノムプロジェクトとバイオインフォマティックス

4. 脳神経系の生物物理：序論

神経ネットワークの構造と機能、ネットワーク解析の方法論、視覚系における情報抽出

5. 記憶の分子機構

記憶の起こる仕組み、神経可塑性、長期増強現象、バイオイメージングによる可塑的過程の解析、記憶のモデル

6. 神経系における信号の生成と伝達機構

神経膜電位、 活動電位（神経インパルス）の生成機構、電気生理学実験、ホジキン・ハクスレー方程式

7. システム生物学

遺伝子ネットワークの構成実験、遺伝子スイッチ、動的解析

8. 定量的生物学

定量的生物学の可能性、遺伝子発現とそのゆらぎ、形態形成モデルへ

1.4.7 統計力学 II： 小形正男

1. 相転移現象

1.0 イントロダクション

1.1 気体-液体相転移

1.2 相転移：対称性の自発的破れ

1.3 スピン系の統計力学

1.4 平均場近似

1.5 イジングモデル

1.6 ランダウの２次相転移理論

1.7 スケーリング理論

1.8 くりこみ群の基礎

2. 非平衡統計力学

2.1 応答関数とゆらぎ

2.2 線形応答理論

2.3 種々の輸送係数

2.4 ブラウン運動とアインシュタインの関係式

2.5 拡散方程式

2.6 境界のある場合の拡散方程式

2.7 ランジュバン方程式

2.8 マスター方程式とフォッカー・プランク方程式

1.5 4年生 夏学期

1.5.1 場の量子論 ： 柳田 勉

1. Relativistic Quantum Theory

1.1 Relativistic Quantum Mechanics

1.2 Dirac Equation

1.3 Lorentz Covariance

1.4 Solutions to the Dirac Equation

1.5 Hole Theory

2. Quantum Field Theory

2.1 Canonical Quantization of Fields

2.2 Real Spinless Fields

2.3 Meaning of Field Quantization

2.4 Dirac Fields

2.5 Electromagnetic Field

1.5.2 プラズマ物理学 ： 江尻 晶

1. 様々なプラズマ

1.1 実験室のプラズマ

1.2 自然界のプラズマ Deby 遮蔽

1.3 プラズマ振動

1.4 Larmor 運動（Cyclotron 運動）

2. 単一粒子の軌道

2.1 各種のドリフト

2.2 ミラー磁場と断熱不変量

2.3 種々の磁場配位と粒子軌道

3. 衝突と拡散

3.1 衝突時間

3.2 電気抵抗

3.3 拡散係数と閉じ込め時間

4. 電磁流体としてのプラズマ

4.1 電磁流体方程式

4.2 MHD 方程式

4.3 抵抗の役割

4.4 MHD 発電，MHD 加速

5. 平衡と安定性

5.1 円柱プラズマの平衡

5.2 不安定性の分類

5.3 不安定性の直感的な説明

6. プラズマ中の波動

6.1 冷たいプラズマの分散式

6.2 不安定性の分類

6.3 冷たいプラズマの分散式

1.5.3 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

1.1 線素と計量

1.2 シュワルツシルド時空の性質

1.3 測地線の方程式

2. 一般相対論の心

2.1 物理量とテンソル

2.2 物理量の微分

2.3 テンソルの成分だけを用いた相対論の表現

2.4 重力場の方程式

3. 球対称時空

3.1 球対称時空に対する計量とアインシュタイン方程式

3.2 完全流体に対するエネルギー運動量保存則

3.3 球対称時空における完全流体の運動方程式

3.4 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

3.5 重力質量と固有質量

4. 相対論的宇宙モデル

4.1 宇宙原理と宇宙の一様等方性

