ISSN 0910-0709

Department of Physics

School of Science

The University of Tokyo

Annual Report

2005

平成17年度 年次研究報告



東京大学 大学院 理学系研究科・理学部
物理学教室

序

平成１７年度（２００５年４月－２００６年３月）東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・理学部物理学科の年次報告をお届けします。この小冊子が物理学教室で行われている多彩で活発な研究・教育の現状を知っていただく手がかりとなれば幸です。　平成１６年の法人化にあたり、教員の総数の見直しが行われ一時人事が凍結されました。その影響で、平成１７年は、助教授から教授への昇任以外、教員の異動はありませんでした。このような事態が２年近く続いた結果、教室全体の年齢構成が高い方に偏りつつあります。若い優秀な人材が任用しやすいよう人事システムを改良し、この問題に対処したいと考えております。

法人化の影響は人事だけではなく、財政状況にも及んでおり、各教員に配分される運営交付金（校費）は法人化前に比べると半減しております。幸にも、下に述べる「２１世紀ＣＯＥプログラム」が順調に推進されていること、そして多くの教員の努力による外部からの競争的資金の導入により、何とか教室の運営が健全に保たれております。

本年度も教室内での活発な研究の結果、多くの方々が受賞されております。小林孝嘉先生が極限的長短パルスの開発とその応用で松尾学術賞を、牧島一夫先生がブラックホール天体および銀河団のＸ線観測研究で日本天文学会林忠四郎賞を受賞されました。これは昨年の須藤先生に続く受賞になります。さらに、小形正男先生は新奇超伝導体における強相関領域での超伝導機構の理論的研究で日本ＩＢＭ科学省を受賞されています。若い人たちの研究でも、守川春雲博士、松田巌助手、長谷川修司先生の共著論文「シリコン表面上での電荷密度波の格子整合とソリトンダイナミックス」が日本表面科学会論文賞を、有田亮太郎博士（現、理化学研究所）が出向先ドイツでの物性理論研究により日独センター科学賞、金井恒人博士（酒井広文研究室）が、配列分子中における高次高調波発生の実験的・理論的研究で、教室としては３年連続となる東京大学総長賞を受賞しました。

現在、物理学教室は宇宙船研究所、物性研究所などと共に「極限量子系とその対称性」をテーマとして「２１世紀ＣＯＥプログラム」を推進しています。このプログラムは物理学専攻を世界の研究教育拠点とすることを目指すもので、院生の財政的支援、海外の研究者による集中講義、院生の海外派遣、院生のための実践的な英語教育などの活動を行っています。ＣＯＥプログラムは４年目に入りますが、中間評価でも高く評価していただいております。活動内容はホームページでご覧になることが出来ます。

「ゆとり教育」等の影響で理科離れが進み、その影響が物理教室にも現れ始めております。このような情勢の下、諸先輩方、関係各位の皆様のご支援、ご助言が何よりも貴重なものと考えております。何卒よろしくお願い申し上げます。

この年次報告書は、酒井広文助教授のご尽力によって編集作成されました。この場を借りて感謝いたします。

２００６年5月３１日

物理学専攻長・教室主任

内田　慎一

目 次

I 研究室別 2005 年度 研究活動報告 **1**

1 原子核・素粒子理論 **3**
1.1 原子核理論研究室（大塚・初田） . . . 3
1.2 素粒子論研究室（江口・柳田・松尾） . . . 15
1.2.1 弦理論 . . . 15
1.2.2 場の理論 . . . 17
1.2.3 TeV スケールの標準模型、素粒子論的宇宙論 . . . 17

2 原子核・素粒子実験 **21**
2.1 原子核実験研究室 (酒井・早野) . . . 21
2.1.1 磁気スペクトロメータ SHARAQ の建設 (酒井研究室) . . . 21
2.1.2 二重 β 崩壊過程の微視的理解 (酒井研究室) . . . 21
2.1.3 2 核子系のスピンを用いたベルの不等式の検証 (酒井研究室) . . . 22
2.1.4 オルソポジトロニウムの 3 光子崩壊を用いた GHZ 模型検証装置の開発 (酒井研究室) . . . 23
2.1.5 偏極重陽子–陽子弾性散乱の高精度測定と三体力 (酒井研究室) . . . 24
2.1.6 反水素原子・反陽子ヘリウム原子の研究 (早野研究室) . . . 25
2.1.7 エキゾチック原子の分光による「陽子質量起源」の研究 (早野研究室) . . . 26
2.2 旧櫻井研究室 . . . 27
2.2.1 中性子過剰核の安定性 . . . 27
2.2.2 ガンマ線分光による核構造研究 . . . 27
2.2.3 ベータ分光を用いた核構造研究 . . . 29
2.2.4 高分解能ガンマ線測定による励起状態の寿命決定 . . . 30
2.2.5 TOF スペクトロメータ開発と中重領域の核分光 . . . 31
2.2.6 天体核物理 . . . 31
2.3 駒宮研究室 . . . 36
2.3.1 最高エネルギー電子・陽電子コライダー LEP を用いた OPAL 実験 . . . 36
2.3.2 電子・陽電子リニアコライダー ILC 計画 . . . 36
2.3.3 BES 実験 . . . 37
2.3.4 超冷中性子を用いた量子力学実験 . . . 39
2.3.5 大気ニュートリノスペクトルの精密計算 . . . 40
2.4 蓑輪研究室 . . . 42
2.4.1 暗黒物質探索実験 . . . 42
2.4.2 アクシオンヘリオスコープ実験 . . . 42
2.4.3 共鳴イオン化質量分析によるニュートリノ検出 . . . 43
2.5 相原研究室 . . . 45
2.5.1 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 . . . 45
2.5.2 中性 B 中間子の $\pi^+\pi^-$ および $\rho\pi$ 崩壊における CP 非対称の精密測定 . . . 46
2.5.3 Belle シリコン崩壊点検出器アップグレード . . . 46
2.5.4 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 . . . 46
2.5.5 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 . . . 47
2.5.6 国際リニアコライダー加速器用測定器 SiD の開発 . . . 47
2.5.7 広視野深宇宙探査によるダークエネルギーの研究 . . . 48

3 物性理論 **52**
3.1 和達研究室 . . . 52

3.1.1 ボース・アインシュタイン凝縮 . . . 52
3.1.2 フェッシュバッハ共鳴を用いたフェルミ原子気体 . . . 52
3.1.3 ソリトン方程式 . . . 52
3.1.4 多粒子系 . . . 52
3.1.5 可積分系の組み合わせ的側面 . . . 53
3.1.6 ランダム行列理論とその応用 . . . 54
3.1.7 結び目理論・低次元トポロジー . . . 54
3.2 青木研究室 . . . 56
3.2.1 超伝導 . . . 56
3.2.2 強相関電子系に対する新手法の開発 . . . 57
3.2.3 非磁性元素系における電子相関からの遍歴強磁性の物質設計 . . . 58
3.2.4 強相関電子系における非平衡・非線形現象 — モット絶縁破壊 . . . 58
3.2.5 分数量子ホール効果 . . . 58
3.2.6 ヘテロ界面の電子物性 . . . 59
3.2.7 周期的極小曲面上の電子 . . . 59
3.2.8 その他 . . . 59
3.3 宮下研究室 . . . 62
3.3.1 量子相互作用に起因する特異な相の発見 . . . 62
3.3.2 量子磁化過程 . . . 62
3.3.3 量子ダイナミックスの解明と制御 . . . 62
3.3.4 量子磁性体の熱伝導現象 . . . 62
3.3.5 スピンクロスオーバー錯体における相転移 . . . 63
3.3.6 フラストレートした系における遅い緩和現象 . . . 63
3.3.7 気相・液相相転移の流体方程式の定式化 . . . 63
3.3.8 カオスの量子古典対応、ランダム行列 . . . 64
3.4 小形研究室 . . . 67
3.4.1 高温超伝導の理論 . . . 67
3.4.2 コバルト酸化物における異方的超伝導 . . . 67
3.4.3 有機導体に関する理論 . . . 68
3.4.4 異方的超伝導体の理論 . . . 69
3.4.5 フラストレーションのある系での電子状態、スピン状態 . . . 70
3.4.6 電子系での新奇な物理量の理論 . . . 70
3.4.7 量子ドットでの近藤効果 . . . 70
3.5 常行研究室 . . . 75
3.5.1 固体表面の電子状態と化学反応 . . . 75
3.5.2 強誘電体と不純物効果 . . . 76
3.5.3 超高圧下の物質変化 . . . 76
3.5.4 シミュレーション手法の開発 . . . 77

4 物性実験 81
4.1 藤森研究室 . . . 81
4.1.1 高温超伝導 . . . 81
4.1.2 強相関遷移金属酸化物 . . . 81
4.1.3 磁性半導体 . . . 82
4.2 内田研究室 . . . 90
4.2.1 梯子型 Cu 酸化物の電荷秩序と超伝導 . . . 90
4.2.2 正常状態の磁気ボルテックス . . . 91
4.2.3 高温超伝導体のナノスケール不均一性と秩序競合 . . . 91
4.3 長谷川研究室 . . . 94
4.3.1 表面電子輸送 . . . 94
4.3.2 表面ナノ構造 . . . 95
4.3.3 新しい装置・手法の開発 . . . 97
4.4 福山研究室 . . . 102
4.4.1 2 次元 ^{3}He の新奇な量子相 . . . 102
4.4.2 走査トンネル分光法による 2 次元電子系の研究 . . . 103

4.4.3 異方的超伝導体の STS 研究 . . . 104
4.4.4 グラファイト化合物における超伝導 . . . 105
4.4.5 低温実験技術の開発 . . . 105
4.5 岡本 研究室 . . . 108
4.5.1 劈開表面に形成された２次元電子系 . . . 108
4.5.2 強相関２次元電子系 . . . 109
4.5.3 半導体２次元系における新奇物性の開拓と新機能デバイスの開発 . . . 110
4.6 島野研究室 . . . 113
4.6.1 新分光法の開発 . . . 113
4.6.2 **擬 1 次元電子系の THz 分光** . . . 114

5 一般物理理論 116
5.1 宇宙理論研究室 (佐藤・須藤) . . . 116
5.1.1 初期宇宙・相対論 . . . 117
5.1.2 観測的宇宙論 . . . 119
5.1.3 天体核・素粒子物理 . . . 122
5.1.4 その他 . . . 124
5.2 村尾研究室 . . . 133
5.2.1 エンタングルメント理論 . . . 133
5.2.2 エンタングルメントの応用研究 . . . 135

6 一般物理実験 137
6.1 小林研究室 . . . 137
6.1.1 超短パルスレーザーの開発 . . . 137
6.1.2 第三高調波励起の NOPA の開発 . . . 137
6.1.3 超高速分光 . . . 137
6.1.4 電場変調分光 . . . 139
6.1.5 量子情報 . . . 140
6.2 牧島研究室 . . . 145
6.2.1 宇宙X線衛星「すざく」の誕生 . . . 145
6.2.2 炭素合成プロセスの現場検証 . . . 146
6.2.3 銀河団の物理学 . . . 146
6.2.4 コンパクト天体からのX線放射 . . . 147
6.2.5 星間空間などでの高エネルギー現象 . . . 148
6.2.6 将来に向けての技術開発 . . . 148
6.3 高瀬研究室 . . . 154
6.3.1 TST-2 球状トカマクにおけるプラズマ生成・加熱・維持実験 . . . 154
6.3.2 JT-60U トカマクにおける自発電流によるプラズマ電流駆動実験 . . . 157
6.3.3 プラズマ合体を使った超高ベータプラズマ生成・維持の研究 . . . 157
6.4 坪野研究室 . . . 160
6.4.1 レーザー干渉計を用いた重力波の検出 . . . 160
6.4.2 宇宙空間レーザー干渉計 . . . 161
6.4.3 精密計測の研究 . . . 162
6.5 佐野研究室 . . . 166
6.5.1 非線形非平衡系の物理学 . . . 166
6.5.2 非平衡ソフトマターの物理学 . . . 167
6.5.3 生命現象の物理学 . . . 168
6.6 山本 研究室 . . . 173
6.6.1 富士山頂サブミリ波望遠鏡 . . . 173
6.6.2 テラヘルツ帯ヘテロダイン検出素子の開発 . . . 174
6.6.3 星形成領域の観測研究 . . . 176
6.7 酒井広文研究室 . . . 179
6.7.1 分子の配向度の増大と断熱領域から非断熱領域への拡張 . . . 179
6.7.2 非断熱的に配列した分子中からの高次高調波発生における楕円率依存性 . . . 179
6.7.3 非断熱的に配列した分子中からの高次高調波発生に対する偏光ゲート法の適用 . . . 180

6.7.4 分子内量子過程のフィードバック型最適制御技術の高度化と非断熱的分子配列への適用 180
6.7.5 円偏光したポンプ光を用いた非断熱的分子配列の制御 180
6.7.6 4 年生特別実験 181

7 生物物理 184
7.1 桑島研究室 184
7.1.1 蛋白質工学を用いた蛋白質のフォールディング研究 184
7.1.2 細胞内での蛋白質フォールディングに関与する分子シャペロンの作用機構 186
7.1.3 新しい測定技術と計算機シミュレーションを利用した蛋白質のフォールディング研究 186
7.2 能瀬研究室 191
7.2.1 シナプス特異性を決める分子の同定と機能解析 191
7.2.2 シナプス形成の生物物理 192
7.2.3 シナプス成長・可塑性の分子機構 194

8 技術部門 196
8.1 技術部門 196
8.1.1 実験装置試作室（大塚、＊南城） 196
8.1.2 安全衛生・薬品管理（佐伯、山本） 196
8.1.3 IT 関連業務（藤代） 197
8.1.4 学生実験（樫村、佐伯、藤代） 197
8.1.5 学生実習（佐伯） 197

II Summary of group activities in 2005 199
1 Theoretical Nuclear Physics Group 201
2 Theoretical Particle and High Energy Physics Group 203
3 Sakai (Hideyuki) Group 205
4 Hayano Group 206
5 Komamiya group 207
6 Minowa-Group 208
7 Aihara Group 209
8 Wadati Group 210
9 Aoki Group 211
10 Miyashita Group 212
11 Ogata Group 214
12 Tsuneyuki Group 215
13 Fujimori Group 216
14 Uchida Group 217
15 Hasegawa Group 219
16 Fukuyama Group 220
17 Okamoto Group 222
18 Shimano Group 223
19 Theoretical Astrophysics Group 224
20 Murao Group 226
21 Kobayashi Group 228
22 Makishima Group 229
23 Takase Group 230
24 Tsubono Group 231
25 Sano Group 232
26 Yamamoto Group 233
27 Sakai (Hirofumi) Group 234
28 Kuwajima Group 236
29 Nose Group 237

III　2005 年度 物理学教室全般に関する報告　239

1　学部講義概要　241

1.1　２年生 冬学期 . . . 241
1.1.1　電磁気学Ｉ： 駒宮幸男 . . . 241
1.1.2　解析力学・量子力学Ｉ： 藤森　淳 . . . 241
1.1.3　物理数学Ｉ： 常行 真司 . . . 242
1.1.4　物理実験学 ： 福山　寛、島野　亮 . . . 242
1.2　３年生 夏学期 . . . 243
1.2.1　光学 ： 山本　智 . . . 243
1.2.2　量子力学 II： 村尾　美緒 . . . 243
1.2.3　物理数学 II : 江口 徹 . . . 244
1.2.4　現代実験物理学Ｉ： 岡本 徹、桑島 邦博 . . . 244
1.2.5　電磁気学 II ： 佐野　雅己 . . . 245
1.2.6　統計力学Ｉ： 和達 . . . 245
1.3　３年生 冬学期 . . . 245
1.3.1　物理数学 III: 松尾　泰 . . . 246
1.3.2　物質科学基礎 ： 溝川貴司 . . . 246
1.3.3　電気力学 ： 蓑輪　眞 . . . 246
1.3.4　流体力学 ： 江尻 晶 . . . 246
1.3.5　現代実験物理学 II : 坪野公夫、早野龍五 . . . 247
1.3.6　量子力学 III ： 大塚孝治 . . . 248
1.3.7　生物物理学： 桑島邦博、能瀬聡直 . . . 248
1.3.8　統計力学ＩＩ ： 宮下精二 . . . 249
1.4　４年生 夏学期 . . . 249
1.4.1　プラズマ物理学： 高瀬 雄一 . . . 249
1.4.2　原子核物理学 ： 初田　哲男・酒井　英行 . . . 250
1.4.3　統計力学特論： 小形正男 . . . 250
1.4.4　生物物理学特論： 能瀬聡直 . . . 251
1.4.5　場の量子論 ： 柳田勉 . . . 251
1.4.6　一般相対論： 須藤 靖 . . . 251
1.4.7　固体物理学Ｉ： 青木 秀夫 . . . 252
1.5　４年生 冬学期 . . . 252
1.5.1　宇宙物理学： 牧島一夫 . . . 252
1.5.2　素粒子物理学 ： 相原 博昭 . . . 253
1.5.3　固体物理 II ： 長谷川修司 . . . 253
1.5.4　物性物理学特論 ： 常行真司、小森文夫、長谷川 修司 . . . 254
1.5.5　量子光学： 酒井広文 . . . 254
1.5.6　化学物理学 ： 内田　慎一 . . . 255

2　各賞受賞者紹介　256

2.1　小林孝嘉教授　：　平成 17 年度松尾学術賞 . . . 256
2.2　小林孝嘉教授　：　2005 年国際振動分光学会賞 . . . 256
2.3　牧島一夫教授　：　第 10 回日本天文学会林忠四郎賞 . . . 256
2.4　小形正男助教授　：　第１９回日本 IBM 賞 . . . 256
2.5　守川春雲博士・松田巌助手・長谷川修司助教授　：　日本表面科学会論文賞 . . . 257
2.6　有田亮太郎助手 (青木研究室)　：　ベルリン日独センター科学賞 . . . 257
2.7　金井恒人博士 (酒井広文研究室)　：　東京大学総長賞 . . . 257

3　人事異動　259

4　役務分担　260

5　教室談話会　261

6　物理学教室コロキウム　262

I

研究室別 2005年度 研究活動報告

1　原子核・素粒子理論

1.1　原子核理論研究室（大塚・初田）

原子核理論研究室の概要

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。その活動は主に二つに分けられる。一つは多数の核子から成る量子多体系としての原子核の構造とそれを支配する動力学についての研究であり、ここでは「原子核構造」と呼んでいる分野である。もう一つは、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、「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・清水助手・板垣助手（在外）及び博士研究員と大学院学生らにより行なわれた。「ハドロン物理学」は主に初田哲男教授・江尻助手・佐々木助手（在外）及び博士研究員と大学院学生らにより行なわれた。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) 不安定核の構造と反応、天体現象への応用
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) 原子核多体問題、量子カオスや核力の新しい方法論の模索

の３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、先ず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。

１番目のものは、対象としては原子核物理学の中で最も急速に進歩している分野である。安定核とは、我々の身のまわりの物質を構成している原子核で、陽子数と中性子数が等しいか、大体等しい。一方、不安定核とは、それらの数がアンバランスになっているものを指す。そのため様々な特異な性質を示すことが分かっているが、研究は始まったばかりで、未知の事柄に満ち溢れたフロンティアである。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、安定核では変わってこなかった。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系統的に異なる。そのメカニズムは核力のスピン・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、という成果が最近我々の研究室で得られた。[7] 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。[101, 102, 103, 105, 106] また、その方向に沿って、テンソル力を含めた平均場理論の構築も行っている。[103, 105, 109]

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」という新しいメカニズムや、クラスター構造と殻構造の相互関係についてもさらに研究している。その結果の一つとして、球や楕円というこれまでに考えられてきた原子核の形とは異なる、三角形のようなものが現れる。このような低密度核物質における、粒子間相関の研究は、ボーズアインシュタイン凝縮とも関連しており、今後の発展が期待される。

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。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、特に今年度は中性子数が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。[1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 101, 102, 103, 105, 106, 109] また、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。さらに、殻模型による研究の進展とも相まって、ニュートリノと原子核の反応がよく記述できるようになり、天体核現象へ応用する。さらに、ダブルベータ崩壊の核行列要素の計算を開始しニュートリノ質量の測定に備えている。[107, 108]

特に、３番目のテーマについては、相対論的な多体理論への入口となるべき相対論的平均場理論の発展 [2]、第一原理的アプローチによる殻模型計算などを探っている。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研究している。

スピン·軌道力を端的に扱う α クラスター模型の構築

α クラスター模型では、通常非中心力がクラスター内部に作用しない。ここでは、α クラスターがスピン・軌道力によって壊れる効果を波動関数に秩序変数を持ち込むことで端的に表現し、^{12}C や ^{20}Ne 核におけるクラスターの崩れの度合を数値化して表現した。[15]

テンソル力を直接扱う核構造模型の構築

従来の α クラスター模型を発展させ、α クラスターを適当に壊すことにより、これまで中心力の中に繰り込まれる事の多かった核力のテンソル部分 (テンソル力) を直接扱った端的な核構造模型を提案した。これにより、^{8}Be がテンソル力を加えてもやはり α-α 構造を持つこと、^{12}C においてはスピン・軌道力とテンソル力の競合が起こる事などが示された。[16]

He 同位体における t+t 成分の混合

He 同位体は α 粒子のまわりに中性子が運動するという模型で良く記述されるが、t+t 成分を混ぜる事でエネルギーが 200 keV 程度減少することが ^{6}He において知られてきた。この効果を He 同位体全体において検証し、どの同位体においてもほぼ同じ程度の作用であることが確かめられた。[17]

多重 α 凝縮状態の探索

全ての α 粒子がガス的に広がった s 軌道の分布を持つ α 凝縮状態の存在が最近研究されはじめ、これまで ^{12}C (3α) の第 1 励起 0^+ 状態などがその候補であることが知られてきた。より重い原子核の領域で、どのような観測量が α 凝縮状態の存在の根拠となり得るのか、多重 α 放出の増大に焦点をあてて議論した。[18]

ランダム行列理論による基底状態がもつ対称性の研究

近年、原子核殻模型においてランダムに生成された二体相互作用が与える基底状態の統計が調べられ、この基底状態は、状態数の分布とくらべて、高い対称性を持つ状態をとる傾向があるという直感と矛盾した現象が知られている。我々はこの基底状態の性質を議論し、三次元対称性を持つハミルトニアンの幾何学的な性質として、時間反転対が通常の対相互作用とは異なった重要な役割を果たすことを明らかにした。[125]

中重核の原子核構造の微視的記述

中重核領域の核構造の理論的解析では集団運動模型が有効ではあるが、実験的には加速器の長足の進歩により中性子過剰不安定核の微細な構造が明らかになりつつあり、さらなる微視的な核構造理論が求められている。我々は、配位混合の効果を取り扱えるモンテカルロ殻模型を用いて、中重核領域における偶々核の原子核構造の微視的な研究をおこなっている。本年度は、主にバリウムの同位体において、典型的ないくつかの集団運動状態とその遷移状態が中性子数の変化によってあらわれる様子を議論した。また、キセノンの同位体の磁気能率のゆるやかな遷移の実験的な振る舞いを微視的に再現することに成功した。[45, 76, 77, 111, 123, 124]

奇奇核の励起メカニズムの解明

全殻模型空間を集団運動的な核子対により作られる空間に制限し、殻模型計算を行う核子対模型を用いて、質量数 130 領域の奇奇核の数値解析を実行した。その結果、奇奇核に現れる 2 つの回転バンドのエネルギー準位や電磁遷移を再現することに成功した。さらに，これらの回転バンドは，今まで知られていなかった励起メカニズムにより生じることを明らかにした。[19, 20, 21, 48, 78, 80, 81, 126]

Ba 原子核に現れる角運動量の挟み運動

質量数 130 領域の原子核では、高スピン状態において、核子の単一粒子的な振る舞いによる角運動量の挟み運動が現れることが知られている。核子対模型により、Ba 原子核にみられる角運動量の挟み運動の発現機構を研究し、この挟み運動が 2 個の中性子と 2 個の陽子により引き起こされることを確認した。[22, 46]

現象論的核子間相互作用による IBM ハミルトニアンの導出

質量数 130 領域において現象論的に求めた核子間相互作用から、相互作用するボソン模型のハミルトニアンを導出した。偶偶核の低エネルギー状態のエネルギー準位や電磁遷移を計算したところ、ボソンの数が少ない系ではフェルミオンの結果をよく再現することを確認した。[47]

中重核領域の原子核の集団運動性と単一粒子性

核子対模型により偶偶核，奇核の微視的記述を行った。その結果，原子核の集団運動性と単一粒子性により生じるエネルギーレベルや E2 遷移を再現することに成功した。[79, 128]

ニュートリノと原子核の反応

原子核とニュートリノの反応断面積を計算する枠組みは確立されてなかったが，殻模型の精密な波動関数を用い、反応断面積を計算する枠組みを整えた。さらに、Ni 領域の原子核に対して数値解析を行った。[127]

Ne 同位体における中性子軌道の多スレータ行列式による計算

AMD 基底を多数生成させて、それらを用いた確率論的な変分法を行なった。ここでは Ne 同位体に適用させ、そのパレンス中性子のパリティを調べた。その結果パリティや量子数 $K = 1/2, 3/2$ におけるパレンス中性子の密度分布、パリティを回復する機構の違いが明らかになった。特に ^{21}Ne ではパレンス中性子の密度分布や ^{4}He での滞在確率を調べることで、コア核 ^{16}O+^{4}He の相対距離に応じて殻的な状態、分子軌道的な状態、そして原子軌道的な状態のように変化していく様子を見ることができた。[49, 82, 83, 129, 130, 131]

平均場理論に基づいた核子多体系の時間発展に関する研究

核子多体系、とくに不安定核の性質を時間発展の観点から明らかにするために、時間依存平均場理論（TDHF 法）に基礎をおいて研究をおこなった。まず中性子過剰核の反応に特徴的な反応機構の解明に向けた研究として、反応中の中性子過剰核内では、二つの中性子、または二つの陽子がより近接して存在する傾向にあることを、具体的な設定の下での計算により理論的に示した。

さらに、核分裂反応機構の解明に向けて、C.Simenel 博士（Saclay）、D.Lacroix 博士（Caen）らと共同で研究を開始し、現在までに ^{238}U の誘導核分裂に関する予備的な結果をいくつか得るに至っている。[84, 85, 132]

テンソル力を含んだ Gogny 型有効相互作用による平均場理論

以前よりテンソル力は原子核の構造や性質に対して重要な核力の成分であることは認識されていたが、これまでの平均場理論計算にはテンソル力の項を加えた有効相互作用による研究は皆無であった。そこで我々は、ポテンシャルの相対距離依存性がガウス関数型である Gogny 力に、新たにテンソル力を含めた有効相互作用による平均場計算を行った。O, Ca, Ni, Sn, Pb など球対称で閉核な原子核やその周辺の原子核におけるスピン・軌道力とテンソル力の効果を詳細に調べた。また不安定核領域になると、スピン・軌道ポテンシャルの変化でスピン・軌道力が弱くなることによるスピン・軌道分岐の減少と同程度のテンソル力が働くことにより、不安定核の構造と性質にテンソル力が大きく寄与していることを確かめた。[50, 72, 86, 87, 88, 89, 90, 133]

V_{low-k} 相互作用の分子軌道法への応用

近年、核子間相互作用の高運動量成分をカットオフしたもの (V_{low-k} 相互作用) が、制限された模型空間内の有効相互作用として有用であることがわかってきた。我々はこの有効相互作用を分子軌道法による核構造計算に用い、重水素を例としてその適用可能性を示した。[73]

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、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。

有限温度におけるハドロンのスペクトル関数

ハドロンがクォーク・グルオン・プラズマのような高温物質中でどのようにその性質を変化させるかは、相転移に伴う素励起の温度変化という理論的興味のみならず、相対論的重イオン衝突実験によるクォーク・グルーオン・プラズマ探索の鍵としても重要である。我々は、この問題を格子量子色力学の第一原理数値シミュレーションとベイズ統計解析を用いて研究を行い、クォークの非閉じ込め相転移がおこっても、相転移温度の約 1.5-2.0 倍の温度まで、様々なクォーコニュームが素励起として存在する証拠をクェンチ近似の範囲で得ている。今年度は、ダイナミカルクォークの効果が、この現象にどのような変更をもたらすかについての理論的考察を進めた。また、関連する QCD 相転移とその実験的検証についての包括的解説を含む教科書を執筆した。[23, 24]

高温高密度における QCD 相転移の数値的研究

アメリカ・ブルックヘブン国立研究所の重イオン衝突実験ＲＨＩＣにより、次々に興味深い実験結果が発表されて、高温高密度状態でのＱＣＤの様相が徐々に明らかになってきている。その実験結果を理解するために、有限温度有限密度での格子ＱＣＤの第一原理計算が非常に重要である。我々は数値シミュレーションを行い、実験で興味がある比較的低密度の状態での、状態方程式、クォーク間ポテンシャルとその遮蔽距離を計算した [25, 26, 51, 52, 53, 92, 117, 118, 142, 143]。また、相転移温度より少し高い温度の状態が単純なクォークとグルーオンのガスになっていないことが実験的に示唆されている。その状態を調べるためには、クォーク数や電荷の揺らぎや、さらに高次のキュムラントを調べることが有用であることが分かり、それを計算した [27, 54]。さらに、高密度になるとカイラル相転移がクロスオーバーから一次相転移に変わることが予想されていて、その変化する点を見つけることが重要な課題となっている。文献 [28] ではそれを見つける方法について議論した。また、QCD を理解するうえでより基本的な情報を与えるエネルギーレベル密度関数の格子 QCD による計算方法を [55, 91] では議論した。

格子 QCD 数値解析による K 中間子のセミレプトニック崩壊の研究

素粒子標準模型の検証および標準模型を超える実験的シグナルの発見に関連して、カビボ-小林-益川行列要素（CKM 行列要素）のユニタリティの検証は現代素粒子論において重要な課題の一つである。現在最も実験的に精度が高く測定されている CKM 行列要素は行列の第一行目 (V_{ud},V_{us},V_{ub}) である。V_{ub} はその他の要素に対して２桁小さいのでほとんど無視することができることから、ユニタリティの要請は $|V_{us}| = \sqrt{1-|V_{ub}|^2}$ となる。しかしながら、最新の PDG(2004) によるとこの関係式がわずかながら破れている (約 0.3%)。本研究では、V_{us} の決定に必要な K 中間子の弱い相互作用による崩壊の形状因子 $f_+(q^2)$ の測定が主目的となる。実験的に測定される崩壊率は V_{us} と前方極限 $q^2 \to 0$ での形状因子 $f_+(0)$ の積に比例し、$f_+(0)$ を理論的に精密に知ること無しには高精度で V_{us} の値を決定することはできない。フレーバー $SU(3)$ が厳密に成り立つ場合、$f_+(0) = 1$ となるがストレンジネスクォークがアップ・ダウンクォークよりやや重い現実の世界ではこの関係は成り立たない。カイラル摂動論によってフレーバー $SU(3)$ の破れの効果がどのくらいあるか見積もることができるが、摂動の最低次を超えると模型の不定性なしに評価することができない。そこで格子 QCD 数値解析を使って第一原理から非摂動論的に $f_+(0)$ を測定することが求められている。現在の実験精度は理論による $f_+(0)$ の不定性を凌駕しており、CKM 行列のユニタリティの検証には格子 QCD 数値解析による $f_+(0)$ の高精度測定が急務となっている。[58]

有限体積 · 格子場の理論における束縛状態形成の研究

近年、マルチクォーク状態（４クォーク状態）の候補ではないかと思われる中間子がいくつも発見された。BaBar によって発見された $D_s(2317)$、CLEO の $D_s(2463)$、Belle $X(3872)$ など。いずれもチャームクォークを含む共鳴状態で、ある崩壊閾値のすぐ下に存在し、非常に幅が狭く、非相対論的クォーク模型では存在が予測できなかった中間子状態である。特に Belle の $X(3872)$ は $DD*$ の閾値のほぼ直上に存在し、$DD*$ が非常に弱く束縛した状態、ハドロン分子共鳴状態ではないかと予想される。本研究の最終目標は、格子 QCD 数値解析によってマルチクォーク状態（＝ハドロン分子共鳴状態）としての可能性を探ることである。しかしながら、ハドロンの分子共鳴状態のように非常に弱く束縛した状態（あるいは閾値のごく近傍の束縛状態）は、格子 QCD 数値解析のように有限体積中で考えた場合、引力的な散乱をする二体状態との区別が難しい。なぜならば、有限体積中においてはすべてのエネルギー固有値は不連続となり無限系での束縛・共鳴状態（不連続状態）と散乱状態（連続状態）はその点で区別が難しいからである。無限系では、閾値以下の状態は束縛状態しかあり得ないが、さらに問題を複雑にしている要因として、有限系において引力的な二体散乱状態は負のエネルギー（閾値を零点として）解になることが知られている。つまり本研究では有限体積中での弱い束縛状態と二体散乱状態を区別する方法を模索するために、まず、格子 QED による電子・陽電子束縛状態の研究を行った。この場合、ハドロンの分子共鳴状態のような「複合粒子同士による束縛状態」ではなく、「素粒子による束縛状態」となり、より問題設定が簡単化され、精密な数値解析も可能となる。ただし、束縛状態から引力的な散乱状態への連続的な変化を制御するためには、長距離的なクーロン相互作用では不可能なので、光子に質量を持たせて電子・陽電子の相互作用を短距離型にした数値実験を行った。このような研究を通じて、「格子 QCD 数値解析によるハドロン分子共鳴状態の探索」へ発展させることを目指している。[57, 93]

Transition between QGP and color superconductor

We study the transition between QGP and color superconducting phase using Monte Carlo simulations of the Ginzburg-Landau Model. This study helps us to analyze the color superconducting transition in the regime where the couplings are not small and the conventional weak coupling analysis break down. Though our results more or less agree with the weak coupling calculations we find some important difference.[32, 60]

Pairing with mismatched Fermi surfaces

The system of Cooper pairing with mismatched Fermi surfaces has stirred a lot of interests recently in charge neutral cold-dense quark matter. In order to understand the origin of the chromomagnetic instability driven by mismatch, we probed the gapless phase by different external sources, and we found that, except chromomagnetic instabilities, the gapless 2SC phase also exhibits color neutral baryon current instability. This suggest that a color neutral baryon current can be spontaneously generated by increasing the mismatch between the Fermi surfaces of the pairing quarks in 2-flavor color superconductor. We described the 2SC phase in the nonlinear realization framework, and showed that each instability indicates the spontaneous generation of the corresponding pseudo Nambu-Goldstone current. The baryon current generation state resembles the LOFF state. We pointed out that, when charge neutral condition is required, there exists a narrow unstable LOFF (Us-LOFF) window, where all the magnetic instabilities exist. (It is the longitudinal Meissner mass square for the 8-th gluon is negative in this Us-LOFF window, the transverse Meissner mass square of 8-th gluon is always zero in the full LOFF window, which is guaranteed by the momentum equation.) The Us-LOFF window brings us a new challenge to solve the instability problem driven by mismatch. We developed the Ginzburg-Landau theory of an electronic superconductor at weak couling when the Fermi momenta of opposite spins are mismatched. A remarkable feature we found is that a type I superconductor becomes to a type II one at sufficiently large mismatch near the transition temperature. We estimated the fluctuation effects and the higher order corrections to GL and argued that this type transition is likely to be robust. [33, 34, 61, 62, 120, 121, 122, 144, 145]

非等方格子 QCD による multi quark 系の研究

時間方向に空間方向よりも細かいメッシュを持った非等方格子 QCD を用いて、multi quark 系 (penta quark $\Theta^+(1540)$, tetra quark(4Q), $\Lambda(1405)$) の研究を行った。$\Theta^+(1540)$ については、その最も興味深い性質の一つにその崩壊幅の狭さ ($\Gamma < 1\,\mathrm{MeV}$) がある。これを説明するために様々なメカニズムが考えられた。ここではその中の一つ、spin=3/2 の可能性を格子 QCD で検証した。その結果、$J^P = 3/2^\pm$ どちらにおいても、2 GeV 以上の非常に重たい状態しか得られず、spin=3/2 の可能性は低いことが示唆された [35]。その他、2008 年から稼動する J-PARC (大強度陽子加速器計画) に向けて、 様々な tetra-quark(4 quark 系) [67, 97] や 5 quark picture が有力視されている $\Lambda(1405)$ についても研究を進めている [146]。また、multi quark 系で用いたのとほぼ同等の空間境界条件を用いる方法で、QGP 相での charmonium の存在の有無についても研究している [36]。

Twisted-mass Wilson クォークを用いた格子 QCD の研究

Wilson クォークを用いた格子 QCD の数値シミュレーションは、ハドロン質量やカイラル有効理論に現れる低エネルギー結合定数の予言など数値実験として現象論に有益な情報を多く提供してきた。ただし、Wilson クォークの数値シミュレーションは技術的問題から実際のクォーク質量よりはるかに重い領域で行われてきた。そこで我々は、twisted-mass Wilson クォークを用い、より軽い領域でのシミュレーションを目指しその可能性を示した。また、理論的に知られていた格子正則化により現れる青木相以外の一次相転移相の存在を確認した。[37]

格子量子色力学に基づく J/ψ-ハドロン相互作用の研究

ハドロン間相互作用を量子色力学（QCD）に基づく数値シミュレーションを用いて研究した。系統的な理解のためにハドロン間相互作用が純グルーオン相互作用となる、重クォーコニウムと軽ハドロン散乱に着目した。重コォーコニウム・ビームは実験的な制御が困難であるが、その一つである J/ψ 中間子の性質は、重イオン衝突による高温核物質中でのクォーク・グルーオン・プラズマ生成を検証する指針のひとつであり注目されている。

我々は、J/ψ-π、J/ψ-ρ 及び J/ψ-N 系のエネルギーシフトを、ウィルソン・フェルミオンを用いたクェンチ近似格子 QCD 数値実験（$\beta = 6.2$、$L^3 \times T = 24^3 \times 48$、$32^3 \times 48$、$48^3 \times 48$）から測定した。その結果、全てのチャンネルにおいて引力的相互作用であることを明らかにした。また、J/ψ-ρ 及び J/ψ-N 系では $L = 24$ では、格子サイズが不十分である可能性も明らかになった。更に、ルッシャーの公式を用い散乱長を評価した結果、J/ψ-π ではカイラル対称性を反映した小さな値となった。一方、特に J/ψ-N 系での引力は強く、J/ψ 中間子と小さな原子核（$A = 3, 4$ 程度）との束縛状態が形成される可能性があることが分かった [71, 74, 98]。

カラー超伝導における準超流動渦

クォーク物質の低温高密度領域（カラー超伝導）において生じる幾何学的に安定な渦の存在を確かめ、その性質を調べた。その結果、秩序変数の張る空間の幾何学的な特徴から、この渦はこれまで通常知られてきた渦とは異なる性質を持つことが明らかになった。即ち、カラーゲージ場からなる Abrikosov ゲージ束を持ちながら、エネルギー的には超流動渦と同様の振る舞いが見られることが分かった。また、実際の観

測との関連から、中性子星内部における渦生成のシナリオと、その進化についても議論した [38, 75, 137]。

カラー超伝導におけるゲージ場の熱揺らぎの効果

カラー超伝導の有限温度相転移付近におけるゲージ場の熱揺らぎの効果について、3 フレーバー (u,d,s)、クォーク質量ゼロの極限で考察した。カラー超伝導は、ゲージ場の揺らぎを無視すると、CFL(Color-Flavor-Locking) と呼ばれる対称性が最も高い相が現れることが知られている。しかし、CJT(Cornwall, Jackiw, Tomboulis) の枠組みで熱揺らぎの効果を取り入れると、相転移線が 2 つに分離し、相転移線付近に 2SC(2-flavor superconductor) と呼ばれる相が出現することが分かった。この結果は、最近の格子シミュレーションによる計算から出された相構造とも対応していることが確認された [75, 99]。

ボーズ · フェルミ混合体の有効場の理論と束縛状態

ボゾン超流動体と希薄なフェルミ粒子の混合に対する低エネルギー有効理論をガリレイ不変性を指針として構築し、それを超流動体中の量子渦に束縛されたフェルミ粒子を調べるのに用いた。その結果、束縛状態が可能なフェルミ粒子の角運動量 (l) を決める簡単な公式を導くことができた。この公式をヘリウム 3–ヘリウム 4 溶液の場合に適用することで、$l = -2, -1, 0$ の角運動量を持つヘリウム 3 粒子が超流動ヘリウム 4 中の渦に束縛され得ることが分かった。さらに、この有効理論を粒子数に僅かな非対称性のあるフェルミ原子気体の場合にも適用した。その結果、超流動状態の BEC（ボーズ・アインシュタイン凝縮）極限では角運動量 $l = -1, 0, 1$ にしか束縛状態は存在し得ないが、ユニタリー極限に近づくに従って負で大きな角運動量を持つフェルミ原子も超流動体中の渦に束縛可能になることを予言した。[39]

マルチクォーク系としてのストレンジ · ダイバリオン及びトライバリオンの研究

2004 年に KEK-PS において鈴木氏らによる実験で存在が報告されたストレンジ・トライバリオン状態 $S^0(3115)$ と 2005 年に FINUDA Collaboration による実験で存在が報告されたストレンジ・ダイバリオン状態 $F^+(2255)$ に関してクォーク描像の立場から理論的解析を行った。これらの状態は $KNNN$ や KNN の閾値より高いエネルギーを持つにもかかわらず小さな崩壊幅を持つことから、K 中間子により深く束縛した多核子状態、もしくは非常にコンパクトな多クォーク状態ではないかと考えられている。[40]

本研究では後者を発展させ、$F^+(2255)$ は 6 個のクォーク $(3u)(2d)(1s)$ から構成されるヘキサクォーク状態、$S^0(3115)$ は 9 個のクォーク $(3u)(5d)(1s)$ から構成されるノナクォーク状態であると考えた。さらにカラー・フレーバー・スピンの対称性による群論的分類を行い、バック模型に基づくスペクトルを考察した結果、F^+ はフレーバー 8 重項、アイソスピン 1/2、スピン 1、S^0 はフレーバー 27 重項、アイソスピン 1、スピン 1/2 に属することを見出した。さらにクォーク間相互作用としてカラー磁気相互作用のほかに、フレーバー、アイソスピンに依存した相互作用を導入し、相互作用のパラメータ領域と束縛状態の可能性を考察した。その結果、ストレンジネス -2 を持つ状態については実験と無矛盾なパラメータ領域があることが分かった。また、ストレンジネス -3 を持つ状態については崩壊の閾値より安定な束縛状態の可能性を指摘した。[100, 138, 139, 140]

GL 理論におけるカイラル凝縮とダイクォーク凝縮の競合

QCD のハドロン相とカラー超伝導相の中間バリオン密度領域における相構造に関しては、その相境界はどうなっているのか、共存相が存在しているのか等、多くの問題が謎に包まれている。我々はこの問題に対して、QCD の対称性のみに基づき、カイラル凝縮とダイクォーク凝縮の 2 つの秩序変数をともに含む一般的な Ginzburg-Landau 理論を用いて解析し、フレーバー数が 2 及び 3 の場合にそれぞれ可能な全ての相構造を分類した。その結果、軸性アノマリーに由来する 2 つの秩序変数の相互作用項が本質的に働くことによって、ハドロン相からカラー超伝導相へのクロスオーバー、更にはその中間領域に新しい臨界点が存在している可能性があることを明らかにした。[41]

＜報文＞

(原著論文)

[1] G. Neyens, M. Kowalska, D. Yordanov, K. Blaum, P. Himpe, P. Lievens, S. Mallion, R. Neugart, N. Vermeulen, Y. Utsuno, and T. Otsuka : “Measurement of the Spin and Magnetic Moment of 31Mg: Evidence for a Strongly Deformed Intruder Ground State”, Phys. Rev. Lett., **94**, 022501 (2005).