4.2 ロバートソン・ウォーカー計量の幾何学的性質

4.3 アインシュタイン方程式からフリードマン方程式へ

4.4 宇宙の状態方程式と宇宙定数

4.5 アインシュタイン・ドジッター宇宙モデル

4.6 フリードマン宇宙モデル

4.7 宇宙の加速膨張と宇宙定数・ダークエネルギー

4.8 実効的な宇宙定数としてのスカラー場

5. 重力レンズ天文学

5.1 重力レンズとは

5.2 レンズ方程式

5.3 光線の曲がり角

5.4 レンズポテンシャルとレンズ方程式

5.5 円対称重力レンズの定性的振舞い

5.6 レンズ変換行列: convergence と shear

5.7 円対称レンズの critical curve と像の変形

5.8 面輝度定理

5.9 重力レンズの増光率

5.10 重力マイクロレンズと MACHO

1.5.4 原子核物理学：大塚 孝治、平野 哲文

1. 原子核の構造

1.1 原子核の大きさと質量

1.2 原子核の平均ポテンシャルと殻構造

1.3 多核子系の持つ対称性と構造

1.4 原子核内の核子間相関と核力

1.5 核子の集団運動

1.6 ＲＩビーム、不安定原子核

1.6 原子核の崩壊

2. クォークとハドロン、及びその多体系

2.1 物質の基本構成要素としてのクォーク

2.2 中間子、核子のクォーク模型

2.3 中間子交換による核力

2.4 ハドロンガスとクォークグルーオンプラズマ

2.5 陽子、中性子の起源

2.6 宇宙初期におけるクォークハドロン相転移

2.7 中性子星の話題

1.5.5 固体物理Ｉ： 長谷川修司

1. 固体の凝縮のメカニズム

1.1 原子から固体へ

1.2 共有結合

1.3 イオン結合

1.4 金属結合

1.5 ファンデルワールス結合と水素結合

2. 結晶構造

2.1 結晶格子

2.2 対称性

3. 固体中の電子

3.1 井戸型ポテンシャル内の自由電子気体

3.2 T=0 K におけるフェルミ気体

3.3 有限温度のフェルミ気体

3.4 比熱

3.5 静電遮蔽

4. 電子バンド構造

4.1 ブロッホの定理

4.2 ほとんど自由な電子の近似

4.3 強束縛電子の近似
4.4 結晶内での電子の運動—波束と群速度—
4.5 電場下での電子の運動
4.6 電子と正孔
4.7 状態密度
5. 半導体
5.1 半導体とは
5.2 真性半導体中のキャリア濃度
5.3 半導体のドーピング
5.4 不純物半導体のキャリア濃度
5.5 半導体の電気伝導度
5.6 ホール効果
5.7 金属絶縁体転移
5.8 pn 接合とトランジスタ
6. 金属とフェルミ面
6.1 1価金属
6.2 2，3価金属

1.5.6 量子光学 ： 島野 亮

1. 光の放出と吸収
1.1 電磁波のモード密度
1.2 電磁波のエネルギー
1.3 黒体輻射、プランクの熱放射式
1.4 自然放出と誘導放出
2. 輻射場と二準位系の相互作用（半古典論）
2.1 双極子近似、回転波近似
2.2 ラビ振動
2.3 密度行列
2.4 光ブロッホ方程式
2.5 縦緩和と横緩和
3. 輻射場の量子論
3.1 自由場の量子化
3.2 光子数状態
3.3 コヒーレント状態
3.4 スクイーズド状態
3.5 モード位相演算子
3.6 量子化した場と二準位系の相互作用
4. 非線形光学の基礎
4.1 古典振動子モデル
4.2 非線形分極と非線形感受率
4.3 二次の非線形光学効果
4.4 位相整合
5. レーザーの基礎
5.1 光共振器のモード
5.2 光共振器の安定性
5.3 発振条件
5.4 各種レーザー

1.6 4年生 冬学期

1.6.1 現代物理学入門 ：樋口秀男、上田 正仁

1. 現代生物物理学
1.1 生体タンパク質分子の機能
1.2 1分子観察技術
1.3 モータータンパク質の1分子測定と運動メカニズム
1.4 細胞内タンパク質1分子の運動測定
1.5 人やマウス内単一分子の運動と生命の営み
2. 原子気体のボース・アインシュタイン凝縮やフェ