[2] M. Serra, T. Otsuka, Y. Akaishi, P. Ring and S. Hirose :“Relativistic Mean Field Models and Nucleon-Nucleon Interactions”, Prog. Theor. Phys. **113**, 1009-1046, (2005).

[3] Vandana Tripathi, S. L. Tabor, P. F. Mantica, C. R. Hoffman, M. Wiedeking, A. D. Davies, S. N. Liddick, W. F. Mueller, T. Otsuka, A. Stolz, B. E. Tomlin, Y. Utsuno, and A. Volya : “^{29}Na: Defining the edge of the island of inversion for Z=11”, Phys. Rev. Lett., **94**, 162501 (2005).

[4] P. Mason, N. Mrginean, S.M. Lenzi, M. Ionescu-Bujor, F. Della Vedova, D. R. Napoli, T. Otsuka, Y. Utsuno, F. Nowacki, M. Axiotis, D. Bazzacco, P. G. Bizzeti, A. Bizzeti-Sona, F. Brandolini, M. Cardona, G. de Angelis E. Farnea, A. Gadea, D. Hojman, A. Iordachescu, C. Kalfas, Th. Kroll, S.

Lunardi, T. Martinez, C. M. Petrache, B. Quintana, R. V. Ribas, C. Rossi Alvarez, C. A. Ur, R. Vlastou, and S. Zilio : "High spin structure of ^{34}S and the proton-neutron coupling of intruder states", Phys. Rev. **C71**, 014316, (2005).

[5] D.-C. Dinca, R.V.F. Janssens, A. Gade, D. Bazin, R. Broda, B.A. Brown, M. Campbell, M.P. Carpenter, P. Chowdhury, J.M. Cook, A.N. Deacon, B. Fornal, S.J. Freeman, T. Glasmacher, M. Honma, F. G. Kondev, J.-L. Lecouey, S.N. Liddick, P.F. Mantica, W.F. Mueller, H. Olliver, T. Otsuka, J.R. Terry, B.A. Tomlin, and K. Yoneda : "Reduced transition probabilities to the first 2+ state in 52,54,56Ti and development of shell closures at N=32,34", Phys. Rev. **C71**, 041302, (2005).

[6] A. Burger, T.R. Saito, H. Grawe, H. Hobel, P. Reiter, J. Gerl, M. Gorska, H.J. Wollersheim, A. Al-Khatib, A. Banu, T. Beck, F. Becker, P. Bednarczyk, G. Benzoni, A. Bracco, S. Brambilla, P. Bringel, F. Camera, E. Clement, P. Doornenbal, H. Geissel, A. Gorgen, J. Grebosz, G. Hammond, M. Hellstrom, M. Honma, M. Kavatsyuk, O. Kavatsyuk, M. Kmiecik, I. Kojouharov, W. Korten, N. Kurzb, R. Lozeva, A. Maj, S. Mandal, B. Million, S. Muralithar, A. Neusser, F. Nowacki, T. Otsuka, Zs. Podolyak, N. Saito, A.K. Singh, H. Weick, C. Wheldon, O. Wieland, M. Winkler and RISING Collaboration : "Relativistic Coulomb excitation of neutron-rich 54,56,58Cr: On the pathway of magicity from N=40 to N=32", Phys. Lett. **B622**, 29-34 (2005).

[7] T. Otsuka, T. Suzuki, R. Fujimoto, H. Grawe and Y. Akaishi : "Evolution of Nuclear Shells due to the Tensor Force", Phys. Rev. Lett., **95**, 232502 (2005).

[8] Y. Nagai, Y. Nagai, M. Igashira, T. Takaoka, T. Kikuchi, T. Shima, A. Tomyo, A. Mengoni, T. Otsuka : "Li-7(n,gamma)Li-8 reaction and the S-17 factor at E-cm ¿ 500 keV", Phys. Rev. **C71**, 055803, (2005).

[9] T.K. Ohnishi, A. Gelberg, H. Sakurai, K. Yoneda, N. Aoi, N. Imai, H. Baba, P. von Brentano, N. Fukuda, Y. Ichikawa, M. Ishihara, H. Iwasaki, D. Kameda, T. Kishida, A.F. Lisetskiy, H.J. Ong, M. Osada, T. Otsuka, M.K. Suzuki, K. Ue, Y. Utsuno, H. Watanabe : "Gamow-Teller decay of the T=1 nucleus Cr-46", Phys. Rev. **C72**, 024308, (2005).

[10] L.A. Riley, M.A. Abdelqader, D. Bazin, M.J. Bojazi, B.A. Brown, C.M. Campbell, J.A. Church, P.D. Cottle, D.C. Dinca, J. Enders, A. Gade, T. Glasmacher, M. Honma, S. Horibe, Z. Hu, K.W. Kemper, W.F. Mueller, H. Olliver, T. Otsuka, B.C. Perry, B.T. Roeder, B.M. Sherrill, T.P. Spencer, J.R. Terry : "Thick-target inverse-kinematics proton scattering from Ar-46 and the N=28 shell below Ca-48", Phys. Rev. **C72**, 024311, (2005).

[11] B. Fornal, S. Zhu, R.V.F. Janssens, M. Honma, R. Broda, B.A. Brown, M.P. Carpenter, S.J. Freeman, N. Hammond, F.G. Kondev, W. Krolas, T. Lauritsen, S.N. Liddick, C.J. Lister, S. Lunardi, P.F. Mantica, N. Marginean, T. Mizusaki, E.F. Moore, T. Otsuka, T. Pawlat, D. Seweryniak, B.E. Tomlin, C.A. Ur, I. Wiedenhover, J. Wrzesinski : "Yrast structure of neutron-rich Ti-53", Phys. Rev. **C72**, 044315, (2005).

[12] M. Belleguic, F. Azaiez, Z. Dombradi, D. Sohler, M.J. Lopez-Jimenez, T. Otsuka, M.G. Saint-Laurent, O. Sorlin, M. Stanoiu, Y. Utsuno, Y.E. Penionzhkevich, N.L. Achouri, J.C. Angelique, C. Borcea, C. Bourgeois, J.M. Daugas, F. De Oliveira-Santos, Z. Dlouhy, C. Donzaud, J. Duprat, Z. Elekes, S. Grevy, D. Guillemaud-Mueller, S. Leenhardt, M. Lewitowicz, S.M. Lukyanov, W. Mittig, M.G. Porquet, F. Pougheon, P. Roussel-Chomaz, H. Savajols, Y. Sobolev, C. Stodel, J. Timar : "Search for neutron excitation across the N=20 shell gap in 25-29Ne", Phys. Rev. **C72**, 054316, (2005).

[13] M. Ionescu-Bujor, A. Iordachescu, D.R. Napoli, S.M. Lenzi, N. Marginean, T. Otsuka, Y. Utsuno, R.V. Ribas, M. Axiotis, D. Bazzacco, A.M. Bizzeti-Sona, P.G. Bizzeti, F. Brandolini, D. Bucurescu, M.A. Cardona, G. de Angelis, F. De Poli M, Della Vedova, E. Farnea, A. Gadea, D. Hojman, C.A. Kalfas, T. Kroll, S. Lunardi, T. Martinez, P. Mason, P. Pavan, B. Quintana, C.R. Alvarez, C.A. Ur, R. Vlastou, S. Zilio : "High spin structure and intruder configurations in P-31", Phys. Rev. **C73**, 024310, (2006).

[14] T. Adachi, Y. Fujita Y, P. von Brentano, A.F. Lisetskiy, G.P.A. Berg, C. Fransen, D. De Frenne, H. Fujita, K. Fujita, K. Hatanaka, M. Honma, E. Jacobs, J. Kamiya, K. Kawase, T. Mizusaki, K. Nakanishi, A. Negret, T. Otsuka, N. Pietralla, L. Popescu, Y. Sakemi, Y. Shimbara, Y. Shimizu, Y. Tameshige, A. Tamii, M. Uchida, T. Wakasa, M. Yosoi, K.O. Zell : "High-resolution study of Gamow-Teller transitions from the T-z=1 nucleus Ti-46 to the T-z=0 nucleus V-46", Phys. Rev. **C73**, 024311, (2006).

[15] N. Itagaki, H. Masui, M. Ito, and S. Aoyama : "Simplified modeling of cluster-shell competition", Phys. Rev. C **71**, 064397 (2005).

[16] N. Itagaki, H. Masui, M. Ito, S. Aoyama, and K. Ikeda : "Simplified method to include the tensor contribution in α-cluster model" , Phys. Rev. C **73**, 034301 (2006).

[17] S. Aoyama, N. Itagaki and M. Oi : "Systematic analyses on the t+t clustering effect in He isotopes" , Phys. Rev. C in press.

[18] Tz. Kokalova, N. Itagaki, W. von Oertzen, and C. Wheldon : "Signatures for multi-alpha-condensed states" , Phys. Rev. Lett. in press.

[19] K. Higashiyama and N. Yoshinaga : "New Neutron-Proton Single-Particle Mode and Collec-

tive Excitations in ^{134}La" , Prog. Theor. Phys. **113**, 1139-1144 (2005).

[20] K. Higashiyama, N. Yoshinaga, and K. Tanabe : "New band mechanism of doubly-odd nuclei around mass 130" , Phys. Rev. C **72**, 024315 (2005).

[21] Naotaka Yoshinaga and Koji Higashiyama : "Microscopic description of systematic doublet bands in $A \sim 130$ region" , J. Phys. G **31**, S1455-S1460 (2005).

[22] Koji Higashiyama and Naotaka Yoshinaga : "Microscopic investigation of magnetic dipole bands in ^{132}Ba" , J. Phys. G **31**, S1877-S1880 (2005).

[23] T. Hatsuda : "In-medium spectral functions from lattice QCD" , Eur. Phys.J. **C43** (2005) 45-49.

[24] K. Yagi, T. Hatsuda and Y. Miake : "Quark-gluon plasma: From big bang to little bang", (Cambridge monographs on particle physics, nuclear physics and cosmology, vol.23) Cambridge Univ. Press (2005) 446 pp.

[25] S. Ejiri, F. Karsch, E. Laermann and C. Schmidt : "The isentropic equation of state of 2-flavor QCD" , Phys. Rev. **D73**, 054506 (2006).

[26] M. Döring, S. Ejiri, O. Kaczmarek, F. Karsch and E. Laermann : "Screening of heavy quark free energies at finite temperature and non-zero baryon chemical potential" , Euro. Phys. J. **C46**, 179 (2006).

[27] S. Ejiri, F. Karsch and K. Redlich : "Hadronic fluctuations at the QCD phase transition" , Phys. Lett. **B633**, 275 (2006).

[28] Shinji Ejiri : "Lee-Yang zero analysis for the study of QCD phase structure" , Phys. Rev. **D73**, 054502 (2006).

[29] K. Sasaki and S. Sasaki : "Excited baryon spectroscopy from lattice QCD: finite size effect and hyperfine mass splitting" , Phys. Rev. **D72** (2005) 034502.

[30] K. Sasaki, S. Sasaki and T. Hatsuda : "Spectral analysis of excited nucleons in lattice QCD with maximum entropy method" , Phys. Lett. **B623** (2005) 208-217.

[31] Y. Maezawa, T. Hatsuda and S. Sasaki : "Strange tribaryons as nona-quark states" , Prog. Theor. Phys. **114** (2005) 317-327.

[32] S. Digal, T. Hatsuda and M. Ohtani : "Thermal phase transition of color superconductivity with Ginzburg-Landau effective action on the lattice" , (in preparation)

[33] Mei Huang : "Spontaneous current generation in g2SC phase" , Phys.Rev.D73, 045007(2006).

[34] Ioannis Giannakis, Defu Hou, Mei Huang, Haicang Ren : "Mismatch Induced Type Transition of a Superconductor" , cond-mat/0603263.

[35] N. Ishii, T. Doi, Y. Nemoto, M. Oka, H. Suganuma : "Spin 3/2 penta-quarks in anisotropic lattice QCD", Phys. Rev. D**72**, 074503 (2005).

[36] H. Iida, T. Doi, N. Ishii, H. Suganuma, K. Tsumura : "Charmonium properties in deconfinement phase in anisotropic lattice QCD", hep-lat/0602008(投稿中)

[37] F. Farchioni, P. Hofmann, K. Jansen, I. Montvay, G. Munster, E.E. Scholz, L. Scorzato, A. Shindler, N. Ukita, C. Urbach, U. Wenger, I. Wetzorke : "Numerical simulations with two flavors of twisted-mass Wilson quarks and DBW2 gauge action", to appear in Eur. Phys. J. C.

[38] A. P. Balachandran, S. Digal and T. Matsuura : "Semi-superfluid strings in high density QCD", Phys. Rev. D **73**, 074009 (2006)

[39] Y. Nishida and D. T. Son : "Effective field theory of boson-fermion mixtures and bound fermion states on a vortex of boson superfluid", cond-mat/0512628（Phys. Rev. A に投稿中）.

[40] Y. Maezawa, T. Hatsuda and S. Sasaki : "Strange tribaryons as nona-quark states", Prog. Theor. Phys. **114**, 317 (2005)

[41] T. Hatsuda, M. Tachibana, N.Yamamoto and G.Baym : "New Critical Point Induced by the Axial Anomaly in Dense QCD", hep-ph/0605018 (投稿中)

(会議抄録)

[42] T. Otsuka, T. Suzuki, R. Fujimoto, T. Matsuo, D. Abe, H. Grawe, and Y. Akaishi: "Shell Structure of Exotic Nuclei and Nuclear Force", Proc. of Int. Symp. on Exotic Nuclei (EXON2004), Jul. 5–12, 2004, Peterhof, Russia, ed. by Yu.E. Penionzhkevich and E.A. Cherepanov, World Scientific (2005) pp. 467–478.

[43] T. Otsuka and N. Shimizu: "Quantum Chaos Generates Regularities", Proc. of Workshop on Nuclei and Mesoscopic Physics (WNMP2004), Oct. 23–26, 2004, East Lansing, USA, AIP Conf. Proc. **777** (2005) pp. 135–139.

[44] T. Otsuka : "Varying Shell Structure od sd-pf Nuclei", Proc. of 12th Int. Symp. on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, Sep. 4–9, 2005, Notre Dame, USA, AIP Conf. Proc. **819** (2006) pp. 65–70.

[45] N. Shimizu, T. Otsuka, T. Mizusaki, and M. Honma : "Monte-Carlo shell model calculations of triaxially deformed states around ^{134}Ba", J. Phys.: Conf. Ser.**20** 65-70 (2005)

[46] K. Higashiyama and N. Yoshinaga : "Microscopic description of magnetic dipole bands in the mass $A \sim 130$" , in Proc. of *International Symposium on Correlation Dynamics in Nuclei (CDN05)*, J. Phys.: Conference Series **20**, 179-180 (2005).

[47] N. Yoshinaga and K. Higashiyama : "Microscopic derivation of the interacting boson Hamiltonian from a phenomenological interaction" , in Proc. of *International Symposium on Correlation Dynamics in Nuclei (CDN05)*, J. Phys.: Conference Series **20**, 199-200 (2005).

[48] Koji Higashiyama and Naotaka Yoshinaga : "New Band Mechanism of Doubly-Odd Nuclei Around Mass 130" , in Proc. of *CAPTURE GAMMA-RAY SPECTROSCOPY AND RELATED TOPICS: 12th International Symposium*, AIP Conference Proceedings **819**, 575-576 (2006).

[49] "Single-particle motion of excess-neutron around parity-asymmetric clusters" , Proceedings of Int.Symp on Correlation Dynamics in Nuclei, Journal of Physics.

[50] D. Abe, T. Matsuo and T. Otsuka : "Ground and single-particle properties from Gogny+Tensor mean-field calculations" , Proc. of the New Developments in Nuclear Self-Consistent Mean-Field Theories.

[51] C.R. Allton, S. Ejiri, S.J. Hands, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann, C. Schmidt : "QCD at non-zero temperature and density from the lattice", Nucl. Phys. B (Proc.Suppl.) **141**, 186(2005).

[52] M. Döring, S. Ejiri, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann : "Heavy quark free energies and screening at finite temperature and density, Proceedings of Lattice 2005", PoS LAT2005, **193** (2005).

[53] S. Ejiri, C.R. Allton, M. Döring, S.J. Hands, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann, K. Redlich : "The QCD equation of state for two flavours at non-zero chemical potential", Proceedings of Quark Matter 2005, `hep-ph/0509361`.

[54] F. Karsch, S. Ejiri and K. Redlich : "Hadronic fluctuations in the QGP", Proceedings of Quark Matter 2005, `hep-ph/0510126`.

[55] Shinji Ejiri and Tetsuo Hatsuda : "QCD Level Density from Maximum Entropy Method", Proceedings of Lattice 2005, PoS LAT2005, **183** (2005).

[56] K. Sasaki and S. Sasaki : "Finite size effect in excited baryon spectroscopy" , PoS LAT2005 (2005) 060.

[57] S. Sasaki and T. Yamazaki : "Bound states spectrum in the finite volume" , PoS LAT2005 (2005) 061.

[58] C. Dawson, T. Izubuchi, T. Kaneko, S. Sasaki and A. Soni : "K(l3) form-factor with two-flavors of dynamical domain-wall quarks", PoS LAT2005 (2005) 337.

[59] S. Sasaki : "Highlights of pentaquark spectroscopy from lattice calculations", Nucl. Phys. **A725** (2005) 165-174.

[60] S. Digal, T. Hatsuda and M. Ohtani : "Study of color superconductivity with Ginzburg-Landau effective action on the lattice" , Proceedings of Workshop on Extreme QCD, Swansea, Wales, 2-5 Aug 2005.

[61] Mei Huang : "Understanding magnetic instability in color superconductors", Int. J. Mod. Phys. A21:910-913, 2006, proceedings of "International Conference on QCD and Hadronic Physics", Jun. 16-20, Beijing, China.

[62] Mei Huang : "Spontaneous Nambu-Goldstone currents generation driven by mismatch", hep-ph/0602092, invited review article, to appear as a Chapter in the book "PAIRING IN FERMIONIC SYSTEMS: BASIC CONCEPTS AND MODERN APPLICATIONS", Series on Advances in Quantum Many-Body Theory, Vol. 8, World Scientific Publishing, Singapore.

[63] N. Ishii, H. Iida, M. Oka, F. Okiharu, H. Suganuma : "Penta-Quark Anti-Decuplet in Anisotropic Lattice QCD", Nucl. Phys. B(Proc. Suppl.)**140**, 269 (2005).

[64] T. Doi, N. Ishii, M. Oka, H. Suganuma : "The lattice QCD simulation of the quark-gluon mixed condensate $g\langle\bar{q}\sigma_{\mu\nu}G_{\mu\nu}q\rangle$ at finite temperature and the phase transition of QCD", Nucl. Phys. B(Proc. Suppl.)**140**, 559 (2005).

[65] N. Ishii, T. Doi, H. Iida, M. Oka, F. Okiharu, H. Suganuma : "Penta-quark in Anisotropic Lattice QCD", Nucl. Phys. A**755**, 467c (2005).

[66] N. Ishii, T. Doi, H. Iida, M. Oka, F. Okiharu, H. Suganuma : "Anisotropic lattice QCD studies of penta-quark anti-decuplet", Proceedings of the International Workshop "*PENTAQUARK04*", (World Scientific, 2005) 316.

[67] H. Suganuma, K. Tsumura, N. Ishii, F. Okiharu : "Lattice QCD evidence for exotic tetraquark resonance", PROCEEDINGS of SCIENCE (**LAT2005**), 070 (2005).

[68] H. Iida, T. Doi, N. Ishii, H. Suganuma : "J/ψ at high temperature in anisotropic lattice QCD", PROCEEDINGS of SCIENCE (**LAT2005**), 184 (2005).

[69] T. Doi, N. Ishii, Y. Nemoto, M. Oka, H. Suganuma : "Anisotropic lattice QCD study of pentaquark baryons in spin 3/2 channel", PROCEEDINGS of SCIENCE (**LAT2005**), 064 (2005).

[70] N. Ishii, T. Doi, H. Iida, M. Oka, H. Suganuma : "Anisotropic lattice QCD studies of penta-quarks and tetra-quarks", hep-lat/0601003, to be published from American Institute of Physics.

[71] K.Yokokawa, S.Sasaki, A.Hayashigaki, T.Hatsuda : "Low-energy J/*psi*-Hadron Interactions from Quenched Lattice QCD", PoS **LAT2005**, 215 (2005).

(学位論文)

[72] D. Abe : “Tensor-force effects on mean-field properties of nuclei”, 修士論文

[73] S. Honda : “V_{low-k} interaction and structure of light nuclei”, 修士論文

[74] K.Yokokawa : “Study of J/ψ-Hadron Interaction from Lattice QCD”, 博士論文

[75] 杣浦妙子 : “Ginzburg-Landau approach to Color Superconductivity”, 博士論文

(国際会議)

一般講演

[76] N. Shimizu, T. Otsuka, T. Mizusaki, and M. Honma : “Monte-Carlo Shell Model calculations of triaxially deformed states around $A = 134$”, 2005 Yale Nuclear Structure Workshop “Nuclear Structure Physics near the Coulomb Barrier”: June 2005 : Yale Univ., New Haven, Connecticut, USA

[77] N. Shimizu, T. Otsuka, T. Mizusaki, and M. Honma : “Monte-Carlo Shell Model calculations of triaxially deformed states around ^{134}Ba”: RIKEN RIBF interational workshop “Collective motions in unstable nuclei -experiments vs. theories-”, May, 2005: RIKEN Wako-shi, Saitama, Japan

[78] Kouji Higashiyama : “New band mechanism of doubly-odd nuclei around mass 130”, Int. Conf. on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, September 4-9, 2005, University of Notre Dame, Indiana, USA.

[79] Naotaka Yoshinaga and Koji Higashiyama : “Pair-truncated shell-model approach to the mass $A \sim 130$ region” , Second Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and the Physical Society of Japan, September 18-22, 2005, Ritz-Carlton, Kapalua, Maui, Hawaii, USA.

[80] Koji Higashiyama and Naotaka Yoshinaga : “New band mechanism of doubly-odd nuclei in the medium-heavy mass region”, Second Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and the Physical Society of Japan, September 18-22, 2005, Ritz-Carlton, Kapalua, Maui, Hawaii, USA.

[81] Koji Higashiyama : “Band structure in doubly-odd nuclei with mass around 130, Int. Symp. on Structure of Exotic Nuclei and Nuclear Forces” , March 9-12, 2006, University of Tokyo, Tokyo, Japan.

[82] 吉田亨、板垣直之、大塚孝治 : “α correlation and single-particle picture. 4th CNS International Summer School”, 2005 年 8 月 和光

[83] 吉田亨、板垣直之、大塚孝治 : “staying probability of valence neutron around each cluster second joint meeting of the nuclear physics divisions of the APS and JPS”, 2005 年 9 月 Maui Hawaii

[84] Yoritaka Iwata : “Reaction Mechanisms in neutron-rich nuclei”, International Workshop ESNT “ Mean field and beyond for nuclear reactions ”, CEA-Saclay (France), Jan. 2006.

[85] Yoritaka Iwata : “Reaction mechanism in neutron-rich nuclei by TDHF3D calculation”, RIBF 2006, Riken, Mar. 2006.

[86] D. Abe, T. Matsuo and T. Otsuka : “Ground and single-particle properties from Gogny+Tensor mean-field calculations”, YITP Workshop on New Developments in Nuclear Self-Consistent Mean-Field Theories. (May 2005, Kyoto, Japan)

[87] D. Abe, T. Matsuo, and T. Otsuka : “Results of mean-field calculations with the tensor interaction”, Recent developments in mean-field methods and the treatment of pairing. (June 2005, Saclay, France)

[88] D. Abe, T. Matsuo, and T. Otsuka : “Results of mean-field calculations with the tensor interaction”, 4th CNS International Summer School. (August 2005, Wako, Japan)

[89] D. Abe and T. Otsuka : “Ground and single-particle properties in Gogny+Tensor mean-field calculations”, 2005 2nd Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and The Physical Society of Japan. (September 2005, Maui, Hawaii)

[90] D. Abe and T. Otsuka : “Tensor-force effects on nuclei by the mean-field calculation”, International Symposium on Structure of Exotic Nuclei and Nuclear Force. (March 2005, Hongo, Japan)

[91] Shinji Ejiri and Tetsuo Hatsuda : “QCD level density from maximum entropy method”, “Lattice 2005” International Symposium on Lattice Field Theory, Jul. 25-30, 2005, Dublin, Ireland.

[92] S. Ejiri, C.R. Allton, S.J. Hands, M. Dëring, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann, K. Redlich : “The QCD equation of state for two flavor QCD at non-zero chemical potential”, “Quark Matter 2005” International Conference on Ultra Relativistic Nucleus Nucleus Collisions, Aug. 4-9, 2005, Budapest, Hungary.

[93] S. Sasaki and T. Yamazaki : “Bound state spectrum in the finite volume”, The XXIII international symposium on Lattice 2005, July 25-30, 2005, Trinity College, Dublin, Ireland

[94] N. Ishii, T. Doi, H. Iida, Y. Nemoto, M. Oka, F. Okiharu, H. Suganuma : “Penta Quark in Anisotropic Lattice QCD”, Japan-US Workshop on “*Electromagnetic Meson Production and Chiral Dynamics*”, April 2005, Osaka Univ., Osaka, Japan.

[95] N. Ishii, T. Doi, H. Iida, Y. Nemoto, M. Oka, F. Okiharu, H. Suganuma : “Anisotropic lattice QCD studies of penta-quark baryons”, *Exotic Hadron Ws*, May 2005, Nara Women’s Univ., Nara, Japan.

[96] N. Ishii, T. Doi, Y. Nemoto, M. Oka, H. Suganuma : "Anisotropic lattice QCD studies of spin 3/2 penta-quark", *Hawaii 2005*, 第 2 回 日米物理学会 合同核物理分科会 (Second Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS), September 2005, Hawaii, USA.

[97] N. Ishii, T. Doi, H. Iida, M. Oka, F. Okiharu, H. Suganuma : "Anisotropic lattice QCD studies of penta-quarks and tetra-quarks", *PANIC05*, Particles and Nuclei International Conference, October 2005, Santa Fe, NM, USA.

[98] K.Yokokawa, S.Sasaki, A.Hayashigaki, T.Hatsuda : "23rd International Symposium on Lattice Field Field (Lattice 2005)" , July 25-30, 2005, Trinity College, Dublin, Ireland.

[99] 松浦妙子, 飯田圭, 橘基, 初田哲男 : "The effect of thermal fluctuations of gauge fields in realistic dense quark matter", 2005 年 9 月 18-22 日, 第 2 回 日米物理学会合同核物理分科会 (Ritz Carlton Hotel, Hawaii)

[100] Y. Maezawa, T. Hatsuda and S. Sasaki : "Strange Dibaryons and Tribaryons as Hexa- and Nona-Quark States" (Poster session), PANIC05, (Oct. 24-28, 2005, Santa Fe, USA)

招待講演

[101] T. Otsuka : "Shell structure of exotic nuclei and NN force", INFN Workshop on Reactions and Structure with Exotic Nuclei, Feb. 24-26, 2005, Pisa, Italy.

[102] T. Otsuka : "Structure issues in exotic heavy nuclei", Int. Workshop on Neutron-Rich Radioactive Ion Beams - Physics with MAFF -, Mar. 29 - Apr. 1, 2005, Kloster Banz, Germany.

[103] T. Otsuka : "New aspect of nuclear mean field theory; Spin-isospin interaction and shell evolution", YITP Workshop on New Developments in Nuclear Self-Consistent Mean-Field Theories, May 30 - Jun. 1, 2005, Kyoto, Japan.

[104] T. Otsuka: "TDHF calculations on nuclear reactions", Symposium en l'honneur de Paul Bonche, Jun. 27, 2005, Saclay, France.

[105] T. Otsuka: "Spin-isospin NN interaction in nuclear mean field", Workshop ESNT Recent developments in mean-field methods and treatment of pairing, Jun. 28 - Jul. 8, 2005, Saclay, France.

[106] T. Otsuka : "Varying Shell Structure of sd-pf Nuclei", Proc. of 12th Int. Symp. on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, Sep. 4-9, 2005, Notre Dame, USA.

[107] T. Otsuka : "Nuclear structure, nuclear force and spin-isospin excitations in stellar processes", Workshop on Neutrino Astrophysics, 2nd Japan-US Joint Nuclear Physics meeting, Sep 18, 2005, Maui, USA.

[108] T. Otsuka : "Neutrino reaction and double beta decay in medium-heavy nuclei", Workshop on Neutrino Nuclear Responses in Double Beta Decays and Low-energy Astro-neutrinos, Dec. 2-4, 2005, Harima Science Park, Japan.

[109] T. Otsuka : "Exploring variations ofsingle-particle motions in RIBF nuclei", Int. Workshop on Nuclear Physics with RIBF, Mar. 13–17, 2006, Wako-shi, JAPAN.

[110] N. Itagaki : "Cluster-shell competition in light nuclei — inclusion of non-central interactions in α-cluster model", International Symposium on Structure of Exotic Nuclei and Nuclear Forces (SENUF06) March 9-12 University of Tokyo, Japan.

[111] N. Shimizu, T. Otsuka, T. Mizusaki, and M. Honma : "Monte-Carlo Shell Model calculations of Xe, Ba isotopes", International symposium on "Structure of Exotic Nuclei and Nuclear Forces": Mar. 2006: Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan

[112] T. Hatsuda : "Hot and Dense QCD", New Trends in Particle Detection of Experiments at the Future European Facilities, May 16-20, 2005, Yalta, Ukraine.

[113] T. Hatsuda : "Hadrons above T_c", International Conference on QCD and Hadronic Physics, June 16-20 Jun 2005, Beijing, China. [hep-ph/0509306: Int.J.Mod.Phys.A21:688-693,2006].

[114] T. Hatsuda : "Hadronic Spectral Functions fom Lattice QCD with Maximum Entropy Method", ECT* Workshop on Highly Excited Hadrons, July 4-9 2005, Trento, Italy.

[115] S. Digal, T.Hatsuda and M. Ohtani : "Study of color superconductivity with Ginzburg-Landau effective action on the lattice". Workshop on Extreme QCD, Aug. 2-5, 2005, Swansea, Wales. [hep-lat/0511018]

[116] T. Hatsuda : "Chiral symmetry in QCD matter", YITP Workshop on Hadrons at finite density, Feb. 20-22, 2006, YITP, Kyoto.

[117] Shinji Ejiri : "Study of QCD phase transition by lattice simulations", YITP Workshop on Hadrons at finite density, Feb. 20-22, 2006, YITP, Kyoto.

[118] Shinji Ejiri : "QCD at finite density: results from Taylor expansions, International Workshop on QCD at Finite Density", May 21-25, 2006, ECT* Trento, Italy.

[119] Shoichi Sasaki : "Lattice QCD and Spin Physics", Second Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS, September 18-22, 2005, Maui, Hawaii, USA

[120] Mei Huang : "Resolving Instabilities in the Gapless Color Superconductor", International Conference on QCD and Hadronic Physics, Jun. 16-20, Beijing, China.

[121] Mei Huang : “Understanding magnetic instability in gapless superconductors: loss of phase coherence driven by mismatch”, INT workshop on “Pairing in Fermionic Systems: Beyond the BCS Theory”, Sept. 19 - 23, 2005, Seattle, USA.

[122] Mei Huang : Review talk “Pairing with mismatched Fermi surfaces”, CCAST workshop on ”High density nuclear matter”, Mar. 6-10, Beijing, China.

(国内会議)

一般講演

[123] N. Shimizu, T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Honma : “Monte-Carlo Shell Model calculations of Xe, Ba isotopes”, 2005 年度物理学会秋の分科会, 2005 年 9 月, Hawaii, USA

[124] 清水 則孝: 中重核領域における原子核殻模型計算 : “2005 年度 KEK 大型シミュレーション研究 ワークショップ”, 2006 年 2 月, 高エネルギー加速器研究機構, 筑波, 茨城

[125] 清水則孝、大塚孝治 : “Quantum chaos and symmetries”, 東大 CNS ワークショップ「殻模型の過去、現在、未来」, 2006 年 1 月, 東大 CNS, 東京

[126] 東山幸司 : “New interpretation of chiral doublet bands by a pair-truncated shell model”, 殻模型の過去、現在、未来（東京大学 原子核科学研究センター 2006 年 1 月）

[127] 東山幸司，大塚孝治，鈴木俊夫，本間道雄，A.B. Balantekin，梶野敏貴 : “ニュートリノによる原子核励起と重粒子放出”, 日本物理学会第 61 回年次大会（愛媛大学 2005 年 3 月）

[128] 原澄人，吉永尚孝，東山幸司 : “Mo-Ru-Pd 領域の核子対殻模型計算”, 日本物理学会第 61 回年次大会（愛媛大学 2005 年 3 月）

[129] 吉田亨、板垣直之、大塚孝治 : “軽い原子核のクラスター構造”, QUESTS RA 若手交流シンポジウム, 2005 年 11 月　東京大学

[130] 吉田亨、板垣直之、大塚孝治 : “neutron motion around asymmetric cluster and cluster-shell competition in 21Ne Binding mechanism and new dynamics in weakly bound systems” 2005 年 12 月 京都大学

[131] 吉田亨 : “cluster and shell correlations in Ne isotopesPast, pre sent and future of shell model”, ２００６年１月 和光

[132] 岩田順敬、大塚孝治 : “TDHF による中性子過剰核の反応”、日本物理学会第 61 回年次大会 (愛媛大学、愛媛、2006 年 3 月)

[133] 阿部大介、大塚孝治 : “テンソル力を導入した平均場理論による不安定核の研究”, 日本物理学会第６１回年次大会　(2005 年 3 月愛媛・松山大学)

[134] N. Ishii, T. Doi, H. Iida, Y. Nemoto, M. Oka, F. Okiharu, H. Suganuma : “Anisotropic lattice QCD studies of penta-quark”, Workshop on LEPS/SPring-8 new beamline, July 2005, RCNP, Osaka Univ., Osaka, Japan.

[135] N. Ishii, T. Doi, H. Iida, Y. Nemoto, M. Oka, F. Okiharu, H. Suganuma : “Penta-quark and tetra-quarks in anisotropic lattice QCD”, 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, 伊東温泉 ホテル伊東ガーデン, 神奈川県伊東市, 2005 年 11 月

[136] 石井理修, 土井琢身, 岡真, 菅沼秀夫 : “5 quark picture of Lambda(1405) with anisotropic lattice QCD”, 日本物理学会 第 61 回年次大会, 愛媛大学, 愛媛県松山市, 2005 年 3 月

[137] 松浦妙子 : “Non-Abelian Vortices in Color Superconductivity ”, 基研研究会「熱場の理論とその応用」(京都大学 基研、2005 年 8 月 24-26 日)

[138] 前沢祐 : “マルチクォーク系としてのストレンジ・ダイバリオン及びトライバリオンの研究”、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 (伊東温泉、2005 年 11 月)

[139] 前沢祐 : “マルチクォーク系としてのストレンジ・ダイバリオン及びトライバリオンの研究”、ＫＥＫ研究会『ＱＣＤとハドロン物理の新展開』(KEK、2006 年 2 月)

[140] 前沢祐、初田哲男、佐々木勝一 : “マルチクォーク系としてのストレンジ・ダイバリオン及びトライバリオンの研究”、日本物理学会第 61 回年次大会 (愛媛大学・松山大学、2006 年 3 月)

招待講演

[141] 初田哲男 : “高密度 QCD”, 第 18 回理論懇シンポジウム「高エネルギー天体物理学の最前線」(京都大学 基礎物理学研究所、2005 年 12 月 25 日-27 日)

[142] 江尻信司 : “格子 QCD の数値シミュレーションによる高温高密度での QCD 相転移の研究”, 基研研究会「熱場の理論とその応用」(京都大学 基研、2005 年 8 月 24-26 日)

[143] 江尻信司 : “QCD phase transition at finite density and temperature”, (シンポジウム：クォーク・ハドロン多体系の物理：J-PARC を目指して), 日本物理学会第 61 回年会 (愛媛大学、2006 年 3 月 27-30 日)

[144] Mei Huang : “Lectures ”Chiral and diquark condensations in Nambu–Jona-Lassino model”, A mini workshop at Nara University, February 13-15, 2006.

[145] Mei Huang : “Review talk ”Progress of understanding and resolving magnetic instabilities in gapless color superconductivity ”, KEK workshop on ‘new development of QCD and hadron physics’, Feb. 27 to Mar 1, 2006, KEK, Japan.

[146] 石井理修 : “Exotic states in lattice QCD”, 日本物理学会 第 61 回年次大会, 愛媛大学, 愛媛県松山市, 2005 年 3 月

1.2 素粒子論研究室（江口・柳田・松尾）

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

1.2.1 弦理論

2 次元共形場理論

弦の作用はその世界面上の共形場の理論として記述される。弦理論の様々な状況での振る舞いを明らかにするためには 2 次元共形場理論の性質を調べることが必要となる。

江口と菅原は Taormina 氏 (ダラム大) と共に種々の拡張された超共形代数、large $N = 4$ 代数、small $N = 4$ 代数、$N = 3$ 代数、を調べた。２つの $SU(2)$ カレント代数を含む large $N = 4$ 代数を変形すると、パラメータ γ の両端の値 $\gamma = 0, 1$ で、ひとつの $SU(2)$ を含む small $N = 4$ 代数が得られ、D5-D1 ブレーン系のクーロン相 ($\gamma = 0$) とヒッグス相 ($\gamma = 1$) を記述する。一方、中間の値 $\gamma = 1/2$ では $N = 3$ 代数が得られる。江口、菅原、Taormina はこれらの代数の表現を調べ指標公式のモジュラー変換性を決定した。また、クーロン相とヒッグス相の境目を記述すると考えられる $N = 3$ 代数の系の物理的性質を調べた [46, 66]。

弦理論のソリトンである D ブレーンを共形場理論を用いて厳密に記述する方法として境界状態がある。これまで境界状態は閉弦セクターで定義され、ブレーンによる閉弦の放出・吸収を記述する状態として定義されてきたが、松尾、今村、礒野はこれを開弦セクターに拡張した。この状態はブレーンが交差している状況で一方のブレーンからもう一つのブレーン上を伝搬する開弦が吸収・放出される過程を記述するものである。この状態は弦の場の理論の文脈では、閉弦の場合の状態が満たしていた冪等方程式を満たす状態として考案された [24][39]。さらにこの状態の詳しい研究、特に直角に尖った隅における共形アノマリーの構造や相関関数の計算などがなされた [13]。

フラックス付きコンパクト化

超弦理論の枠組み内で 4 次元の現象論を実現するにあたっては、6 次元の空間をコンパクト化しなければいけないが、安直に行うと内部空間の変形に伴うゼロ質量の粒子が沢山あらわれ現実とまるで合致しない。それを回避するには、コンパクト化する内部空間に超弦理論における拡張された電磁場のフラックスを入れれば良いことが知られているが、フラックスの導入の方法によって、10^{200} もの超対称真空が生じるであろうと思われている。そのような多数の真空において内部空間がどのような形であるかを逐一調べるのは実際的でない。そこで Ashok と Douglas は統計的な扱いをこころみ、conifold とよばれる特異性が内部空間に生じる場合の確率が高いということを示していた。さて、特異性は conifold 以外にもいろいろな種類のものがあり、特異性が生じると興味深い力学が生じることも知られている。そこで江口と立川は、種々の特異性が生じる場合についての確率を調べた。結果、特異性の種類によらず普遍的な確率の増大があること、また確率密度は特異性が発散する極限で発散するが積分可能に留まることを示した [8]。

量子重力・行列模型

行列量子力学 (Matrix Quantum Mechanics) は低次元の重力を厳密に記述する定式化であるが、これまでは直接弦模型に対応する singlet セクターのみが研究されてきた。松尾は Kostov 氏 (サクレー) と共同で non-singlet セクターの研究を始めた。singlet セクターが自由フェルミオンで記述される自明な力学系であるのに対し non-singlet セクターはある種の Calogero で記述される、自明でない可解系となる。特にエネルギー固有値の厳密解の積分表示や large N 極限における振る舞い (低次元重力系のソリトンである長い弦を記述している) が得られた [34, 35]。特徴的な現象としてユニタリー行列模型の相関関数が積分核として現れる。

初田は行列模型における non-singlet sector の働きとその 2 次元量子重力理論への応用について、最近の発展を修士論文にまとめた [31]。

さまざまな背景上の弦理論と D-ブレーン

様々な背景時空上での弦や D-ブレーンの振る舞いを調べることは、弦理論そのものの性質を解明する上で不可欠であるばかりでなく、ゲージ理論との双対性の研究や、現実的な現象論的モデルを作るうえでも重要である。

菅原と中山は、Rey 氏（ソウル国立大）とともに、(Lorentzian)2 次元ブラックホールに吸収される D0-ブレーンのダイナミクスに関し、境界共形場理論の立場から解析を行った。背景が曲がっているため、波動関数の境界条件の任意性に起因してウィック回転はより非自明となり、物理的に興味深い様相を示す。閉弦の輻射率に関しては、ブラックホールに吸収されるモードは rolling tachyon と同様の Hagedorn 的振る舞いを示すが、無限遠への ‘out-going’ モードは、Hawking 温度での熱的輻射と解釈できることを示した。更に輻射率が affine $SL(2)$ のレベル k に関して興味深い相転移を示し、最近提案されている「ブラックホール/ストリング相転移」との関連について論じた [2, 22, 37, 50]。

また、菅原と中山は、Rey 氏（ソウル国立大）との共同研究 [45] において time-like sine-Liouville 模

型を用いて宇宙の初期特異点を解消する機構の精密な理論的検証を行った。

中山は、Giribet 氏（ブエノス・アイレス大学）との共同研究 [38, 54] で Stoyanovski-Ribault-Teschner map として知られる、$SL(2,R)$ WZNW 模型と Liouville 模型を結びつける関係式を、一般化し、その物理的意味を調べた。

今村は IIA 型超弦理論において 4 つの超対称性を残すようなブレーン配位をブレーンプローブ上の量子力学の観点から調べ、Denef らによって構成された超重力理論の古典解の上におかれた D0-ブレーンの受けるポテンシャルエネルギーがある特定のパラメーター領域では完全に再現されることを示した。また、$SU(2)_R$ カレントへの量子補正として静止した D0-ブレーンが持つ角運動量が現れることを示した [14]。

Raeymaekers は Gaiotto, Strominger および Yin によって提案された、D-ブレーンプローブ上の束縛状態のスペクトルを調べる方法を用いてブラックホールや D-ブレーン系のエントロピーについて研究した [23, 47, 58]。

Raeymaekers、戴は Trivedi 氏および Nampuri 氏 (Tata Institute, Mumbai) とともに Tripathy と Trivedi によって発見された IIA 型超弦理論における超対称性のない古典解を用いてプローブ上の束縛状態とブラックホールの微視的状態との対応が超対称性のない場合にも存在するのかどうかの研究を行った。

また、Raeymaekers は Yogendran 氏 (KIAS, Seoul) とともに 2 つのチャージを持つ D1-D5 系の微視的状態についても同様の解析を行った。そのためにまず D1-D5 系を表す曲がった背景時空における超対称性を破らないような D-ブレーンのプローブの分類を行い、さらにその結果を用いてエントロピーについての解析を行った。