ルミ超流動の基礎について

2.1 ボゴリウボフ理論

2.2 グロスピタエフスキー理論

2.3 BCS 理論

2.4 BCS-BEC クロスオーバー理論

1.6.2 素粒子物理学 ： 駒宮幸男、 浅井祥仁

1. 物質と放射線の反応、検出器

2. クォークモデル

3. 量子電磁気学 (QED) とファイマン図の計算

4. 弱い相互作用

5. 強い相互作用、陽子の構造関数

6. 電弱理論の枠組み、ゲージ原理

7. 電弱理論の精密検証

8. ハドロンの内部構造

9. 素粒子と宇宙

1.6.3 場の量子論 II：濱口 幸一

1. 自由スカラー場の量子化

2. 相互作用するスカラー場

2.1 摂動論

2.2 S 行列

2.3 相互作用表示

2.4 Wick の定理

2.5 Feynman diagram

2.6 S 行列→遷移確率

3. 経路積分による量子化

1.6.4 宇宙物理学： 牧島一夫、中澤知洋

1. 重力

1.1 Newton の重力の法則

1.2 ブラックホール

1.3 自己重力系

1.4 運動方程式と状態方程式

2. 電磁放射

2.1 黒体放射

2.2 黒体放射の概念の応用

2.3 光子ガスの熱力学

3. 星の物理学

3.1 星の熱力学

3.2 星のパラメータスケーリング

3.3 星内部の熱核融合

3.4 宇宙における重元素合成の現場

4. 星の進化と終末

4.1 星の進化

4.2 星の終末

4.3 電子縮退した星：白色わい星

4.4 核子が縮退した星：中性子星

5. ビッグバン宇宙論

5.1 膨張宇宙の記述

5.2 膨張宇宙の力学と宇宙論パラメータ

5.3 宇宙の創成と素粒子

5.4 バリオン数の生成と軽元素の合成

5.5 宇宙の晴れ上がりとマイクロ波背景放射

5.6 最新の宇宙像

1.6.5 固体物理学 II ： 福山　寛

固体物理学 I に引き続き、物質の示す多彩な性質を量子力学や統計力学の知識をもとにミクロに理解するための基礎を解説する。

1. 格子振動

1.1 フォノン

1.2 デバイ模型

2. 固体中の伝導現象

2.1 電気伝導

2.2 ホール効果

2.3 熱伝導

3. 磁性

3.1 常磁性と反磁性

3.2 磁気的相互作用と磁気秩序

3.3 スピン波

4. 超流動

4.1 ボース・アインシュタイン凝縮

4.2 巨視的量子現象

4. 超伝導

4.1 基本的性質と現象論

4.2 BCS 理論

1.6.6 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

2.1　物理学教室出身の南部陽一郎氏がノーベル物理学賞受賞を受賞

理学部物理学科出身の南部陽一郎氏（米シカゴ大名誉教授、大阪市立大名誉教授）が、小林誠氏、益川敏英氏とともに、2008 年度のノーベル物理学賞を受賞されました。

2.2　霜田 光一 名誉教授：平成 20 年度文化功労者顕彰

霜田先生が最初に手がけたのはマイクロ波レーダーの研究であり、終戦後はそれがマイクロ波分光の研究につながっていきました。先生がリードしたマイクロ波分光スペクトルの研究は、その後の日本の電波天文学の発展に大きく寄与しました。また、1950、1960 年代のメーザーおよびレーザーの黎明期には、タウンズ (C. H. Townes) 等と共にそれらの基礎を構築するという業績を残しています。その後はレーザー分光学の研究に進み、シュタルク分光や二重共鳴などの基礎研究からレーザー応用技術まで幅広い研究を展開しました。霜田先生は研究だけではなく、理科教育、物理教育にも熱心な情熱を傾けてこられました。2 年前までの 16 年間ものあいだ日本物理教育学会の会長を務めたほか、たくさんの教育的な教科書や参考書を出版しています。また、物理分野においてこれまで数多くの指導的な研究者、教育者を輩出しています。霜田光一名誉教授のこのような幅広い物理研究および教育に対する功績が認められて、今回平成 20 年度文化功労者に選出されました。

2.3　江口 徹 名誉教授（現京都大学基礎物理学研究所所長）：2009 年 恩賜賞・日本学士院賞

「数理物理学的な手法による素粒子論の研究」:
江口先生は，受賞理由にもあるとおり，素粒子論における数理物理学的な研究において大きな功績を残されてきました。特に 1978 年にカリフォルニア大学のハンソン (A.J.Hanson) 氏との共同研究で発見された一般相対論の厳密解は江口・ハンソン解として有名であり、現在でも超紐理論などにおいて広く応用されています。またその際書かれた重力理論に関するレビュー論文も世界的に幅広く読まれております。東京大学に着任された後も、川合光氏（現在京都大学教授）との共同研究で、格子ゲージ理論における次元の自由度を低次元理論の内部自由度に還元する方法を発見され、その後の素粒子理論の発展に大きな影響を与えました。その他にも共形場理論、位相的場の理論、超紐理論のコンパクト化などで著名な仕事を多数残されており、超紐理論研究の指導者として活躍されております。先生は最先端の研究をスマートにわかりやすく講義されることでも有名であり、研究者の育成や数学者との交流の創成についても指導的な役割を果たされてきました。

2.4 上田 正仁 教授：平成 20 年度日本学術振興会賞

「冷却原子気体の理論」（Theory of Ultracold Atomic Gases）：
ボース粒子系が低温において,「ボース・アインシュタイン凝縮（BEC）」とよばれる特異な現象を起こすことは，アインシュタインによって 1924 年に理論的に予言されていました。近年，そのようなボース粒子からなる原子の集団（ボース原子気体）が磁気トラップやレーザー冷却を用いて生成され，さらにそれを蒸発冷却によって超低温に冷却することによって BEC が実現されています。冷却原子気体は，超流動ヘリウムや超伝導電子系と比肩する新しい量子凝縮相として注目されています。