戴は疋田氏（KEK）とともに、ツイストタキオンの凝縮による Misner 空間の特異点の解消について研究した [9]。D インスタントンをプローブとして用いると、その上の有効理論の Higgs ブランチのモジュライの変化から、ツイストタキオンが凝縮する際に Misner 空間が含むビッグバン特異点近傍の計量の変わり具合を読み取ることができ、タキオン凝縮によってビッグバン近傍が滑らかになることが分かった。

ゲージ／重力対応

ゲージ理論と弦理論の関係を調べることは、素粒子論における重要な研究分野の一つである。特に近年、曲がった空間上の弦理論と共形対称性を持つ場の理論の間の対応が注目されている。これは $d+1$ 次元 Anti de Sitter (AdS) 時空上の弦理論と、d 次元時空上の共形場理論 (CFT) の間の対応であり、しばしば AdS/CFT 対応と呼ばれる。

さらにこの対応は共形対称性をもたないような場合にまで拡張され、より広い意味でゲージ・重力対応とも呼ばれている。この対応を用いれば、直接摂動論を用いて議論することが難しい、強い相互作用をしている系の性質を、重力やブレーンを用いることで調べることができる。今村は [17] において超対称性のないゲージ理論におけるバリオン頂点、すなわち QCD 弦の分岐点の持つエネルギーを、AdS/CFT 対応を用いて計算した。バリオン頂点は AdS ブラックホール上の滑らかな D-ブレーン配位に対応することが知られているが、そのエネルギーがほとんど 0 になることを数値的な計算によって示した。

AdS/CFT 対応は AdS 空間上の半古典的な弦と CFT における大きな共形次元を持つ演算子を対応付ける。このような演算子はスピン鎖模型を用いて記述するのが便利であることが知られている。こうした弦の半古典状態とスピン鎖模型との対応を調べることは、非 BPS 領域における AdS/CFT の検証として重要な意義を持つ。岡村は Chen 氏 (Cambridge U., DAMTP) とともに，Lunin-Maldacena 背景上の spinning string 解を構成し、これを β-deformed $\mathcal{N}=4$ super Yang-Mills 由来のスピン鎖模型と比較した。その結果、こうした対応が超対称性の低いケース ($\mathcal{N}=1$) についても成り立つことを確認した [18, 59, 61]。

また岡村は高山氏（阪大）、吉田氏（KEK）とともに、こうしたスピン鎖と半古典弦の対応を open string セクターに拡張した例として、D3-D5 系の open string と defect CFT 演算子との対応を調べた [10, 52, 57, 21, 68]。

井手口は学位論文 [27] において、AdS 空間の orbifold 上の半古典的な弦と quiver ゲージ理論におけるオペレータの間の対応について考察した。

立川は、Benvenuti 氏（Pisa 大）、Mahato 氏、Pando Zayas 氏（Michigan 大）とともに、5 次元佐々木-Einstein 多様体の 4 次元部分多様体を膨らませる変形の場の理論における対応物を調べ、双対の共形場理論次元 6 の演算子が普遍的に存在すること見いだした。また、超共型理論の三角量子異常を知ることは a-maximization を実行するためなどにも基本的であるが、立川は、Benvenuti 氏（Pisa 大）、Pando Zayas 氏（Michigan 大）とともに、これが佐々木-Einstein 多様体の幾何からどのように得られるかを調べた。また、その結果が場の理論の予言と一致することを示した。これは AdS/CFT 対応の更なる確証になっている [64, 72]。

木村は佐々木-Einstein 多様体上の弦理論と $\mathcal{N}=1$ 超対称ゲージ理論の AdS/CFT 対応に関して最近の発展を修士論文にまとめた [28]。

位相的弦理論

桜井は Beilinson-Drinfeld の chiral algebra を用いた量子コホモロジーに対する結果が、2 次元の Hitchin 系の変形量子化から得られること、さらに heterotic model から A-model に幾何学的転移を行わなくても、ホモロジカルミラー対称性を援用して open に拡張できることを提唱した [33]。また桜井は chiral algebra における geometric Langlands duality を量子変形した D-加群の Fourier-Mukai 変換について、擬モジューラー形式の分配関数を基にして del Pezzo 9 の場合について議論した。同時に、通常用いられる

Cech cohomology ではなく、ループ空間と導来圏を用いた定式化が chiral de Rham complex には必要であると提案した [51]。さらに桜井は、すべての（非トーリックを含む）del Pezzo 曲面を調べることで、ADE 型のピカール群の affine Hecke 環を得た。また非アフィンな chiral algebra の gerbe が well-defined であることを確かめる必要性を論じた [67]。

瀧は修士論文 [29] において、トーリック-カラビ・ヤウ多様体上の位相的弦理論の最近の発展と、低エネルギー有効理論への応用についてまとめた。

1.2.2 場の理論

超対称共形ゲージ理論

超対称性を持つゲージ理論は統一理論として有望であると同時に、その数学的な構造のために様々な、時には厳密な解析が可能であり、一般の場の理論の本質的な性質を見極めるための重要な足がかりとして活発に研究が行われている。とくに、共形対称性を持つ超対称ゲージ理論 (SCFT) は弦理論との間に密接な関係（AdS/CFT 対応）があり注目されている。

4 次元 $\mathcal{N}=1$ 超対称ゲージ理論の赤外固定点として現れる SCFT の研究は、強結合の物理を理解する上でも AdS/CFT の検証をする上でも重要である。近年 Intriligator と Wecht によって a-maximization という手法が開発され、SCFT にとって重要な量である R チャージが計算できるようになった。川野、大河内、立川、八木は、この方法を利用して Pouliot-type duality を持つ $Spin(10)$ 理論でスピノル表現の物質場が一つのモデルの赤外固定点を調べ、ベクトル表現の物質場の数によってはメソン演算子が理論からデカップルすることを示した [7, 20, 48, 56]。川野、大河内、八木は更にスピノル表現の物質場が多数ある場合を詳細に調べた [62]。

大河内は奥田氏（カリフォルニア工科大）とともに、２つの随伴表現といくつかの基本表現に属する物質場が入った $SU(N)$ 超対称ゲージ理論の赤外固定点を議論した。メソン形のスーパーポテンシャルを考えることで、これまで知られていなかった赤外固定点が得られ、それが妥当であるかの議論を行った [5]。

d次元の超共型理論は AdS/CFT 対応によって $d+1$ 次元の反ドジッター空間上の重力理論から調べることもできるので、a-maximization が重力理論の観点からどう見えるかを調べる事は自然な疑問である。立川は [4, 75] において、a-maximization が 5 次元の AdS 超重力理論において、超ポテンシャルの最小化に対応することを見いだした。

SCFT を分類することは、場の理論・弦理論の枠組みを定めるのに重要である。SCFT の指数は超対称共形場を特徴付ける新しい量であり、中山は、その性質を詳しく調べた [15, 73]。具体的に、オービフォルドゲージ理論や、コニフォールドゲージ理論で指数を計算し、AdS/CFT 対応から予言される結果を再現することを示した。

超重力理論の量子異常

超重力理論は、重力理論を超対称性を持つように拡張したものであり、弦理論の低エネルギーでの振る舞いを記述するのに不可欠である。また、現象論的な模型を作る際にも重要である。超重力理論にポテンシャル項を超対称性と矛盾せず付け加える方法としては、大域 R 対称性をゲージ化する方法のみが知られている。しかし、ゲージ対称性はしばしば量子異常を被り、理論のユニタリティを破ってしまうことが知られている。鈴木と立川は、６次元の超重力理論が、局所的および大域的な一般座標変換・ゲージ変換の下で量子異常を受けないための条件を一般的に調べる事によって、６次元の ゲージ化された超重力理論において、量子異常を打ち消すことのできる模型が、従来考えられていたよりも莫大な数存在することを示した [12, 60, 65]。

1.2.3 TeV スケールの標準模型、素粒子論的宇宙論

現在、標準理論を超える理論の有力な候補の一つとして、超対称性を持つように拡張された標準理論 (超対称標準理論) が考えられている。この理論は、階層性問題が解消される可能性があること、標準理論の三つのゲージ理論の結合定数が高いエネルギースケールでよく一致することなどから支持されている。しかしながら、超対称性の破れの現れ方についてはまだ多くの疑問が残されている。特に、レプトンやクォークの超対称対として存在すると考えられているスレプトン、スクォークの二乗質量行列は超対称性の破れを示す重要なパラメータであるが、フレーバー対称性を破る中性カレント相互作用が非常に小さいという観測結果から、その大きさや形が厳しく制限されている (SUSY-FCNC 問題)。また、一般に長寿命のグラヴィティーノは、崩壊の際にビッグバン元素合成の予言を変えてしまうことが知られている。グラビティーノの量は宇宙初期の温度に比例するため、この事実から宇宙の初期温度が厳しく制限されている (グラヴィティーノ 問題)。

これらの問題を解決する一つの解決策として 4 次元超共形場理論を応用したものがある。4 次元超共形場理論を用いることで SUSY-FCNC 問題を解決するスペクトラムを実現し、また重い質量により十分早くグラビティーノを崩壊させることが原理上可能であることは知られていたが、具体的で有望なモデルは存在していなかった。柳田、井沢、伊部、中山、新原、は、超対称性を自発的に破る模型を 4 次元超共形場理論に埋め込むことで具体的にそのようなモデルを構築することに成功した [3, 6]。

またもうひとつの解決策として、ミニマルな超重力理論が考えられている。ミニマルな超重力理論では、スレプトンやスクォークが高エネルギーで普遍的な質量を持つため SUSY-FCNC 問題を起こさない。またミニマルな超重力理論では、暗黒物質の量から比較的重い、すなわち比較的短寿命のグラヴィティーノが予言されるので、初期温度の制限が比較

的緩くなることが分かる。その結果、宇宙のバリオン数を右巻きニュートリノで説明するのに必要な温度 ($T \gtrsim 10^{6-7}$ GeV) まで上げても gravitino 問題が生じないことが知られている。このようなミニマルな超重力理論は大きな cutoff スケールを導入することで実現することができる (LCSUGRA)。

しかしながら、LCSUGRA では繰り込み不可能な演算子の係数は制限され、繰り込み不可能な演算子を利用したインフレーション模型で観測を説明できうるか不明瞭であった。そこで、柳田、井沢、伊部、新原は new inflation 模型を LCSUGRA のもとで考察した [19]。この理論ではさらに inflation セクターのパラメーターからグラビティーノの質量がきまり、ビッグバン元素合成の予言、宇宙背景輻射の揺らぎの観測、宇宙に存在するバリオンの非対称性を LCSUGRA のもとで説明できるか非自明であったが、自然なパラメーターで実現されることを示した。

また、標準模型を超えた理論の他の候補として高次元時空を利用した Randall-Sundrum 模型が考えられている。この模型では階層性問題が時空の計量から説明され、また湯川相互作用の大きさを $O(1)$ の相互作用で説明することが可能となるため非常に魅力的であると考えられている。

しかしながら、単純な模型では陽子の寿命が短いと言う点や、ニュートリノのマヨラナ質量が観測と比べて大きすぎるといった点があることが知られている。そこで中島は、修士論文 [30] において Randall-Sundrum 模型における現象論の基本的な性質をまとめ、陽子崩壊やニュートリノ質量に関連した問題の原因となる繰り込み不可能な演算子を、新たな対称性を導入することによって禁止する方法について考察した。

＜報文＞

(原著論文)

[1] M. Kawasaki and T. Yanagida, "511-keV gamma ray from moduli decay in the galactic bulge," Phys. Lett. **B624** (2005) 162.

[2] Y. Nakayama, S. J. Rey and Y. Sugawara, "D-brane propagation in two-dimensional black hole geometries," JHEP **0509**, 020 (2005).

[3] M. Ibe, K. I. Izawa, Y. Nakayama, Y. Shinbara and T. Yanagida, "Conformally sequestered SUSY breaking in vector-like gauge theories," Phys. Rev. D **73**, 015004 (2006)

[4] Y. Tachikawa, "Five-dimensional supergravity dual of a-maximization," Nucl. Phys. B **733** (2006) 188.

[5] T. Okuda and Y. Ookouchi, "Higgsing and superpotential deformations of ADE superconformal theories," Nucl. Phys. B **733** (2006) 59.

[6] M. Ibe, K. I. Izawa, Y. Nakayama, Y. Shinbara and T. Yanagida, "More on conformally sequestered SUSY breaking," Phys. Rev. D **73**, 035012 (2006).

[7] T. Kawano, Y. Ookouchi, Y. Tachikawa and F. Yagi, "Pouliot Type Duality via a-Maximization," Nucl. Phys. B **735** 1 (2006).

[8] T. Eguchi and Y. Tachikawa, "Distribution of flux vacua around singular points in Calabi-Yau moduli space," JHEP **0601** (2006) 100.

[9] Y. Hikida. and T.-S. Tai, "D-instantons and Closed String Tachyons in Misner Space," JHEP **0601**, 054 (2006).

[10] K. Okamura, Y. Takayama and K. Yoshida, "Open spinning strings and AdS/dCFT duality," JHEP **0601**, 112 (2006).

[11] M. Tanimoto and T. Yanagida, "A Higher-dimensional origin of the inverted mass hierarchy for neutrino," Phys. Lett. **B633** (2006) 567.

[12] R. Suzuki and Y. Tachikawa, "More anomaly-free models of six-dimensional gauged supergravity," J. Math. Phys. (in press)

[13] Y. Imamura, H. Isono and Y. Matsuo, "Boundary states in the open string channel and CFT near a corner," Prog. Theor. Phys. **115** (2006) (in press).

[14] Y. Imamura, "Large N vector quantum mechanics and bubbling supertube solutions," Prog. Theor. Phys. **115** (2006) 797-813.

[15] Y. Nakayama, "Index for orbifold quiver gauge theories," Phys. Lett. B **636**, 132 (2006).

[16] F. Takahashi and T. Yanagida, "Unification of dark energy and dark matter," Phys. Lett. **B635** (2006) 57.

[17] Y. Imamura, "Baryon vertices in AdS black hole backgrounds," Prog.Theor.Phys. **115** (2006) 815-826.

[18] H.-Y. Chen and K. Okamura, "The anatomy of gauge/string duality in Lunin-Maldacena background," JHEP **0602**, 054 (2006).

[19] M. Ibe, K. I. Izawa, Y. Shinbara and T. T. Yanagida, "Minimal supergravity, inflation, and all that," To appear in Phys. Lett. B.

(会議抄録)

[20] 八木 太, "Pouliot-type duality via a-maximization," 基研研究会「場の理論の基礎的諸問題と応用」研究会報告, 素粒子論研究 **113-1**, A-89 (2006)

[21] 岡村 圭祐, "Open Spinning Strings and AdS/dCFT Duality," 基研研究会「場の量子論の基礎的諸問題と応用」研究会報告, 素粒子論研究 113 巻 1 号 （2006 年 4 月号）A92.

[22] Y. Sugawara, "D-brane falling into 2d black-hole and closed string radiation," AIP Conf. Proc. **805**, 374 (2006).

[23] J. Raeymaekers, "Small black holes and superconformal quantum mechanics," AIP Conf. Proc. **805**, 403 (2006).

[24] H. Isono and Y. Matsuo, "Boundary state in open string channel and open/closed string field theory", (arXiv: hep-th/0511203), 4th International

Symposium on Quantum Theory and Symmetries (QTS-4), Varna, Bulgaria

[25] 信山 竜二, 「閉じた弦のタキオンと時空の不安定性について」第 1 回 COE 若手シンポジウム プロシーディング集 46p (2005)

(学位論文)

[26] M. Ibe, "Particle-Physics Phenomenology and Cosmology of Gauge Mediated Supersymmetry Breaking Models."

[27] K. Ideguchi, "Semiclassical Strings on AdS5×S5/Γ and Operators in Orbifold Field Theories."

(修士論文)

[28] 木村 圭助, 「Sasaki-Einstein 多様体上の弦理論と N=1 超対称ゲージ理論」

[29] 瀧 雅人,「トポロジカル・ストリングの最近の発展」

[30] 中島 寛人, 「ランドール-サンドラーム模型の現象論的問題点」

[31] 初田 泰之, 「行列模型における non-singlet sector の研究とその 2 次元量子重力への応用」

(著書)

[32] J. Polchinski 著 伊藤克司・小竹悟・松尾泰訳 「ストリング理論」シュプリンガー・フェアラーク東京 第 1 巻 2005 年 6 月

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[33] M. Sakurai, "Duality between open Gromov-Witten invariants and Beilinson-Drinfeld chiral algebra," Strings 2005, Fields Institute, Canada, 2005 年 7 月

[34] Y. Matsuo, "Adjoint sector of MQM at finite N," Mini conference on string theory, Tamkang University, 2005 年 10 月 28 日.

[35] Y. Matsuo, "Adjoint sector of c=1 MQM," Frontiers in string theory, Banff, Canada, 2006 年 2 月 15 日.

招待講演

[36] T. Eguchi, "Geometry of N=2 Liouville Theory," PITP Showcase conference, Univ. of British Columbia, Vancouver, 2005 年 5 月 11 日-16 日.

[37] Y. Sugawara, "D-branes Falling into 2-dimensional Black-Hole and Closed String Radiation," International Conference PASCOS-05, Hote Hyundai Gyeongju, Gyeongju, Korea, 2005 年 5 月 30 日 – 6 月 4 日.

[38] Y. Nakayama, "From Liouville to SL(2,R) WZNW," International Workshop on Liouville Theory and Matrix Model, 理化学研究所, 2005 年 6 月

[39] Y. Matsuo, "Vacuum open/closed string field theory and boundary states," QTS-4, Varna, Burgaria, August 16, 2005.

[40] T. Eguchi, "Modular Bootstrap of N=2 Boundary Liouville Theory," XXIII Internatinal Conference on Differential Geometric Methods in Theoretical Physics, Nankai Institute of Mathematics, Tianjin, China, 2005 年 8 月 20-26.

[41] T. Eguchi, "Distribution of Vacua around Singular Points in Calabi-Yau Moduli Space," Cosmological Landscape, Strings, Gravity and Inflation, KIAS, Korea, 2005 年 9 月 20-24.

[42] T. Eguchi, "Distribution of Vacua around Singular Points in Calabi-Yau Moduli Space," Workshop in Algenbraic Geometry and Physics 2005, "Moduli spaces and superpotentials", Univ. of Pennsylvania, Philadelphia, 2005 年 10 月 20 日-24 日.

[43] T. Eguchi, "String Landscape and Distribution of Vacua near Calabi-Yau Singularities," Supersymmetry, Duality and Unification, in honor of N.Sakai's 60th birthday, 2005 年 11 月 19 日.

[44] T. Eguchi, "String Landscape", Discoveries of Higgs and Supersymmetry to Pioneer Particle Physics in the 21st Century, Univ. of Tokyo, 2005 年 11 月 24 日-25 日

[45] Y. Nakayama, "End of the Universe, Closed String Tachyon Condensation from time-like Liouville," APCTP Focus Program "Liouville, Integrability and Branes," APCTP, Postech, Pohang. 2005 年 12 月

[46] Y. Sugawara, "Concluding Remarks," APCTP Focus Program "Liouville, Integrability and Branes," APCTP, Postech, Pohang, 2005 年 12 月 12 日 – 12 月 17 日.

[47] J. Raeymaekers, "Small black holes and superconformal quantum mechanics," APCTP Focus Program "Liouville, Integrability and Branes," APCTP, Postech, Pohang.

(国内会議)

一般講演

[48] 八木 太, "a-maximization in Pouliot type duality," 日本物理学会, 大阪市立大学, 2005 年 9 月.

[49] 新原 祐喜, "Confromally Sequestered SUSY Breaking Models," 日本物理学会, 大阪市立大学, 2005 年 9 月.

[50] 菅原 祐二, "Aspects of Infalling Branes in 2D Black-Hole," 日本物理学会, 大阪市立大学, 2005 年 9 月.

[51] 桜井 真 "open Gromov-Witten 不変量と Beilinson-Drinfeld chiral algebra の双対性," 日本物理学会, 大阪市立大学, 2005 年 9 月.

[52] 岡村 圭祐, "The SU(2) Sector in AdS/dCFT Correspondence," 日本物理学会, 大阪市立大学, 2005 年 9 月

[53] 礒野 裕, 「弦の場の理論による開弦セクターの境界状態の解析」日本物理学会, 大阪市立大学, 2005 年 9 月

[54] 中山 優, “The Stoyanovsky-Ribault-Teschner Map and String Scattering Amplitudes,” 日本物理学会, 大阪市立大学, 2005 年 9 月

[55] 信山 竜二, 「閉じた弦のタキオンと時空の不安定性について」第 1 回 COE 若手シンポジウム 東京大学小柴ホール, 2005 年 11 月 21 日〜22 日

[56] 八木 太, “Pouliot-type duality via a-maximization,” 場の量子論の基礎的諸問題と応用, 京都大学基礎物理学研究所, 2005 年 12 月

[57] 岡村 圭祐, “Open Spinning Strings and AdS/dCFT Duality,” 場の量子論の基礎的諸問題と応用, 京都大学基礎物理学研究所, 2005 年 12 月

[58] J. Raeymaekers, “Small Black Holes and Superconformal Mechanics,” Winter School in Niseko ’06, 2006 年 3 月

[59] 岡村 圭祐，“Spin-chain/String Duality in Lunin-Maldacena Background,” Winter School in Niseko ’06, 2006 年 3 月

[60] 鈴木了、「6 次元 gauged supergravity におけるアノマリー自由な模型の探索」KEK 理論研究会、高エネ研、2006 年 3 月

[61] 岡村 圭祐，“Spin-chain/String Duality in Lunin-Maldacena Background,” KEK 理論研究会, 高エネ研, 2006 年 3 月

[62] 八木 太, “Vacuum structure of Pouliot-type duality via a-maximization,” 日本物理学会, 愛媛大学, 2006 年 3 月

[63] 戴大盛, “D-instantons and Closed String Tachyons in Misner Space,” 日本物理学会, 愛媛大学, 2006 年 3 月

[64] 立川裕二, 「佐々木 Einstein 多様体と三角量子異常」、日本物理学会、愛媛大学、2006 年 3 月

[65] 鈴木了, “Search for Anomaly-free Models in 6D Gauged Supergravity,” 日本物理学会、愛媛大学、2006 年 3 月

[66] 菅原 祐二, “Modular Properties of Large/Small N=4 Super Conformal Field Theories,” 日本物理学会, 愛媛大学, 2006 年 3 月

[67] 桜井 真, “non-toric topological string theory and anomalies,” 日本物理学会, 愛媛大学, 2006 年 3 月

[68] 岡村 圭祐, “Open Spinning Strings and AdS/dCFT Duality,” 日本物理学会, 愛媛大学, 2006 年 3 月

[69] 中山 優, “Making Precise the Nothing at the Beginning of the Universe,” 日本物理学会, 愛媛大学, 2006 年 3 月

招待講演

[70] 今村 洋介 “Twistors and Perturbative QCD,” 弦理論、場の量子論の展望, 京都大学基礎物理学研究所, 2005 年 8 月 19 日-23 日

[71] 江口 徹, 「統一理論への夢と湯川理論」, 「学問の系譜」ーアインシュタインから湯川 · 朝永へ ー、京都大学基礎物理学研究所, 2005 年 12 月 7 日-8 日

[72] 立川裕二, “Recent Progress in AdS5/CFT4 with Eight Supercharges,” 弦理論とゲージ理論の双対性, 名古屋大学, 2006 年 2 月

[73] 中山 優, “Index for Orbifold Quiver Gauge Theories,” 場の理論・弦理論の進展, 大阪市立大学, 2006 年 2 月

[74] 江口 徹, 「21 世紀と知の原風景ー超弦理論の目指すものー」, 藤崎晴男教授退官記念講演会, 立教大学, 2006 年 3 月 11 日

[75] 立川裕二, “Three Extremization Principles in AdS_5/CFT_4 Correspondence with Eight Supercharges,” KEK 理論研究会 2006, 高エネルギー研究所, 3 月 13 日–16 日

[76] 江口 徹, 「ランドスケープと超弦理論」日本物理学会, 愛媛大学, 2006 年 3 月

2 原子核・素粒子実験

2.1 原子核実験研究室 (酒井・早野)

原子核実験研究室は、酒井 (英) 研究室と早野研究室で構成される。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行っている。

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行っている。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。今年度から、新プロジェクト「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)」を開始した。本研究は、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ことを目的としている。今年度は、発熱型反応と相補的な従来の荷電交換反応によるスピン・アイソスピン励起の研究、2 核子系のスピン測定を用いたベルの不等式の検証実験、3 核子系における三体力の実験的研究を行った。また、偏極固体陽子標的を用いて不安定核のスピン構造の研究[1]も行っている。

早野研究室では、物質・反物質の対称性 (CPT 対称性) の検証をめざして、ジュネーブの CERN 研究所において反陽子を含む反物質である反水素原子の研究 (ATHENA 実験) や反陽子ヘリウム原子の精密レーザー分光 (ASACUSA 実験) を推進してきた。今年度からは、新たに反水素原子の閉じ込めをめざして、国際共同実験 ALPHA を立ち上げた。また、陽子の質量起源の解明をめざして、 ドイツ重イオン研究所 (GSI) において、η 中間子と原子核の束縛状態の探索を行うとともに、高エネルギー加速器研究機構において K 中間子と原子核の深い束縛実験探索の追試実験、K 中間子ヘリウム原子の $3d \to 2p$ X 線の精密測定を行った。

2.1.1 磁気スペクトロメータ SHARAQ の建設 (酒井研究室)

原子核のスピン・アイソスピン応答はもっとも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。高励起状態で $q \sim 0$ の条件は、不安定重イオン誘起発熱型荷電交換反応によってのみ達成されるため、この反応は、原子核の高励起状態の強力なプローブとなる。

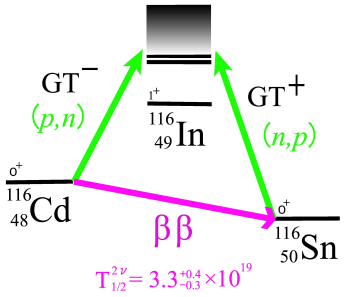


図 2.1 a: Simplified level scheme of $A = 116$ isobar members involved in the ^{116}Cd double beta decay.

理研 RI ビームファクトリー施設 (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最も強調される最適のエネルギーである。本研究は、RIBF で、$({}^{12}\mathrm{N},{}^{12}\mathrm{C})$、$({}^{12}\mathrm{B},{}^{12}\mathrm{C})$、$({}^{20}\mathrm{Mg},{}^{20}\mathrm{Ne})$ といった RI ビームを用いた反応を用い、無反跳条件下でスピン単極子共鳴および二重 GT 共鳴状態を探索する。

現在、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 スペクトメーター: Spectroscopy of HAdoron systems with RadioActive Quantum beams) を設計中である。平成 19 年度に完成する予定である。

2.1.2 二重 β 崩壊過程の微視的理解 (酒井研究室)

二重ベータ崩壊とは、原子核が 2 つの β 崩壊を一度に行い、電子を 2 個出す過程である。たとえば、図 2.1 a に示すように $^{116}_{48}\mathrm{Cd}_{68}$ 核は、$^{116}_{49}\mathrm{In}_{67}$ 核への通常の β^- 崩壊がエネルギー的に禁止され、$^{116}_{50}\mathrm{Sn}_{66}$ への二重 β 崩壊が許容される。

もし、ニュートリノ放出を伴わない二重 β 崩壊 ($0\nu\beta\beta$) 現象が確認されれば、標準理論のレプトン数保存の要請を破る現象であり、マヨラナ型 (粒子と反粒子が等しい) ニュートリノの存在が証明されると同時に寿命からマヨラナ型ニュートリノの有効質量が得られる。近年、$0\nu\beta\beta$ 事象の探索が精力的に進められているが、この過程は原子核を媒体として起るため、有効質量の導出には核行列の情報が不可欠

[1] CNS annual report 2004, p.36 と CNS annual report 2005, 該当記事を参照のこと

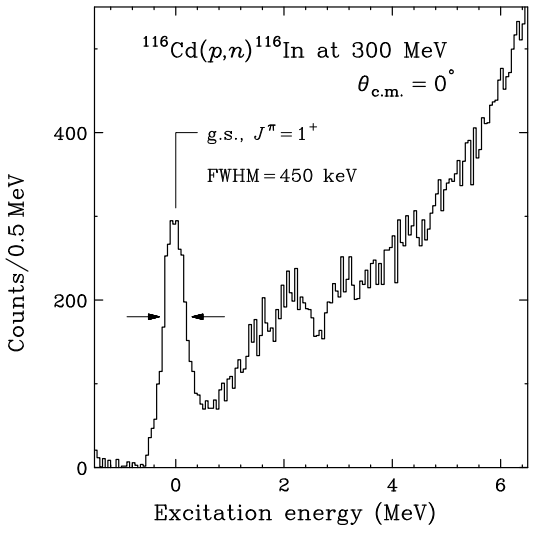


図 2.1 b: Excitation energy spectrum of ^{116}Cd$(p,n)^{116}$In(0°) measurement at 300 MeV.

である。このため、核行列の理論計算が試みられてきた。

理論計算で得た核行列の正しさを検証するのに、ニュートリノ放出を伴う二重 β 崩壊 ($2\nu\beta\beta$) 過程が注目されている。$2\nu\beta\beta$ 事象は二次の弱い相互作用で引き起こされる。核構造の観点からは親核の基底状態から中間核へ、中間核から娘核の基底状態への 2 段階のガモフ・テラー型 (GT) 遷移によって起こると考えられ、この過程の核行列を理論的に求めることによって、崩壊寿命を説明する試みがなされてきた。しかしながら、現時点では理論計算の予言能力が低いことが明らかになっている。

本研究では、入射エネルギー 300 MeV の (p,n)、(n,p) 反応を用いて、親 (娘) 核から中間核への GT 遷移強度 $B(\mathrm{GT}^{+(-)})$ を、中間状態毎に求めることにより、$2\nu\beta\beta$ 核行列の微視的構造を明らかにすることを目的とする。これらのプローブは、反応機構の不定性が小さいという特長を持ち、励起エネルギー 50 MeV の領域までの B(GT) 分布を絶対値も含めて精度よく決定できる唯一のものである。

大阪大学核物理研究センターの中性子飛行時間施設を用い、(p,n) 反応の測定を ^{48}Ca、^{76}Ge、^{100}Mo、^{116}Cd 標的核に対して行った。高エネルギー分解能測定のため、新型中性子検出器 NPOL3 を用いた。この検出器の時間分解能は 230 ps で、最終的なエネルギー分解能は 450 keV であり、この入射エネルギー領域の (p,n) 測定では世界最高の分解能を達成した。散乱角度 0 度における ^{116}Cd(p,n) 反応の解析結果を図 2.1 b に示す。基底状態への遷移の B(GT) は、従来の $(^3\mathrm{He},t)$ 反応で求めた B(GT) より 10 倍程度大きい、という驚くべき結果が得られた。[1, 2, 31, 80]

2.1.3 2 核子系のスピンを用いたベルの不等式の検証 (酒井研究室)

量子力学では、相互作用していない 2 粒子が遠く離れているとき、一方の粒子に対するある物理量の測定が、他方の粒子に対する測定結果に影響を及ぼすことがある。量子力学のこのような「非局所性」を疑ってアインシュタインらが 1935 年にパラドックスを提示したことは広く知られている。非局所性を説明するために、2 粒子は測定結果を決定する共通の「隠れた変数」を持っているという解釈が提案されたが、その場合、2 粒子の相関が量子力学の場合よりも弱くなり得ることが 1964 年にベルによって示された (ベルの不等式)。

ベルの不等式の発見以来、もつれた光子対を用いて不等式の検証実験が多数行われ、殆どの実験が量子力学を支持する結果を得ている。しかし、ハドロン系を用いた高精度検証実験は例がなく、このような量子的もつれによる相関が強い相互作用の系でも存在することを示すのは重要である。我々は、2 陽子のスピンを用いたベルの不等式の検証実験に引き続き、中性子-陽子の異粒子の系での実験を行った。ハドロン系を用いた異粒子のスピン偏極同時測定は世界初の試みである。

ベルの不等式の検証には、スピン一重項 ($^1S_0$) に組んだ陽子-中性子 (pn) 対が必要である。pn 対を理化学研究所加速器施設の 270 MeV の重陽子ビームを液体重水素標的に照射して ^{2}H$(d,pn[^1\mathrm{S}_0])pn$ 反応によって生成した。出射陽子のスピンの向きを、磁気スペクトロメータ SMART の第二焦点面に設置された陽子偏極度計 EPOL により、出射中性子のスピンの向きを新しく開発した中性子偏極度計 SMART-NPOL により測定した。現在データを解析中であり、今年度は、pn 対の $^1S_0$ 純度について検討を行った。[32, 59]

中性子偏極度計の開発

陽子-中性子系のスピン相関測定のため、高効率、高エネルギー分解能の中性子偏極度計 SMART-NPOL を新たに建設し、その性能評価を行った。

NPOL の概略を図 2.1 c に示す。NPOL は厚さ 3 cm のプラスチックシンチレータ面 12 枚からなり、それぞれが位置分解能 $\pm$5 cm を持ち、入射中性子の 2 回散乱角 (θ,ϕ) を求めることができる。この散乱角分布が中性子の偏極度を与える。この NPOL を標的の下流 18 m の地点に設置した。

有効偏極分解能の較正のために、270 MeV の偏極重陽子ビームを ^{6}Li 標的に入射して、^{6}Li$(\vec{d},\vec{n})$X 反応によっておよそ 135 MeV の偏極中性子ビームを生成し、NPOL に照射した。この結果、有効偏極分解能 $A_y^{\rm eff} = 0.28\pm0.01$、2 回散乱効率 $\varepsilon_{\rm double} = 4.2\times10^{-4}$ を得た。入射中性子のエネルギーは飛行時間法によって測定される。NPOL の時間分解能 300 ps から期待されるエネルギー分解能は、135 MeV の中性子に対して 1.0 MeV である。[55, 60]

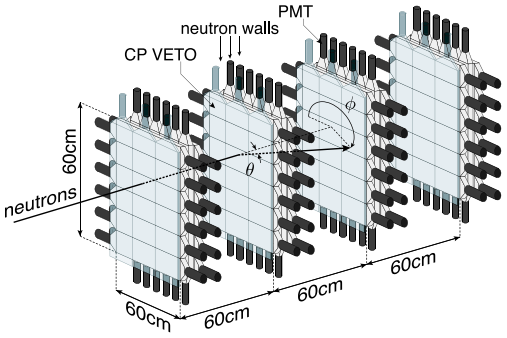


図 2.1 c: Schematic view of the neutron polarimeter. The polar angle θ and the azimuthal angle ϕ are indicated.

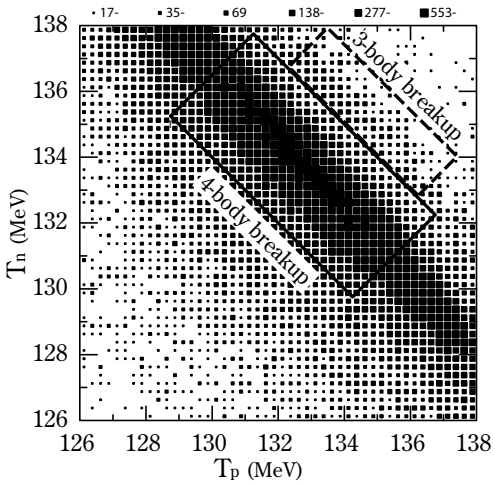


図 2.1 d: Energy correlation between proton and neutron obtained by the $^2\mathrm{H}(d,pn)(0^\circ)$ reaction at $E_d = 270$ MeV.

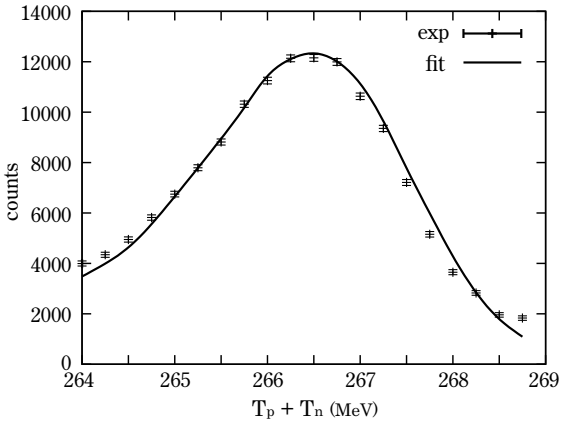


図 2.1 e: Total kinetic energy of pn pairs. The solid curve shows the result of Monte-Carlo simulation.

$^2\mathrm{H}(d,pn)$ 反応で生成する陽子-中性子対の $^1S_0$ 純度

一般に、重陽子分解反応からは、スピン一重項状態に加えスピン三重項状態が生成する。ベルの不等式の検証のためには、$^1S_0$ 状態を選び出す必要がある。

$^2\mathrm{H}(d,pn)$ 反応で 0 度方向に生成した陽子･中性子の運動エネルギー T_p、T_n から、図 2.1 d のような相関が得られた。中性子のエネルギー分解能は 2.1 MeV である。測定されたイベントには 3 体崩壊 $^2\mathrm{H}(d,pn)d$、4 体崩壊 $^2\mathrm{H}(d,pn)pn$ の 2 種類があり、分解する重陽子の個数によって反応の Q 値が異なる。3 体崩壊による pn 対は、角運動量保存からスピン三重項状態となるため、反応の Q 値の違いを利用して除外する。一方 4 体崩壊の場合、$^1S_0$、$^3S_1$ 双方の生成が許されるが、スペクトルが重なるために分離できない。しかし、核力の性質から相対エネルギーの小さい ($<\sim 3$ MeV) pn 対に限れば $^1S_0$ の割合が高くなることが期待されるため、今回はそれに該当する運動学領域 (図 2.1 d 実線枠内) を選択し純度を見積もった。

選択領域内の pn 対は相対エネルギーが小さいために強く終状態相互作用していることが期待される。従って、終状態を 2 つの pn 対とした 2 体の反応学が良い近似を与える。そこで、$^1S_0$、$^3S_1$ それぞれに対し平面波インパルス近似を用いた 2 体の反応学に基づき、シミュレーションを行った。$^1S_0$ 純度を変数にとって実験で得たスペクトルをフィットすることで $^1S_0$ 純度を見積もった。その結果、シミュレーションでスペクトルがほぼ完全に理解でき (図 2.1 e)、$^1S_0$ 純度は $98 \pm 7\%$ と求まった。これは、ベルの不等式を検証するのに十分な純度である。$^1S_0$ 状態 pn 対生成レートは、ビーム強度 0.2 nA、標的厚約 10 mm の条件で、毎秒 130 個程度であった。[81]

2.1.4 オルソポジトロニウムの 3 光子崩壊を用いた GHZ 模型検証装置の開発 (酒井研究室)

GHZ 模型とはベルの不等式と同様、量子力学の非局所性とアインシュタインらが主張する局所実在論との間の非両立性に言及する理論である。ベルの不等式は 2 粒子の量子的にもつれた状態について、粒子の相関の統計的な結果、すなわち期待値が、量子力学と局所実在論の間で異なることを示している。これに対し、GHZ 模型は 3 粒子の相関を考察することで量子力学と局所実在論それぞれが予言する測定結果の符号が逆になるという決定論的な違いを導くものである。

本研究は、3 光子の偏光相関係数を 2 種類測定することで、GHZ 模型を検証することを最終目標とする。まず、われわれは、オルソポジトロニウムの 3 光子崩壊を利用して偏光計を開発した。まず、$^{22}\mathrm{Na}$ の β^+ 崩壊で放出される陽電子を密度 0.06 g/cm^3 のエアロジェル中で止め、オルソポジトロニウムを生成した。これが同一平面状に相対角 120° で崩壊する事象について 3 光子の偏光を同時測定する。3 光子がすべて偏光計に入射する事象は、毎秒 800 個程度である。

偏光計は、散乱体のプラスチックシンチレータの上下左右、斜め方向に計 8 個の NaI シンチレータを配置したもので、プラスチックに入射した光子がコンプトン散乱され、どの NaI 検出器で検出されるかによって偏光状態を判定する。相対角 120° の 3 光子崩壊事象の偏光を用いて較正を行い、検出効率 5×10^{-3}、偏光分解能 0.52 ± 0.01 を得た。次に、オルソポジトロニウム源に磁場をかけて 3 重項状態の分布に偏りを生じさせることで、偏光相関を強め、90 日間に渡って 3 光子偏光相関測定を行った。$C_{\rm HHH} = 0.59\pm0.14$、$C_{\rm HH'H'} = 0.11\pm0.09$ が得られ、それぞれ量子力学の予言値 0.59、0.20 と誤差の範囲で一致した。オルソポジトロニウムからの 3 光子は偏光相関の強さが十分でなく、GHZ 模型の検証が不可能なため、完全相関を満たす 3 光子線源を準備することが次の課題である。[48, 82]

2.1.5 偏極重陽子–陽子弾性散乱の高精度測定と三体力 (酒井研究室)

湯川の中間子理論が提唱された頃から、原子核における多体力効果については数多く議論されてきた。中でも三体力はその多体力の素過程であり、最も発現する可能性が高いと考えられている。しかし、二核子間に働く核力 (二核子間力) に比べ三体力は比較的小さい事から、現在に至るまでその存在を明確に示す結果は殆んど得られていない。唯一の事例として、三重水素 (^{3}H)、ヘリウム 3(^{3}He) など三核子系の原子核の束縛エネルギーが三体力の導入により説明されることが挙げられる。

近年、三核子系を厳密に記述するファデーエフ理論計算の計算技術が発展し、重陽子–陽子弾性散乱、分解反応などの三核子系散乱による三体力の検証が可能になり、中間エネルギー領域 (入射粒子のエネルギーが核子あたり 100 MeV 付近) における、三核子系散乱において三体力の効果を見ることが出来るのではないかとの理論的示唆がなされた。

今まで我々は主に中間エネルギーでの重陽子–陽子の弾性散乱に注目し、理研の偏極重陽子ビームを用いて微分断面積、及びスピン観測量の測定を行ってきた。その結果、微分断面積において三体力効果の証拠を掴んだ。三体力の研究の次のステップとしては、重陽子–陽子分解反応 ($d+p\rightarrow p+p+n$) の測定を行うことが肝要である。その理由は、弾性散乱とは異なり、反応の終状態が束縛状態である重陽子になるという制約がないため、散乱粒子の運動量やスピンに、より三核子反応の中間状態、即ち三体力の効果が反映されると考えられるからである。更に、最近発表された分解反応に関する理論計算では、入射粒子のエネルギーが高くなるほど弾性散乱よりも分解反応の全反応断面積が大きくなること (例えば 135 MeV/A では約 2.5 倍) が示唆されており、三体力の全貌を明らかにするためには主要チャンネルである分解反応の測定を行うことが必須であると考えられる。

今回我々は、理化学研究所リングサイクロトロン施設において 135 MeV/A の偏極重陽子ビームを用い、重陽子–陽子分解反応の中でも特に三体力の効果が顕著にみられると予測された幾何学的条件を中心に偏極移行量 $K^{y'}_{yy}$、及び重陽子の偏極分解能 A^d_y、A_{xx}、A_{yy}、A_{xz} の測定を行った。得られた結果の一部とファデーエフ計算結果を図 2.1 f に示した。図中、横軸は二つの散乱陽子 (1、2) の運動エネルギーの条件を記述する量 S である。散乱角度は各々$\theta_1 = 30°$、$\theta_2 = 31°$ である。実験値とファデーエフ理論計算との比較の結果、テンソル偏極分解能 A_{xx} は、三体力を考慮した方が実験値を再現する方向にあるが、ベクトル偏極分解能 A_y は三体力を考慮しない方が実験値を再現することがわかった。今後、実験解析を進めた上で散乱角度角度依存性、スピン観測量依存性など系統的な議論を進めてゆく予定である。[4, 5, 68]

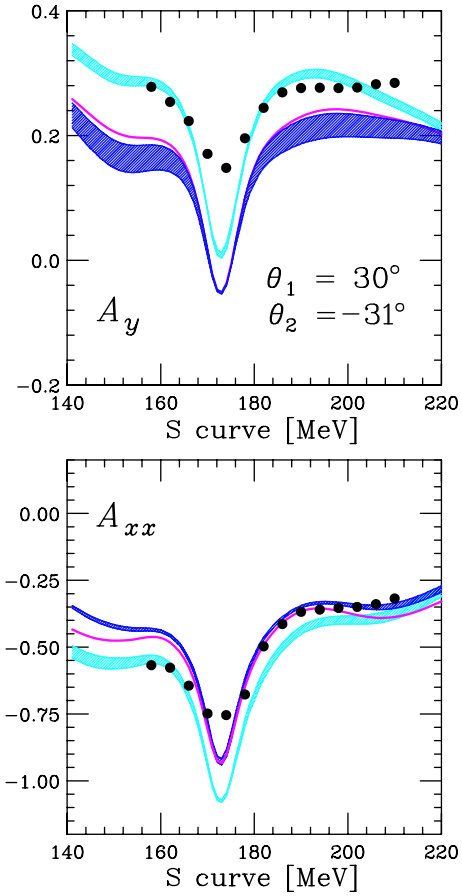


図 2.1 f: Vector and tensor analyzing powers A_y and A_{yy} of the kinematic condition $\theta_1 = 30°$, $\theta_2 = 31°$, $\phi_1 - \phi_2 = 180°$ for ^{1}H$(\vec{d}, pp)n$ reaction at 135 MeV/A. The light (dark) shaded bands are results of the Faddeev calculations without (with) Tucson Melborne three nucleon force using *NN* forces of CD Bonn, AV18, Nijmegen I, Njimegen II. The solid lines are the predictions considering the Urbana three nucleon force.