上田教授はこの分野の研究を早くから幅広く進めてきましたが，強く引力相互作用をするボース凝縮体がボース・ノヴァとよばれる特異な飛散崩壊現象を起こすことを理論的に示し，その準安定性や崩壊メカニズムについても論じ，それがおもな受賞理由になっています。上田教授は，他にも超流動現象など量子多体現象に関するさまざまな独創的研究を展開しており，今後さらに巨視的な量子現象の工学的応用や，冷却原子気体を用いた量子計算などの実験と理論を先導することが期待されています。

2.5 上田 正仁 教授、早野龍五教授：平成 20 年度仁科記念賞

2.5.1 上田 正仁 教授：2008 年度仁科記念賞

「引力相互作用する原子気体のボース・アインシュタイン凝縮の理論的研究」：
上田教授は量子光学の分野で業績を上げてきた理論物理研究者ですが、1994 年に原子のボーズ・アインシュタイン凝縮（BEC）が実現した際に、その多彩な物理学上の可能性に注目していち早く理論研究に取り組み多数の成果を上げてきました。そのなかで、今回の受賞対象となったのが引力相互作用をしているボーズ粒子が作る BEC のダイナミクスの研究です。引力相互作用をしている粒子からなる一様な気体は、温度を下げてゆくと引力によって収縮してしまうため、BEC を起こさないことが理論的に知られていました。原子の BEC は外部ポテンシャルで小さな空間に閉じこめられた有限個の粒子の系が起こす現象で、このような系では、量子学的揺らぎに起因する零点圧力のために粒子数が小さいときは引力と釣り合って安定な BEC ができ、大きくなると引力が勝って崩壊します。この崩壊過程は激しい変化を伴い、また、BEC の種類によって特徴的な振る舞いを示すことを理論的に示し、実験との定量的な比較によって引力系 BEC 物理の本質の解明に成功しました。

2.5.2 早野 龍五 教授：2008 年度仁科記念賞

「反陽子ヘリウム原子の研究」：
早野教授は、異常長寿命反陽子ヘリウム原子の発見し、そのレーザー分光によって数々の研究成果をあげた業績により、平成 20 年度仁科記念賞を受賞されました。

反陽子ヘリウム原子は早野教授により KEK で発見されました。その後、早野教授により 1993 年には CERN 研究所においてそのレーザー分光手法確立され、この奇妙な原子の準安定状態群の構造が解明されました。さらに 2000 年から稼働した反陽子減速器施設において、早野教授が率いる ASACUSA（浅草）実験グループは、高精度パルスレーザーなどの最新鋭装置の開発・導入を次々と行い、レーザー遷移周波数から反陽子と電子の質量比を 10^{-9} の相対精度で決定することに成功しました。また、反陽子ヘリウム原子の研究は、粒子・反粒子対称性（CPT 対称性）を高精度に検証できる実験として世界の注目を集めています。

科学技術委員会（CODATA）による基礎物理定数の最新版では、この結果がリュドベリ定数や陽子・電子質量比の決定に貢献していることが明記されており、これは日本の研究成果が基礎物理定数決定に寄与した希有な例といえます。

2.6 平野 哲文 講師：平成 21 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞

受賞対象は「相対論的流体力学よるクォークグルーオンプラズマの研究」です。今世紀に入り、米国ブルックヘブン国立研究所の重イオン衝突型加速器 RHIC を用いて、温度が 10^{12}K を越える超高温物質「クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)」を生成する実験が開始されました。その結果、高い運動量を持つクォークが高温物質内部で大きなエネルギー損失をおこすジェット抑制現象や、反応後の粒子が強く結合し流体的に振る舞う楕円型フロー現象などが発見されました。平野氏は、この重イオン衝突の理論研究で次々と成果を挙げてこられました。特に、世界に先駆けて、空間対称性を仮定しない相対論的流体方程式に基づく数値計算を実行し、QGP の局所熱平衡成立の実証やジェット抑制の定量的研究を行ったことが高く評価されました。平野氏の研究により、RHIC で生成された高温物質が完全流体のように振舞う可能性が明らかになり、強結合 QGP 研究という新たな分野が拓かれました。2009 年から本格稼働するヨーロッパ共同原子核研究機構 CERN の大型ハドロン衝突型加速器 LHC でも QGP 生成実験が行われる予定で、今後のさらなる発展が期待されています。

2.7 岩崎 昌子 講師（相原研）：第 10 回（平成 19 年度）守田科学研究奨励賞

岩崎氏は、B ファクトリー加速器を使ったフレーバー変換中性カレント反応を初めてとするフレーバー物理の研究に対して重要な貢献を成し、第 10 回守田科学研究奨励賞を受賞しました。

2.8 阿部 利徳 特任助教（相原研）：第 10 回財団法人高エネルギー加速器科学研究奨励会小柴賞

阿部氏は、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新しい光検出器「大口径ハイブリッド光検出器」の開発において中心的役割を果たし、第 10 回財団法人高エネルギー加速器科学研究奨励会小柴賞を受賞しました。

2.9 平原 徹 助教（長谷川研）：第 3 回日本物理学会若手奨励賞

平原博士はビスマス超薄膜の表面状態でのラシュバ効果および表面電気伝導に関する一連の研究成果で標記奨励賞を受賞しました。ラシュバ効果とは磁場ではなく電場を用いて電子系のバンド構造のスピン状態を制御する方法であり、従来の磁性体に変わる高効率スピン注入源として近年世界中で精力的に研究されています。平原博士は世界に先駆けて、スピン・角度分解光電子分光を用いてスピン偏極電子状態の直接測定を行い、ラシュバ効果と量子サイズ効果の相互作用に関する新たな概念を提案しました。さらにこのスピン分裂したバンド構造を利用して表面上でスピン流を流せる可能性を示しました。これらの業績は国際的に高い評価を得ており、この分野の発展に大きな寄与をしました。

2.10 大栗 正宗 博士（宇宙理論研究室：現国立天文台メンバー）：第 3 回日本物理学会若手奨励賞

大栗正宗博士は、「非球対称性を取り込んだ銀河団重力レンズモデルの構築」において第 3 回日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。銀河団により引き起こされる重力レンズは、宇宙を満たすダークマターあるいは宇宙モデルの検証においてもっとも有力な現象の一つとして認識されてきました。特に、銀河団が強い重力レンズを生ずる重力レンズ確率は銀河団中のダークマターの分布に敏感であり、標準的な冷たいダークマター (CDM) の検証として議論されていました。同氏は従来確立されていた球対称を仮定する重力レンズの確率を非球対称な場合に拡張する解析的手法を確立しました。この結果はシミュレーションや観測で球対称な場合に比較してよい一致が見られ、極めて先駆的なものです。さらに、この手法を用いて銀河団重力レンズで期待される複数像の個数の理論予言を行い、その後自らが主導した観測プロジェクトで三重像銀河団重力レンズクエーサーを世界で初めて発見し、この理論予言を観測的にも証明しました。銀河団の非球対称性は重力レンズ確率のみならず個々の銀河団を解析する上でも極めて重要になり、実際に観測データが三軸不等楕円体模型でよく説明できることを示しました。以上のように、同氏がこれまで行ってきた三軸不等楕円体模型を用いた銀河団重力レンズの一連の研究はこの分野で大きなインパクトをもっており、その業績が高く評価されました。

2.11 稲田 直久 博士（宇宙理論研究室：現理化学研究所牧島宇宙放射線研究室メンバー）：第 20 回日本天文学会研究奨励賞

稲田直久博士は、「可視光広域サーベイデータを用いた重力レンズクエーサーの探索」において第 20 回日本天文学会研究奨励賞を受賞しました。重力レンズ効果は、宇宙の物質分布を探る強力な手段として、天文学の広範な分野において重要な役割を果たしています。稲田直久氏は、重力レンズ効果を受けたクエーサー（強い重力レンズ効果を受けて“ 見かけ上 ”複数の像として観測されるクエーサー）を発見することに日本人研究者として初めて成功しました。さらに、銀河団による重力レンズクエーサーを世界で初めて発見しました。同氏は後にもう 1 つの銀河団重力レンズクエーサーを発見しており、しかも未だにこの 2 例しかありません。同氏はこのような珍しい天体の発見とは相補的に、重力レンズクエーサーの統計カタログの構築も行っています。この統計サンプルはその一様性と規模の大きさにより、今後の重力レンズクエーサーを用いた応用のための最も主要な基礎データとなると考えられます。以上のように国内はもとより世界的にも重力レンズクエーサーの観測的研究を主導しており、その業績が高く評価されました。

2.12 和達 大樹 博士（藤森研究室）：第 25 回井上研究奨励賞

和達大樹博士は、「Photoemission studies of perovskite-type transition-metal oxides in epitaxial thin films」と題する博士論文で、遷移金属酸化物の電子状態を高品質な単結晶薄膜試料を用いて光電子分光法によって研究しました。これまでのバルク試料では不可能であった物質のバンド構造の決定、基板からの格子歪みの効果の観測、異種の物質の界面の電子状態の観測などの多くの新しい方向性を打ち出したことが高く評価されました。