2.1.6 反水素原子・反陽子ヘリウム原子の研究 (早野研究室)

この研究は、科学研究費補助金「特別推進研究」を得て、CERN 研究所の反陽子減速器 (Antiproton Decelerator: AD) で推進している。反水素原子は反陽子と陽電子の束縛状態、反陽子ヘリウム原子 ($\bar{p}\mathrm{He}^+$) はヘリウム原子核+反陽子+電子の奇妙な三体系であり、これらを用いて物質・反物質の対称性（CPT 対称性）の精密検証を行うことが目的である。

すなわち、CPT 対称性が厳密に成り立っていれば、陽子・反陽子の質量は等しく、また、水素原子・反水素原子のスペクトルは一致するはずである。そこで我々は反陽子ヘリウム原子のレーザー分光による反陽子質量の精密測定を行うとともに[2]、反水素原子の $1s-2s$ 準位間隔のレーザー分光と基底状態超微細構造のマイクロ波分光に向けた実験準備を行っている。[54, 72, 73, 74, 75, 76]

反陽子ヘリウム原子・イオンのレーザー分光

我々は 2004 年に光学周波数コム (optical frequency comb) を用いたレーザーシステムによって、反陽子ヘリウム原子 [70] の様々な遷移エネルギーを測定し、2005 年度は[3]その結果を三体の電磁量子力学計算結果と比較することによって、反陽子・電子の質量比を正確に求める解析を行った。[50, 58, 85] その結果を、陽子・電子質量比の最新値とともに図 2.1 g に示す。図のように、反陽子質量精度は陽子質量精度に迫りつつあり、両者は相対精度で 2×10^{-9} 以内で一致している。これは CPT 対称性直接検証として最も高精度の結果である。

実は図に示す反陽子質量の誤差の最大要因は、三体の電磁量子力学計算の精度である。二体系のレーザー分光を行うことができれば、理論の誤差なしに反陽子質量をより精密に決定できるのではないかと期待される。従来は反陽子を含む二体系で、レーザー分光可能なほどに長寿命のものは存在しなかったが、我々は最近反陽子ヘリウム原子のレーザー解離によって準安定な反陽子ヘリウムイオン ($\bar{p}\mathrm{He}^{++}$) を作ることに成功した。2006 年に反陽子ヘリウムイオンのレーザー分光を実施すべく準備を行っている。

超伝導高周波トラップを用いた反水素原子生成

我々は反水素原子の基底状態超微細構造周波数を精密に測定し、これを水素原子の結果と比較することをめざしている。この実験のための反水素生成源として、超伝導高周波トラップ (Paul Trap) が最適

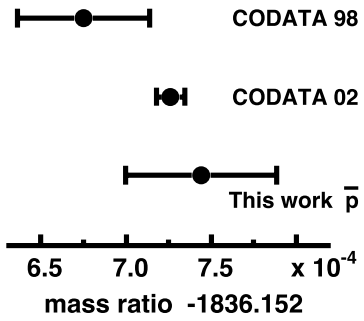


図 2.1 g: 反陽子ヘリウム原子のレーザー分光で求めた反陽子質量と陽子質量の比較

であると考えられるところから、そのための超伝導空洞の製作を行っている。

CO_2 レーザーを用いた反水素原子の誘導生成

陽電子と反陽子を混合して反水素を生成させる際、波長 11μm の CO_2 レーザーを照射することで連続状態から反水素原子の $n=11$ への遷移を誘導し、反水素原子生成率を高めることができるとの期待から、2004 年に実験を行い、2005 年に詳細な解析を行った。その結果、誘導生成率が理論予想よりもはるかに小さく、検出限界内であることが示された。これは、高磁場下の陽電子プラズマ中での反陽子生成過程が、従来考えられていたよりもはるかに複雑であることを示唆している。[83, 84]

反水素原子の閉じ込め実験

反水素原子のレーザー分光に向けた重要なステップは、反水素原子の「閉じ込め」である。一旦安定に閉じ込めることができれば、最終目標であるレーザー分光のみならず多くの応用実験が可能となる。

我々は多重局磁石が作る磁場（勾配）と反水素原子の磁気モーメントとの相互作用による閉じ込めを実現すべく、国際共同実験グループ ALPHA を結成した。ALPHA は世界最高の蓄積効率を誇る陽電子源 [9] など、成功をおさめた ATHENA 実験をもとに、図 2.1 h に示す超伝導八重極コイルを製作するなどして、2006 年度の実験開始に備えている。

反陽子と水素原子の衝突によるプロトニウム生成のチャネル結合配列理論

陽子の反粒子である反陽子が原子と衝突すると、標的原子の中の電子と入れ替わって反陽子原子を形成する。この形成過程は、重い粒子と軽い粒子が入れ替わる奇妙な衝突過程である。そこで、反陽子と水素原子の衝突によるプロトニウム生成に対し、チャ

[2]通常の原子のレーザー分光とは異なり、我々はヘリウム原子核に束縛された反陽子準位の遷移をレーザーによって誘導している。その遷移周波数が反陽子の換算質量に比例することを用いて反陽子質量を決定できるのである。

[3]2005 年度は CERN 研究所の予算の関係上、加速器が運転されなかった。データ解析を行うとともに、今後の実験の準備や装置類の開発を行なった。

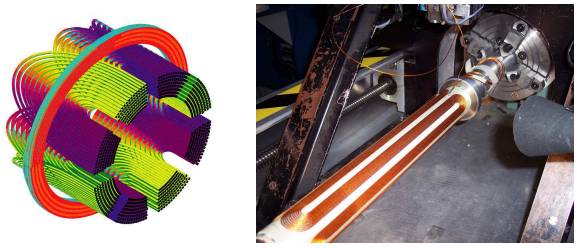


図 2.1 h: 反水素原子閉じ込め用の超伝導 8 重極コイル模式図（左）および製作風景（右）

ネル結合配列法を構築し、生成断面積の計算をおこなった。チャネル結合配列法では、組み替え衝突を精密に記述するために Faddeev 理論を基礎とし、散乱方程式としてチャネル結合配列方程式 (微分形式の Faddeev 方程式) を採用し、外向波の境界条件を課すために複素スケーリング法を導入する。それにより、通常の Faddeev 法では取り扱いの困難なクーロン三体問題を扱うことができる。反陽子の入射エネルギー 6.8 eV に対し部分断面積を求めたところ、反陽子は主量子数 40 辺りのプロトニウム状態に集中的に分布することがわかった。また、電子は約 2 eV のエネルギーをもって放出されるが、その速度は反陽子の入射速度より十数倍大きい。[69]

次世代の大強度加速器ビームを診断する検出器の開発

CERN における反物質研究に必須の装置として、我々は、反陽子ビームやレーザー光線の空間的な形状を測定する高感度ワイヤー検出器 [8] を開発して、超高真空、高磁場、極低温などの苛酷な環境でも動作することを示した。この装置を、反陽子減速器 AD に設置した。

この経験を生かし、CERN 研究所で計画中の超電導 H^- イオン線形加速器の前段加速器となる「Linac-4」の性能を診断する新型のビーム検出器を開発した。[71] 我々の検出器は、H^- イオンがこの高波数に歪みなく、正しく波乗りするかを高い時間分解能で検証することができるため、加速器の性能評価に不可欠な測定装置になる。この検出器は 2007 年の初旬にフランスのオルセー研究所で大強度の加速器を用いた性能評価試験を行なった後に、2008 年頃 CERN の Linac-4 に組み込まれる予定である。

2.1.7 エキゾチック原子の分光による「陽子質量起源」の研究 (早野研究室)

我々は、CERN における反水素原子や反陽子原子の分光研究に加え、π^-, K^-, η などの中間子が原子核に束縛された奇妙な原子（エキゾチック原子）の分光研究も精力的に行っている。その目的は、「陽子の質量起源」を解明することにある。

陽子の「原料」である u, d クォークの質量は数 MeV/c^2 しかなく、これを 3 個分足しても陽子の質量には全く足りない。これは、真空に $q\bar{q}$ 対が凝縮して「カイラル対称性」が自発的に破れ、クォークが大きな有効質量を獲得した結果であると考えられている。$q\bar{q}$ 対の凝縮量は核子密度や温度を高めると減少すると予言されており、その効果を実験で定量的に調べることが、陽子質量起源の理解には必須である。

我々は、$q\bar{q}$ 対のプローブとして π, K, η などの中間子を用い、これらを原子核中に入れた場合と真空中に置いた場合とで、中間子の質量や崩壊定数などがどのように変化するかを測定する手法で、陽子質量起源の解明につとめている。

2005 年度は、$\eta-$ 原子核の束縛状態の探索、K 中間子と原子核の深い束縛状態の探索、および K 中間子ヘリウム原子の X 線精密測定を行った。

$\eta-$ 原子核の束縛状態の探索

我々は 2004 年までの段階で、π^- 中間子原子の精密分光から、π 崩壊定数の核密度依存性を決定し、$q\bar{q}$ 凝縮量が核密度とともに減少することを定量的に示したが、同様な効果が他の中間子でも見られるかどうかを調べるため、ドイツの重イオン研究所 (GSI) にて、$d + {}^{12}\mathrm{C} \rightarrow {}^{11}_{\eta}\mathrm{B} + {}^{3}\mathrm{He}$ 反応による η 中間子と原子核の束縛状態探索実験を行った。データ収集は完了し、現在解析を進めている。

K 中間子と原子核の深い束縛状態の探索

我々は 2004 年に $K^- + {}^4\mathrm{He} \rightarrow S^0 + p$ 反応、すなわちヘリウムに K^- 中間子を吸収させ、放出される陽子のエネルギーを測定する手法で、K 中間子と核子 3 個が深く束縛されたと考えられる状態 $S^0(3115)$ の存在を示唆する結果を得た。これは、従来全く知られていなかった奇妙な状態であり、より精密な追試実験による確認が必須である。そこで我々は 2005 年に陽子のエネルギー測定精度を向上させた実験を高エネルギー加速器研究機構の陽子シンクロトロンで実施し (KEK E549)、現在データ解析を進めている。[36, 47, 86, 87]

K 中間子ヘリウム原子 $3d \rightarrow 2p$ X 線 の精密測定

上記の「K 中間子と原子核の深い束縛状態」に関連し、K 中間子ヘリウム原子の X 線測定による K 中間子と原子核の間の強い相互作用の決定が非常に重要となった。すなわち、S^0 の ような奇妙な状態の存在を予言する理論では、K 中間子原子の $3d \rightarrow 2p$X 線のエネルギーがクーロン相互作用のみを用いて計算した値から 10 eV 程度ずれると予言するのに対し、S^0 の存在に否定的な理論では、X 線エネルギーはずれないと予言しているのである。

一方、過去の実験では 40 eV もの巨大なずれが観測されており、理論的に理解不可能とされてきた。

そこで我々は、K 中間子ヘリウム原子の $3d \rightarrow 2p$X 線のエネルギー (6.4 keV) を高精度で決定すべく、2005 年 10 月から 12 月にかけて、高エネルギー加速器研究機構の 12GeV 陽子シンクロトロンで実験を行った。

E570 実験では、新たに開発された、大面積と高いエネルギー分解能を兼ね備えた超薄型の X 線検出器、シリコンドリフトディテクター (SDD) を用いた。さらに、^{4}He 標的の下流に Ti と Ni の箔を設置し、目的の X 線のシグナルを取るのと同時に Ti と Ni の特性 X 線を測定することで、インビームエネルギー較正を行った。また、目的の X 線が標的内から発生したことを保証するために、ドリフトチェンバーによって反応点の再構成を行い、fiducial volume cut をかけられるようにした。これらを総合して、統計精度 ~ 3 eV という精密測定を目指した。

データは解析中であるが、すでに過去に観測された -40 eV という巨大なシフトは誤りであることが確実で、E570 実験が K 中間子と原子核の相互作用の解明に大きく貢献することは確実である。[61, 77, 78, 88, 89, 90, 93, 94]

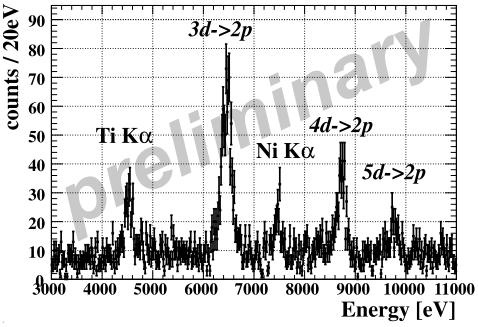


図 2.1 i: K 中間子ヘリウム原子の X 線スペクトル

2.2 旧櫻井研究室

原子核実験研究室では、旧櫻井研究室のメンバーを中心に不安定核ビームを用いた実験的研究を行なっており、天然に存在する安定核よりも中性子数や陽子数が極端に多い不安定核を生成し、その高アイソスピンに由来するエキゾチックな性質を探る研究を行っている。特に中性子過剰核に現れる特異な現象に着目し、中性子過剰核のハロー構造や殻構造の変化（魔法数の消失や新魔法数の出現など）や、核反応を用いた動的性質の研究を進めている。また、天体現象で重要な役割を果たす不安定核による核反応の研究にも取り組んでいる。実験は、主に理化学研究所の不安定核ビーム装置 RIPS (**RI**KEN **P**rojectile-fragment **S**eparator) で生成された不安定核ビームを利用している。また、より重い、より中性子過剰な原子核を対象とした実験研究を開拓すべく、理化学研究所の RI ビームファクトリー計画に深く関与し、実験シミュレーションや検出器開発等にも着手している。

2.2.1 中性子過剰核の安定性

中性子超過剰核の存在やその安定性は高アイソスピンに依拠する核構造の変化、有効核力の異常などを理解する上で基礎をなすものである。この観点から未開の中性子ドリップ線近傍核に関して、新同位元素探査、質量、半減期（$t_{1/2}$）及び β 遅発中性子放出確率（P_{in}）の測定を試みている。[92]

2.2.2 ガンマ線分光による核構造研究

原子核の低励起準位は、原子核の回転や振動運動に対応する低励起 2^+、4^+ 状態、殻構造を特徴づける一粒子状態など、原子核の代表的な励起様式が現れ、核構造研究の重要な研究対象である。不安定核の低励起状態を実験的に調べるには、ガンマ線核分光の手法を用い、不安定核ビームを標的に照射し、適当な核反応で励起状態を生成し、脱励起する際の γ 線のエネルギーと絶対強度を測定する。これにより、励起準位のエネルギー、スピン・パリティー、遷移強度等の知見が得られる。我々は、対象となる不安定核の種類や得られるビーム強度、測定する物理量に応じて、様々な測定方法、励起方法を用いた研究を行っている。また、より広範囲の原子核を対象とし、多様な物理量を測定するための新しい手法の開発も行っている。以下に現在取り組んでいるテーマを測定手法で分類して述べる。

軽い中性子過剰核の励起状態の寿命測定法

我々は、不安定核ビームを用いた、励起状態の寿命を直接測定する実験手段として、Recoil Shadow Method (RSM) を考案し、軽い中性子過剰核を対象とした実験を展開している。[49, 51]

RSM は、不安定核を標的に照射し、脱励起の γ 線を測定する際に、励起状態の寿命に応じて、γ 線の放出位置がビーム軸方向に移動することを利用する。例えば核子あたり 50 MeV の不安定核ビームを標的に照射すると、励起された不安定核は光速の 1/3 程度の速さで移動する。励起状態の寿命が 30ps とすると、平均 3mm 程度移動することになる。ここで標的周辺に鉛コリメータを置くなどして、γ 線の放出位置によって、検出効率の異なる幾つかの検出器群を用いると、各々の検出器群で測定する γ 線の収量比が、励起状態の寿命に依存して変化する。各検出器群の収量比と寿命の関係を、シミュレーションを用いて求め、寿命を決定することができる。

本年度は、RSM を用いた中性子過剰なホウ素同位体、炭素同位体の励起状態の寿命決定を行った。我々が先に行った実験より、^{16}C の 2^+ 状態の寿命が異常に長く、他の実験値に基づく経験的な予測値に比べ

ても十倍以上長いことがわかっている。偶偶核の 2^+ 状態の寿命は、電気四重極遷移確率 $B(\mathrm{E2})$ の逆数に比例するため、陽子分布の四重極変形 (または振動) の発現強度を端的に表す物理量である。したがって、得られた実験結果は四重極集団運動に対して陽子分布の寄与が異常に小さいことを示唆するが、このような現象が何故生じるのかは未だに解明されておらず、同様な現象が周辺の中性子過剰核にも一般に出現するかどうかを実験的に明らかにすることは重要な課題である。我々は、^{16}C 近傍核の核構造を系統的に調べるため、^{15,17}B、^{17,18}C を対象に、励起状態探査実験、および、RSM による励起状態の寿命測定を行っている。特に、^{18}C は、2^+ 状態の励起エネルギーが、1620 keV と、^{16}C の 2^+ 状態の励起エネルギー (1766 keV) に近いため、^{16}C と同様な構造を持ち、四重極集団運動に対する陽子分布の寄与が抑制されている可能性がある。^{18}C に関するデータについては、現在詳細に解析を行なっているが、2^+ 状態の寿命が、^{16}C の 2^+ 状態の寿命とほぼ同じオーダーであるという結果を得ている。

^{17}C 励起状態の寿命測定

中性子ドリップ・ライン近傍の奇核である ^{17}C は、特異な核構造を持つことが知られている。例えば、その閉殻外中性子の束縛エネルギーは安定核に比べて遥かに小さい。また、中性子の一粒子軌道である $1s_{1/2}$ 軌道と $1d_{5/2}$ 軌道がエネルギー的に縮退している。^{17}C をめぐる実験的研究は、これまで主に中性子ハローなどの観点から基底状態を対象に行われてきたが、近年不安定核ビームを用いたインビーム・ガンマ線核分光によって 210 keV と 330 keV の励起エネルギーを持つ束縛励起状態が発見された。そこで我々は、新たに発見された第一・第二励起状態の波動関数の知見を得るべく、RSM により励起状態の寿命を測定し、基底状態-励起状態間の電磁遷移確率を実験的に決定した。[49]

実験では、約 80AMeV の ^{18}C ビームを ^{9}Be 標的に照射し、中性子ノックアウト反応によって ^{17}C の励起状態を生成した。散乱核の脱励起 γ 線は、標的周辺に設置した 13 層 150 台の NaI(Tl) 検出器群によって観測した。得られたガンマ線スペクトルを、モンテカルロ・シミュレーションにより生成した NaI(Tl) 検出器の応答関数を用いてフィットし、各層における脱励起ガンマ線収量を求めた。鉛を設置したデータと設置しないデータにおけるガンマ線収量の比をシミュレーションの計算結果と比較することで、^{17}C の第一・第二励起状態の寿命値をそれぞれ 約 600 ps および 20 ps と決定した。

また、他の反応チャネルに現れた ^{11}Be の第一励起状態と ^{16}N の第二励起状態に関しても同様の解析を行ったところ、公称値と一貫性のある結果を得た。手法の有効性を確認することができた。

寿命値に基づいて、両遷移は共に M1 が主体的な γ 崩壊過程であることが結論された。これは、過去の実験において示唆された励起状態のスピン・パリティを支持する結果である。標準的な psd シェルの相互作用を用いて ^{17}C の殻模型計算を行い、理論との比較を行った。その結果、第一励起状態の寿命は実験値と計算値が誤差の範囲で一致したが、第二励起状態に関しては実験値が計算値より 8 倍近く長いことがわかった。現在、この大きなずれの原因解明を中心に、^{17}C の核構造の議論を進めている。

^{15,17}B の核分光

中性子過剰なホウ素同位体 ^{15,17}B は、近年さまざまな実験的研究が行なわれている原子核である。特に、四重極モーメントが中性子数の増加に対してきわめて鈍感であるとする実験結果は、過剰な中性子がコアから分離しているデカップリング現象を示唆するものであり、中性子過剰領域において出現する新奇現象として注目を集めている。実験的研究の発展に伴い理論計算も盛んに行われ、ドリップライン近傍では、クラスター構造が顕著になるという理論予測など、中性子過剰ホウ素同位体の特異性を指摘する研究は多い。

また、^{15,17}B は、^{16}C の近傍核としての興味もある。先に我々のグループにより測定された ^{16}C の 2^+ 状態の異常長寿命は、陽子の分布と中性子の分布の変形度が大きく異なる特異な核構造を示唆しており、過剰な中性子のデカップリング現象が軽い中性子過剰核特有の現象として一般に出現するのかどうか興味が持たれている。そこで、^{15,17}B を対象に、励起状態の探査実験、RSM による励起状態の寿命測定を行った。[51]

実験では、新励起準位の探索のために二段階破砕反応を用いた。この手法は高励起状態への励起断面積が大きく、また核反応による選択性も少ないと考えられるため、新励起準位の探索には適している。過去に行われたクーロン励起や陽子非弾性散乱による ^{17}B の分光実験では、第一励起準位しか観測されていなかった。破砕反応を用いることで、高励起準位に対しても大きな統計量を稼ぐことができ、破砕反応を二段階で用いることで信号雑音比のよいデータとすることにも成功した。本年度はデータ解析を中心に行い、その結果、未知であった ^{17}B の第二励起準位を発見し、その励起エネルギーを 1674 keV と決定した。また、同時に行なった RSM による寿命測定実験から、^{15}B の第一励起準位 (1334 keV、既知)、^{17}B の第一励起準位 (1070 keV、既知) それぞれに対して、寿命の上限を与え、ともに支配的な脱励起が M1 であること、スピンパリティが $\frac{5}{2}^-$ であることを示唆する結果を得た。^{17}B の第二励起準位についても、寿命の上限値を決定し、スピンパリティを $\frac{1}{2}^-$ であると予想した。今後更なる解析及び議論を通じて、^{15,17}B の励起準位の構造について理解を深めていきたい。

陽子非弾性散乱

原子核の四重極集団運動の大きさは、基底状態と 2^+ 状態とを結ぶ遷移確率強度に反映される。陽子非弾性散乱により原子核を低励起 2^+ 状態に励起する場合は、中性子側が強く励起されると考えられるため、その遷移強度は、中性子物質の寄与をより強く反映している。陽子非弾性散乱から求められる変形度 $\beta_{pp'}$ と、電気四重極遷移確率や、2^+ 状態の寿命から求められる陽子分布の変形度 β_{em} と組み合わせる

ことで、陽子・中性子物質の四重極集団運動への寄与の違いを明らかにすることができる。[25, 27, 30]

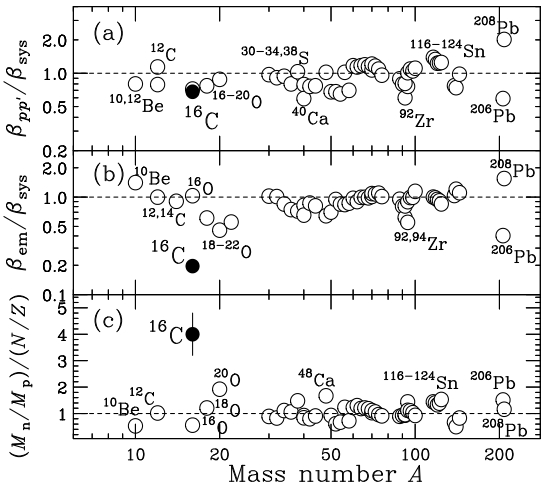


図 2.2 j: 偶々核の四重極集団性。(a) 陽子非弾性散乱実験、(b) クーロン励起法や寿命測定、による変形パラメータと現象論的な予想値との比較、及び (c) 陽子・中性子の四重極集団運動への寄与を表す行列要素の比 $(M_n/M_p)/(N/Z)$. [30]

我々は、^{16}C の中性子物質の寄与を求めるため、陽子非弾性散乱実験を行った。実験では、^{16}C ビームを液体水素標的に入射させて第一励起状態に効率よく励起し、脱励起 γ 線をの強度から断面積を求めた。そして、光学ポテンシャル模型を用いて断面積が実験値と再現する変形パラメータを求めた。この変形パラメータは現象論的な理論予想値 ($\beta_{\rm sym}$) とほぼ一致し、他の偶々核と矛盾しない結果になっている (図 2.2 j(a))。一方、先に行われた 2^+ 状態の寿命測定結果により、陽子側の寄与が異常に小さいことが示唆されている (図 2.2 j(b))。陽子非弾性散乱実験で求めた $\beta_{pp'}$ と寿命から求めた $\beta_{\rm em}$ と組み合わせることにより、中性子側の寄与が陽子側のそれより四倍大きいことを明らかにした。これはこれまでに観測された原子核のよりおよそ二倍大きい値である (図 2.2 j(c))。[30, 41, 62, 64]

中間エネルギークーロン励起

クーロン励起は、従来、核力の影響を避けるためクーロン障壁以下の低いエネルギーで行われてきたが、中間エネルギーにおいても、$Z\geq10$ の原子核に対しては、クーロン励起が核力による励起を上まわるため、適用可能であることがわかってきた。特に偶偶核の 2^+ 状態への電気四重極遷移確率は、原子核の四重極変形の発現強度を調べる目的で、中間エネルギーの不安定核ビームを用いたクーロン励起法により広く測定されている。本年度は、クーロン励起法により、中性子数 N=20、50 周辺の中性子過剰核を対象に電気四重極遷移確率の導出を行った。^{28}Ne を対象にした実験では、周辺原子核の電気四重極遷移確率の実験値との比較から、^{28}Ne の電気四重極遷移確率には、変形状態と球形状態の縮退が重要な役割を果たしていることが示された。Ge 同位体を対象とした実験では、Ge 同位体の中性子過剰領域では、安定核近傍の原子核と同様に魔法数 N=50 に起因する閉殻構造の発現が見られることがわかった。また、将来 RIBF において展開しうる中重領域の原子核分光法として、中間エネルギーでの２段階クーロン励起法を提案している。特に偶偶核の第２励起状態 (2^+_2、4^+_1 状態) の分光を行なうべく、解析法の確立、最適な実験条件の考案などの懸案に関して議論を行なっている。[26, 44, 63, 66, 67, 79, 91]

2.2.3 ベータ分光を用いた核構造研究

β 崩壊は、その機構がよく理解されているため、崩壊の始状態、終状態の核構造を知るための優れた手法である。また、不安定核はその定義からいって、必ず β 崩壊するため、β 核分光は、全ての不安定核研究に適用できる汎用性をもち、かつ、他の 2 次反応を用いる核分光法にくらべ、極めて効率のよい実験手段である。安定線から離れた陽子・中性子過剰核を対象とした場合は、ベータ崩壊の Q 値が一般に 10∼20 MeV 程度と大きいため、β 線と、遅発陽子・中性子、γ 線を同時測定する実験手法が有効であり、娘核の非束縛状態、束縛状態に関する情報を得ることができる。我々は、実験条件に応じた測定方法の考案、必要な検出器の開発を行い、研究を行っている。

β-γ 分光法を用いた核構造

我々は、ゲルマニウム検出器に BGO 検出器によるアクティブコンプトンシールドを施したガンマ線検出器群を開発しており、安定線から遠く離れた陽子、中性子過剰核を対象とした、β-γ 分光研究を行なっている。

本年度は、陽子過剰核 ^{46}Cr を対象としたガモフテラー (GT)-β 崩壊の測定実験の解析を終了し、実験結果に関する議論をまとめ論文発表した。^{46}Cr のように $N=Z$ 核はアイソスピン自由度が最も対称な核であり、核力のアイソスピン対称性について調べるのに適した核である。実験の結果、^{46}Cr の GT-β 崩壊を初めて観測するとともに、^{46}Cr の基底状態から ^{46}Cr の 993 keV の 1^+ の励起状態への崩壊の $\log ft$ を 3.6 ± 0.2 と決定した。殻模型などの理論計算との比較から、$N=Z$ である ^{46}V の核内相互作用についての知見を得た。[28, 65]

また、本年度は、中性子過剰な炭素、窒素、酸素同位体の β-γ 核分光実験を行った。この領域の原子核の殻模型配位は、中性子の最外殻は sd 殻、陽子の最外殻は p 殻という特徴をもつ。GT 遷移は軌道角運動量を変えない遷移であるので、これらの不安定核が GT 遷移により崩壊する場合 sd 殻の中性子が sd

殻の陽子に変わる。特に、娘核が窒素や酸素の同位体の場合は、基底状態の陽子の最外殻は p 殻であるため、GT 遷移によって陽子が p 殻から sd 殻に励起した状態に選択的に遷移することになる。したがって、β 遅延ガンマ線の測定によって、シェルギャップ間の遷移に対応するガンマ線を同定できる可能性があり、中性子過剰領域における陽子の p 殻と sd 殻間のシェルギャップの変化について実験的に調べることができる。

図 2.2 k に本実験のセットアップを示す。β 崩壊に際して放出される β 線をプラスチックシンチレータを用いて観測し、娘核が励起状態から脱励起する際に放出される γ 線をゲルマニウム検出器で観測して、β 線と γ 線の同時測定を行った。実験上の工夫点は、ゲルマニウム検出器に β 線によるバックグランドを除去するための薄いプラクチックシンチレーターを施し、高いエネルギー分解能と、高い信号-雑音比を両立している点があげられる。現在は、実験の結果を解析中である。

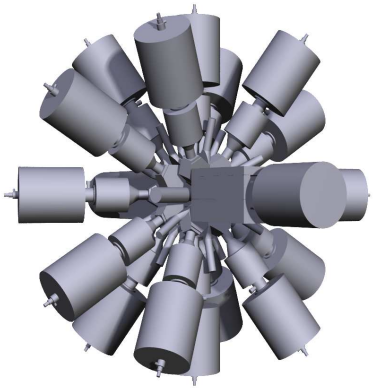


図 2.2 k: 中性子過剰な炭素、窒素、酸素同位体の β-γ 分光実験に用いたセットアップ。ガンマ線は、Clover 型ゲルマニウム検出器 2 台と、CNS のゲルマニウム検出器アレイ GRAPE を組み合わせて測定した。

陽子過剰核 ^{24}Si のベータ核分光

^{24}Si は比較的軽い sd 殻領域のドリップライン近傍に位置する陽子過剰核であり、アイソスピン $T_z = -2$ という値を持つ。$T_z = \pm 1$ のアイソスピン対称性を系統的に議論するための手段として、親核である $T_z = \pm 2$ の核の β 崩壊様式から娘核の核構造に関する情報を得るという方法が挙げられる。しかし、^{24}Si は sd 殻領域の $T_z = -2$ の系列核の中で、唯一 β 崩壊様式が定まっていなく、娘核 ^{24}Al の構造に関する情報も不十分であった。そこでアイソスピン対称性の成否を確認するため、^{24}Si の β 崩壊の測定を行なった。^{24}Si では、β 崩壊の Q 値が 10.8MeV と大きいため、β 核分光を行うことによって数多くの遷移を同時にかつ精度良く測定することができる。その測定結果に基づいて崩壊様式、そして娘核の核構造についての詳細な議論を展開することが可能になる。

実験は 2004 年度に理化学研究所の入射核破砕片分離装置（RIPS）を用いて行った。RIPS で生成した不安定核 2 次ビーム（^{24}Si,^{23}Al, 他）を対象に β 遅延陽子および β-γ 分光測定を行なった。β 遅延陽子の測定では従来に比べて 10 倍の統計を得ることに成功した。β-γ の測定では ^{24}Si の娘核 ^{24}Al の第 2 励起準位からの脱励起 γ 線を 664 keV に初めて観測した。

本年度は実験で得たデータから最終的な結論を導くべく、精密な解析を行った。γ 線検出効率などの評価の精度を向上させ、観測した β 遷移の ft 値を精度よく決定した。その中の 4 つの遷移に関しては ft 値を導出したのは初であり、特に ^{24}Al の第 2 励起準位 1090 keV への遷移は、導出した ft 値から許容遷移であることが推測でき、準位のスピンパリティが 1^+ であると決定することができた。さらにバックグラウンドの評価精度を向上させることで、陽子ピークの時間構造に関してより信頼のできる結果を得た。この結果から、以前の先行実験で観測されていた陽子ピークの起源はすべて ^{24}Si であることが判明し、^{24}Si の寿命を 143.0 ± 2.8(ms) と現時点における最高精度で決定した。

また同時に ^{24}Si と共に 2 次ビームに含まれる ^{23}Al についても解析を行った結果、新たな準位への β 遷移を 1 つ観測した。

本実験の解析から ^{24}Si の崩壊様式を決定し、娘核 ^{24}Al とその鏡映核 ^{24}Na の構造を比較した結果、低励起準位のエネルギー、スピンパリティ、β 遷移の ft 値について良いアイソスピン対称性が成り立っていることが確認できた。この結果によって、sd 殻領域の $T_z = \pm 1$ の系列の核においては、基本的なアイソスピン対称性が成立しているという結論に至った。現在本研究の結果について投稿論文を執筆中である。

2.2.4 高分解能ガンマ線測定による励起状態の寿命決定

ドリップライン近傍までの核を対象とした実験手法として、現在、インビーム γ 線核分光が広く使われている。インビーム γ 線核分光ではクーロン励起や原子核破砕反応などの手法で目的の核の励起状態を作りそこからの脱励起 γ 線を測定することで、励起エネルギーや遷移行列要素といった情報を得る。対象とする原子核領域の拡大に伴い、γ 線検出器の高精度化、高効率化が求められている。

我々は、Recoil Distance Method (RDM) を用い、^{32}Mg の第一 2^+ 励起状態の寿命を直接決定する実験研究を行っている。RDM とは、励起状態生成用の標的と、入射粒子を減速するための標的の 2 層の反応標的を用い、それぞれの標的通過後に放出されたガンマ線の個数の比から、励起状態の寿命を決定する手法である。中間エネルギーの不安定核ビームへの適用は本実験が世界初である。ガンマ線の個数の比

を精度よく求めるためには、高分解能で脱励起ガンマ線を測定することが不可欠であり、実験では CNS のゲルマニウム検出器アレイ GRAPE を用いてガンマ線を測定した。また、我々が開発している BGO 検出器をコンプトンシールドとして用い、信号雑音比の向上を図った。現在、寿命の導出へ向けて解析を進めており、結果は論文として発表する予定である。

2.2.5 TOF スペクトロメータ開発と中重領域の核分光

中重領域の中性子過剰核では、中性子数 28、40 の (擬) 魔法数消失、中性子数 32 の新魔法数出現などが示唆され、実験による核構造の解明が望まれている。不安定核の分光手段としては、逆運動学非弾性散乱を用いたインビーム γ 線核分光が盛んに行われているが、これまでは二次標的からの散乱粒子の質量識別に ΔE-E 法を用いていたため、主に質量数 30 程度以下の軽い不安定核にしか適用できなかった。そこで我々は、開発した TOF スペクトロメータを用い、実験可能領域を質量数 70 程度まで広げることに成功した。TOF スペクトロメータは、超伝導三連四重極電磁石と、その前後に配置されたプラスチック検出器、最下流に置かれたシリコン検出器からなり、散乱粒子の質量識別法として、TOF-E 法を採用している。TOF スペクトロメータの特徴は、三連四重極電磁石を用いることによって質量数領域に見合った TOF 分解能を得るための飛行距離を確保しながら下流の検出器面積を小さくし、測定の効率化を図った点にある。

本年度は、中性子数 40 の (擬) 魔法数の中性子過剰領域での振舞いを調べる目的で行なった、中性子過剰 Ti 同位体のガンマ線分光実験について、データ解析を中心に研究を進めている。また、TOF スペクトロメータの特性である高い散乱粒子輸送効率を生かした実験を数々行ない、中性子過剰炭素同位体の反応断面積測定、^{36}Mg、^{42}Si を対象とした陽子非弾性散乱、二重閉殻核 ^{48}Ca 近傍の超変形状態の探査などを行なった。

中性子過剰核 ^{58}Ti、^{60}Ti、^{62}Ti の多粒子多チャネル反応実験

中性子過剰な Ti 同位体に注目し、殻構造の振る舞いを調べる実験を行った。中性子数 40 の同調核では、中性子が過剰になるに従って原子核の変形度が増し、魔法数が消失している可能性がある。実際に質量数 40 程度以下の軽い中性子過剰領域では、中性子数 8、20 の閉殻構造が崩れて魔法数が消失し、中性子数 16 が新魔法数になるなど、殻構造の異常な変化が実験的にも理論的にも指摘されている。

そこで我々は中性子過剰な Ti 同位体に注目し、液体水素標的を用いた、インビーム γ 線核分光実験を行った。偶偶核において、陽子非弾性散乱や原子核破砕反応などの多様な核反応を用いて励起状態を生成し、その性質に関する実験情報から殻構造の振る舞いを調べている。これにより、Ti 同位体における中性子 (擬) 魔法数 40 の消失の有無を調べることを目指している。

本年度は二次標的への入射粒子、散乱粒子の識別に関する解析を終了し、Ti 同位体やその周辺核種の低励起状態のエネルギーを決定した。今後は、励起状態への遷移強度や複数の γ 線の相関に関する解析等を進め、中性子数 40 近傍の Ti 同位体の殻構造の振る舞いについて、さらに詳しく議論する予定である。

2.2.6 天体核物理

初期宇宙、恒星内部の燃焼サイクル、超新星爆発といった個々の天体現象に関わる核反応の反応断面積はエネルギー収支および元素合成過程を理解する上で不可欠な量である。特に超新星や、X 線バーストといった高温、高密度状態では平均自由時間が短くなり、原子核の崩壊よりも先に反応が起こり得る。つまり、不安定核を含んだ反応が寄与することが可能になり、これらの断面積を測定することが重要となる。我々は、クーロン分解反応法を用いて、不安定核ビームを用いた天体現象に関わる放射性捕獲断面積の間接測定を行っている。クーロン分解反応法は、A(p,γ)B といった陽子捕獲断面積の場合、逆反応学を応用し、B 核のクーロン分解反応 ^{208}Pb(B,A+p)^{208}Pb を測定する。この逆反応断面積から仮想光子理論を用いて陽子捕獲反応の断面積を導出する。本年度は、^{23}Al、^{27}P のクーロン分解反応の測定から、新星などで生じる rp-process (爆発的水素燃焼過程) で重要な働きをする ^{22}Mg(p,γ)^{23}Al 反応、^{26}Si(p,γ)^{27}P 反応の断面積決定を行った。これらの反応は、新星爆発直後の γ 線源となる ^{22}Na、^{26}Al の生成量を左右するため、反応断面積を実験的に決定することが重要である。解析により、理論で予想された断面積を支持する結果を得た。[39, 40, 46]

＜報文＞

(原著論文)

[1] K. Yako, H. Sakai, M.B. Greenfield, K. Hatanaka, M. Hatano, J. Kamiya, H. Kato, Y. Kitamura, Y. Maeda, C.L. Morris, H. Okamura, J. Rapaport, T. Saito, Y. Sakemi, K. Sekiguchi, Y. Shimizu, K. Suda, A. Tamii, N. Uchigashima, and T. Wakasa: "Determination of the Gamow-Teller quenching factor from charge exchange reactions on ^{90}Zr", Phys. Lett. B **615**, 193–199 (2005).

[2] T. Wakasa, Y. Hagihara, M. Sasano, S. Asaji, K. Fujita, K. Hatanaka, T. Ishida, T. Kawabata, H. Kuboki, Y. Maeda, T. Noro, T. Saito, H. Sakai, Y. Sakemi, K. Sekiguchi, Y. Shimizu, A. Tamii, Y. Tameshige, and K. Yako: "Performance of the neutron polarimeter NPOL3 for high resolution measurements", Nucl. Instrum. Methods A **547**, 569–582 (2005).

[3] T. Wakasa, M. Ichimura, and H. Sakai: "Unified analysis of spin isospin responses of nuclei", Phys. Rev. C **72**, 067303 (2005).

[4] K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Witala, W. Glockle, J. Golak, K. Hatanaka, M. Hatano, K. Itoh, H. Kamada, H. Kuboki, Y. Maeda, A. Nogga, H. Okamura, T. Saito, N. Sakamoto, Y. Sakemi, M. Sasano, Y. Shimizu, K. Suda, A. Tamii, T. Uesaka, T. Wakasa, and K.Yako: "Resolving the Discrepancy of 135 MeV *pd* Elastic Scattering Cross Section and Relativistic Effects", Phys. Rev. Lett. **95**, 162301 (2005).

[5] P. Mermod, J. Blomgren, A. Hildebrand, C. Johansson, J. Klug, M. Osterlund, S. Pomp, U. Tippawan, B. Bergenwall, L. Nilsson, N. Olsson, O. Jonsson, A. Prokofiev, P.-U. Renberg, P. Nadel-Turonski, Y. Maeda, H. Sakai, and A. Tamii: "Evidence of three-body force effects in neutron-deuteron scattering at 95 MeV", Phys. Rev. C **72**, 061002 (2005).

[6] M. Hatano, H. Sakai, T. Wakui, T. Uesaka, N. Aoi, Y. Ichikawa, T. Ikeda, K. Itoh, H. Iwasaki, T. Kawabata, H. Kuboki, Y. Maeda, N. Matsui, T. Ohnishi, T.K. Onishi, T. Saito, N. Sakamoto, M. Sasano, Y. Satou, K. Sekiguchi, K. Suda, A. Tamii, Y. Yanagisawa, K. Yako: "First experiment of ^{6}He with a polarized proton target", Eur. Phys. J. A **25**, Supplement **1**, 255 (2005).