2.13 西田 佑介 博士（初田研究室）: 第 25 回井上研究奨励賞

受賞対象となった西田佑介氏の博士論文「ϵ 展開を用いたユニタリー・フェルミ気体の研究」では、散乱長が発散するユニタリー極限の近傍にある強結合フェルミ気体（ユニタリー・フェルミ気体）において、空間次元の 4 からのずれ ϵ を展開パラメータとする系統的方法が提唱されました。この方法の確立により、これまで理論計算が難しいとされてきたユニタリー極限近傍の冷却原子気体や中性子物質が、解析的かつ定量的に扱えるようになったこと、この方法が広範な応用を持つこと、などが高く評価されました。

2.14 中濱 優 君（相原研）: 平成 20 年度理学系研究科研究奨励賞（博士）

中濱優君が、博士論文 ”Measurement of CP -Violating Asymmetries in the Flavor-Changing Neutral Current Decays of the B Meson（B中間子のフレーバー変換中性カレント崩壊におけるＣＰ非対称性の測定）Laser-Field-Free Molecular Orientation” を中心とする研究業績が高く評価され、平成 20 年度理学系研究科研究奨励賞（博士）を受賞しました。

2.15 出田 真一郎 君（藤森研）: 第 22 回日本放射光学会学生口頭発表賞（修士）

出田真一郎君（現在、藤森研究室博士課程１年）は、「三層系高温超伝導体 $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$ の角度分解光電子分光による電子構造の研究」と題する講演で、日本放射光学会学生口頭発表賞を受賞しました。銅-酸素からなる 2 次元面を 3 枚もち高い臨界温度をもつ標記超伝導体の電子構造を、角度分解光電子分光を用いて詳しく調べた結果、中央の 2 次元面で従来観測されたことのない非常に大きな超伝導ギャップを観測しました。本研究の結果は，銅酸化物高温超伝導体の超伝導機構の解明に重要な手掛かりを与えるものと考えられています。

2.16 大口 雄一郎 君（酒井広文研究室）: 第 24 回 (2008 年春季) 応用物理学会「講演奨励賞」

大口雄一郎君が、第 55 回応用物理学関係連合講演会での講演「2 波長を用いた高次和・差周波発生とその偏光依存性」(共同研究者：峰本紳一郎、酒井広文) に対し、第 24 回 (2008 年春季) 応用物理学会「講演奨励賞」を受賞しました。本賞は、学術講演会において、応用物理学の視点から一般講演件数の１％以内の極めて価値のある一般講演論文を発表した若手会員に授与し、これをたたえることを目的とするものです。大口君らは、Ti:sapphire パルスと OPA パルスの偏光が平行のときは、OPA 光子が最大 8 個関与する和周波を初めて観測することに成功しました。また、両者の偏光が直交するときは、OPA 光子が偶数個関与する和周波の方が奇数個関与する和周波よりも高効率に発生することを初めて実験で検証しました。これはパリティー保存の性質から発生する和周波の偏光が決まることを反映した結果であり、非摂動論的領域における高次の非線形光学効果における極めて重要な結果です。大口君は既存の理論モデルに独自の改良を加えることにより観測した新現象の再現と物理的理解に成功しました。

2.17 宮武 広直 君 (相原研):2008 IEEE-Nuclear Science Symposium, NPSS Student Paper Awards : NSS Poster Award (Second Place)

宮武君のポスター発表“ Prototype Readout Module for Hyper Suprime-Cam ”が高く評価され、NSS Poster Award を受賞しました。

2.18 碁盤 晃久 君（酒井広文研究室）: 平成 20 年度理学系研究科研究奨励賞（修士）

碁盤晃久君が、修士論文”Laser-Field-Free Molecular Orientation(レーザー電場のない条件下での分子配向制御）”を中心とする研究業績が高く評価され、平成 20 年度理学系研究科研究奨励賞（修士）を受賞しました。碁盤君は、高強度レーザー電場の存在しない条件下で分子配向を実現すべく、まずプラズマシャッター法を用いてナノ秒レーザーパルスをそのピーク強度付近で急峻に遮断する技術の開発に取り組み、様々なパラメータの最適化を地道に行うことにより必要なレーザーパルスの整形に初めて成功しました。この整形されたパルスを用い、OCS 分子を試料として分子の配向度の時間発展を調べたところ、理論計算とよく一致する結果を得ることに成功しました。これは、高強度レーザー電場の存在しない条件下での分子配向を初めて実現したものであり、様々な応用研究への発展が強く期待される分子科学分野における画期的な成果です。