[7] M. Ichimura, H. Sakai, and T. Wakasa: "Spin-isospin responses via (p,n) and (n,p) reactions", Prog. Part. Nucl. Phys. **56**, 446 (2006)

[8] M. Hori, "High-sensitivity, non-destructive spatial monitor with micro-wire electrodes for UV, X-ray, and charged particle beams", Rev. Sci. Instr. **76**, 113303 (2005).

[9] L.V. Jørgensen, M. Amoretti, G. Bonomi, P.D. Bowe, C. Canali, C. Carraro, C.L. Cesar, M. Charlton, M. Doser, A. Fontana, M.C. Fujiwara, R. Funakoshi, P. Genova, J.S. Hangst, R.S. Hayano, A. Kellerbauer, V. Lagomarsino, R. Landua, E. Lodi Rizzini, M. Macri, N. Madsen, D. Mitchard, P. Montagna, A. Rotondi, G. Testera, A. Variola, L. Venturelli, D.P. van der Werf, and Y. Yamazaki, "New Source of Dense, Cryogenic Positron Plasmas", Phys. Rev. Lett. **95**, 025002 (2005).

[10] S.S. Adler *et al.*: "Deuteron and antideuteron production in Au+Au collisions at $\sqrt{S_{NN}}$ = 200 GeV", Phys. Rev. Lett. **94**, 122302 (2005).

[11] R.S. Hayano: "Laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms and ions", Canadian J. Phys. bf 83, 357 (2005).

[12] S.S. Adler *et al.*: "Midrapidity direct-photon production in p+p collisions at $\sqrt{S}$ = 200 GeV", Phys. Rev. D **71**, 071102 (2005).

[13] S.S. Adler *et al.*: "Systematic studies of the centrality and $\sqrt{S_{NN}}$ dependence of the $dE(T)/d\eta$ and $dN(ch)/d\eta$ in heavy ion collisions at midrapidity" Phys. Rev. C **71**, 049901 (2005).

[14] S.S. Adler *et al.*: "Jet structure of baryon excess in Au+Au collisions at $\sqrt{S_{NN}}$ = 200 GeV", Phys. Rev. C **71**, 051902 (2005).

[15] S.S. Adler *et al.*: "Centrality dependence of direct photon production in $\sqrt{S_{NN}}$ = 200 GeVAu+Au collisions", Phys. Rev. Lett. **94**, 232301 (2005).

[16] S.S. Adler *et al.*: "Saturation of azimuthal anisotropy in Au plus Au collisions at $\sqrt{S_{NN}}$ = 62−200 GeV", Phys. Rev. Lett. **94**, 232302 (2005).

[17] S.S. Adler *et al.*: "Production of ϕ mesons at midrapidity in $\sqrt{S_{NN}}$ = 200 GeV Au+Au collisions at relativistic energies", Phys. Rev. C **72**, 014903 (2005).

[18] S.S. Adler *et al.*: "Measurement of single electron event anisotropy in Au plus Au collisions at $\sqrt{S_{NN}}$ = 200 GeV", Phys. Rev. C **72**, 024901 (2005).

[19] K. Adcox *et al.*: "Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration", Nucl. Phys. A**757**, 184 (2005).

[20] S.S. Adler *et al.*: "Measurement of transverse single-spin asymmetries for midrapidity production of neutral pions and charged hadrons in polarized $p+p$ collisions at $\sqrt{S}$ = 200 GeV", Phys. Rev. Lett. **95**, 202001 (2005).

[21] S.S. Adler *et al.*: "J/ψ production and nuclear effects for d+Au and p+p collisions at $\sqrt{S_{NN}}$ = 200 GeV", Phys. Rev. Lett. **96**, 012304 (2006).

[22] S.S. Adler *et al.*: "Single electrons from heavy-flavor decays in $p+p$ collisions at $\sqrt{S}$ = 200 GeV", Phys. Rev. Lett. **96**, 032001 (2006).

[23] S.S. Adler *et al.*: "Nuclear modification of electron spectra and implications for heavy quark energy loss in Au + Au collisions at $\sqrt{S_{NN}}$ = 200 GeV", Phys. Rev. Lett. **96**, 032301 (2006).

[24] S.S. Adler *et al.*: "Measurement of identified π^0 and inclusive photon second-harmonic parameter $v(2)$ and implications for direct photon production in $\sqrt{S_{NN}}$ = 200 GeV Au+Au", Phys. Rev. Lett. **96**, 032302 (2006).

[25] Z. Elekes, H. Iwasaki, H.Sakurai *et al.*: "Low-lying excited states in ^{17,19}C", Phys. Lett. B **614**, 174 (2005).

[26] H. Iwasaki, H. Sakurai, *et al.*: "Quadrupole collectivity of ^{28}Ne and the boundary of the island of inversion", Phys. Lett. B **620**, 118 (2005).

[27] Zs. Dombradi, H. Iwasaki, H. Sakurai, *et al.*: "Decoupling of valence neutrons from the core in 17B", Phys. Lett. B **621**, 81 (2005).

[28] T. K. Onishi, H. Sakurai, H. Iwasaki, *et al.*: "Gamow-Teller decay of the T = 1 nucleus ^{46}Cr", Phys. Rev. C **72**, 024308 (2005).

[29] R. Kanungo, H. Iwasaki, H.Sakurai *et al.*: "Search for an isomeric state in ^{19}C", Nucl. Phys. A **757**, 315 (2005).

[30] H. J. Ong, H. Iwasaki, H. Sakurai, *et al.*: "Neutron-dominant quadrupole collective motion in ^{16}C", Phys. Rev. C **73**, 024610 (2006).

(会議抄録)

[31] M. Sasano *et al.*: "Determination of Gamow-Teller unit cross sections of the (p, n) reaction at 200 and 300 MeV", Journal of Physics: Conference Series **20**, 181–182 (2005).

[32] T. Saito, H. Sakai *et al.*: "Experimental Test of Bell's Inequality via the ^{1}H$(d, ^2$He) Reaction", AIP Conf. Proc. **768**, 62–64 (2005).

[33] R.S. Hayano: "Prospects of CPT tests using antiprotonic helium and antihydrogen", Proceedings of Workshop on Physics with Ultra Slow Antiproton Beams, Y. Yamazaki and M. Wada eds., AIP Conference Proceedings 793, pp.136.

[34] R.S. Hayano: "Overview of the ASACUSA Program", Proceedings of EXA05, A. Hirtl, J. Marton, E. Widmann and J. Zmeskal eds., Austrian Academy of Science Press, Vienna 2005.

[35] G. Bonomi, *et al.*: "Antihydrogen production mechanisms in ATHENA", Nuc. Phys. A **752**, 97c (2005).

[36] T. Suzuki, *et al.*: "A search for deeply bound kaonic nuclear states", Nucl. Phys. A **754**, 375c (2005).

[37] R.S. Hayano: "Antiprotonic Atoms", Proceedings of the eight International Conference on Low Energy Antiproton Physics, D. Grzonka, W. Oelert, T. Rozek and P. Winter eds., (AIP Conference Proceedings 796), pp. 233.

[38] R.S. Hayano: "Laser Spectroscopy of Antiprotonic Helium Atoms – Weighing the antiproton –", Proceedings of the XVII International Conference (ICOLS 2005), E. Hinds ed., (World Scientific Publishing, Singapore, 2005).

[39] Y. Togano, H. Iwasaki, H. Sakurai, *et al.*: "Study of ^{26}Si$(p, \gamma)^{27}$P reaction using Coulomb dissociation method", Nucl. Phys. A **758**, 182c (2005)".

[40] T. Gomi, H. Iwasaki, H. Sakurai, *et al.*: "Coulomb Dissociation of ^{23}Al for the stellar ^{22}Mg$(p, \gamma)^{23}$Al reaction", Nucl. Phys. A **758**, 761c (2005).

[41] H. J. Ong, H. Iwasaki, H. Sakurai, *et al.*: "Inelastic proton scattering on ^{16}C", Eur. Phys. J. A **25**, s01, 347 (2005).

[42] T. Michimasa, S. Shimorau, H. Iwasaki, *et al.*: "Study of single-particle states in ^{23}F using proton transfer reaction" Eur. Phys. J. A **25**, S01, 367 (2005).

[43] K. Yamada, H. Iwasaki, H. Sakurai, *et al.*: "Reduced transition probabilities for the first 2^+ excited state in ^{46}Cr, 50Fe, and ^{54}Ni", Eur. Phys. J. A **25**, S01, 409 (2005).

[44] H. Iwasaki, H. Sakurai, *et al.*: "Intermediate-energy Coulomb excitation of the neutron-rich Ge isotopes around N = 50" Eur. Phys. J. A **25**, S01, 415 (2005).

[45] E. Ideguchi, M. Niikura, H. Iwasaki, *et al.*: "Study of high-spin states in the ^{48}Ca region by using secondary fusion reactions", Eur. Phys. J. A **25**, S01, 429 (2005).

[46] T. Gomi, H. Iwasaki, H. Sakurai, *et al.*: "Coulomb dissociation experiment for explosive hydrogen burning: study of the ^{22}Mg$(p, \gamma)^{23}$Al reaction", J. Phys. (London) G **31**, S1517 (2005).

(学位論文)

[47] 鈴木隆敏: "An Experimental Search for Deeply Bound Kaonic Nuclear States" (K 中間子の原子核による深束縛状態の探索、博士論文).

[48] 高橋良幸:「オルソポジトロニウムを用いた 3 光子偏光相関測定による GHZ モデルの検証」(修士論文).

[49] 鈴木大介:「^{17}C 励起状態の寿命測定」、(修士論文).

[50] 大能直哉: "High precision spectroscopy of antiprotonic helium atoms" (反陽子ヘリウム原子の高精度分光、修士論文).

[51] 中尾太郎:「中性子過剰核 ^{15,17}B のインビーム γ 核分光」、(修士論文).

[52] Posada, Lawrence Gene Cirera: "Laser-induced formationn of antihydrogen atoms" (反水素原子のレーザー誘導生成、修士論文).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[53] H. Kuboki: "Search for narrow dibaryon resonances via the $p + d$ scattering", The Third Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics, July 26–30, 2005, Nakhon Ratchasima, Thailand.

[54] R. Funakoshi, "ATHENA: A High Performance Detector for Low Energy Physics", In Proc. of the Conf. on New Trends in High Energy Physics, Crimea, Ukraine, September 10–17, 2004.

[55] S. Noji, K. Miki *et al.*: "Performance Evaluation of Neutron Polarimeter NPOL", 2nd Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of APS and JPS, September 18–22, 2005, Ritz Carlton Hotel, Hawaii, USA.

[56] R. Funakoshi: "Way to CPT test with cold antihydrogen", *ibid.*

[57] Lawrence Gene C. Posada *et al.*: "Experiments on Laser-Induced Radiative Formation of Antihydrogen Atoms", *ibid.*

[58] N. Ono, R.S. Hayano *et al.*: "High precision spectroscopy of antiprotonic helium atoms", *ibid.*

[59] K. Yako *et al.*: "Polarimeters for tests of EPR paradox", XIth International Workshop on Polarized Sources and Targets November 14–17, 2005, Tokyo, Japan.

[60] S. Noji, K. Miki *et al.*: "Performance evaluation of neutron polarimeter NPOL", *ibid.*

[61] S. Okada, KEK-PS E570 Collaboration: "Precision spectroscopy of Kaonic Helium $3d \rightarrow 2p$ X-rays", YITP Workshop Hadrons at Finite Density, University of Kyoto YITP, February 20-22, 2006.

[62] H. J. Ong, H. Iwasaki, H. Sakurai *et al.*: "Quadrupole Collectivity in ^{16}C", RIKEN RIBF International Workshop "collective motions in unstable nuclei - experiments vs. theories", RIKEN, Saitama, Japan, May 24–26, 2005.

[63] H. Iwasaki, H. Sakurai *et al.*: " Structure of neutron-rich isotopes at and around N=50 from intermediate-energy Coulomb excitation", *ibid.*

[64] H. J. Ong, H. Iwasaki, H. Sakurai, *et al.*: "Inelastic proton scattering on ^{16}C", International Symposium on Structure of Exotic Nuclei and Nuclear Forces (SENUF06), Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan, Mar. 9–12, 2006.

[65] T. K. Onishi, H. Iwasaki, H. Sakurai, *et al.*: "The β-decay of ^{46}Cr", *ibid.*

[66] H. Iwasaki, *et al.*: "Spectroscopy on neutron-rich nuclei near N=50 via single-step and two-step Coulomb excitation at intermediate energies", *ibid.*

[67] H. Iwasaki : "Spectroscopy on meadium and heavy neutron-rich nuclei via two-step Coulomb excitation at intermediate energies", International Workshop on "Nuclear Physics with RIBF", RIKEN, Saitama, Japan, March 13–17, 2006.

招待講演

[68] H. Sakai: "The *nd* scattering compared to *pd* scattering at intermediate energies", The Third Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics, July 26–30, 2005, Nakhon Ratchasima, Thailand.

[69] N. Yamanaka, "Time-dependent coupled-channel studies of atomic Coulomb three-body dynamics", 3rd Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics, July 26-30, 2005, Nakhon Ratchasima, Thailand.

[70] M. Hori "Laser spectroscopy of antiprotonic helium", Conference on lasers and electro-optics European Quantum Electronics Conference (CLEO-EQEC) 2005, Munich, Germany, June 12–17, 2005.

[71] M. Hori, "Status report on the beam shape and halo monitor" European Collaboration on High-Intensity Pulsed Proton Injectors HIPPI-05, Abingdon, United Kingdom, September 28-30, 2005.

[72] R.S. Hayano: "Antiprotonic Atoms", International conference on Low Energy Antiproton Physics (LEAP05), Bonn - Jülich, Germany, May 16-22, 2005.

[73] R.S. Hayano: "Laser Spectroscopy of Antiprotonic Helium Atoms – Weighing the antiproton –", International Conference on Laser Spectroscopy, Cairngorms National Park, Scotland, June 19-24, 2005.

[74] R.S. Hayano: "Ground-state hyperfine splitting of antihydrogen", 37th Conference of the European Group for Atomic Systems, Dublin City University, Ireland, August 3-6, 2005.

[75] R.S. Hayano: "Testing CPT using low energy antiprotons " 2nd Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of APS and JPS, September 18–22, 2005, Ritz Carlton Hotel, Hawaii, USA.

[76] R.S. Hayano: "Precision laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms", The 3rd COE workshop, "Frontiers of Laser and Optical Sciences", Tokyo University, October 1-2, 2005.

[77] R.S. Hayano: "Kaonic helium experiment at KEK", Austrian - Japanese Workshop on Antikaon mediated bound systems, Stefan Meyer Institute for subatomic Physics, December 21 and 22, 2005.

[78] R.S. Hayano: "Mesic atoms and mesic nuclei", YITP Workshop Hadrons at Finite Density, University of Kyoto YITP, February 20-22, 2006.

[79] H. Iwasaki : "Spectroscopy on neutron-rich nuclei around N=20 via intermediate-energy Coulomb excitation", Symposium on "Science with rare isotope beams", part of Pacifichem 2005, Hawaii, USA, December 19-20, 2005.

(国内会議)

一般講演

[80] 笹野匡紀, 他: 「(p,n) 反応における R^2 の質量数依存性とその解釈」日本物理学会第 61 回年次大会、2006 年 3 月、愛媛大学・松山大学.

[81] 三木謙二郎, 他: 「0 度 $d(d,pn)$ 反応による $^1S_0$ pn 対の生成」、同上.

[82] 高橋良幸、酒井英行、矢向謙太郎: 「オルソポジトロニウムを用いた 3 光子偏光相関測定」、同上.

[83] 船越亮，Lawrence Gene C. Posada，早野龍五，他 (ATHENA Collaboration), 「冷たい反水素を使った物理」、同上.

[84] L.G.C. Posada，R. Funakoshi，R.S. Hayano，Y. Yamazaki，M.C. Fujiwara，他 (ATHENA Collaboration), "Laser-Induced Formation of Antihydrogen"、同上.

[85] 大能直哉、早野龍五、他「反陽子ヘリウム原子の高精度分光による反陽子電子質量比の測定及び CPT 対称性の検証」、同上.

[86] 佐藤将春、他 、KEK-PS E549 Collaboration :「^{4}He $(K^-_{stopped}, N)$ 反応を用いたストレンジトライバリオンの実験的研究 (1)、同上」

[87] 福田芳之、他 、KEK-PS E549 Collaboration :「^{4}He $(K^-_{stopped}, N)$ 反応を用いたストレンジトライバリオンの実験的研究 (3)、同上」

[88] 飯尾雅実、他、KEK-PS E570 Collaboration: 「K 中間子ヘリウム原子 X 線測定実験のための検出器系 I」、同上.

[89] 竜野秀行、他、KEK-PS E570 Collaboration: 「K 中間子ヘリウム原子 X 線測定実験のための検出器系 II」、同上.

[90] 岡田信二、他、KEK-PS E570 Collaboration: 「K 中間子ヘリウム原子 $3d \to 2p$ X 線の精密測定」、同上.

[91] H. Iwasaki : "Spectroscopy on medium and heavy neutron-rich nuclei via two-step Coulomb excitation at intermediate energies", 東大 CNS ワークショップ「殻模型の過去、現在、未来」, 2006 年 1 月 26-28 日、東京大学原子核科学研究センター.

(セミナー)

[92] H. Iwasaki : "Spectroscopy of neutron-rich nuclei at the RIPS facility", Cologne University, Germany, September 1, 2005.

[93] 早野龍五: 「K-He X-ray」、特定領域「ストレンジネスで探るクォーク多体系」研究会、静岡県伊東、2005 年 11 月

[94] 竜野秀行、KEK-PS E570 Collaboration: 「K 中間子ヘリウム原子 $3d \to 2p$ X 線の精密測定」、ＫＥＫ研究会 "ＱＣＤとハドロン物理の新展開"、KEK、2006 年 2 月

2.3 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 年度でほぼ終了した. 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 加速器の研究開発と, ILC での実験の検討を行なっている. また, 2007 年から始まる LHC 実験のデータ解析にも大学院学生が参加しつつある. エネルギーフロンティアにおける加速器実験に加えて, 中小規模の実験で本質的な素粒子物理研究を行なう為に, 粒子検出器の開発研究をおこなっている. 粒子検出器開発においては超冷中性子の重力での束縛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ている. 更に旧折戸研究室のメンバーによる飛翔体を利用した宇宙線観測実験のデータ解析も続けている.

2.3.1 最高エネルギー電子・陽電子コライダー LEP を用いた OPAL 実験

世界最高エネルギーの電子・陽電子衝突型加速器（e^+e^- コライダー）LEP を用いて, 国際協同実験 OPAL を素粒子物理国際研究センターと共同で行ってきた. この実験の目的は, 統一ゲージ理論の精密検証, 質量の起源であるヒッグス粒子の探索, 超対称性などの素粒子物理学上の根源的な問題の研究を, 素粒子反応の素過程を明確に観測できる電子・陽電子衝突を用いて, 世界最高エネルギーで行なうことにある. 1989 年 に重心系エネルギー 90GeV 近辺で実験を開始して以来, Z^0 粒子を総数 500 万事象観測し,「統一ゲージ理論 (標準理論) の精密検証」,「クォーク・レプトン群の世代数の決定」,「大統一理論の検証」等を行なってきた (LEP-I). 1995 年からは衝突エネルギーを徐々に上げて行き (LEP-II), 2000 年には 209GeV に達した. 2000 年 11 月に実験が終了し, 主なデータ解析は 2004 年度に終了し, 解析毎に総括的な論文を投稿した. 電弱相互作用でのゲージ原理の精密検証は Veltman, t'Hooft の 2000 年のノーベル物理学賞に繋がった. 強い相互作用に関しても Running Coupling を τ レプトンの質量領域から LEP-II の最高エネルギーまで測定し, 強い相互作用でのゲージ原理を検証し, Gross, Plitzer, Wilczek の 2004 年のノーベル物理学賞に繋がった. LEP での最重要課題であったヒッグス粒子は 115GeV〜250GeV の狭い質量範囲に追い込み, 次世代のコライダー LHC と ILC での発見と詳細研究に期待がかかる. 宇宙の暗黒物質の最有力候補である最も軽い超対称性粒子ニュートラリーノは 36GeV 以下の質量を棄却した. 暗黒物質粒子の非常に軽い質量領域は, 半導体検出器などでの直接探索が困難なためこの制限は重要である.

2.3.2 電子·陽電子リニアコライダー ILC 計画

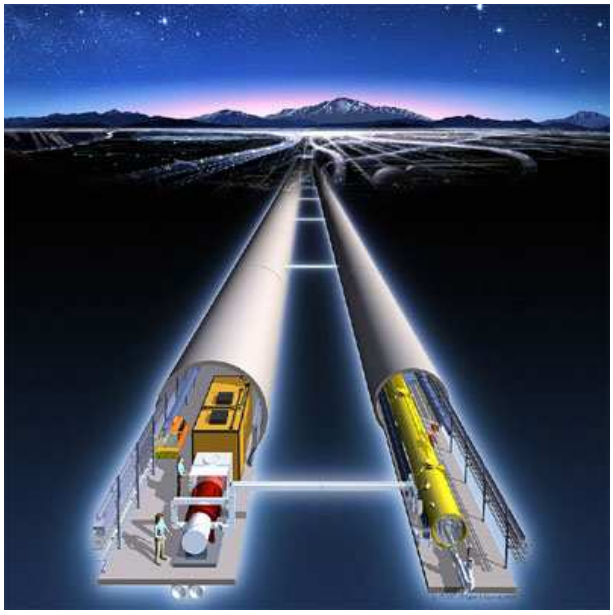


図 2.3 a: ILC 計画

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. LEP が到達したエネルギーよりも高いエネルギーに到達するためには半径を非常に大きくする必要があるが, LEP よりも大型の円形の e^+e^- コライダーは予算上建設不可能である. 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リニアコライダーのほうが経済的である. 現在 e^+e^- リニアコライダーの開発研究が日本, ドイツ, 米国 などで盛んに続けられている. 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. 3 年程前から 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つつある. 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, 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, 強い相互作

用をも統一する大統一理論, 及び超対称性の正しさを示唆している. もしこれが正しいとすれば, 理論は 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あまり高くないエネルギーに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. 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. 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. KEK では, 2003 年度に主線形加速器の試験ベンチを建設したが, ここでは加速管の放電モニター系の開発や加速器の tuning などに貢献した. 本研究室の駒宮は ICFA 及び ILCSC (International Linear Collider Steering Committee) の委員であり, 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.

最終収束システムの研究

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.

最終収束系システムを実証するための研究施設 (ATF2) の建設へ向けた準備している. ATF2 は, 現在 KEK で稼働中の先進加速器試験装置 (ATF) を拡張し, 実機と全く同じ原理の最終収束系を実証する施設である. 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が初期の目標である. さらに, 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. 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, アメリカやヨーロッパの多数の国々が参加しており, 国際共同研究として進めている. 2005 年度には, 計画の詳細を"ATF2 Proposal"として発表した. 2007 年の夏から建設を開始し, 2008 年中に 37nm のビームサイズを実現する計画である.

ILC 衝突点ビームサイズモニタ (新竹モニタ) の開発研究

ILC では, 電子ビームと陽電子ビームの衝突確率をあげるため, 衝突点 (IP) においてビームを極限 (∼5nm) まで絞る. この極小ビームサイズの測定は ILC 実現のための大きな課題であり, レーザの干渉縞を用いた方法 (新竹モニタ) が実現の見通しが現在最も高い. これは, 衝突点にレーザ光の干渉縞を作り, 電子ビームと逆コンプトン散乱させる方法で, 干渉縞の位置を動かすと発生する γ 線の量が変化する. この変化率から電子ビームサイズを求めることが可能である.

この新竹モニタは, SLAC(Stanford Linear Accelerator Center) の FFTB(Final Focus Test Beam) 実験にて 70nm のビームサイズを測ることに成功している. 今回 KEK の ATF2 実験で達成される予定の 37nm のビームサイズを測定するため, FFTB で使用した装置を日本に移転し, 37nm を測定するためのアップグレードを行っている.

新竹モニタで ATF2 のビームを測定するためには, いくつかの課題がある. 一つは分解能の向上と誤差の正確な評価と低減である. 分解能の向上のため, FFTB で使用していたレーザに高調波発生器を追加し, 波長を 1064nm から 532nm に変更した. また, レーザに起因する測定誤差を評価・低減するため, 干渉縞の位相計測, 安定化, スキャンのための機構を開発している.

もう一つの課題は, バックグラウンドに強い γ 線検出器の開発である. 加速器のビームライン上には, 加速電子と加速管壁との散乱による γ 線が大量に存在する. ATF2 では, FFTB と比べて測定する γ 線のエネルギーが非常に低いため, バックグラウンド γ 線の除去はより困難となる. 当研究室では, 多層チェレンコフ方式, 多層シンチレータ方式の 2 つの測定器を考案し, それぞれの方式のバックグラウンド分離性能と最適な設計をシミュレーション等を用いて予測・検討している.

2.3.3 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, 電子・陽電子衝突による高エネルギー素粒子実験である. 1989 年より行われおよそ 12 年間続いた BES-I 実験の成功の後, 1996 年から upgrade され, BES-II 実験が行われた. BEPC のビームエネルギー範囲は 1.5 GeV から 2.8 GeV である. 興味ある物理は c-クオーク, および τ レプトンの物理であり, J/ψ, ψ', τ, D および D_s 粒子のデータが得られている. 特に J/ψ 粒子は BES-I 実験において 7.8×10^6, BES-II 実験において 5.77×10^7 イベント得られている. BES-I, II 実験の成功に伴い, これまでの実験装置の性能をさらに向上させた BES-III 実験が計画されている. 加速器は BEPC-II に upgrade され 1.89 GeV においてピークルミノシティは $10^{33}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ に計画されている. また測定器についてもこれまでの実験に比べて, 光子のエネルギーおよび角度分解能の向上, 精度の良い運動量測定, ハドロン同定能力の向上を目指したより正確な測定の出来るよう, IHEP をはじめとした様々な研究機関で開発が進められている. BES-III 実験においては, 1 年間に 10^9 の J/ψ 粒子を得ることが

計画され, これまでの実験結果よりさらに精度の高い結果が得られることが期待されている.
我々の研究室では BES-II 実験の実験データを用いたらの新しい物理の探索と, BES-III 実験に向けて新たな TOF システムの構築を IHEP, USTC とともに担当している.

BES-II 実験のデータを用いた $J/\psi\to\Lambda\overline{\Lambda}$ 過程の研究

これまでに観測された CP Violation は CP の違う 2 つの固有状態の混じり合いという, いわば間接的な破れを観測したものであった. $J/\psi\to\Lambda\overline{\Lambda}$ 過程は dibaryon 崩壊であるから, baryon 数の保存によって Λ と $\overline{\Lambda}$ が混じり合うことはない. よって, mixing によるものとは違う, もっと直接的な, 崩壊過程の崩壊振幅に起因する CP の破れを探索した. また, $J/\psi\to\Lambda\overline{\Lambda}$ の branching fraction の測定も行った.

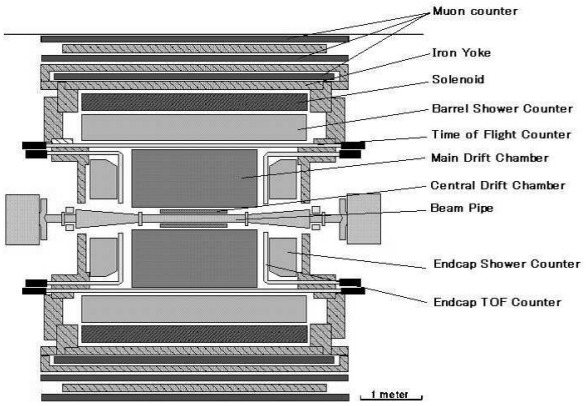


図 2.3 b: BES II detector

BES II Detector(図 1) は中国 IHEP の e^+e^- コライダー (BEPC) における汎用 detector である. BEPC のビームエネルギーの範囲は 1.5(GeV) から 2.8(GeV) に及ぶ. この detector の物理的な目的は, charm クオークと τ レプトンの物理の解析であり, J/ψ 粒子 (質量 3.097GeV) が非常に多く生成される. e^+e^- の反応により生成される全ての粒子を完全に reconstruct するために, Detector は大きな立体角をカバーし, また位置, 運動量, エネルギー分解能も非常に良くなっている. 中央の Detector は Vertex chamber(VC) と Main Drift Chamber(MDC) で構成されている. VC は J/ψ 粒子が生成され崩壊する vertex を reconstruct することや, tracking の精度の向上, およびトリガに用いられる. MDC は 20 層のドリフトチェンバーからなっており, 粒子の tracking, および運動量, dE/dx の測定を行う. MDC の外側には, TOF が配置され, これによって粒子の time of flight が測定されて particle ID をおこなっている. TOF の外側には 24 層の shower counter が配置され, これによって電子および光子のエネルギーの測定が行われる. 一番外側には 3 層の muon counter が配置されており, これによってミューオンの測定が行われる.
我々はまず, これまでの BES の 4 体崩壊の事象解析により得られていた J/ψ の全事象数の系統誤差 4.7% を減らすために, $J/\psi\to\mu^+\mu^-$ 事象を用いて J/ψ の全事象数の見積もりを行った. その結果, 1999 年から 2002 年の間に測定された全事象数は $(5.44\pm0.13)\times10^7$ となり, 誤差を 2.4%に減らすことが出来た. また, これまで π の軌跡が大きく曲げられることで Λ 粒子の崩壊点を再構成できず, そのために多くの事象が除外される原因について, 測定器の物質によるクーロン散乱とエネルギー損失が原因であることを突き止め, その理解を正しく行うことが出来た.
解析の結果, J/$\psi\to\Lambda\overline{\Lambda}$ 過程の崩壊率について, これまでの世界平均から 7.9σ のずれが見られた. また, CP の破れの指標となる, CP 変換に対して符号を変える測定量について, 0 からの有意なずれは見られなかった. 現在我々は最終的な結果を求めるための最後の解析を行っている.

飛行時間測定器 (TOF) の開発研究

中国高能研究所の BES 実験グループとの共同で, 2007 年度に開始する BES-III 実験のための飛行時間測定器 (TOF) の開発を進めている. TOF は, プラスチックシンチレータと光電子増倍管を組み合わせた測定器であり, 荷電粒子の飛行時間を測定することで, 粒子識別等の役割を果たす. BES-III では, 約 100ps の時間分解能を目指し, 測定器の最適化を進めている. 今年度において, 主に本研究室では, TOF 測定器用として生産された約 550 本の光電子増倍管 (PMT) についての性能試験を行っている.

性能試験は, 高エネルギー加速器研究機構の東カウンターホールにて行った. 牛若電磁石を用いることで, BES-III 検出器と同じ磁場 1 テスラ内での PMT の動作・特性を評価している. 光源には, 青色レーザーダイオードを採用し, 立ち上がりの十分速いパルス光を用いて, PMT の電流増倍率の電圧特性や時間分解能の光量依存性等を調べた. 測定は, 生産された全 PMT について行い, 要求性能を満たしていることを確認したうえで, 実際に BES-III 実験にて使用する 448 本の PMT の選別を進めた.

さらに本研究室では, 本試験のために独自に立ち上げたセットアップを, BES-III の TOF キャリブレーションシステムへの応用することを現在検討中である. 従来, こうしたシステムでの光源には, 窒素ダイレーザーを使うのが一般的であったが, 低頻度でのパルスしか発生できないほか, レーザーの寿命が短いなどの問題も抱えていた. レーザーダイオードの場合には, 高頻度でのパルス生成が可能となり, また安価かつ長寿命であるなど利点が多い. 立ち上がりの速いレーザー光の生成も行うことができ, キャリブレーション用光源として十分な性能を有していることも, 我々の性能試験での経験から理解されている. 但し, 我々の試験は, 12 個の PMT を同時測定するシステムであったため, 今後本研究室では, 光学系に改良を加えることで, 数百個ある TOF 用の全 PMT に

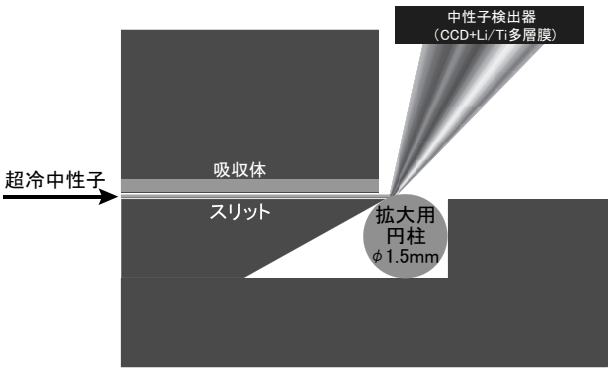


図 2.3 c: 実験セットアップ概念図

対して十分な強度のパルス光を供給できるシステムの構築を考察していくことになる．

2.3.4 超冷中性子を用いた量子力学実験

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．ここでは重力場を考えているので, エネルギーが離散化すると, 超冷中性子が存在できる高さが局在することになる．地表の重力では, 局在する高さのスケールは 10μm 程度と計算できる．また, 量子力学の予言と, 実際の高さ分布が食い違った場合, 到達距離が 10μm 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．10μm 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 を組み合わせた装置を考案した．現在は, CCD の基本性能チェックを終え, 超冷中性子の検出効率を向上させる研究を進めている．

実験セットアップ

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．この分布を正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ガラス棒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ガラス棒の曲率を利用し, 中性子の分布を拡大させる．

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 Li を蒸着し, 中性子と Li の核反応によって生じる荷電粒子を CCD によって検出する装置を開発している．また, Ti は中性子に対し負のポテンシャルを持つので CCD 上に Ti と Li の多層膜を形成し, 検出効率を上げる事を考えている．CCD を用いた中性子測定器は高い位置分解能を持つだけでなく, リアルタイムの測定が可能なため, 本実験のみでなく幅広く利用される測定器になると考えられる．

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 $1\mu m$ 以下の精度で測定できるような装置を開発している．

Li 及び Ti の蒸着試験

UCN の測定器として, 受光部分に Li を蒸着した CCD を用いる．UCN が CCD に入射すると受光部分の Li と核反応を起こし, α 粒子とトリチウムが生成される．α 粒子とトリチウムを CCD で測定する．

CCD の受光部分は Si であるが, Li は Si 中に拡散していく速度が速い物質なので, CCD に直接 Li を蒸着してしまうと CCD はすぐに正常に動作しなくなる恐れがある．そこで, Li と Si の間に Ti の保護膜を蒸着することで Li の拡散を抑え, CCD の寿命が少なくとも 1 年以上になるように保護膜の膜厚を見積もる．Ti の膜厚を決定するために, Ti 中における Li の拡散定数を測定する．

Li は Si 中でドナーとして働くので, P 型の Si に Li が拡散すると電子とホールが相殺し Si 中のキャリアであるホールの数が減少する．従って, Li の拡散が電気抵抗の変化として見えることになる．

電気抵抗の測定方法は二探針法と四探針法を用いる．Si に Ti を蒸着しその上から Li を蒸着したサンプルを作成する．Li はまず Ti を通過してその後, Si に拡散する．Ti 中での Li の拡散は非常に遅いと予想されるので, サンプルを恒温器で過熱し加速試験をする．恒温器で, ある一定の温度に保たれたサンプルの電気抵抗の時間変化を測定することで, その温度における Ti 中での Li の拡散定数がわかる．温度を変えて電気抵抗を測定する事を繰り返すことで, 拡散定数を温度の関数として求めることが出来る．

物理過程のシミュレーション

高さ方向については, 重力場 mgz が働いているが, この場合に Schrödinger 方程式を解くと, 波動関数は Airy 関数で書かれることがわかっている．高さ方向 1 次元のみについて, Schrödinger 方程式を解くことは容易であるが, 実際に粒子がスリットに入ってくる前からスリットを出ていくまでのふるまいを予想するとなると, 2 次元または 3 次元の Schrödinger 方程式を解くことになる．

スリット入口での反射, スリット内での吸収材の影響も考慮して中性子の波動関数を計算し, 高さについての位置分布を予測した. この際に, 異なる準位間の干渉が, 位置分布に見られると予想される各準位に由来するピークの検出を困難にする可能性がある. しかし, 速度スペクトルなどを考慮しシミュレーションを行ったところ, 干渉の効果は無視できる程に小さくなることがわかった. その際に重要になってくる速度スペクトルを測定によって求める方法についてもシミュレーションを行った. 又, Yukawa 型の未知相互作用が存在した場合に, 波動関数が受ける影響なども考察することができた.

2.3.5 大気ニュートリノスペクトルの精密計算

スーパーカミオカンデで観測されている大気ニュートリノ事象を用いてニュートリノ振動のパラメータ $(\sin\theta, \Delta m^2)$ を詳細に決定するためには, 大気ニュートリノのスペクトルを精密に計算することが必須である. この計算には莫大な計算量が必要だが, 大気ニュートリノ計算に特化した PC クラスタを構築し, ソフトウェアを徹底的に最適化することで, 高速の計算を可能にした. 大気 μ 粒子も大気ニュートリノと同じく π 粒子や K 粒子の崩壊から作られるので, 大気 μ 粒子の測定結果を正確に再現できる計算は, 大気ニュートリノも正確に予測できると期待される. 現在は, あらゆる観測結果の再現精度を飛躍的に向上させることに成功した. さらに, 大気 μ 粒子の観測結果と計算結果を詳細に比較し, そのズレから大気ニュートリノ計算の系統誤差を評価している. この計算は, ニュートリノ振動のパラメータを詳細に決定し, その系統誤差を評価するために, 非常に重要である.

＜報文＞

(原著論文)

[1] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Colour reconnection in $e^+e^- \to W^+W^-$ at $\sqrt{s} = 189 - 209$ GeV, Eur. Phys. J. C45 (2006) 291-305

[2] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the mass and width of the W boson, Detector at LEP, Eur. Phys. J. C45 (2006) 307-335

[3] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the running of the QED coupling in small-angle Bhabha scattering at LEP, Eur. Phys. J. C45 (2006) 1-21

[4] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measuerment of event shape distributions and moments in $e^+e^- \to$ hadrons at 91-209 GeV and a determination of α_s, Eur. Phys. J. C40 (2005) 287-316

[5] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Radions at LEP2, Phys. Lett. B609 (2005) 20-34

[6] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Determination of the LEP beam energy using radiative Fermion-pair events, Phys. Lett. B604 (2004) 31-47

[7] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Flavour independent hA search and two Higgs doublet model interpretation of neutral higgs boson searches at LEP, Eur. Phys. J. C40 (2005) 317-332

[8] The BESS Collaboration, K. Yamato et al. : Measurements of atmospheric antiprotons, Phys. Lett. B632 (2006) 475-479

[9] ATF2 Group : ATF2 Proposal Vol.1, SLAC-R-771, CERN-AB-2005-035, CLIC-NOTE-636, DESY-05-148, ILC-ASIA-2005-22, JAI-2005-002, KEK-REPORT-2005-2, UT-ICEPP-05-02

[10] ATF2 Group : ATF2 Proposal Vol.2, DESY-06-001, CERN-AB-2006-004, ILC-ASIA-2005-26, JAI-2006-001, KEK-REPORT-2005-9, SLAC-R-796, UT-ICEPP-05-04

(会議抄録)

[11] T.Sanuki et al. : Atmospheric neutrino and muon fluxes, Proc. 29th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2005).

[12] T.Sanuki : Measurement of cosmic-ray spectra with the BESS/BESS-TeV, Nucl.Phys.B.Proc.Suppl. 145 (2005) 132-135.

[13] S.Araki et al. : Proposal of the Next Incarnation of Accelerator Test Facility at KEK for the International Linear Collider, Proc. 1Knoxville 2005, Particle Accelerator Conference (2004) 874

[14] T.Suehara, T.Sanuki, T.Tauchi, Y.Honda, T.Kume : Status of Shintake-monitor (Laser fringe beam size monitor) for ATF2, Proc. NANOBEAM2005, 36th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop (2005) 275

(国内雑誌)

[15] 横谷馨, 久保浄, 早野仁司, 栗木雅夫, 奥木敏行, 佐貫智行, 斉藤健治, 森田洋平 : 「Snowmass 2nd ILC Workshop」, 高エネルギーニュース 24 (2006) 113–121

[16] 佐貫智行 : 「ATF2 プロジェクト」, 高エネルギーニュース 24 (2006) 244–248

(学位論文)

[17] 大川英希 : 「超冷中性子を用いた重力場中での量子効果のシミュレーション」, 修士論文（東京大学大学院理学系研究科）, 2005 年 3 月

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[18] S. Komamiya : “Greeting and purpose of this meeting”, International Conference :Discovery of Higgs and Supersymmetry to Pioneer Particle Physics in the 21st Century (November 2005) the University of Tokyo, Japan

[19] T.Sanuki et al. : “Atmospheric neutrino and muon fluxes”, 29th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2005), Pune, India, 3-11 Aug 2005.

[20] T.Sanuki : “Shintake Monitor”, ILC-BDIR Workshop, June 20–23, 2005, RHUL, London, UK.

[21] T.Sanuki : “ATF2 Project and its status”, The 8th ACFA Workshop on Physics and Detector at the Linear Collider, July 11–14, 2005, Daegu, Korea

[22] T.Sanuki : “ILC WG4”, 2005 ALCPG & ILC Snowmass Workshop, August 14–27, 2005, Snowmass, Colorado, USA

[23] T.Sanuki : “ATF2 Proposal Vol.2: schedule, cost estimation and international contributions”, ATF2 Project Meeting, February 3–5, 2006, SLAC, USA

[24] T.Sanuki : “Optics and FD support requirements from the BSM”, ATF2 Project Meeting, February 3–5, 2006, SLAC, USA

[25] T.Sanuki : “IP beam size monitor (BSM, Shintake monitor)”, ATF2 Project Meeting, February 3–5, 2006, SLAC, USA

[26] M. Kurata : “Study of $J/\psi \to \Lambda\overline{\Lambda}$”, BES Annual Meeting, May 2005, Beijing, China

[27] T. Yamamura : “PMT Performance Test for BES-III TOF System”, BES Annual Meeting, May 2005, Beijing, China

[28] T. Yamamura : “Status of PMT Performance Test for BES-III TOF”, BES-III Collaboration Meeting, Jan 2006, Beijing, China

[29] T.Suehara : “Shintake-monitor and the background estimation” , Third Mini-Workshop on Nano Project at ATF, KEK, Japan, May 2005

[30] T.Suehara, T.Sanuki, T.Tauchi, Y.Honda, T.Kume : “Status of Shintake-monitor (Laser fringe beam size monitor) for ATF2” , NANOBEAM2005, 36th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop, Uji Campus, Kyoto Univ., Japan, Oct 2005

招待講演

[31] S. Komamiya : “Physics and Experiments at the International Linear Collider”, German-Japan Year Science Symposium (November 2005), the German Culture Center, Tokyo, Japan

(国内会議)

一般講演

[32] 大川英希 :「重力場中での超冷中性子の量子効果のシミュレーション」, 日本物理学会 (2005 年 9 月), 大阪市立大学, 大阪

[33] 川崎真介 :「重力場による超冷中性子の量子化状態測定 –高位置分解能 UCN 測定器の開発–」, 日本物理学会 (2005 年 9 月), 大阪市立大学, 大阪

[34] 園田真也 :「重力場による超冷中性子の量子化状態測定 –半導体検出器の薄膜蒸着試験–」, 日本物理学会 (2005 年 9 月), 大阪市立大学, 大阪

[35] 大川英希 :「超冷中性子による重力場中での量子効果のシミュレーション」, ICEPP シンポジウム (2006 年 2 月), 白馬

[36] 末原大幹, 田内利明, 佐貫智行, 本田洋介, 久米達哉 :「ATF2 におけるレーザ干渉法を用いた極小電子ビームサイズモニタの開発研究」, 日本物理学会 (2006 年 3 月), 愛媛大学・松山大学

招待講演

[37] 駒宮幸男 :「最先端加速器で宇宙の謎に迫る」, 基礎科学フォーラム (2005 年 5 月) 東京ビッグサイト, 東京

[38] 駒宮幸男 :「質量の起源ーヒッグス粒子を探すー」, 日本物理学会・科学セミナー (2005 年 8 月) 牛込箪笥区民ホール, 東京

[39] 駒宮幸男 :「国際リニアコライダーの推進と組織」, 日本物理学会 (2005 年 9 月) 大阪市立大学, 大阪

(セミナー)

[40] 駒宮幸男 :「素粒子と宇宙」, 東京大学オープンキャンパス (2005 年 8 月) 素粒子物理国際研究センター

[41] 末原大幹 :「レーザ干渉法を用いた極小電子ビームサイズの測定」, 第 1 回 21 世紀 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム, 2005 年 11 月, 東京大学

2.4 蓑輪研究室

蓑輪 研究室では、大型加速器を使わずに新しい工夫により素粒子のさまざまな実験的研究を行なっている。

2.4.1 暗黒物質探索実験

様々な観測結果から我々の宇宙を構成する物質の大部分は非バリオン的な冷たい暗黒物質であることが確実と考えられている。この暗黒物質は Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) として存在する可能性が高く、その候補として超対称性理論から予言される未発見の粒子 neutralino が有力である。WIMP を発見しその正体を明らかにすることは宇宙物理学、素粒子物理学両方の観点から重要である。我々のグループはこの WIMP を直接発見することを目的とした研究を行なっている。

本年度は昨年度に引き続き CaF_2(Eu) シンチレーターを用いた WIMP 観測実験を行った。CaF_2 は原子核中核子のスピン期待値が大きい ^{19}F を含むため、原子核のスピンに依存した相互作用を通して WIMP を検出するのに有利である。また、NaI(Tl) シンチレーターの 50%程度の発光量があるため、比較的エネルギー閾値を下げることができる。前年度バックグラウンドイベントの低減に効果のあった 6N 高純度銅シールドの厚さを 5cm まで増やして宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設における約 2ヶ月間の WIMP 観測実験を行った。観測されたエネルギースペクトルから原子核のスピンに依存した相互作用における WIMP-陽子、WIMP-中性子の結合定数 $a_{\rm p}$ と $a_{\rm n}$ に対する上限値を導出した (図 2.4 a)。この結果は WIMP を発見したと主張するイタリア DAMA グループのパラメータ許容領域の多くの部分を制限している。

残存するバックグラウンドイベントの原因として結晶中にドープしたユーロピウムの放射性同位体 ^{152}Eu の崩壊が考えられる。^{152}Eu は天然に存在する ^{151}Eu が地上で熱中性子を吸収することによって生成される。さらなるバックグラウンドイベントの低減のため、結晶中の ^{152}Eu 生成量の同定、除去方法の検討を行った。地上で約一年間熱中性子を照射された CaF_2(Eu) 結晶を用いて測定を行ったところ、地下に保管した結晶に比べて約 10mBq/kg の ^{152}Eu 含有量の増加が確認された。測定されたエネルギースペクトルから WIMP 観測実験で重要な 10keV electron equivalent 以下の領域でのバックグラウンドイベントの約半分が ^{152}Eu 由来であることが分かった。^{152}Eu 含有量の測定として原料の EuF_3 から発生する γ 線の観測を Ge 検出器を用いて行ったところ、CaF_2(Eu) 結晶を用いた測定と矛盾しない結果が得られた。これらの測定からユーロピウムのドープ量の低減、熱中性子吸収断面積の小さい ^{153}Eu の同位体濃縮がバックグラウンドイベントの低減に有効な方法であると考えられる。^{153}Eu の低減により WIMP 観測の感度を約 2 倍にできると考えられるが、WIMP を検出するためには今後のさらなるバックグラウンドイベント源の追求、低減が必要である。

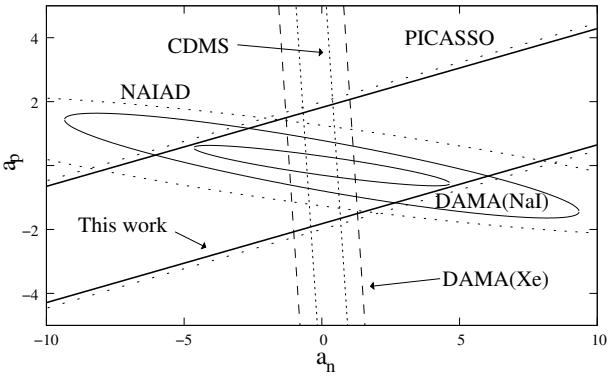


図 2.4 a: WIMP と原子核スピンに依存した相互作用に対する制限。$a_{\rm p}$、$a_{\rm n}$ はそれぞれ WIMP-陽子、WIMP-中性子の結合定数。WIMP の質量 50GeV/c^2 のとき。

2.4.2 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、このうち 1eV 近辺では太陽がよいアクシオン源となることが知られている。

我々は太陽由来の太陽アクシオンを捕えるために、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 4T、長さ 2.3m の超電導磁石と PIN フォトダイオード X 線検出器を備え、仰角 ±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。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捕えられていないが、0.27eV 以下のアクシオンと光子の結合定数に対して $g_{a\gamma\gamma} < (6.8-10.9)\times10^{-10}$GeV^{-1} という上限値を得ることに成功している。

現在は装置を理学部 1 号館地下に移設して組み立て・再立ち上げを行っている。それと並行して、1-2eV 程度の質量のアクシオン探索のために低温高密度ヘリウムガスを利用した装置のアップグレードを行っている。eV 質量領域探索の実験ではヘリウムガスの圧力を様々な値に設定する必要があるため、ガス圧の自動制御装置を製作しており、現在までに常温窒素ガスの制御に成功している。また高密度ヘリウムガスを扱うに当って、超電導コイルのクエンチ

による急激な温度上昇、ガス圧の上昇による爆発に対する安全対策が必要となる。その一貫として、極低温で動作する安全弁の選定、弁の装置が要求するスペックを満たしているかどうかの試験を行った。この実験がうまくいけば、素粒子の大統一理論（GUT）の予言するアクシオンモデルの検証が行える予定である。

2.4.3 共鳴イオン化質量分析によるニュートリノ検出

太陽ニュートリノのうち $p-p$ 反応による物などや原子炉の放出しているような低エネルギー（MeV 程度あるいはそれ以下）の電子ニュートリノ・反電子ニュートリノの有効な検出手段は、有機液体シンチレータと放射化学的方法に限られていると言ってよい。そのうち、塩素やガリウムをターゲットとした従来の放射化学的手法ではニュートリノ捕獲による生成核が適当な半減期の放射性である必要があるので使えるターゲットには制限がある。エネルギー閾値の低い、あるいは断面積の大きい多様な検出ターゲットが使用可能な新しいニュートリノ検出法が開発できれば、原子炉からの反電子ニュートリノ、あるいは低エネルギー太陽ニュートリノの精密観測が可能になる。とくに、原子炉実験では、KamLAND 実験が成功した事を受けて混合角 θ_{13} の測定など、さらに精密なニュートリノ振動の検証ができる意義は大きい。

特定元素が電子ニュートリノまたは反電子ニュートリノと荷電カレント反応をした場合、

$$\nu_e + (A,Z) \rightarrow e^- + (A,Z+1)$$

$$\bar{\nu_e} + (A,Z) \rightarrow e^+ + (A,Z-1)$$

のように原子番号が $\pm$ 1 だけ異なる元素に転換される。この原子を LASER を用いて選択的に共鳴イオン化する。そこで、まず原子の基底状態から中間の励起状態まで LASER 光により励起し、次に別のまたは同じ LASER 光により原子をイオン化させる。最初のエネルギーレベル差は元素に特有なものなので、LASER 光の波長をその元素のエネルギーレベル差に合わせてやることによりその元素のみを選択的にイオン化することができる。イオン化された元素は、Q-mass spectrometer（四重極質量分析器）または Time of Flight Spectrometer（TOF 式質量分析器）によりさらに同位体分析し不純物とより分けることになる。

この方法の開発研究の第一歩として、Q-mass spectrometer による微量元素検出能力の検証をした。図 2.4 b に示すように、333.1 kBq の ^{241}Am 線源の放出する α 線を真空容器内に一定時間蓄積して、ヘリウム原子として四重極質量分析器で検出することを試みた。線源はプラスチック容器の密封線源であるので、α 線は容器中で停止するが、拡散により十分速く容器外にヘリウム原子として出てくる。残留ガスやプラスチック容器からのアウトガスは、液体窒素のトラップでとり除いた。その結果、1 時間 – 20

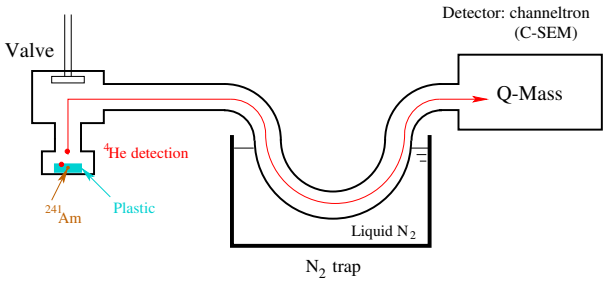


図 2.4 b: ^{241}Am 線源の放出する α 線を蓄積してヘリウム原子として四重極質量分析器で検出する。

時間の蓄積時間に対して蓄積時間にほぼ比例する量のヘリウム原子が検出された。また、検出限界はヘリウム原子約 10^8 個であることがわかった。現在の装置では、四重極質量分析器の真空排気を行いながら分析しているために大多数のヘリウム原子が質量分析されることなく捨てられている。この部分を改善すれば、検出限界は何桁も改善するものと考えられる。

この方法により、物質透過力の弱い α 線でも、ヘリウム原子として物質を透過できるならば、放射能の定量が可能であることが示されたわけであり、放射線計測への応用も考えられる。

今後は半導体波長可変レーザーを導入し、実際に共鳴イオン化質量分析器を組み立てて検出能力の実証実験を行い、問題点を洗い出してゆきたい。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Y. Akimoto, Y. Inoue, M.Minowa: Measurement of the thickness of an insensitive surface layer of a PIN photodiode, physics/0504147, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **557** (2006) 684 – 687.

[2] Y. Shimizu, M. Minowa, W. Suganuma, Y. Inoue: Dark matter search experiment with CaF_2(Eu) scintillator at Kamioka Observatory, astro-ph/0510390, Physics Letters B **663** (2006) 195 – 200.

(会議抄録)

[3] H. Sekiya, M. Minowa, Y. Shimizu, W. Suganuma, Y. Inoue: Dark Matter Search with Direction Sensitive Scintillator, Proceedings of the the Fifth International Workshop on Neutrino Oscillations and their Origin(NOON2004), Eds. Y. Suzuki, M. Nakahata, S. Moriyama and Y. Koshio (World scientific) (2005) pp.395-400, astro-ph/0405598.

[4] H. Sekiya, M. Minowa, Y. Shimizu, W. Suganuma, Y. Inoue: Dark Matter Search with Direction Sensitive Scintillators, Proceedings of the the Fifth International Workshop on The Identification of Dark Matter(IDM2004), Eds. N. J. C. Spooner and V. Kudryavtsev (World scientific) (2005) pp.378-383, astro-ph/0411215.

(国内雑誌)

[5] 蓑輪 眞: 暗黒物質直接探索の現状, 日本物理学会誌, Vol. 60, 2005 年 8 月号 609 – 615.

(学位論文)

[6] 岩田圭弘: 微量元素分析法による粒子検出のための四重極質量分析計の性能評価、平成 18 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＞

(国内会議)

一般講演

[7] 清水雄輝: 暗黒物質探索の現状、第 4 回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会、国民休暇村 鹿沢高原 2005 年 8 月 23 日.

[8] 秋本祐介: Tokyo Axion Helioscope の改良による eV 質量領域のアクシオン探索計画、日本物理学会 2005 年秋季大会、大阪市立大学杉本キャンパス、2005 年 9 月 12 日.

[9] 岩田圭弘: 中性子捕獲反応 $^{10}\mathrm{B}(n,\alpha)^{7}\mathrm{Li}$ を用いた四重極質量分析計の性能評価、日本物理学会秋の分科会、大阪市立大学杉本キャンパス 2005 年 9 月 12 日.

[10] 秋本祐介: 太陽アクシオン探索実験の現状、第 1 回 21 世紀 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム、東京大学本郷キャンパス、2005 年 11 月 21 日.

[11] 清水雄輝: 暗黒物質の探索について、平成 17 年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表研究会、東京大学宇宙線研究所 柏 2005 年 12 月 16 日.

[12] 秋本祐介: 太陽アクシオン探索実験の現状、第 12 回東京大学素粒子物理国際研究センターシンポジウム、長野県白馬村、2006 年 2 月 27 日.

[13] 清水雄輝: $\mathrm{CaF_2(Eu)}$ シンチレーターを用いた暗黒物質探索実験における結晶内部放射性不純物の低減、第 12 回東京大学素粒子物理国際研究センターシンポジウム、長野県白馬村 2006 年 3 月 1 日.

[14] 岩田圭弘: レーザー共鳴イオン化質量分析法を用いた微量粒子検出、第 12 回東京大学素粒子物理国際研究センターシンポジウム、長野県白馬村 2006 年 3 月 1 日.

[15] 清水雄輝: 暗黒物質直接観測実験に用いる $\mathrm{CaF_2(Eu)}$ 結晶の放射性不純物の研究、日本物理学会第 61 回年次大会、愛媛大学・松山大学 2006 年 3 月 28 日.

[16] 秋本祐介: 低温高密度 He ガスを利用した Tokyo Axion Helioscope の改良とその安全対策、日本物理学会第 61 回年次大会、愛媛大学・松山大学、2006 年 3 月 29 日.

[17] 太田良介: 太陽アクシオン探索に用いるガス圧自動制御装置の開発、日本物理学会第 61 回年次大会、愛媛大学・松山大学 2006 年 3 月 29 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粒子検出器開発 I、日本物理学会第 61 回年次大会、愛媛大学・松山大学 2006 年 3 月 30 日.

[19] 林寛仁: レーザー共鳴イオン化質量分析法を用いた粒子検出器開発 II、日本物理学会第 61 回年次大会、愛媛大学 2006 年 3 月 30 日.

2.5 相原研究室

当研究室の研究活動は以下にまとめられる.

- 高エネルギー加速器研究機構 KEK B ファクトリー加速器における Belle 実験：B 中間子の CP 非保存現象および，非常に稀な崩壊事象の精密測定によって，素粒子の標準理論の厳密検証と新しい物理の探索を行っている（科研費特定領域「質量起源と超対称性物理の研究」による研究）.
- 茨城県東海村で建設が進む J-PARC 陽子シンクロトロンを用いた長基線ニュートリノ振動実験（T2K 実験）：ミューオンニュートリノ ν_μ の電子ニュートリノ ν_e への振動の発見を目指している.
- 次世代大型ニュートリノ検出器ハイパーカミオアカンデ (Hyper Kamiokande) 用新型光センサーの開発：科学技術振興事業団 (JST) の先端計測分析技術・機器開発事業によって，半導体素子増幅による光検出器（ハイブリッド光電子増倍管）の開発に取り組んでいる.
- 国際リニアコライダー (International Linear Collider, ILC) 加速器のための汎用測定器 SiD の開発：米国フェルミ国立研究所 (Fermilab) やスタンフォード線形加速器センター (SLAC) の研究者と共同で，シリコン検出器からなる測定器の開発を行っている.
- 超広視野カメラ (Hyper Suprime) によるダークエネルギーの研究：すばる望遠鏡に次世代 CCD カメラを搭載することによって，現在の宇宙の加速膨張の原因とされているダークエネルギーの正体に迫る計画を国立天文台と共同で推進している.

2.5.1 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，$b \to s\gamma$, $b \to s\ell^+\ell^-$(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 $(-1/3)$ と終状態の粒子の電荷の総和 $(-1/3)$ 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.

2003 年 Belle グループは，$b \to sg$ の FCNC プロセスによって引き起こされる $B^0 \to \phi K^0_S$ 崩壊の CP 非対称パラメータ S の値が，標準理論から期待される $S = 0.713$ からずれていることを発見した．このときの測定は，140fb^{-1} 相当のデータから得られた 1 億 5,200 万個の B 中間子・反 B 中間子ペアに基づいたもので，標準理論からのズレ（の統計的有意さ）は 3.5σ であった.

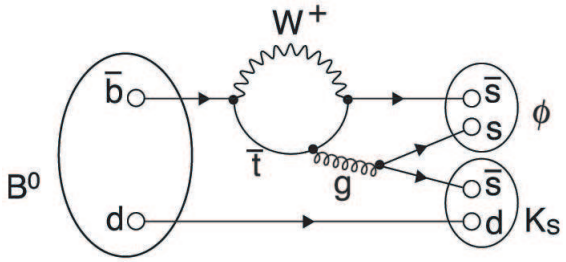


図 2.5 a: $\bar{b} \to \bar{s}s\bar{s}$ プロセスの代表例である B 中間子が ϕ 中間子と K_S 中間子に崩壊する過程．中間状態において，ボトムクォークが量子効果により，35 倍も重いトップクォークと 16 倍重い W 粒子に化ける過程を示している.

この $B^0 \to \phi K^0_S$ 崩壊における異常（アノマリー）は，その後の測定においても解消されず，2005 年 3 月までの全てのデータ（357fb^{-1}，3 億 8,600 万 B 中間子・反 B 中間子ペア）を使った最新の解析においても $S = 0.44 \pm 0.27 \pm 0.05$ である．Belle グループの競争相手である米国スタンフォード大学線形加速器センター (SLAC) の BaBar グループの同様の結果と合わせると，$S = 0.47 \pm 0.19$ となった.

さらに，$b \to sg$ FCNC プロセスによって引き起こされる他のいくつかの崩壊モード $B^0 \to \eta K^0$, $f_0 K^S_0$, $\pi^0 K^0_S$, $K^+K^-K^0$, $K^0_S K^0_S K^0_S$ についても，標準理論の期待値よりも小さい値が得られている [Time-Dependent CP Asymmetries in $b \to sq\bar{q}$ Transitions and $\sin 2\phi_1$ in $B^0 \to J/\psi K^0$ Decays with 386 Million $B\bar{B}$ Pairs, K.Abe et al. (Belle Collaboration) arXiv:hep-ex/0507037]. このアノマリーが，新しい物理からの FCNC プロセスへの寄与によるのかどうかの解明はフレーバー物理における最大の課題といってよい．このアノマリーが，我々が追い求めている新しい物理の証拠となるのか，これによってフレーバー物理の新しい展開が始まるのか，当研究室は今後一層の性能向上が計画されている B ファクトリーを用い，かつ，測定器（シリコンバーテックス検出器）を改良してその解明を図る.

$b \to sg$(図 2.5 a)

b クォークの s クォークを含む終状態へ崩壊する過程である，3 億 8 千 6 百万の B・反 B 中間子対から，B 中間子がファイ中間子 ϕ と K_S 中間子，およびイータプライム中間子 η' と K_S 中間子とに崩壊する反応を選び出し，それらの CP 非対称を測定した.

その結果，それらのＣＰ非対称度の値が標準理論から期待される値からずれている可能性を得た．

$b \to s\ell^+\ell^-$（図 2.5 b）

Ｂ中間子がストレンジネスを含むハドロンとレプトン対（電子・陽電子またはミューオン・反ミューオン）へ崩壊する電弱崩壊の精密測定を進めた．１億５千２百万のＢ・反Ｂ中間子対を解析することによって，その分岐比を $(4.11 \pm 0.83^{+0.85}_{-0.81}) \times 10^{-6}$ と決定した．この値を使って，いくつかの超対称性モデルに制限を与えることができる．さらに，Ｂ中間子が K^* 中間子とレプトン対に崩壊する反応のレプトンの角分布を測定し，角分布に前方後方非対称があることを世界で初めて示した．また，反応の Wilson 係数を決定し，新物理のモデルにも制限を与えた．

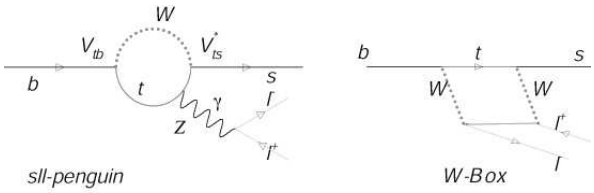


図 2.5 b: $b \to s\ell^+\ell^-$ 電弱フレーバー変換中性カレント崩壊.

2.5.2 中性 B 中間子の $\pi^+\pi^-$ および $\rho\pi$ 崩壊における CP 非対称の精密測定

Ｂ中間子が荷電パイ中間子対に崩壊する過程の CP 非対称の測定の統計精度を高め，直接的 CP 対称性の破れについての信頼度を高めた．２億７千５百万のＢ・反Ｂ中間子対の解析から得られた直接的 CP 非対称の大きさ $A = 0.56 \pm 0.12 \pm 0.06$ は，この反応における直接的 CP の破れを $4\,\sigma$ の統計的有意さで示している．また、中性 B 中間子の $\pi^0\pi^0$ 崩壊の分岐比及びその CP 非対称度の測定結果等を利用したアイソスピン解析を行ない, ユニタリティ三角形の角度の１つ ϕ_2 に対し 95.4 % の信頼度で $0^\circ < \phi_2 < 19^\circ, 71^\circ < \phi_2 < 180^\circ$ の制限を与えた．さらに，$B \to \rho\pi$ モードの CP 非対称の測定も進行中である．

2.5.3 Belle シリコン崩壊点検出器アップグレード

KEK-B 加速器のルミノシティー性能の向上によるビームバックグランドの増加に伴い、Belle シリコン崩壊点検出器の性能の大きな低下が予想されている。そのため、2007 年度に 4 層のシリコン崩壊点検出器のうちビームパイプに近くバックグランドヒットの多い 1 層目と 2 層目のアップグレードを計画している。このアップグレードではデータ読みだし用集積回路を新しいものに変更して波形の立ち上がり時間を現在のものより短くすることで信号事象に非同期のビームバックグランドの削減を狙い、また高速化に伴うノイズの増加を抑えるためのシリコンセンサーの改良を行う。新しいデータの読みだし用集積回路には CERN の大型ハドロン衝突実験 CMS 実験用に開発された APV25 を用いる。APV25 は、現在の読みだし回路 (VA1TA) と比較して 16 倍短い立ち上がり時間を持つことに加え、波形の時間サンプリングが可能である。CMS 実験と異なり Belle 実験においては信号事象の生成は APV25 のサンプリングクロックと非同期であり、またサンプリングクロックと比較して波形が短いことから、波形の時間サンプルから波高の再構成をする処理が必要である。2005 年 4 月 に KEK PS において 4 GeV π 中間子ビームを用いて APV25 の動作試験を行った。このデータを元にオンラインでの実装が可能な波高再構成処理手法 (デコンボリューションフィルター) を新たに開発した。このデコンボリューションフィルターは、信号に対しては正しい波高の値を返しながらビームバックグランドの更なる抑制することが同時に可能であり、ビームバックグランドを現在の 1/25 まで削減できることが分かった。

2.5.4 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

次世代のニュートリノ振動実験である東海-神岡間長基線ニュートリノ振動実験では、原研東海に建設中の J-PARC 大強度陽子シンクロトロンを用いて大強度のニュートリノビームを生成し、その生成したニュートリノを約 300km 離れた場所に位置する神岡の大型水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデで観測することによりニュートリノの質量と混合の性質を詳細に調べる。J-PARC 50 GeV シンクロトロンから取りだされる 0.75MW の陽子ビームをニュートリノ生成用の π 中間子標的まで輸送するビームライン (一次ビームライン) を現在建設中であり、そのビームラインに設置するビームモニターの開発を行っている。ビームモニターは主にビームのチューニングを行うための 17 台のビームプロファイルモニターと実験データ取得中にビームの安定性を監視するための 20 台のビームポジションモニターなどから構成されるが、本年度はそれらのプロトタイプを用いた試験等を行った。

ビームプロファイルモニターの開発

ビームプロファイルモニターには厚さ 5 μm のチタン箔を最小 1mm 幅のストリップ状に切断して用いた Segmented Secondary Emission Monitor (SSEM) を用いる。ビームがストリップ状にセグメント化されたチタン箔を通過する際の二次電子放出量に応じ

た電流を各ストリップ毎に測定することにより、ストリップを配置した方向のビームプロファイルを観測する。データの読みだしシステムには、KEK 回路室の開発した新しいデータ収集フレームワークである COPPER システムを採用し、新開発の 65MHz のフラッシュ ADC を用いて、ビーム 1 パルス中の 0.6 μs 周期のマイクロバンチ波形をサンプリングし、マイクロバンチ毎のビームプロファイルの測定を目指す。本年度は SSEM のプロトタイプを製作し、KEK PS ラインのビームを用いて検出器および読みだしシステムの性能評価を行った。SSEM をビーム軸から 3 cm の近接した位置に 2 台配置し、それぞれの SSEM で得られるビームプロファイルを比較することで性能を評価した。図 2.5 c に得られたビームプロファイルを示す。このビームテストの結果から 70μm の ビーム位置精度および 70μm のビーム幅の精度が得られ、J-PARC ニュートリノ一次ビームラインに設置する SSEM においては、ビーム位置およびビーム幅の測定精度はそれぞれ 0.25mm および 0.23mm 以下に抑えることが出来ることがわかった．この値は、ビームラインシミュレーションから一次陽子ビームを標的まで輸送する為に必要とされる精度 (ビーム位置精度 1mm 以下および ビーム幅の精度 0.35mm 以下) を満たしている。

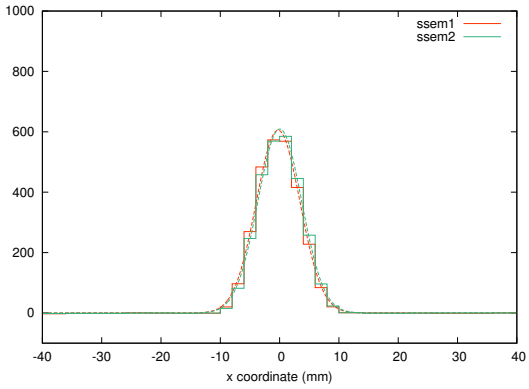


図 2.5 c: 2 つの SSEM から得られたビームプロファイル

ビームポジションモニターの開発

実験データ取得中にビームの安定性を常時監視するためのビームポジションモニターには、4 極静電型モニター (ESM) を用いる。4 極 ESM は 2 対計 4 枚の互いに向かい合った電極板をビームダクトの内周に配置し、陽子ビームが通過した際ビームダクトに対して電極板に誘起される電荷を測定する。向かい合った電極板から得られる信号の非対称度をビーム軸の位置に焼き直す。昨年度のビームテストの結果とミュレーションから，J-PARC ニュートリノ一次ビームラインで予想されるビームパルス波形に対しては 0.6mm の位置精度が得られるこという予想が得られた．これは，一次陽子ビームを標的まで輸送する為に必要とされるビームモニターの位置精度を満たしている．またプロトタイプ ESM 中にワイヤーを通しパルスを送ってビームを摸擬することによるキャリブレーションの手法の確認及び J-PARC ビームに対する信号応答の摸擬試験を行った．さらに J-PARC ニュートリノ一次ビーム用 ESM の 実機設計をすすめた。

2.5.5 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

次世代メガトン級水チェレンコフ検出器を使うニュートリノ検出器の計画が、日本、米国、ヨーロッパ等でさかんに検討されている。これらの計画のいずれもが、新しい大口径光電子増倍管の開発を必要としている。従来のダイノード構造による光電子増倍管よりも優れた時間分解能を持ち、かつ安価な光検出器の開発が望まれている。当研究室は、浜松ホトニクス、東大宇宙線研、KEK 回路と共同で Hybrid Photodetector (HPD) を開発している。このデバイスは、光電面から出た光電子を電場で加速し、アバランシェダイオード (AD) に打ち込みさらに増幅するものである。13 インチ HPD（図 2.5 d 参照）を試作し，基本性能を確認した．さらに，読み出し用集積回路（アナログメモリーセル）を試作した. 図 2.5 e に示すように，HPD は優れたエネルギー分解能と時間分解能を持っている．これは，通常の PMT と異なり（ダイノードがないため），増幅過程の第一段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である，したがって, 13inchHPD は既存の 13inchPMT よりもよいエネルギー分解能を持ち, またより高い単光子検出能力を持つ.

2.5.6 国際リニアコライダー加速器用測定器 SiD の開発

高エネルギー物理学の将来計画である国際リニアコライダー (International Linear Collider, ILC) 加速器のための大型汎用測定器 SiD を開発している．SiD は，重心系エネルギー 500GeV から 1TeV の電子陽電子衝突によって生成された荷電粒子およびガンマ線，中性パイ中間子を含むすべての粒子をシリコン検出器を主体とする測定器で検出しようというきわめて斬新な測定器である．ILC 汎用測定器として検討されている 3 つの測定器デザインの一つである．開発項目としては，CMOS を使った応答速度の早いシリコンバーテックス検出器（Hawaii 大学．Fermilab, SLAC との共同開発）や，5 テスラ (T) の大型超伝導ソレノイド（蓄積エネルギー 1 ギガジュール，Fermilab, KEK, 東芝との共同開発）を含んでいる．

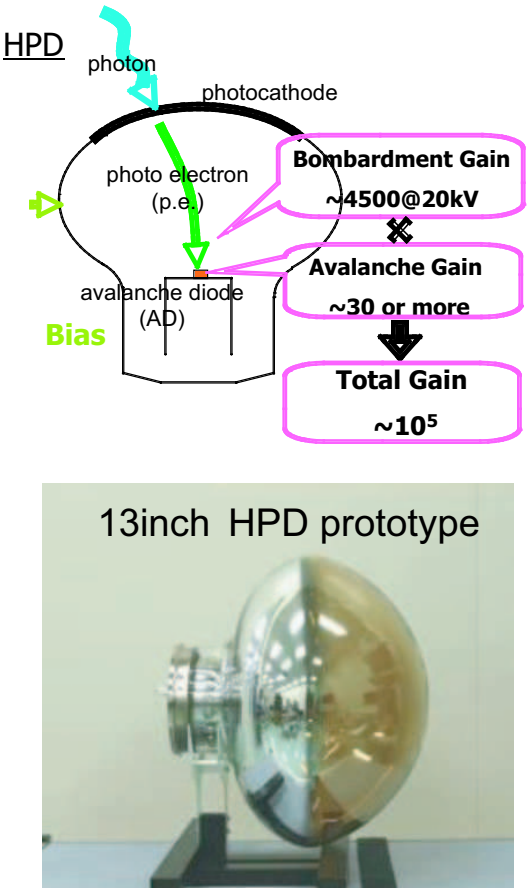


図 2.5 d: 13 インチ Hybrid Photodetector の試作品

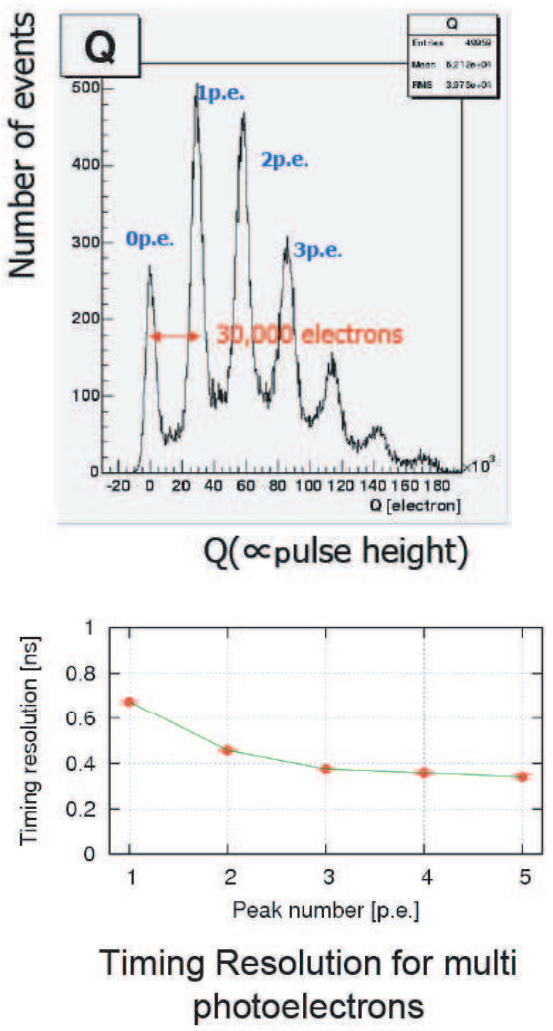


図 2.5 e: 13 インチ Hybrid Photodetector の試作品の性能

2.5.7 広視野深宇宙探査によるダークエネルギーの研究

我々の宇宙は約 23% のダークマターと 73% のダークエネルギーによって占められている．20 世紀の素粒子物理学が解明した物質階層であるバリオンは宇宙ではわずか 4% を 占めるのみである．ダークエネルギーという存在自体も，宇宙論スケールにおける一般相対論の限界を示している可能性もある．バリオンでもダークマターでもない宇宙の新たな構成要素であれ，一般相対論の修正という新たな物理法則の示唆であれ，現代科学に与える意義は計り知れない．本研究室は，国立天文台と共同で，すばる望遠鏡の主焦点に広視野 3.1 平方度の CCD カメラ（HyperSuprime）を製作する計画を開始した．この新装置を用いて最低 1000 平方度超広域撮像探査を行い，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する．この弱い重力レンズ効果の検出によって，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て宇宙の「3 次元質量分布地図」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ろうとしている．

＜報文＞

(原著論文)

[1] A. Drutskoy *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of anti-B0 → D*(sJ)(2317)+ K- decay," Phys. Rev. Lett. **94**, 061802 (2005).

[2] R. Stamen *et al.*, "Status of the Belle Silicon Vertex Detector," Nucl. Instrum. Meth. A **541**, 61 (2005).

[3] T. Tsuboyama *et al.*, "The Silicon Vertex Detector for the super B factory," Nucl. Instrum. Meth. A **541**, 421 (2005).

[4] G. Majumder *et al.* [Belle Collaboration], "Evidence for B0 → D+ D- and observation of B- →

D0 D- and B- → D0 D*- decays," Phys. Rev. Lett. **95**, 041803 (2005).

[5] T. Ziegler *et al.*, "The improved ladder production for the Belle Silicon Vertex Detector (SVD2.1)," IEEE Trans. Nucl. Sci. **52**, 1907 (2005).

[6] J. Schumann *et al.* [BELLE Collaboration], "Observation of anti-B0 → D0 eta' and anti-B0 → D*0 eta'," Phys. Rev. D **72**, 011103 (2005) [arXiv:hep-ex/0501013].

[7] H. Miyake *et al.* [Belle Collaboration], "Branching fraction, polarization and CP-violating asymmetries in B0 → D*+ D*- decays," Phys. Lett. B **618**, 34 (2005) [arXiv:hep-ex/0501037].

[8] K. Hayasaka *et al.*, "Search for tau → e gamma decay at Belle," Phys. Lett. B **613**, 20 (2005) [arXiv:hep-ex/0501068].

[9] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Improved evidence for direct CP violation in B0 → pi+ pi- decays and model-independent constraints on phi(2)," Phys. Rev. Lett. **95**, 101801 (2005) [arXiv:hep-ex/0502035].

[10] C. C. Kuo *et al.*, "Measurement of gamma gamma → p anti-p production at Belle," Phys. Lett. B **621**, 41 (2005) [arXiv:hep-ex/0503006].

[11] Y. Ushiroda *et al.*, "New measurement of time-dependent CP-violating asymmetry in B0 → K0(S) pi0 gamma decay," Phys. Rev. Lett. **94**, 231601 (2005) [arXiv:hep-ex/0503008].

[12] K. F. Chen *et al.* [BELLE Collaboration], "Measurement of polarization and triple-product correlations in B → Phi K* decays," Phys. Rev. Lett. **94**, 221804 (2005) [arXiv:hep-ex/0503013].

[13] K. Sumisawa *et al.*, "Measurement of time-dependent CP-violating asymmetries in B0 → K0(S) K0(S) K0(S) decay," Phys. Rev. Lett. **95**, 061801 (2005) [arXiv:hep-ex/0503023].

[14] L. M. Zhang *et al.* [Belle Collaboration], "Search for B0 → J/psi anti-D0 and B+ → J/psi anti-D0 pi+ decays," Phys. Rev. D **71**, 091107 (2005) [arXiv:hep-ex/0503037].

[15] Y. Enari *et al.* [Belle Collaboration], "Search for lepton flavor violating decays tau- → l- pi0, l- eta, l- eta'," Phys. Lett. B **622**, 218 (2005) [arXiv:hep-ex/0503041].

[16] M. Iwasaki *et al.* [Belle Collaboration], "Improved measurement of the electroweak penguin process B → X/s l+ l-," Phys. Rev. D **72**, 092005 (2005) [arXiv:hep-ex/0503044].

[17] Y. J. Lee *et al.*, "Observation of B+ → p anti-Lambda gamma," Phys. Rev. Lett. **95**, 061802 (2005) [arXiv:hep-ex/0503046].

[18] M. Z. Wang *et al.*, "Study of the baryon antibaryon low-mass enhancements in charmless three-body baryonic B decays," Phys. Lett. B **617**, 141 (2005) [arXiv:hep-ex/0503047].

[19] K. F. Chen *et al.* [Belle Collaboration], "Time-dependent CP-violating asymmetries in b → s anti-q q transitions," Phys. Rev. D **72**, 012004 (2005) [arXiv:hep-ex/0504023].

[20] R. Itoh *et al.* [Belle Collaboration], "Studies of CP violation in B → J/psi K* decays," Phys. Rev. Lett. **95**, 091601 (2005) [arXiv:hep-ex/0504030].

[21] A. Limosani *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of inclusive charmless semileptonic B-meson decays at the endpoint of the electron momentum spectrum," Phys. Lett. B **621**, 28 (2005) [arXiv:hep-ex/0504046].

[22] I. Bizjak *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the inclusive charmless semileptonic partial branching fraction of B mesons and determination of |V(ub)| using the full reconstruction tag," Phys. Rev. Lett. **95**, 241801 (2005) [arXiv:hep-ex/0505088].

[23] D. Mohapatra *et al.* [Belle Collaboration], "Search for the b → d gamma process," Phys. Rev. D **72**, 011101 (2005) [arXiv:hep-ex/0505097].

[24] R. Seuster *et al.* [Belle Collaboration], "Charm hadrons from fragmentation and B decays in e+ e- annihilation at s**(1/2) = 10.6-GeV," Phys. Rev. D **73**, 032002 (2006) [arXiv:hep-ex/0506068].

[25] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], "Measurements of B decays to two kaons," Phys. Rev. Lett. **95**, 231802 (2005) [arXiv:hep-ex/0506080].

[26] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Search for the Theta(1540)+ pentaquark using kaon secondary interactions at Belle," Phys. Lett. B **632**, 173 (2006) [arXiv:hep-ex/0507014].

[27] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Search for D0 anti-D0 mixing using semileptonic decays at Belle," Phys. Rev. D **72**, 071101 (2005) [arXiv:hep-ex/0507020].

[28] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Search for the decay B0 → gamma gamma," Phys. Rev. D **73**, 051107 (2006) [arXiv:hep-ex/0507036].

[29] X. C. Tian *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the wrong-sign decays D0 → K+ pi- (pi0, pi+ pi-) and search for CP violation," Phys. Rev. Lett. **95**, 231801 (2005) [arXiv:hep-ex/0507071].

[30] Q. L. Xie *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of B- → J/psi Lambda anti-p and searches for B- → J/psi Sigma0 anti-p and B0 → J/psi p anti-p decays," Phys. Rev. D **72**, 051105 (2005) [arXiv:hep-ex/0508011].

[31] N. Soni *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of branching fractions for B → chi/c1(2) K (K*) at Belle," Phys. Lett. B **634**, 155 (2006) [arXiv:hep-ex/0508032].

[32] Y. Miyazaki *et al.* [BELLE Collaboration], "Search for lepton and baryon number violating tau- decays into anti-Lambda pi- and Lambda pi-," Phys. Lett. B **632**, 51 (2006) [arXiv:hep-ex/0508044].

[33] D. Liventsev *et al.*, "Measurement of the branching fractions for B- → D(*)+ pi- l - anti-neutrino-lepton and anti-B0 → D(*)0 pi+ l- anti-neutrino-lepton," Phys. Rev. D **72**, 051109 (2005).

[34] S. Uehara *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of a chi'/c2 candidate in gamma gamma → D anti-D production at Belle," Phys. Rev. Lett. **96**, 082003 (2006) [arXiv:hep-ex/0512035].

[35] Z. Natkaniec *et al.*, "Status of the Belle silicon vertex detector," Nucl. Instrum. Meth. A **560**, 1 (2006).

[36] L. M. Zhang *et al.*, "Improved constraints on D0 - anti-D0 mixing in D0 → K+ pi- decays at Belle," Phys. Rev. Lett. **96**, 151801 (2006) [arXiv:hep-ex/0601029].

[37] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], "Study of B+- → D(CP) K+- and D*(CP) K+- decays," Phys. Rev. D **73**, 051106 (2006) [arXiv:hep-ex/0601032].

(学位論文)

[38] 修士論文，中浜優, "Research and Development of a Pipeline Readout System for the Belle Silicon Vertex Detector."

[39] 修士論文，中山浩幸, "Research and Development of a 13-inch Hybrid Avalanche Photo-Detector and its Readout System for a Water Cherenkov Detector."

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[40] H. Aihara :"R&D of a Large Format Hybrid Photo-Detector (HPD) for a Next Generation Water Cherenkov Detector," Next Generation of Nucleon Decay and Neutrino Detectors 7-9 April 2005 Aussois, Savoie, France.

[41] H. Aihara:"ϕ_2 and ϕ_3 related CP Violation Measurements," American Physical Society Meeting, Apr. 16-19, 2005, Tampa, Florida

[42] H. Aihara:"The Silicon Detector Concept," The 8th ACFA workshop on Physics and Detector at the Linear Collider, July 11 - 14, 2005, EXCO, Daegu, Korea

[43] H. Aihara:"Rare Decays of B and D Mesons and Flavor Physics,"Italian Physical Society International School of Physics "Enrico Fermi" CP Violation from quarks to leptons, 19-29 July 2005, Varenna, Italy

[44] H. Aihara:"The Silicon Detector Concept," 2005 International Linear Collider Physics and Detector Workshop, Snowmass, Colorado, August 14-27, 2005.

[45] H. Aihara:"R&D of a Large Format Hybrid Photo-Detector (HPD) for a Large Water Cherenkov Detector," International Workshop on a Far Detector in Korea for the J-PARC Neutrino Beam, Nov 18-19, 2005, KIAS, Seoul, Korea

[46] H. Aihara:"CP-Violation from B-Factories," 2006 Aspen Winter Conference on Particle Physics Program, Aspen, Colorado, February 12-18, 2006.

[47] H. Aihara: "Experimental Summary," Moriond/QCD 2006, La Thuile, Italy, March 18 -25, 2006.