2.19 野村 昂亮 君（大塚研）: 平成 20 年度理学系研究科研究奨励賞（修士）

野村昂亮君が平成 20 年度理学系研究科研究奨励賞 (修士）を受賞しました。原子核の表面の形が様々に変形するのは陽子や中性子の集団運動の結果であり、そのために振動的な、或いは回転的な、さらにはそれらの中間のパターンのスペクトラムが発生します。このような励起状態のエネルギー準位を始めとして様々な物理量を計算するのに相互作用するボソン模型は成功してきました。一方、原子核の平均場模型は、上記の集団運動による密度分布の変化を核子多体系として説明してきましたが、励起エネルギーなどの計算は困難です。野村君の研究は、この 2 つの方法論が関係づけられ、それによって相互作用するボソン模型に予言能力を与えた画期的なものです。論文は既に Physical Review Letters 誌に掲載され、本人も海外の会議で数回講演をしています。

2.20 穀山 渉 君（坪野研）: 平成 20 年度理学系研究科研究奨励賞（修士）

穀山氏が修士課程で研究開発を行ったのは、衛星搭載用超小型ねじれ型重力波検出器である SWIM$_{\mu\nu}$ である。彼はこの SWIM$_{\mu\nu}$ の発案の段階から本研究に参加し、デザイン、製作、組み立て、調整、試験、衛星搭載までほとんどすべての段階で計画実行部隊の中で中心的な役割を果たしました。2009 年 1 月 23 日に H-IIA ロケット 15 号機による温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」 が打上げられましたが、この衛星にはピギーバックとして小型副衛星が積み込まれており、その中の一つに今回穀山氏らが開発した SWIM$_{\mu\nu}$ も搭載されています。その後の衛星運用は順調であり、現在 SWIM$_{\mu\nu}$ から興味深いデータが送られてきつつあります。

2.21 宮武 広直 君（相原研）：平成 20 年度理学系研究科研究奨励賞（修士）

宮武広直君が、修士論文“ Research and Development of Readout System for New Wide-Field CCD Camera of Subaru Telescope ”を中心とする研究業績が高く評価され、平成 20 年度理学系研究科研究奨励賞（修士）を受賞しました。

2.22 グエン タンフク 君、加藤 康作 君、飯山 悠太郎 君：平成 20 年度理学部修奨励賞

3　人事異動

[物理学教室に来られた方々]

樋口　秀男	教授	2008 年 4 月 1 日	採用 (東北大学教授)
川口　由紀	助教	2008 年 5 月 1 日	採用 (東京工業大学助教)
金田　美紀	物理教務	2008 年 5 月 1 日	採用
茅　元司	助教	2008 年 6 月 1 日	採用
福富　薫里	第一事務分室	2008 年 6 月 1 日	採用
小形　正男	教授	2008 年 6 月 16 日	昇任 (物理学専攻准教授)
石塚　裕美子	第二事務分室	2008 年 6 月 16 日	採用
合田　義弘	助教	2008 年 7 月 1 日	採用
一戸　育子	物理教務	2008 年 7 月 1 日	採用
森　恭子	物理図書	2008 年 7 月 1 日	配置換（柏図書館・情報サービス係）
服部　敦子	第一事務分室	2008 年 9 月 1 日	採用
原田　崇弘	講師	2008 年 10 月 1 日	採用 (福井大学講師)
坂井　南美	助教	2008 年 10 月 1 日	採用
阿部　武	技術補佐員	2008 年 12 月 1 日	採用
小田倉　未央	物理教務	2008 年 12 月 4 日	採用（派遣）
岡本 茜	物理事務	2009 年 1 月 21 日	採用（派遣）
稲葉　知子	物理教務	2009 年 2 月 3 日	採用（派遣）

[物理学教室から移られた方々]

工藤 伯子	第一事務分室	2008 年 6 月 30 日	辞職
金田　美紀	物理教務	2008 年 6 月 30 日	辞職
小野沢　さわ子	物理図書	2008 年 7 月 1 日	配置換（情報基盤センター図書室）
服部　敦子	第一事務分室	2008 年 9 月 10 日	辞職
樋上　和弘	助教	2008 年 9 月 30 日	辞職（鳴門教育大・准教授）
一戸　育子	物理教務	2008 年 12 月 31 日	辞職
安東　正樹	助教	2008 年 12 月 31 日	辞職（京都大・G-COE　特定准教授）
渡利　泰山	助教	2008 年 12 月 31 日	辞職（数物連携　特任准教授）
坂井　南美	助教	2009 年 3 月 1 日	配置換（ビッグバン　助教）
柳田　勉	教授	2009 年 3 月 31 日	辞職（数物連携　特任教授）
佐藤　勝彦	教授	2009 年 3 月 31 日	定年退職
山本　智史	技術	2009 年 3 月 31 日	辞職（千葉県　職員）