[48] H. Nakayama:"R&D of a 13-inch HAPD for a Next Generation Water Cherenkov Detector," 4th International Conference on New Developments in Photodetection, Beaune, France, June 22, 2005.

[49] A. Kusaka:"Constraint on CKM angle ϕ_2 from B decays," Particles and Nuclei International Conference (PANIC05), October 24-28, 2005, Santa Fe, NM, U.S.A.

[50] N. Hastings:"Measurement of sin $2\phi_1$ in $b \to c$ and $b \to s$ decays," Lake Louise Winter Institute, Alberta, Canada, February 17-23, 2006.

一般講演

[51] K. Kawai: "Development of Large-Aperture Hybrid Photo-Detector and Readout System," IEEE Nuclear Science Symposium, Puerto Rico, October 23-29, 2005.

(国内会議)

招待講演

[52] 相原 博昭："SiD 測定器の概念設計" 日本物理学会 秋季大会, 大阪市大, 2005 年 9 月 12 日ー 15 日

[53] 角野 秀一：" B 中間子崩壊に関する最近の結果から," *ibid.*

[54] 相原 博昭："CP violation in B decays,"科研費特定領域 第四回研究会「質量起源と超対称性物理の研究」、2006 年 3/6-8, つくば国際会議場エポカル

[55] 日下 暁人： "Constraint on CKM angle $\phi_2(\alpha)$," *ibid.*

一般講演

[56] 角野 秀一："J-PARC ニュートリノ ビームライン用陽子ビームモニターの研究開発," 日本物理学会 秋季大会, 大阪市大, 2005 年 9 月 12 日ー 15 日

[57] 日下 暁人:"Constraint on CKM angle ϕ_2 with Belle new results," *ibid.*

[58] 中山浩幸："水チェレンコフ検出器用 13inch ハイブリッドフォトディテクタの開発," *ibid.*

[59] 中浜 優:"Belle シリコン崩壊点検出器アップグレードのための読み出しシステム及びその性能評価," *ibid.*

[60] 中山 浩幸:"水チェレンコフ検出器用 13inch ハイブリッドフォトディテクタとその読み出し回路の開発," 日本物理学会 春季大会, 松山大学･愛媛大学, 2006/3/27-30.

[61] 中浜 優：“Belle 実験シリコン崩壊点検出器のためのパイプライン読み出しシステムの研究,” *ibid.*

[62] 山田 剛大：“Ｔ２Ｋ実験用陽子ビームプロファイルモニターの研究開発,” *ibid.*

その他

[63] 相原 博昭：“ 物質世界の起源ー反物質はどこへ行ったかー，” 日本物理学会科学セミナー，牛込箪笥区民ホール，2005 年 8 月 26, 27 日

[64] 相原 博昭：“素粒子の物理,”平成 17 年度　静岡県立韮山高等学校「大学レクチャー」（2005 年 11 月 26 日）静岡県伊豆の国市

3 物性理論

3.1 和達研究室

3.1.1 ボース・アインシュタイン凝縮

スピン自由度のある物質波ソリトン

2002 年の実現以来、ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) による物質波ブライトソリトンは、原子レーザー、コヒーレント物質輸送への応用が期待されており、さらには量子情報・通信の素子としても注目を集めている。我々は、これら将来の応用を念頭におき、原子気体 BEC 系のもつ内部自由度を導入することで、多成分チャンネルへの拡張を提唱してきた。

BEC のダイナミクスはグロス・ピタエフスキ方程式で記述される。特に 1 次元の一様系では非線形シュレディンガー (NLS) 方程式の名で知られるソリトン方程式となり、BEC におけるソリトンダイナミクスに関して数多くの研究が行われてきた。中でも我々はスピン自由度のある BEC が行列型 NLS 方程式で記述されることに注目し [7]、いくつかの可能性について研究を進めた。

超微細スピン $F = 1$ 状態にある BEC が斥力的かつ反強磁性的な結合定数で相互作用する系を考察した。結合定数を調節することによって 2×2 行列版の反自己収束相互作用 NLS 方程式へのマップを得、無限遠で定数に収束する境界条件の下でダークソリトン解を明示的に書き下した。1 ソリトン解には強磁性状態および極性状態の 2 つの状態があり、物理的にはスピンを搬送するかしないかの違いがあることが分かった。これらは境界条件がドメインウォール型か位相シフト型かで作り分けられる。更に 2 ソリトン衝突を解析し、磁気的に “作用的な” 強磁性状態ソリトンが “受動的な” 極性状態ソリトンに対してスピンスイッチングすることを観察した [8]。

3.1.2 フェッシュバッハ共鳴を用いたフェルミ原子気体

フェッシュバッハ共鳴を用いたフェルミ原子気体の超流動化の実験が 2004 年になって相次いで報告された。フェッシュバッハ共鳴を用いることで、引力が弱い BCS 的な系から束縛されたボソン分子による BEC 的な系へのクロスオバーをみることができる。実験で得られた相図は、共鳴磁場よりもはるかに大きい磁場での温度を縦軸に用い、そこから磁場をゆっくりと共鳴近傍までスウィープした後の凝縮したペアの割合をプロットしている。スウィープの前後で系の温度は変わるが、磁場を断熱的にスウィープしたとみなすことで関係付けられる。2 チャンネルモデルを用いて、平均場近似の範囲内で、凝縮したペアの断熱的な相図を示した。また、磁場を断熱的にスウィープした前後での温度の関係、分子の生成効率も求めた。

3.1.3 ソリトン方程式

行列型非線形シュレディンガー方程式の逆散乱法

逆散乱法はソリトン方程式を解く強力な方法として知られている。ごく最近、多成分系・行列型のソリトン方程式にも適用できる例が示され重要度を増している。我々は、反自己収束相互作用をもつ行列型 NLS 方程式について逆散乱法を用い、無限遠で定数行列に収束する境界条件の下で一般的なソリトン解の具体形を明らかにした [9]。特に 2×2 行列へ還元することによって BEC ソリトンへの応用が見られる [8]。一般の $N \times N$ 行列型においても、ドメインウォール型ソリトンと位相シフト型ソリトンとが現れる。数学的には、逆散乱法における線形問題に出てくる束縛状態各々がドメインウォール型に対応し、束縛状態が縮退することによって位相シフト型へと変化することを発見した。

3.1.4 多粒子系

δ 関数型気体

1 次元量子多体系の厳密解は、ベーテ仮説法により系統的に求めることができる。Lieb-Liniger は斥力相互作用する 1 次元 δ 関数ボース気体の基底状態が、準粒子の運動量分布関数に対する積分方程式 (L-L 積分方程式) で記述されることを示した。Gaudin はその手法を内部自由度を持つ系に拡張し、1 次元スピン 1/2 引力フェルミ気体の基底状態（全スピン 0）を、準粒子のスピン分布関数を定める積分方程式 (Gaudin 積分方程式) を得た。この L-L 積分方程式と Gaudin 積分方程式の類似性は以前より指摘されてきたが、その詳細は明らかにされていなかった。

我々はベキ級数展開法により、相互作用の強い場合と弱い場合のおのおのについて、展開パラメータの 2 次の範囲で、上記 2 つの積分方程式の解の厳密な表式を得た。相互作用の強い場合において、展開パラメータにあるスケール変換をほどこすと、斥力相互作用するボース気体と引力相互作用するスピン 1/2 フェルミ気体とは、分布関数と物理量の表式が完全に一致することを明らかにした。すなわち、斥力相互作用するボース粒子はスピン 1 重項のフェルミ粒子のペアと同一視できることが示唆された。また、この極限は剛体ボース気体とも一致をみた。以上から、適切なパラメータをとると、これら 3 つの模型の解がなめらかにつながることが結論された [12, 19, 22, 28]。

これらは、粒子間の相互作用を変化させていったときの、1 次元における BCS-BEC クロスオーバーを記述する模型とみることができ、興味深い。現在、全スピンが 0 と異なる場合のスピン 1/2 引力あるいは斥力フェルミ気体の解析や、3 次元系との対応について研究を進めている。

3.1.5 可積分系の組み合わせ的側面

Jack 対称多項式と Virasoro 代数の表現

円周上に、粒子間距離の 2 乗分の一に比例する斥力相互作用を持つ N 個の量子力学粒子を配置した系は、可積分であることが知られており、Calogero-Sutherland モデルと呼ばれる。特に励起状態の全ての波動関数は基底状態の波動関数と、対称多項式の積で表示されることが知られており、後者を Jack 対称多項式と呼ぶ。I. G. Macdonald により、Jack 対称多項式は対称多項式環上のある組み合わせ的な内積に対する直交多項式系として特徴付けられたが、この内積は共形場理論で標準的に用いられる Fock 空間上の内積と同一視され、したがって Jack 対称多項式をボソン化することができる。

Fock 空間の基底としてボソン化した Jack 対称多項式の全体をとり、その上で Virasoro 代数のボソン表現を考える。すると Virasoro 代数の新しい組み合わせ的な表現が得られることが分かった [13, 29]。応用として、特異ベクトルの存在、および Mimachi、Yamada が求めた特異ベクトルの長方形型パーティションに付随する Jack 対称関数による表示に対して新しい図式的な解釈を与えた。また、ボソン化された特異ベクトルを、比例定数をこめて決定し、その応用として Verma 加群上で特異ベクトルの双対をとり、さらにボソン化するとゼロベクトルとなることを示した。

Kerov-Kirillov-Reshetikhin 全単射の結晶基底による解釈

可解格子模型で物理量を計算する代表的な手法として、Bethe 仮説法と Baxter の角転送行列法が存在する。前者では艤装配位 (rigged configurations) を用いて、また後者では最高重みパス (highest weight paths) を用いて物理量をラベル付けする。以上の 2 つの計算手法は未だ数学的に厳密な基礎付けが与えられているわけではないが、2 つの物理量は一対一対応を持っていることが知られている。すなわち艤装配位と最高重みパスの間の全単射が Kerov, Kirillov, Reshetikhin (KKR) によって 1986 年に構成された。彼らは応用として、組み合わせ論および表現論で著名な Kostka 多項式の明示公式 (Fermionic formula) を証明した。

もともとの KKR 全単射の定義は純粋に組み合わせ論的な方法によっているが、写像の表現論的な意味付けを探る試みが続けられてきた。今回我々は、アフィン量子群の結晶基底の理論を用いることで、この問題の決着をみた [14, 33, 34, 35]。すなわち組み合わせ R 行列のみを用いて KKR 全単射と同値な写像を構成した。証明ではアフィン組み合わせ R 行列の構造を艤装配位に導入することが鍵となる。これらの結果は箱玉系と呼ばれるソリトンセルオートマトンの逆散乱法とも見ることができ、KKR 全単射と箱玉系が同一の理論的枠組みで扱えるようになった。なお、以上の結果は一般の非例外型アフィンリー代数についても拡張でき、類似の表式を予想できた。

可解位相モデルと skew plane partition の数え上げ

近年、数理物理における可積分モデルと組合せ的な量の数え上げとが密接に関連している例が多く発見され、注目を集めている。

可解位相モデルは q 変形した 1 次元格子ボゾンモデルの $q \to 0$ の極限で得られる量子可積分系である。q 変形した格子ボゾンモデルは強相関のあるボゾン系で量子逆散乱法によって解ける模型として知られている。こういったモデルではスカラー積と呼ばれるベーテベクトルの内積に相当する量が基本的である。ごく最近、Bogoliubov によって可解位相モデルのスカラー積の特殊な場合が、ファクターを除いて（箱に入った）plane partition の母関数という組合せ量に一致するという結果が得られた。我々は更にスカラー積を一般化することによって、この結果を拡張して（箱に入った）skew plane partition の母関数を得た [11, 30]。一つの方法は、ベーテベクトルを skew Schur 関数で表し一般化スカラー積を skew Schur 関数の足し上げることによって得る方法であり、もう一つは、量子逆散乱法で基本的なモノドロミー演算子の交換関係を使って一般化スカラー積の行列式公式を導く方法である。この二つの方法による副産物として一見異なる二つの一般化スカラー積の表式を導いた。これらの結果は、Okounkov–Reshetikhin によって調べられた Schur 過程の有限サイズバージョンになっており、確率過程的な解釈、相関関数の明示的な計算などの興味深い課題がある。

$O(1)$ ループ模型とハーフターン対称交代符号行列

$O(1)$ ループ模型は、Temperley-Lieb ハミルトニアンで記述される可解な確率モデルである。量子可積分である XXZ 模型の全スピン 0 のセクターの部分空間に対応しており、三角 R 行列を持つ可積分系である。また、同じく可積分系である Fully Packed Loop (FPL) 模型や組み合わせ論的な対象である交代符号行列 (ASM) とも密接に関係している。交代符号行列の総数はドメインウォール型境界条件をもつ inhomogeneous な 6 頂点模型の分配関数で homogeneous な極限をとったものと一致する。$O(1)$ ループ模型とこれらを結び付けているものが Razumov-Stroganov 予想（RS 予想）であり、総和則と成分則の二つから成る。

我々は、円柱状のリンクパターンの空間で $O(1)$ ループ模型で確率分布の成分和を考察した [31]。主要結果としては、homogeneous な極限で確率分布の成分和がハーフターン対称な交代符号行列の総数 $A_{HT}(2n) = 2, 10, 140, \cdots$: と対応することを見出した。また、スペクトラル変数の特殊化によって、$2n-1$ 点のマッチングで得られるリンクパターンへのリダクションも明らかにした。

3.1.6 ランダム行列理論とその応用

ランダム行列理論とは要素が乱数である行列の統計的振る舞いを扱う理論であり、量子カオス、メゾスコピック系など物理学のさまざまな分野で応用されている。最近、ランダム行列理論の新しい応用が発見され注目されている。非平衡統計物理学における一次元の Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 普遍クラスに属する界面成長模型や拡散模型において、物理量のゆらぎがランダム行列理論における最大固有値ゆらぎと等しいことが明らかにされたのである。

本年度は KPZ 普遍クラスに属する一次元多核成長模型 (Polynuclear Growth Model、以下 PNG 模型) を解析し、ランダム行列理論との関係を考察した。具体的には、外場のある多核成長模型の高さゆらぎと、外場のあるランダム行列の最大固有値ゆらぎとが等しいことを示した。[10] 次に、上記の等価性の起源を明らかにするために、シューア過程と呼ばれる、PNG 模型の数理構造の基礎となっている確率過程について考察した。シューア過程の相関関数について適当な連続極限をとると、外場のあるランダム行列の相関関数と等しくなることが明らかになった。

3.1.7 結び目理論・低次元トポロジー

Jones、Witten による量子不変量の発見以降、結び目・3 次元多様体の様々な不変量が提出されてきたが、こうした量子不変量の幾何学的な背景については未解明の部分が数多く残されている。こうした問題のひとつの手がかりとなると期待されるのが体積予想と呼ばれる、色つきジョーンズ多項式の特殊値の極限が結び目の補空間の体積と一致するとの予想である。本年度はある種のザイフェルト多様体の Witten 不変量の解析を詳細に行った。その結果、多様体の基本群および保型形式との関連性を明らかにし [1, 2]、また Ramanujan のモック・テータ函数との関係も指摘した。[3, 4]

＜報文＞

(原著論文)

[1] K. Hikami: On the Quantum Invariant for the Brieskorn Homology Spheres, Int. J. Math. **16**, 661–685 (2005)

[2] K. Hikami: On the quantum invariants for the spherical Seifert manifolds, Commun. Math. Phys., to appear.

[3] K. Hikami: Mock (false) theta functions as quantum invariants, Regular and Chaotic Dynamics **10**, 509–530 (2005)

[4] K. Hikami: Transformation Formula for the "2nd" Order Mock Theta Function, Lett. Math. Phys. **75**, 93–98 (2006)

[5] K. Hikami and A. N. Kirillov: Hypergeometric Generating Function for L-Functions, Slater's Identities, and Quantum Knot Invariant, Algebra i Analysis **17**, 190–208 (2005)

[6] M. Wadati and N. Tsuchida: Wave Propagations in the F=1 Spinor Bose-Einstein Condensates, J. Phys. Soc. Jpn. **75** 014301 (2006).

[7] J. Ieda, T. Miyakawa and M. Wadati: Exact Soliton Solutions of Spinor Bose–Einstein Condensates, Laser Physics, **16** 678–682 (2006).

[8] M. Uchiyama, J. Ieda and M. Wadati: Dark Solitons in F=1 Spinor Bose–Einstein Condensate, J. Phys. Soc. Jpn. in press; arXiv: cond-mat/0603070.

[9] J. Ieda, M. Uchiyama and M. Wadati: Inverse Scattering Method for the Multicomponent Nonlinear Schrödinger Equation under Nonvanishing Boundary Conditions, submitted; arXiv: nlin.SI/0603010.

[10] T.Imamura and T. Sasamoto: Polynuclear growth model with external source and random matrix model with deterministic source, Phys. Rev. E **71**, 041606-1-12 (2005).

[11] K. Shigechi and M. Uchiyama: Boxed skew plane partition and integrable phase model, J. Phys. A: Math. Gen. **38**, 10287–10306 (2005).

[12] T. Iida and M. Wadati: Exact Analysis of δ-Function Attractive Fermions and Repulsive Bosons in One-Dimension, J. Phys. Soc. Jpn. **74** 1724-1736 (2005).

[13] R.Sakamoto, J.Shiraishi, D.Arnaudon, L.Frappat, E.Ragoucy, Correspondesces between conformal field theory and Calogero-Sutherland model, Nuclear Physics, B704, 490-509 (2005).

[14] A.Kuniba, M.Okado, R.Sakamoto, T.Takagi, Y.Yamada, Crystal interpretation of Kerov-Kirillov-Reshetikhin bijection, Nuclear Physics, B740, 299-327 (2006).

修士論文

[15] 土田: Spinor Bose-Einstein Condensates: Analytical Study of Nonlinear Matter-Waves

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[16] M.Wadati: Exact Soliton Solutions of Spinor Bose-Einstein Condensates ("14th International Laser Physics Workshop", Kyoto, Japan, July 4-8, 2005)

[17] M.Wadati: Matter-Wave Solitons in Spinor Bose-Einstein Condensates (“50 Years of the Fermi-Pasta-Ulam problem: Legacy, Impact and Beyond”, Santa Fe, New Mexica, USA, May 16-21, 2005)

[18] M.Wadati: Bose-Einstein Condensation of Ultra Cold Neutral Atoms (“Innovative Nanoscale Approach to Dynamic Studies of Material”, Okinawa, Japan Jan. 9-14, 2006)

[19] M.Wadati: Exact Analysis of One-dimensional Qunatum Gas (“International Conference on Nonlinear Waves, Integrable Systems and their Applications”, Colorado Spring, Colorado, USA, June 4-8, 2006)

[20] K. Hikami: Introduction to Elliptic Ruijsenaars Model (mini-Workshop “Multiparticle Integrable Systems”, Kyoto, July 2005)

一般講演

[21] S.Watabe, T.Nikuni, N.Nygaard, J.E.Williams, and C.W.Clark: Equilibrium phase diagrams of degenerate Fermi gas with a Feshbach resonance (“14th International Laser Physics Workshop”, Kyoto, Japan, July 4-8, 2005)

[22] T. Iida: One-Dimensional Quantum Delta-Function Gas (UT-ANU Conference “Integrability, Spin Systems and Ultracold Quantum Gases”, Tokyo, Japan, August 11, 2005)

(国内会議)

招待講演

[23] 和達: 物理と数学 (大阪市立大学数学研究所 発足式, 2005 年 4 月)

[24] 和達: 非線形科学の発展 (本田財団, 2005 年 7 月)

[25] 和達: 量子情報 - 量子論の不思議さとその応用 (ソニー先端技術講座 SIT2005, 品川, 2005 年 10 月)

[26] 和達: 世界物理年 - アインシュタイン奇跡の年から 100 年 - (プラズマ・核融合学会, 特別講演, 2005 年 11 月)

[27] 樋上: 量子不変量と保型形式 (「共形場理論，作用素環論とモジュラーなテンソル圏」、大阪千里ライフサイエンスセンター、2005 年 9 月)

一般講演

[28] 飯田: 1 次元デルタ関数気体の統計力学 (第一回２１世紀 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム、東京大学理学部, 2005 年 11 月)

[29] 坂本:Jack 対称多項式と Virasoro 代数の表現 (第一回２１世紀 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム、東京大学理学部, 2005 年 11 月)

[30] 内山, 茂地: 可解位相モデルと skew plane partition の数え上げ (日本物理学会第 61 回年次大会, 愛媛大学・松山大学, 2006 年 3 月)

[31] 茂地, 内山: $O(1)$ ループ模型とハーフターン対称交代符号行列 (日本物理学会第 61 回年次大会, 愛媛大学・松山大学, 2006 年 3 月)

[32] 渡部, 二国, N.Nygaard, J.E.Williams, C.W.Clark: フェッシュバッハ共鳴を用いたフェルミ原子気体の断熱的相図 (日本物理学会２００６年春季大会、愛媛大学・松山大学、2006 年 3 月)

[33] 坂本:Crystal interpretation of Kerov-Kirillov-Reshetikhin bijection (日本数学会春季大会, 中央大学理工学部, 2006 年 3 月)

(セミナー)

[34] R.Sakamoto, Crystal interpretation of Okado-Schilling-Shimozono bijection (Osaka University, August 2005).

[35] R.Sakamoto, Crystal interpretation of Kerov-Kirillov-Reshetikhin bijection (Kobe University, November 2005).

3.2 青木研究室

我々は一貫して、「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、対称性（特にゲージ対称性）が自発的に破れる。

3.2.1 超伝導

非連結フェルミ面における電子間斥力からの超伝導

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 ($t \sim$ バンド幅 ~ 10000 K) を持つ超伝導をもつと考えられ、銅酸化物の $T_C \sim 100$K 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。これに対して、黒木（電通大）と有田は、フェルミ面が非連結の場合を考えれば node をフェルミ面を避けるように通すことができ、T_C が飛躍的に上昇し得ることを指摘していた。

最近我国で発見されたコバルト酸化物超伝導体 Na_xCoO_2 では、フェルミ面近傍に 3 つのバンド（a_{1g} バンドと e'_g バンド二つ）が存在する。有田は黒木、田仲（名大）等とともに、状態密度の高い e'_g バンドがフェルミ面にかかる場合にはポケット状のフェルミ面がトリプレット超伝導に有利に働く可能性を指摘し、*Phys. Rev. Lett.* に発表した [1]。実験的には、コバルト酸化物 CoO_2 面の間に水分子を 2 層挿入したときのみ超伝導になる。そこで有田は、第一原理電子状態計算によって、水が 2 層の場合と 1 層の場合の比較を行った結果、両者の差は、面に垂直方向の軌道をもつ a_{1g} バンドに顕著に現れ、超伝導には a_{1g} バンドも重要な可能性を指摘した [6]。そこで a_{1g} バンドを詳細に見ると、Γ 点近傍でローカルミニマムが存在し、2 重リングのようなフェルミ面が出来る可能性がある。黒木、大成、田仲、有田、野尻は、そのような場合に拡張 s 波シングレット超伝導の可能性を示した [2, 39]。

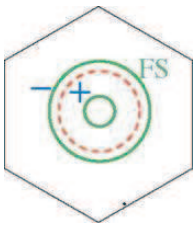


図 3.2 a: A possible Fermi surface of the superconducting cobalt compound with the sign of the gap function indicated[2].

長距離斥力からの超伝導

近年、有機導体 $(TMTSF)_2X$ やルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 においてスピン・トリプレット超伝導 (スピンの揃った Cooper 対で軌道対称性は p,f 等) の可能性が実験的に指摘されている。短距離相互作用の極限である Hubbard(on-site 斥力) 模型においてはスピン揺らぎが支配的であり、そのためトリプレット超伝導はシングレットに対して一般的に実現しにくい、という有田・青木の理論がある。我々はこの観点から、隣接 site 間の斥力（これは電荷揺らぎ、従ってトリプレット超伝導を有利化する）を取り入れた拡張 Hubbard 模型を考え、TMTSF やルテニウム酸化物の超伝導を議論してきた。一方、逆の極限である長距離クーロン相互作用をする電子気体では電荷揺らぎが支配的であり、希薄な場合に超伝導になるという理論的予測がある。そこで本年度は、大成（現在名大）、有田、黒木、青木は、拡張 Hubbard 模型に対する超伝導のペアリング対称性の相図を求めた [3] とともに、さらに斥力の距離を伸ばして $1/r$ クーロン型に近づけたとき、電子気体での超伝導にどのようにつながるかを調べた [4, 19]。

また、吉川は、近接サイト間クーロン斥力の効果を低温で調べるために、拡張ハバード模型を用いて、Bickers らにより提案された繰り込まれた揺らぎ交換近似用いて解析し、修士論文にまとめた [51]。

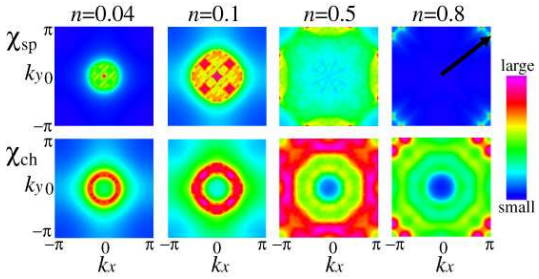


図 3.2 b: Spin susceptibility χ_{sp} (top panels) and charge susceptibility χ_{ch} (bottom) in $\mathbf{k}$ space for typical values of the band filling n in the extended Hubbard model with $1/r$-like interaction [4].

多軌道系における超伝導

遷移金属酸化物のような強相関電子系を考えるとき、スピン、電荷の自由度とともに重要になり得るのが軌道の自由度である。興味は多軌道に特有な交換相互作用（フント結合）の効果であるが、モット転移を記述できる利点をもつ動的平均場 (DMFT) + 量子モンテカルロ (QMC) 法をフント結合多軌道模型に拡張すると、負符号問題や、演算子の非可換性のため SU(2) 対称性を保てない、等の困難があった。

そこで、酒井、有田、青木は、Rombouts らによって提案された摂動展開を出発点とするアルゴリズム

を、多軌道系の DMFT に応用することを提案し、この方法を、2 バンド縮退系の強磁性の問題に適用した [20, 40, 41]。しかし、負符号を軽減したり現実に重要な 3 軌道系等を扱うためにはさらに工夫が必要である。そこで、酒井、有田、Held(Max-Planck 研)、青木は、摂動展開型アルゴリズムと、酒井等により以前提案された新補助場変換を組み合わせることを提案した。これにより、従来実行不可能であった 3 バンド系の SU(2) 対称な計算が可能になり、ルテニウム酸化物に適用した [31, 42]。

電子・電子斥力と電子・フォノン相互作用が共存する系での超伝導

強い電子・フォノン相互作用が強い電子・電子相互作用と共存する系は、理論的に興味深いだけでなく、アルカリ金属をドープしたフラレン超伝導体などで実現しており、これをモデル化した Hubbard-Holstein 模型が調べられてきた。特に、電子間斥力とフォノン媒介引力とが拮抗する場合に興味がもたれるが、電子・フォノンと電子・電子相互作用の共存を扱うのは、adiabatic 近似あるいは anti-adiabatic 近似のような極限以外では困難であった。そこで手塚は、Hubbard-Holstein 模型を、1 次元電子・フォノン共存系に対する密度行列繰り込み群 (DMRG) を用いて解析した。SDW 相（電子・電子由来）と CDW 相（電子・フォノン由来）の中間に興味がもたれ、電子構造に electron-hole 対称性があるときには超伝導が支配的になることはないが、electron-hole 対称性を崩してやると超伝導が支配的になり得ることを見出した。この成果は *Phys. Rev. Lett.* に発表された [5, 21, 43, 50]。さらに、梯子系などの準一次元系における解析を開始した [32, 44]。

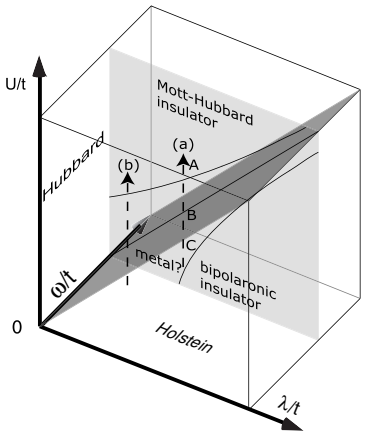


図 3.2 c: Schematic parameter space in the model that has both electron-electron(U) and electron-phonon(λ) interactions, with ω the phonon frequency and t the electron hopping[5].

第一原理計算を用いた超伝導の理論設計にむけて：バナジウム酸化物

銅酸化物超伝導体以外の遷移金属酸化物で、unconventional な超伝導の可能性を理論的に探索する試みも行っている。最近、バナジウム酸化物 Sr_2VO_4 の単結晶薄膜が実験的に合成されたが、この物質は、銅酸化物に電子・正孔変換した電子配置をもつ故興味がもたれる。しかし、バンドの結晶場分裂を見ると単純な電子正孔変換にはなっていない。そこで、有田、山崎、Held、Andersen(Max-Planck 研)、黒木は Sr_2VO_4 に対し、c 軸方向に一軸性圧力を加えると銅酸化物の電子・正孔対称アナログを実現できる可能性を、LDA+DMFT によって電子状態の圧力依存性を計算することにより検討した [33, 45]。

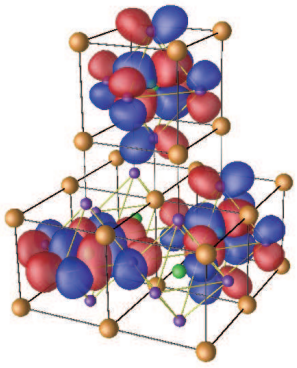


図 3.2 d: Electronic wavefunction in Sr_2VO_4 with the first-principles calculation[45].

3.2.2 強相関電子系に対する新手法の開発

密度汎関数理論を基礎とする第一原理計算と強相関モデル計算を融合することにより、強相関物質に対する第一原理計算手法の開発も目指している。

射影量子モンテカルロ法

電子相関を扱う典型法の一つである量子モンテカルロの一つの問題点は、計算規模が $\propto T^3$ で増大し、低温の計算が困難な点である。そこで、有田、Held は、絶対零度の物理量を効率よく計算する射影モンテカルロ法を開発し、2 軌道系の動的平均場計算および単一軌道系の動的クラスター計算に応用した。前者においては、SU(2) 対称性を保った絶対零度量子モンテカルロ計算が可能になり、軌道選択型のモット転移を議論することがで、これを $Ca_xSr_{2-x}RuO_4$ に適用した [7, 22, 29, 34]。動的クラスター計算においては、Sr_2RuO_4 におけるトリプレット超伝導を念頭に、次近接サイト間にも transfer がある 2 次元

Hubbard 模型における d-wave 超伝導と p-wave 超伝導のクロスオーバーを考察した [8, 22, 29, 34]。

また、高島は、Salmhofer 等により提案された、汎関数くりこみ群法を検討し、修士論文にまとめた [52]。

相互作用パラメータの評価

第一原理計算と電子相関計算をつなぐ上で重要な手続きに相互作用パラメータの評価がある。これには、constrained LDA と呼ばれる手法が用いられてきたが、従来は LMTO(linearized muffin tin orbital) 基底のみが用いられてきた。中村（常行研)、有田、吉本（物性研)、常行は、平面波基底の第一原理計算において、maximally localized Wannier function を構成し、この基底に対して constrained LDA を実行する方法を開発し、遷移金属に対して適用した [30]。この新しい手法は、有機導体なども含む広範な物質に適用可能である [46]。

3.2.3 非磁性元素系における電子相関からの遍歴強磁性の物質設計

非磁性元素からなる物質で磁性体が作れるかという問題は、電子相関の基本的、かつチャレンジングな問題といえる。平坦なバンドをもつ格子の上の斥力 Hubbard 模型においては、或る条件が満たされた場合強磁性が実現し得ることが 1990 年代に Mielke や田崎によって厳密に証明された。有田は、この条件を満たさせ易いのは奇数員環からなる有機高分子であろうという観点から、諏訪（日立基礎研)、黒木、青木と共に局所スピン密度第一原理計算と、Hubbard 模型計算の両面建てで、新有機物（五員環高分子 polyaminotriazole）および関連物質が合成できれば平坦バンドが実現し、適当な band filling において強磁性が実現する可能性を指摘した。さらに、この高分子が結晶化したときにバルク強磁性を持つ可能性があることを示した [25]。この物質は本学化学教室の西原研究室において、現在オリゴマーまでの合成に正功した [47]。

江澤は、炭素ナノリボンと呼ばれるリボン状の炭素系の状態を系統的に調べた [9]。

3.2.4 強相関電子系における非平衡・非線形現象 — モット絶縁破壊

モット絶縁体のような強相関電子系における非平衡・非線形な現象は、開拓の余地の大きい興味深い問題である。岡等は、モット絶縁体に強電場をかけた場合の絶縁破壊を、量子準位間の非断熱トンネリングを多体電子系に初めて拡張することにより調べてきた。多体系ではエネルギー準位は複雑となり、そこでの量子トンネリングによる確率の分岐を論じねばならないが、岡、今野（横浜国大)、有田、青木は、この問題を、エネルギー準位を渡り歩く量子 walk にマップして考察し、確率分布関数を厳密に求めた。このアプローチにより、弱電場下では量子干渉効果によって分布は基底状態近傍に局在するが、電場を強くすると非局在分布が発生することが示され、*Phys. Rev. Lett.* に発表された [10]。

さらにこの描像をミクロな模型 (Hubbard 模型) で確かめるために、岡、青木は、強い電場下の絶縁体中の非線形輸送を、「幾何学的位相」の観点から捉え直した。その過程で先ず、強電場下での基底状態の残存確率の式が、QED における真空の崩壊確率の Schwinger 公式と形式的に一致すること、また有効作用が、最近定式化された分極に対する Berry 位相公式を非断熱過程に拡張したもの (Stokes 位相) になっていることを見い出した。具体的に、モット絶縁体に対して時間依存密度行列繰り込み群 (TDMRG) を用いてトンネル率を計算した結果、量子 walk 模型で予言された動的局在が起きていることが明らかになり、*Phys. Rev. Lett.* に発表された [11]。

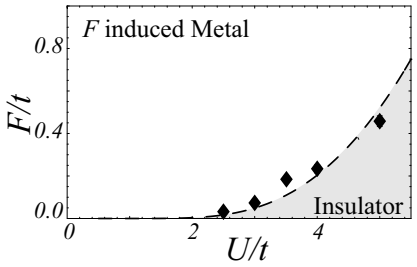


図 3.2 e: Dielectric breakdown phase diagram on (U, F) for the one-dimensional Hubbard model, with Mott's insulator and the electric-field(F) induced metallic phases[11].

3.2.5 分数量子ホール効果

分数量子ホール効果は、クーロン斥力相互作用する電子を 2 次元に閉じこめた系に強磁場を加えた場合に発現する、電子相関効果であり、2 次元空間に特有な Chern-Simons ゲージ場（複合粒子) 理論も展開されている。通常の電子相関においては、電子間相互作用と運動エネルギーの競争になるのとは対照的に、この系では磁場によるランダウ量子化のために運動エネルギーが凍結しており、全ては相互作用で決まるという特異な「強相関極限」にある。このため、ランダウ準位の詰まり方 (ν) を変えると多彩な量子相転移が起きる。

青木研では、この数年様々な面から分数量子ホール系の物理を探索してきたが、本年度は、小野田（強相関研）等による分数量子ホール液体における有効質量とフェルミ液体論、小野田、水崎（専修大)、青木による分数量子ホール系における BCS 状態（異方的ペアリング $(p+ip)$ 状態）の性質、越野（現東工

大）による 3 次元における量子ホール効果などを中心に、高温超伝導体に代表される通常の相関電子系との比較も行いながら総合報告を行った [26]。

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ことは、最近の技術で可能になっているが、ここで電子は磁気長 (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）等は提案してきた。最近、樽茶グループ（本学物理工学科）の実験において励起スペクトルの詳細が観測され始め、電子分子理論（スピン自由度まで含んだ）の予言する魔法数構造との非常に良い一致が得られた。本年度はこの成果を、Maksym、青木（理論）と西、羽田野、樽茶（本学工)、Austing（カナダ National Research Council)、Kouwenhoven（Delft 大）（以上実験）との共著論文として出版した。[12, 23]

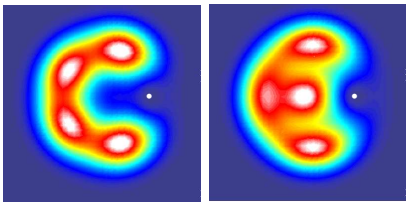


図 3.2 f: “Electron molecules” in a quantum dot in strong magnetic fields, where five electrons take pentagonal (left panel) or a square+centre(right) configurations [23].

3.2.6 ヘテロ界面の電子物性

金属/絶縁体界面のような、性質の異なる物質の界面において、原子スケールで何が起きるかをモダンな視点で探るのは興味深い。我々のグループは、斉木 (新領域) を代表とする学術創成研究「高度界面制御有機・無機複合構造による量子物性」の理論分担として研究をすすめている。

金属/有機物界面における金属誘起状態

半導体/金属界面では、界面に発生する金属誘起ギャップ状態 (MIGS) が生じることが知られているが、最近、実験（木口等）と理論（有田等）の共同研究により絶縁体/金属界面にも存在することが示されていた。木口等はさらに、有機絶縁体/金属界面 (アルカン/銅) における MIGS の観測に成功し、有田、谷田（富士通)、青木はこれに対する第一原理計算を行って実験結果を再現すると同時に、基板を強磁性金属 (Ni) にすれば有機物をスピン偏極させ得ることを理論的に予言した [13, 24]。

極性面における金属・絶縁体転移および磁性

極性面（イオン結晶において、陰（あるいは陽）イオンだけが表面に出た面）が実現し得るか否かは固体物理の長年の懸案であったが、最近木口等が MgO/Ag の界面で MgO が原子数層の場合は極性面となることを観測した。有田、谷田、青木は第一原理電子状態計算を行い、MgO 1 層で既に極性界面が実現し、実験と整合することを示した。極性面は大きな局所状態密度を伴って金属化しており、界面での金属・絶縁体転移や界面強磁性を制御できる可能性を議論した [27]。

3.2.7 周期的極小曲面上の電子

越野（東工大）等は、C_{60} ゼオライトやグラファイト・スポンジのような無限周期曲面上の電子を考えてきた。模型として極小曲面を採用し、Weierstrass 表示を援用してブロッホ電子のエネルギー・バンド構造を求めた。また、極小周期曲面間が Bonnet 変換と呼ばれる共形変換で結ばれているときは、それらのバンド構造の間に関連があることも示した。本年度はこの発展として、3 方向に螺旋状である G(gyroid)-surface を考察し、螺旋対称性のためにバンドが多重に stick together すること、これに付随して高い状態密度が現れることを見出した [14]。

3.2.8 その他

柱（現本学工）と青木は、超対称性（SUSY; 交換関係と反交換関係のコンビネーションで閉じた Lie 代数）が、D 次元相対論的水素原子でも存在することを見出し、supercharge 演算子を与えた [15]。Runge-Lenz-Pauli ベクトルで従来知られた代数構造が、一般次元への拡張に対しても意外と壊れないことになる。

総合報告としては、青木は、強相関系における超伝導 [17, 36, 37]、強相関系におけるスピン・トリプレット超伝導 [16]、強相関系におけるフェルミ面形状効果 [18]、配列ナノ構造における電子相関設計 [38] 量子ホール効果の進展と展望 [28, 26]、量子ホール効果における多体効果と次元性 [35]、電子相関設計 [48, 49] のテーマで講演、解説を行った。

2004 年 10 月より、助手の有田は Alexander von Humboldt Research Fellow として 2006 年 3 月まで Stuttgart の Max-Planck 研究所に出向して研究を推進してきたが、2006 年 4 月からは理化学研究所に転出した。2006 年 2 月からは、岡　隆史が助手に着任した。

＜報文＞

(原著論文)

[1] K. Kuroki, Y. Tanaka and R. Arita: Competition between singlet and triplet pairing in $Na_xCoO_2{\cdot}yH_2O$, *Phys. Rev. B* **71**, 024506 (2005).

[2] K. Kuroki, S. Onari, Y. Tanaka, R. Arita and T. Nojima: Extended s-wave pairing originating from the a_{1g} band in $Na_xCoO_2 \cdot yH_2O$ — single-band U-V model with fluctuation exchange method, to appear in *Phys. Rev. B*.

[3] S. Onari, R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: Triplet superconductivity induced by charge fluctuation in the extended Hubbard model, *J. Phys. Soc. Jpn* **74**, 2579 (2005).

[4] S. Onari, R. Arita, K. Kuroki, H. Aoki: Superconductivity from long-range interaction — a crossover between the electron gas and the lattice model, *Phys. Rev. B* **73**, 014526 (2006).

[5] M. Tezuka, R. Arita and H. Aoki: Density-matrix renormalization group study of pairing when electron-electron and electron-phonon interactions coexist — Effect of the electronic band structure, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 226401 (2005).

[6] R. Arita: Electronic structure of sodium cobalt oxide — Comparing mono- and bilayer hydrate, *Phys. Rev. B* **71**, 132503 (2005).

[7] R. Arita and K. Held: Orbital-selective Mott-Hubbard transition in the two-band Hubbard model, *Phys. Rev. B* **72**, 201102(R) (2005).

[8] R. Arita and K. Held: Crossover from d-wave to p-wave pairing in the t-t' Hubbard model at zero temperature, *Phys. Rev. B* **73**, 064515 (2006).

[9] M. Ezawa: Peculiar width dependence of the electronic properties of carbon nanoribbons, *Phys. Rev. B* **73**, 045432 (2006).

[10] T. Oka, N. Konno, R. Arita and H. Aoki: Breakdown of an electric-field driven system: a mapping to a quantum walk, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 100602 (2005).

[11] Takashi Oka and Hideo Aoki: Ground-state decay rate for the Zener breakdown in band and Mott insulators, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 137601 (2005).

[12] Y. Nishi, P.A. Maksym, D.G. Austing, T. Hatano, L.P. Kouwenhoven, H. Aoki and S. Tarucha: Intermediate low spin states in a few-electron quantum dot in the $\nu \leq 1$ regime, *Phys. Rev. B* (in press).

[13] M. Kiguchi, R. Arita, G. Yoshikawa, Y. Tanida, S. Ikeda, S. Entani, I. Nakai, H. Kondoh, T. Ohta, K. Saiki and H. Aoki: Metal-induced gap states in epitaxial organic-insulator/metal interfaces, *Phys. Rev. B* **72**, 075446 (2005).

[14] M. Koshino and H. Aoki: Electronic structure of an electron on the gyroid surface, a helical labyrinth, *Phys. Rev. B* **71**, 73405 (2005).

[15] Hosho Katsura and Hideo Aoki: Exact supersymmetry in the relativistic hydrogen atom in general dimensions — supercharge and the generalized Johnson-Lippmann operator, *J. Math. Phys.* **47**, 032301 (2006).

(国際会議録（招待講演）)

[16] Hideo Aoki: Triplet superconductivity — spin vs charge fluctuations and fermiology, *Proc. 10th Int. Conf. on Muon Spin Rotation, Relaxation and Resonance*, Oxford, Aug. 2005 [*Physica B* **374-375**, 229 (2006)].

[17] Hideo Aoki: Superconductivity in highly correlated systems, *Proc. 29th Int. Workshop CMT29*, Kizu, 2005, in press.