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	大塚	新井、川崎、上間、管波、佐々木
幹事	宮下、相原	新井、川崎、上間、管波、佐々木
専攻主任	須藤	佐々木、小野、金田
専攻副主任	宮下	佐々木、小野、金田
常置委員	蓑輪、佐野	佐々木、小野、金田
教務係	**坪野 (理兼任)**、小形、藤森、(宮下)	佐々木、小野、金田
	常行 (大学院)	佐々木、小野、金田
学生実験	**山本**、浅井、岡本 (理兼任)	樫村
就職係	**牧島**、(大学院他部局:)	横山
奨学金	**青木**	佐々木
会計係	**濱口**	新井、川崎、管波
号館関係　1 号館運営員	**駒宮**	新井
旧 1 号館運営委員	駒宮	新井
部屋割	長谷川	新井
技術部門　(統括)	**坪野** (相原)	大塚 (茂)
試作室	坪野	
薬品管理	岡本	山本
研究材料・回路	酒井（広）	樫村、蛯原
ＩＴ関連	早野	藤代
安全衛生	早野	佐伯
低温	岡本	
電顕	長谷川	
図書係	**初田 (理兼任)**、樋口、上田、村尾	小野澤、南、森村
談話会	**柳田**、初田、藤森、上田	田中、原
年次報告	中澤	横山
記録係	平野、小澤、(中澤)	
物品供用官	内田	新井
環境安全	早野	川崎
放射線管理	蓑輪	川崎
物理事務室	宮下	新井
事務分室　第１/２/３	佐野/須藤/常行	新井
理交会	浅井	新井
教職員親睦会	平野	
進学指導	佐野	佐々木
ホームページ	松尾、中澤	藤代
オープンキャンパス	**長谷川**	新井

＊**太字**は責任者

5　教室談話会

- 2008 年 7 月 25 日（金）　16:30-18:00

  Hassan Aref 氏　（バージニア工科大学）

  「Point vortices: From Models of Atoms to Patterns in Bose-Einstein Condensates」

- 2008 年 10 月 17 日（金）　17:00-19:00

  対称性の破れとは何か？　- 南部陽一郎博士のノーベル賞受賞業績と今後の展望 -

  柳田　勉 氏　（東京大学）

  「対称性の破れと現代物理学」

  上田　正仁 氏　（東京大学）

  「マクロな量子現象における対称性の破れ」

- 平成 21 年 1 月 9 日（金）　15:00-16:30

  田中　貴浩 氏　（京都大学基礎物理学研究所）

  「Gravity in Braneworld」

- 平成 21 年 1 月 22 日（木）　16:30-18:00

  霜田　光一 氏　（東京大学名誉教授）

  「レーザーの発明者は誰か？」

- 平成 21 年 1 月 26 日（月）　15:00-16:30

  Artur Ekert 氏　（Mathematical Institute, University of Oxford)

  「Post-quantum cryptography」

- 平成 21 年 3 月 6 日（金）　16:30-18:00

  佐藤 勝彦 氏　（東京大学）

  「超新星からインフレーション宇宙へ」（最終講義）

6　物理学教室コロキウム

場所：理学部４号館１３２０号室（３階）または１２２０号室（２階）

- 平成 20 年 4 月 25 日（金）　16:30-18:00

  川人　光男 氏　（ATR）

  「脳内情報処理をどのように科学的に制御できるか」

- 平成 20 年 5 月 16 日（金）　16:30-18:00

  村山　斉 氏　（東京大学／カリフォルニア大学バークレー校）

  「２１世紀の物理：量子論と宇宙の出会い」

- 平成 19 年 7 月 11 日（金）　16:30-18:00

  樽茶　清悟 氏　（東京大学）

  「単一量子と量子もつれの操作：固体物理と量子情報を繋ぐ」

- 平成 20 年 10 月 10 日（金）　16:30-18:00

  細野　秀雄 氏　（東京工業大学）

  「驚きのある材料探索：セメントから金属・鉄から高温超伝導」

- 平成 20 年 11 月 28 日（金）　16:30-18:00

  大栗　博司 氏　（東京大学／カリフォルニア工科大学）

  「一般相対性理論と量子力学の統合を目指して－ ブラックホール・ホログラフィ原理・スーパーストリング －」

- 平成 20 年 12 月 19 日（金）　16:30-18:00

  家　正則 氏　（国立天文台）

  「すばる望遠鏡で迫る宇宙史の暗黒時代－ 最遠銀河の発見・補償光学・次世代望遠鏡 －」

- 平成 21 年 1 月 26 日（金）　16:30-18:00

  Anthony J. Leggett 氏　（イリノイ大学）

  「Cuprate Superconductivity：The Current State of Play」