[18] Hideo Aoki: Fermiology and interaction in unconventional superconductors — triplet versus singlet pairs,
Proc. 4th Int. Conf. on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors, Crete, 2005, in press.

(国際会議録（一般発表）)

[19] S. Onari, R. Arita, K. Kuroki, H. Aoki: Superconductivity from a long-range repulsive interaction, to appear in *Proc. 24th Int. Conf. on Low Temperature Physics*, Florida, 10-17 August 2005.

[20] S. Sakai, R. Arita and H. Aoki: Application of the perturbation series expansion quantum Monte Carlo method to multiorbital systems having Hund's coupling, *Proc. SCES'05*, Vienna, 26-30 July 2005 (to appear in *Physica B*).

[21] M. Tezuka, R. Arita and H. Aoki: Density-matrix renormalization group study of phase diagram in systems with strong electron-electron and electron-phonon interactions, to appear in *Proc. 24th Int. Conf. on Low Temperature Physics*, Florida, 10-17 August 2005.

[22] R. Arita and K. Held: DCA study of d- and p-wave pairing in the Hubbard model, to appear in *Proc. 24th Int. Conf. on Low Temperature Physics*, Florida, 10-17 August 2005.

[23] P. A. Maksym and H. Aoki: Electron-molecules in quantum dots — Transitions between electron-molecule states in electrostatic quantum dots, to appear in *Proc. Int. Conf. on Quantum Dots*, Chamonix, 2006.

[24] M. Kiguchi, G. Yoshikawa, K. Saiki, R. Arita and H. Aoki: Metal induced gap states at tetratetracontane/Cu interface, *Proc. Int. Conf. on Formation of Semiconductor Interfaces* [*Journal de Phys. IV* **132**, 199 (2006)].

(国内雑誌)

[25] 有田亮太郎、諏訪雄二、黒木和彦、青木秀夫：強磁性有機高分子の物質設計、固体物理 **40**, 177 (2005)。

[26] 青木秀夫：量子ホール効果 — 進展と展望、日本物理学会誌 **61**, 19 (2006).

[27] 木口学、有田亮太郎、斉木幸一朗、青木秀夫：イオン結晶の極性表面は可能か？ー分子線エピタキシーによる MgO 極性表面の実現と第一原理電子状態計算、固体物理 **41**, 13 (2006)。

＜学術発表＞

(国際会議)

招待講演 (会議録掲載以外)

[28] Hideo Aoki: Future directions in the quantum Hall physics — QHE in 3D, nano and nonequilibrium systems, *Int. Workshop on New Horizon in High Magnetic Fields*, Tsukuba, 18 Jan 2006.

一般講演（会議録掲載以外）

[29] R. Arita, K. Held: Application of the projective QMC method for impurity models to DMFT and DCA calculation at $T = 0$, Psi-k2005, Schwäbisch Gmund, 17-21 Sept 2005.

[30] K. Nakamura, R. Arita, Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki: First-principles calculation of Hubbard parameter — Constrained local density functional approach with maximally localized Wannier function, Psi-k2005, Schwäbisch Gmund, 17-21 Sept 2005.

(Colloquia)

[31] S. Sakai: A new quantum Monte Carlo method and its application to multi-orbital systems, Max-Planck Insititute seminar, 20 Dec 2005.

[32] M. Tezuka, R. Arita and H. Aoki: Density-matrix renormalization group study of pairing in Holstein-Hubbard model — effect of electronic band structure, APS March Meeting, Baltimore, March 13-17 2006.

[33] R. Arita: Sr_2VO_4 under pressure — an orbital switch and potential d^1 superconductor, Augsburg 大学、8 March 2006.

[34] R. Arita: Application of the projective QMC method for impurity models to DMFT and DCA calculation at $T = 0$, Würzburg 大学、22 Dec 2005.

[35] Hideo Aoki: Interaction and dimensionality in the quantum Hall physics, Université Paris-Sud, 1 Sept 2005.

(国内会議)

招待講演

[36] 青木秀夫：電子間斥力と超伝導、「量子ビームによる高温超伝導機構の解明」研究会、五浦、1 Nov 2005。

[37] 青木秀夫：エキゾチック超伝導への理論的 strategy、日本物理学会「エキゾチック超伝導」シンポジウム、松山, 27-30 March 2006.

[38] 青木秀夫：理論からみたナノ空間物質の特異性、日本応用物理学会「配列ナノ空間を利用した機能発現とその応用：材料ユビキタス元素戦略へのアプローチ」シンポジウム、徳島、10 Sept 2005。

一般講演

[39] 黒木和彦，大成誠一郎，田仲由喜夫，有田亮太郎，服部幸博，野嶋琢己，田中麻衣：$Na_xCoO_2 \cdot yH_2O$ の a_{1g} バンドにおけるスピン・電荷揺らぎ共存による超伝導の可能性、日本物理学会, 京都, 12-15 Sept 2005.

[40] 酒井志朗，有田亮太郎，青木秀夫：無限次元多軌道 Hubbard 模型における強磁性の有限温度の性質、日本物理学会, 京都, 12-15 Sept 2005.

[41] 酒井志朗，有田亮太郎，青木秀夫：動的平均場理論の新しい解法－摂動展開量子 Monte Carlo 法、日本物理学会, 京都, 12-15 Sept 2005.

[42] 酒井志朗，有田亮太郎，青木秀夫:動的平均場＋摂動展開量子 Monte Carlo 法による多軌道 Hubbard model の研究、日本物理学会, 松山, 27-30 March 2006.

[43] 手塚真樹, 有田亮太郎, 青木秀夫：Holstein-Hubbard 模型におけるバンド構造と超伝導、日本物理学会、京都、12-15 Sept 2005.

[44] 手塚真樹, 有田亮太郎, 青木秀夫：異方的超伝導における電子格子相互作用の影響 — ハバード梯子模型に対する DMRG、日本物理学会, 松山, 27-30 March 2006.

[45] 有田亮太郎、山崎敦嗣，K. Held，黒木和彦：Sr_2VO_4 における圧力誘起強的軌道秩序の可能性 — LDA+DMFT による検討、日本物理学会, 松山, 27-30 March 2006.

[46] 中村和磨，有田亮太郎，吉本芳英，常行真司：第一原理からの CNDO モデルハミルトニアンの構築 — グラファイトへの応用、日本物理学会, 松山, 27-30 March 2006.

[47] 浜田剛志、倉科昌、長谷川雄大、山野井慶徳、西原寛、有田亮太郎、諏訪雄二、黒木和彦、青木秀夫：平坦バンド強磁性体として分子設計されたオリゴ [1-(ジメチルアミノ) ピロール] の合成と酸化体の物性、日本化学会、船橋、27-30 March 2006。

(セミナー・研究会)

[48] 青木秀夫：高温超伝導と量子ホール効果の物理 － 電子相関設計、京都大学、19 May 2005。

[49] 青木秀夫：多体効果を設計する、大阪大学理学部物理談話会、9 Dec 2005。

[50] 手塚真樹, 有田亮太郎, 青木秀夫：Holstein-Hubbard 模型におけるバンド構造に依存した超伝導相関、京大基研短期研究会「異方的超伝導現象の統一的理解を目指して」, 6-8 Dec 2005.

(学位論文)

[51] 吉川俊彦：繰り込まれた揺らぎ交換近似によるハバード模型の研究 (修士論文、2006 年 1 月)。

[52] 高島宏和：Functional renormalization approach to the effect of Fermi surface on superconductivity (修士論文、2006 年 1 月)。

3.3 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。特に相転移・臨界現象や秩序形成に伴う非平衡現象、強く相互作用している量子系の基底状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。昨年度は、いろいろな構造を持つ量子スピン系でのエネルギー構造、ナノシステムにおける量子ダイナミックス、電子スピン共鳴などの研究、スピンクロスオーバーや電荷移動など電子状態が変化する系の相転移や動的性質、相互作用が競合するフラストート系での遅い緩和現象と量子アニーリング、沸騰現象の流体力学的研究などの非平衡現象を研究した。

3.3.1 量子相互作用に起因する特異な相の発見

量子系においては物理量の非可換を反映して、古典的ではみられない特異な状態が現れることがハルデーン状態の発見以来詳しく調べられてきている。それらの多くは非磁性状態として現れるが、我々は磁化が存在する場合の量子効果に注目して研究を進め、次の２つのケースを発見した。一つは、フラストレートした相互作用のもとで格子のユニットを反映しない自発磁化をもつ基底状態である。この基底状態はいわゆるリープ・マチスタイプのフェリ磁性状態とは異なり、励起状態との間にエネルギーギャップをもたず、古典的には互いに平行でないスピンからなるいわゆる非線状（non-collinear）な状態に相当していると考えられる。さらに、この状態ではスピンの相関関数が不整合な振動を示し、量子的なヘリカル状態であることも明らかにした。[19] また、この特異な基底状態の特徴をもつ単分子磁性体の設計も行い、そこで分子を構成している各原子の微視的運動についても研究した。[31]

もう一つは、非磁性の基底状態と磁気的な励起状態をもつ局所状態（分子レベル）をあらわす Blume-Capel モデルにおいて、励起状態の間に量子混合を許す相互作用を考えた場合に、量子ゆらぎによって誘起される特異な磁気状態が現れることを発見した。通常、量子ゆらぎは横磁場イジングモデルの場合のように磁気秩序を壊す働きをするが、今の場合は量子混合のゼロ点振動エネルギーで磁気状態を安定化するという新しい機構であることがわかった。[7]

また、三角形をつなげたスピンチューブと呼ばれる格子の上で、カイラリティ自由度によるエネルギーギャップの発生の有無にかかわる詳しい研究も行い、相互作用の強さによって相転移があることを発見した。[8]

3.3.2 量子磁化過程

磁化過程における量子効果も興味深い対象であり、多くの磁気誘起横磁化秩序、磁気ボース・アインシュタイン凝縮（BEC）の立場から多くの研究がされてきている。[33] 我々は、量子揺動誘起磁場中相転移が注目されている XY 的な異方性をもつ三角格子反強磁性体の基底状態での磁化過程を異方性の強さの関数として調べ、詳細な相図を得た。この構造は、かつて我々が求めていた対応する古典的なモデルの有限温度でのエントロピー効果と一致することも見いだした。また、ダイマー複雑なダイマー構造を持つ一次元ハイセンベルグ模型での磁化過程を調べ、ダイマー構造を有効相互作用で置き換えた場合の理論的予想と結果が異なることを発見し、それが量子系での強磁性ダイマーを有効相互作用に置き換える場合に磁場中では注意がいることに起因していることを発見し、有限温度、有限磁場中での有効相互作用について詳しく調べた。[22]

また、一次元横磁場イジング模型が掃引磁場のもとで示す動的磁化過程についても研究し、エネルギーの反発交差に基づくランダウ・ゼナー型の遷移の他に、速い掃引においては系のサイズに依らない古典的な集団運動を反映する過程があることも明らかにした。さらに、スピンの大きさ S による臨界横磁場の大きさ依存性やその過程における散逸の効果についても研究を進めた。[35]

3.3.3 量子ダイナミックスの解明と制御

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。[30] 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、昨年度から 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」をはじめた。

量子情報の基本的な単位である qubit の物理的性質についても研究を進めている。たとえば、サーキット QED と言われる、超伝導回路で組まれた qubit と調和振動子が相互作用している系は、これからの量子デバイス開発の上で重要な役割を演じる可能性があり注目されている。我々はこの系の基本的なダイナミックスを理解するために、qubit が調和振動子系と相互作用をするときの Landau-Zener の非断熱トンネル確率がどのようになるかを解析的に厳密に導出した。また調和振動子を古典電磁波とみなした半古典解析でも、その特徴的な時間発展や漸近的に厳密なトンネル確率を導いた。[1]

3.3.4 量子磁性体の熱伝導現象

量子磁性体の熱伝導現象は最近様々な系で実験がなされている。そこではフォノンでなくスピンが主に熱を運ぶ。スピンはマグノンなどの集団運動を通して熱を運ぶため、異常に大きい熱伝導度になるこ

とが多い。我々はギャップのある微小な量子磁性体とギャップのない微小な磁性体をくっつけたときに低温での熱流がどう振舞うかを非平衡グリーン関数の方法で解析した。その結果、熱浴の温度の入れ替えに対し熱流の大きさが異なる非対称熱流を見出した。[11]

3.3.5 スピンクロスオーバー錯体における相転移

物質の形態に関する相転移として興味深い現象として、スピンクロスオーバー相転移と呼ばれる現象がある。[34] Fe や Co などは結晶場の強さによって、フント則が効いて大きな磁気モーメントをもつハイスピン（HS）状態と、結晶場分裂が効いて磁気モーメントが小さなロースピン（LS）状態の間でイオンが変化する現象である。この現象では、局所的にエネルギーが高いが状態密度が大きいため高温で有利な状態と、エネルギー的に有利な低温状態の間で状態変化がおきる。また、電子が原子間を移動することで磁気モーメントの配置が変わる電荷移動相転移も同様な機構がある。そこでは、相互作用や系の縮退度や状態間のエネルギー差など系のパラメターによって、連続的に変化する場合や一次相転移を起こして不連続に起こる場合など多様な温度変化を示すが、パラメター変化に伴う相転移のあり方を系統的に調べ、普遍的なパラメター依存性があることを示した。そこでは、熱力学的な安定相だけでなく、興味深い準安定状態の存在形態を発見した。[6] これに関しては、関連する実験も進んでいる。[15] また、スピンクロスオーバー相転移と磁性秩序の統一的理論取り扱いの定式化を行い磁性とスピン形態の複合的な相転移を研究史、さらにその動的性質にについて研究した。[4, 5] さらに、プルシャンブルー類似体などで見つかっている光による磁気状態のスイッチ機構に関連してスピンクロスオーバーと HS 間の磁気相互作用、さらに磁場依存性についても詳しく調べた。またこれらの系における電子移動現象における量子効果や振動外場に対する応答についても研究した。

3.3.6 フラストレートした系における遅い緩和現象

エネルギーが最も低い状態に状態が緩和する際に、準安定状態にトラップされると、そこからエネルギー障壁を越えて脱出することが低温では困難になり、非常に遅い緩和現象が生じることが知られており、特に希釈磁性体やスピングラス系など不均一系では、長年詳しく研究されてきた。そのような緩和現象において相互作用の競合（フラストレーション）の効果がどのように現れるかについて研究してきた。たとえば、温度によって秩序形態がかわるいわゆるリエントラント現象、温度の下げ方を系が記憶しているメモリー効果や系の秩序化が温度に単調に進まな

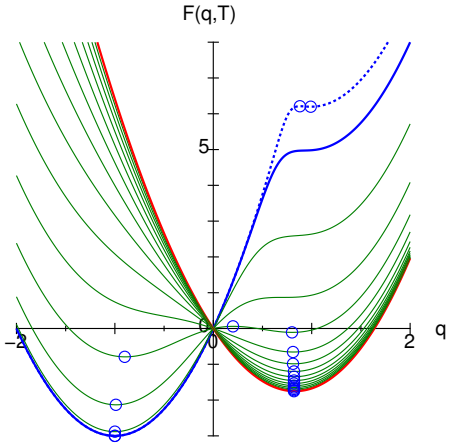


図 3.3 a: スピンクロスオーバー転移の際に生じる低温での準安定状態

いスピン若返り現象と呼ばれる現象などを研究してきた。[21, 32] そこで、我々はこれまでよく知られている相互作用エネルギーの不均一から生じるエネルギー障壁起因のものと異なり、状態密度の構造によるエントロピー障壁起因のものであることを明らかにその機構を解明した。さらにこれらの系の基底状態の有効な探索法として、量子アニーリングの方法が有効に働くことを発見し、その機構を研究している。

また、完全にフラストレートしたかごめ格子反強磁性体で基底状態では基底状態マクロな縮退のために通常相転移がないが、秩序変数の構造によってはマクロに縮退した秩序状態が生じることが知られている。この対称性が破れた構造においてはエントロピー効果による状態選択機構が働き、そのため遅い緩和現象が起こることを発見した。

3.3.7 気相・液相相転移の流体方程式の定式化

流体における気相・液相相転移（沸騰）は、興味深い現象であるが、沸騰の際の物質の大きく急激な体積変化とそこでの流体の運動を気相・液相にわたって統一的に取り扱うため、流体の運動方程式（ナビエ・ストークス方程式）と状態方程式（ファンデアワールス方程式）を結合させる定式化を行った。それによって、加熱によって気泡が発生する過程を研究した。また、沸騰のミクロな過程を調べるため、分子動力学による研究も進めた。この研究は、キャノン（株）の研究所との共同研究として行った。[9]

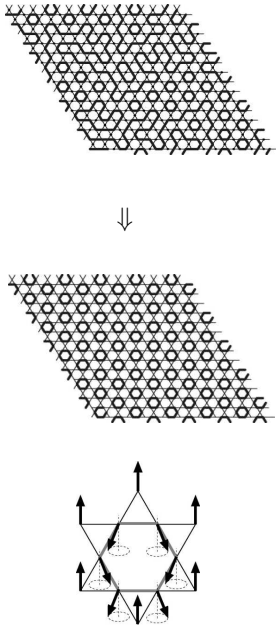


図 3.3 b: カゴメ格子の”風見鶏ループ”と呼ばれる自由度（下図の回転部分をつないだループ）の緩和の様子

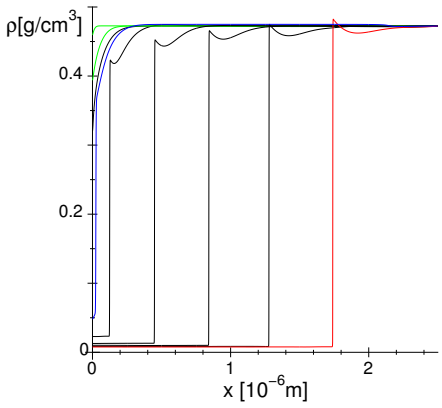


図 3.3 c: 加熱によって起こる気泡発生の流体相転移

3.3.8 カオスの量子古典対応、ランダム行列

自然界の一般的な物理系が示す古典的な力学挙動は、長時間極限を見れば複雑怪奇な挙動を示すカオスである。古典系では、カオスは正のリアプノフ指数で特徴付けられる。一方で量子系ではそのような量がない。量子系では、相当する古典系がカオスであることが、エネルギー準位の統計性に反映され、ランダム行列のそれと一致するということが約２０年前に予想された。そのことは多くの数値計算により確認されてきており完全に確立した概念に成ってきている。我々はそのような量子古典対応関係を解析的に完全に示す試みを行ってきている。特に今回は弱磁場下でのカオス系で、この量子古典対応を考えた。スペクトラルフォルムファクターの半古典解析において、氷上 box を持つ古典周期軌道を数え上げ、更にゲージの効果を取り入れることにより、GOE-GUE クロスオーバーを示すランダム行列理論と半古典解析の結果が 3 次まで完全に一致することを示した。[10]

またランダム行列での基本的な性質として、摂動が加わったときにエネルギー構造に現れる準位交差の交差間分布の研究も行った。[2]

＜報文＞

(原著論文)

[1] M. Wubs, K. Saito, S. Kohler, Y. Kayanuma, and P. Hänggi: Landau-Zener transitions in qubits controlled by electromagnetic fields, New Journal of Physics **7**, 218 (2005).

[2] M. Machida and K. Saito: Distribution of the spacing between two adjacent avoid crossings Phys. Rev. E **72**, 056206 (2005).

[3] M. Machida and S. Miyashita: Spectral statistics and the Dzyaloshinsky-Moriya interaction of nanomagnet V_{15}, Physica E **29**, 538 (2005).

[4] K. Boukheddaden, M. Nishino, S. Miyashita and F. Varret: Unified theoretical description of the thermodynamical properties of spin crossover with magnetic interactions, Phys. Rev. B **72**, 014467 (2005).

[5] M. Nishino, K. Boukheddaden, S. Miyashita and F. Varret: Dynamical aspects of photoinduced magnetism and spin-crossover phenomena in Prussian blue analogs, Phys. Rev. B **72**, 064452 (2005).

[6] S. Miyashita, Y. Konishi, H. Tokoro, et al,: Structures of Metastable States in Phase Transitions with a High-Spin Low-Spin Degree of Freeedom, Prog. Theor. Phys. **114**, 719 (2005).

[7] N. Todoroki and S. Miyashita: Quantum-Fluctuation-Enhanced Ordered Phase in Blume-Capel Model, J. Phys. Soc. Jpn.**74**, 2957-2960 (2005).

[8] K. Okunishi, S. Yoshikawa, T. Sakai and S. Miyashita: Low-Energy Excitations of the $S = 1/2$ Quantum Spin Tube with the Triangular Lattice Structure, Prog. Theor. Phys. Suppl. **159**, 297 (2005).

[9] A. Asai, K. Shinjo and S. Miyashita: Van der Waals-Navier StokesEquation for Boiling Phanomena -Bubble Formation by Heating-, J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 024001(1-9) (2006).

[10] K. Saito and T. Nagao: Spectral form factor for chaotic dynamics in a weak magnetic field, Physics Letters A **352**, 380-385 (2006).

[11] K. Saito: Asymmetric Heat Flow in a Mesoscopic Magnetic System, J. of Phys. Soc. Jpn. **75**, 034603 (2006).

[12] T. Makino, K. Saito, A. Ohtomo, et al.: Analysis of localization dynamics of exitions in a CdZno quantum well revealed by Monte-Carlo simulation, J. of Appl. Phys. **99**, 066108 (2006).

[13] H. De Raedt, K. De Raedt, K. Michielsen and S. Miyashita: Efficient data processing and quantum phenomena, Single-particle system, Computer Physics Communications **174**, 803-817 (2006).

[14] M. Nishino, K. Boukhaddaden, S. Miyashita and F. Varret: Dynamical properties of Photoinduced Magnetism ans Spin-Crossover phanomena in Prussian Blue Analogs -photoinduced thermal hysteresis of magnetization-, Solid State Phenomena, **112** (2006), 73-80.

[15] H. Tokoro, S. Miyashita, K. Hashimoto, S. Ohkoshi: Huge thermal hysteresis loop and a hidden stable phase in a charge-transfer phase transition of $Rb_{0.64}Mn[Fe(CN)_6]_{0.88}\cdot 1.7H_2O$, Phys. Rev. B(2006), in press.

[16] S. Yuan, H. De Raedt and S. Miyashita: Quantum Dynamics of Spin Wave Propergation Through Domain Walls, J. of Phys. Soc. Jpn. **75**, No.8 (2006), in press.

(会議抄録)

[17] Y. Konishi and S. Miyashita: Mechanisms of Magnetic Order in a Charge Transfer Complex Mediated by Virtual Interactions Due to the Charge Fluctuation, J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. **74** (2005) 103-106.

[18] M. Machida, T. Iitaka and S. Miyashita: Anisotropy and Dzyaloshinsky-Moriya Interaction in V_{15}, J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. **74** (2005) 107-110.

[19] S. Yoshikawa and S. Miyashita: Nature of Ferrimagnetic Ground States in Quantum Spin Models, J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. **74** (2005) 71-74.

[20] K. Saito: Nonadiabatic Electron Manipulation in a Quantum-Dots Array and Related Transport Phenomena, J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. **74** (2005) 256-260.

(国内雑誌)

[21] 田中宗: フラストレートスピン系におけるリエントラント転移の動的特性物性研究 85-4, 523 (2006).

(学位論文)

[22] 坂本昌彦: "Study on equilibrium and dynamical metamagnetic processes in low dimensional quantum spin systems" (修士論文：工学系研究科物理工学専攻) 2006

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[23] Y. Konishi: Charge fluctuation induced magnetic phase transition, 1st NAREGI International Nanoscience Conference (Nara, 2005 Jun. 14-17).

[24] M. Sakamoto: Effects of geometrical strusture of lattices onESR line shape, 1st NAREGI International Nanoscience Conference (Nara, 2005 Jun. 14-17).

[25] K. Saito: Nonadiabatic tunneling of qubit in the circuit quantum electrodynamics, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintonics 2006 (Atsugi, 2006 Feb.27-Mar.2).

[26] H. Tokoro, S. Miyashita, K. Hashimoti, S. Ohkoshi: Photomagnetic phenomenon in rubidium manganese hexacyanoferrate, ICONO/LAT2005 (St. Petersburg, 2005 May 11-20).

[27] H. Tokoro, S. Miyashita, K. Hashimoti, S. Ohkoshi: Photomagnetic phenomena induced by one-shot pluse laster light in rubdium manganese hexasyanoferrate, Pacifichem 2005 (Honolulu, 2005 Dec.5-20).

[28] H. Tokoro, S. Miyahsita, K. Hashimoto, S. Ohkoshi: Photomagnetic phenomenon in rubidium manganese hexacyanoferrate, Second International vonference on Photo-Induced Phase Transition (Rennes, 2005 May 24-28).

[29] S. Miyashita: Structure of metastable state in the entropy-induced phase transitions and effects of photoirradiation on it, Second International conference on Photo-Induced Phase Transitions (Rennes, 2005 May 24-28).

招待講演

[30] S. Miyashita: Adiabatic Change and Relaxation of Magnetization in Triangle Clusters, Exploratory Workshop Manipulating Quantum Spins and Classical Dots (Les Horches, 2005 Apr.26-29).

[31] S. Miyashita: Microscopis motion of atomic magnetism in a magnetic cluster, International Workshop on Molecular and Nano-particle Magnetism (Kyoto, 2005 Jun. 18-19).

[32] S. Miyashita: Mechanism of slow dynamics in a decoration bond system, Recent progress in glassy physics France-Japan Seminar (Paris, 2005 Sep. 27-30).

[33] S. Miyashita: Quantum excitations due to fast changing field, New Horizon in High Magnetic Fields, International Workshop on High Magnetic Fields (Tsukuba, 2006 Jan. 17-20).

[34] S. Miyashita: Phase Transition and Quantum Dynamics of Charge-Transfer Spin-Crossover Systems, (Tokyo, 2006 Feb. 16-18).

[35] S. Miyashita: Dynamical Properties of One-dimensional Ising-like Ferromagnetic Quantum Magnets, International Conference on Single-Chain Quantum Magnets ーNew Generation of Quantum Molecular Nano-Magnetsー(Okazaki, 2006 Mar.11-12).

(国内会議)

一般講演

[36] 齊藤圭司，永尾太郎: 弱磁場中のカオス系における Form Factor の微視的導出, (日本物理学会、同志社大学、2005 年 9 月 19-22 日).

[37] 齊藤圭司: 量子磁性体を使った非対称熱流の測定可能性, (日本物理学会、同志社大学、2005 年 9 月 19-22 日).

[38] 小西優祐，宮下精二: 電荷移動を起こす物質の光磁性における準安定構造の寄与に関する研究, (日本物理学会、同志社大学、2005 年 9 月 19-22 日).

[39] 所裕子，宮下精二，橋本和仁，大越慎一: Mn-Fe シアノ錯体における光誘起活性種の検出とその緩和, (日本物理学会、同志社大学、2005 年 9 月 19-22 日).

[40] 田中宗，宮下精二: 遅いダイナミックスを誘起する相互作用の微視的機構, (日本物理学会、同志社大学、2005 年 9 月 19-22 日).

[41] 坂本昌彦，宮下精二: 周期的なボンド構造を持つ一次元スピン系の低温物性と ESR, (日本物理学会、同志社大学、2005 年 9 月 19-22 日).

[42] 小西優祐，所裕子，宮下精二: スピンクロスオーバー現象の振動外場による制御, (日本物理学会、同志社大学、2005 年 9 月 19-22 日)

[43] 齊藤圭司: Theory of Nonadiabatic manipulation and exact theory of transition in superconducting circuits, (JST/CREST 量子情報ワークショップ、リゾーピア箱根、2005 年 12 月 12-16 日).

[44] 宮下精二: 動的な外場に関する量子応答, (JST/CREST 量子情報ワークショップ、リゾーピア箱根、2005 年 12 月 12-16 日).

[45] 田中宗、宮下精二: Quantum Annealing Effect on the Entropical Slowing Down Machanism in Decorated Bond System, (JST/CREST 量子情報ワークショップ、リゾーピア箱根、2005 年 12 月 12-16 日).

[46] 坂本昌彦、宮下精二: Dependence of Dynamical Magnetization Process on Bond Struture of System, (JST/CREST 量子情報ワークショップ、リゾーピア箱根、2005 年 12 月 12-16 日).

[47] 小西優祐、宮下精二: Control of Electron States by Extermal Field in Charge-Transfer-Spin-Crossover Complexes, (JST/CREST 量子情報ワークショップ、リゾーピア箱根、2005 年 12 月 12-16 日).

[48] 山本啓介、宮下精二: Field sweep effect on Transverse-Ising model, (JST/CREST 量子情報ワークショップ、リゾーピア箱根、2005 年 12 月 12-16 日).

[49] 加藤岳生，齊藤圭司: スピン軌道相互作用があるバリスティック伝導系におけるダイナミクス, (日本物理学会、松山大学、2006 年 3 月 27-30 日).

[50] 齊藤圭司，萱沼洋輔，M.Wubs，S.Kohler，P.Hanggi: 超伝導回路で実現されるキャビティー QED と Qubit の Landau-Zener トンネリング, (日本物理学会、松山大学、2006 年 3 月 27-30 日).

[51] 所裕子、宮下精二、張悦、寶角敏也、橋本和仁、大越慎一: Cu-Mo オクタシアノ金属錯体における可逆な光磁性現象, (日本物理学会、松山大学、2006 年 3 月 27-30 日).

[52] 田中宗、宮下精二: カゴメ格子のイジング的ハイゼンベルグスピン系における遅い緩和現象, (日本物理学会、松山大学、2006 年 3 月 27-30 日).

[53] 坂本昌彦、宮下精二: 量子スピン系における構造を持つボンドの有効相互作用の温度磁場依存性, (日本物理学会、松山大学、2006 年 3 月 27-30 日).

[54] 山本啓介、宮下精二: 量子ダイナミクスにおける準位交差と集団運動, (日本物理学会、松山大学、2006 年 3 月 27-30 日).

[55] 小西優祐，所裕子，宮下精二: スピンクロスオーバー現象の振動外場による制御, (日本物理学会、松山大学、2006 年 3 月 27-30 日).

招待講演

[56] 宮下精二: 物性物理におけるモンテカルロ法－－新奇な相の発見と動的過程－－, (2005 年度ＫＥＫ大型シミュレーション研究ワークショップ「超高速計算機が切り開く計算物理学の展望」つくば、2006 年 2 月 6-8).

[57] 宮下精二: カイラリティとは, (第 2 期菅野シンポジウム（第 2 回）「物理学、化学、生命科学における左と右」柏、2006 年 3 月 4 日).

(セミナー)

[58] 齊藤: 熱伝導現象をめぐる歴史と最近の話題 (大阪市大、2005 年 6 月).

3.4 小形研究室

物性理論、凝縮系とくに量子現象が顕著に現れる多電子系の理論、すなわち強い相関のある電子系、高温超伝導の理論、モット金属-絶縁体転移、磁性、有機伝導体などの低次元伝導体、軌道・スピン・電荷の複合した物質、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。

3.4.1 高温超伝導の理論

強相関電子系での超伝導相関

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、高温展開の手法を用いて超伝導相関関数を調べた。分配関数 Z を $1/k_{\rm B}T$ のべき乗で展開するという高温展開においては、絶対零度への外挿が常に問題になるが、我々は、より高次の次数まで計算を進め、さらに超伝導相関長を調べることによって、低温領域での超伝導相関の発達を精度よく評価することができた。その結果、$d_{x^2-y^2}$-波のチャンネルに関して実効的に引力相互作用があることを示した。またドーピング依存性に関しては、高温超伝導体の実験と一致する領域において d 波超伝導相関が発達することが明らかになった。さらに、超伝導相関が発達し始める特徴的な温度は $J/2$ にスケールするということも分かった。これらの結果は、超伝導の数値シミュレーションによる証拠が少ない弱相関ハバードモデルでの状況と対照的である。[6, 28, 56]

モット金属絶縁体転移と超伝導

高温超伝導は、モット絶縁体に動けるキャリアを導入することによって発現するので、超伝導と絶縁体との関係は強相関電子系での最も興味ある研究の１つである。これを理解するために、ハバードモデルを用いて金属絶縁体転移と超伝導の関係を明らかにした。とくに強相関領域で有効な方法として、電子相関を十分考慮した波動関数を仮定して変分法によって基底状態を調べた。その結果、スピン $\pm 1/2$ の電子の二重占有のサイトとホールがいるサイトとの間の空間的相関を変分関数中で考慮することが非常に重要であることを見出した。これにより１次相転移としての金属絶縁体転移が実現することを示した。これは最近の有機導体などにおける実験結果とよく対応している。得られた絶縁体状態では、二重占有サイトとホールのサイトは束縛状態を作っており、t-J モデルでよく記述される状況となる。また波動関数中には超伝導相関があるが、相互作用のために絶縁体となっている状態であることもわかる。したがって、この状態にキャリアを導入したものが高温超伝導であると考えられる。一方、電子相関が弱い領域では、通常の BCS 型の d 波超伝導状態が実現することがわかった。[23, 53, 54, 61, 83, 87]

磁性と超伝導の多重臨界領域における乱れの効果

高温超伝導体、有機導体や重い電子系などの強相関電子系では、磁性と超伝導が競合・共存することが知られている。この問題を理解するためには電子相関だけでは不十分であり、乱れの存在が本質的に重要であると考え、その影響を調べた。乱れた超伝導を議論する際には、通常用いられる摂動論が破綻するため乱れを非摂動的に考慮する必要がある。そこで、空間依存性のあるグリーン関数法を臨界揺らぎの理論に適用する手法を開発して計算した。その結果から、系の振舞いは超伝導コヒーレンス長 ξ によって全く異なることが分かった。ξ が短い場合、乱れによって容易に微視的な不均一性が生じ、磁気揺らぎと超伝導揺らぎが空間的に共存する。そのために揺らぎが増強され、広い範囲に多重臨界領域が現われる。また、超伝導相関関数、磁気相関関数等を計算した結果から、微視的不均一性が巨視的な性質に対しても本質的に重要であることが分かった。[47, 60, 82, 84]

Zn, Ni 不純物近傍の電子状態

高温超伝導体に非磁性不純物である Zn やスピン１の不純物である Ni を導入した場合、その近傍の電子状態は、通常の超伝導体の場合と比べて非常に奇妙な振舞いをすることが実験的に知られている。このことについて、微視的なモデルである t-J に基づいて調べた。非磁性不純物の Zn まわりでのスピンの振舞いや、Ni とホールの関係が t-J モデルによると素直に理解できることを示した。[57, 70]

3.4.2 コバルト酸化物における異方的超伝導

２次元三角格子上の超伝導体であるコバルト酸化物 $\mathrm{Na}_x\mathrm{CoO}_2\cdot y\mathrm{H}_2\mathrm{O}$ において、電子相関による超伝導の可能性を探るためにいくつかの理論的解析を行った。[55]

$\mathbf{Na}_x\mathbf{CoO}_2\cdot y\mathbf{H}_2\mathbf{O}$ の多軌道型超伝導

コバルト酸化物超伝導体において、Co の t_{2g} 軌道の自由度が重要な役割を果たしている可能性を指摘し、多軌道型超伝導体に特有の物性や現象および超伝導発現のメカニズムについて調べた。まず、バンド計算の結果に基づいて、この物質を記述する多軌道ハバードモデルを構築し、FLEX 近似（揺らぎ交換近似）を多軌道系に拡張してこのモデルを解析した [4, 26]。また摂動論による解析も行った [5, 27]。この結果をもとに、一見矛盾するような数々の実験

結果を統一的に理解することを試みた。まず最近の実験で得られているような、NQR 周波数と超伝導転移温度や磁気揺らぎとの相関が、多軌道ハバードモデルの解析によって説明することができることを示した。とくに a_{1g} 軌道と e'_g 軌道とがフェルミ面近傍で上下するという効果が非常に大きく、これが多彩な物性を決めていると予想した。[9, 41, 49, 62] また、スピン軌道相互作用を考慮したモデルを解析し、d ベクトルが面内（スピンが c-軸方向）に固定されることを見出した。これは、低磁場 NMR 測定の結果をうまく説明する。

スピン三重項超伝導における d-vector と磁場中多重相図

スピン三重項超伝導では、クーパー対がスピンおよび軌道の自由度を持つため、多変数の秩序変数を持つ。この時、温度･磁場相図中で多重相転移が起こり得ることが知られている。これまでに、GL 理論に基づく現象論に基づいて議論されてきたが、より微視的な研究が可能であるコバルト酸化物において、クーパー対の内部自由度について調べた。[11, 15, 42, 59, 88] まず、スピン軌道相互作用を含む軌道縮退ハバードモデルを構成し、摂動論による解析を行なった。結果として、p 波超伝導の場合と f 波超伝導の場合でスピン軌道相互作用の働きが全く異なり、それぞれの場合での安定な d-vector の向きを決定した。さらに、平行磁場中での多重相転移の可能性を調べた結果、p 波超伝導、および p 波と f 波の共存状態では、多彩な磁場中相図が得られることが分かった。

電荷揺らぎによる超伝導状態

コバルト酸化物において電荷揺らぎが重要な役割を果たしているという可能性についても議論した。実際に、三角格子の形状に都合のよい特定の電子密度では、長距離クーロン斥力が電荷秩序を誘起し、その近傍で電荷ゆらぎによる超伝導が発現する可能性がある。このことを明らかにするために、最近接クーロン相互作用を考慮した２次元三角格子上の拡張ハバードモデルを用いて、RPA 近似により超伝導の可能性を調べた。その結果、あるパラメータ領域では電荷秩序相近傍で f 波対称性を持つスピン３重項超伝導状態が最も安定化する。電子間の有効相互作用を調べると、スピン揺らぎ・電荷揺らぎが協力的に働く場合にはスピン１重項よりスピン３重項の方が安定化することが明らかになった。この超伝導状態は、電子が最近接斥力を避けて、次近接の位置でクーパー対を組んでいると解釈することができる。[29]

また、変分モンテカルロ法による解析の結果、相互作用の競合によって二種類の蜂の巣格子型の電荷秩序相の存在が確認された。さらに U が大きくなると反強磁性スピン秩序を引き起こすことが示された。また超伝導に関しては、V によって次近接間のペアリングが増大し、スピン三重項の f 波超伝導が実現する可能性が見られた。ただし今のところ電荷秩序相の方がエネルギー的に安定化している。[12]

3.4.3 有機導体に関する理論

有機導体（分子性導体）において電荷秩序状態がしばしば見出されている。この新しい秩序状態近傍での電荷の自由度に着目し、それの引き起こす特異な現象やダイナミクス、および超伝導に関する研究を行なっている。

幾何学的フラストレーションによる量子融解

２次元有機導体の実験に触発されて、２次元 1/4 充填の強相関電子系における幾何学的フラストレーションの効果を調べた。２次元正方格子上の拡張ハバードモデルを考えるが、最近接斥力相互作用に加えて、次近接斥力相互作用も考慮する。この場合、２つの斥力相互作用はお互いに異なる電荷秩序状態を安定化しようとして競合する。有限系のハミルトニアンの厳密対角化の結果、２つの相互作用が拮抗するかなり広いパラメータ領域において、フラストレーションの結果として電荷秩序状態が量子融解し、金属化した状態が現れることを見出した。多少パラメータが変更を受けてもこの量子融解状態は安定であり、この現象が 1/4 充填の強相関電子系において、一般的に生じることを議論した。[2] また、これに関する理論的研究を網羅したレビューをまとめた。[18]

擬二次元有機導体における新しいタイプの電荷秩序状態と超伝導

θ-型有機導体は、分子が異方的三角格子を組んだ 3/4 フィリングの系であり、多くの系において電荷秩序が見出されている。この電荷秩序の起源については、オンサイト斥力 U に加えて、最隣接クーロン相互作用 V が重要であると考えられている。その１つである θ-(BEDT-TTF)$_2$X では、格子が２次元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る。我々は平均場近似 [16, 35, 73, 77] および変分モンテカルロ法を用いて [17, 45, 52, 69, 72, 76]、電荷秩序状態およびそれがフラストレーションによって量子融解したあとの金属状態を詳しく調べた。今までは電荷秩序状態として、ストライプ型のものが考えられてきているが、最近提唱された３倍周期を持つ電荷秩序状態も広いパラメータ領域で安定化することを見出した。さらに量子融解した後の金属状態では、これらのパターンの異なる電荷秩序がエネルギー的に拮抗していることがわかった。この場合、強い電荷揺らぎを用いたスピン３重項 f 波超伝導が実現可能であることを変分モンテカルロ法によって見出した。[17, 45, 52, 69, 72, 76]

電荷秩序転移とその近傍でのスピン自由度の振舞い

実験では、電荷秩序が生じたときにスピン帯磁率などのスピン自由度がほとんど影響を受けないという不思議なことが知られている。これに関連して、スピン自由度に対する電荷秩序の影響を一般的に調べた。まず一次元電子系において、オンサイト斥力 U と最隣接サイト間の相互作用 V を考慮した拡張ハバードモデルを調べた。その際、$U \to \infty$ でのスピン-電荷分離型の波動関数と、数値的厳密対角化法を用いて、基底状態での帯磁率 χ などを精度よく求めた。その結果、χ は V によって増加すること、また電荷秩序が発生する臨界点において χ には際だった特異性が現れないことを明らかにした。これは電荷秩序転移が一次元系に特有の Berezinskii-Kosterlitz-Thouless 型の転移であることから解釈できる。この結果は、臨界点近傍で電荷揺らぎが非常に重要な働きをしており、秩序形成そのものはスピン自由度に対して大きな影響を及ぼさないことを意味している [14, 34, 39, 44]。

また、二次元系の有限温度での電荷秩序についても調べた。具体的には、正方格子上の拡張ハバードモデルを量子モンテカルロ法を用いて調べ、電荷秩序転移のユニヴァーサリティ・クラスが、二次元イジングモデルのものと矛盾しないことを見出した。さらに、相転移の近傍で帯磁率の顕著な変化は見られないという結論を得た。これらの結果から、電荷秩序はスピン自由度にはほとんど影響しないということを議論した [34, 51, 67]。

局在スピンとの相互作用をもつ 1 次元有機系

いくつかの有機物質では、局在スピンが各サイトに存在し伝導電子と相互作用している場合がある。この問題は近藤効果に近い問題であり、これまで有機系とは独立して研究されてきた。有機導体においては、伝導電子が電荷秩序を持つ場合があり、さらに多様な現象が期待できる。そこで我々は、電荷秩序状態が局在スピンの存在によってどのように変化を受けるかについて、密度行列くりこみ群（DMRG）の数値的手法を用いて調べた。その結果、局在スピンとの反強磁性結合は、電荷秩序状態を非常に安定化させることを見出した。さらに磁性に関しては強磁性が出現することを明らかにした。この強磁性の出現と電荷秩序はほとんど独立に生じる。得られた結果と最近のフタロシアニンの実験結果との比較の議論を行なった。[7, 40, 65]

3.4.4 異方的超伝導体の理論

異方的超伝導体の比熱の磁場角度依存性についての準古典方程式による研究

異方的超伝導体では、面内に平行な磁場をかけた場合に、各種物理量の磁場の角度方向依存性から超伝導のギャップ構造が決定できると考えられている。比熱の磁場角度依存性 $C(H)$ も超伝導ギャップ構造を反映すると考えられる物理量であり、実験により盛んに調べられている。ここでは、異方的超伝導体として知られる YNi_2B_2C 及び κ-(BEDT-TTF)$Cu(NCS)_2$ を取り上げ、これら物質での比熱の磁場角度依存性 $C(H)$ を準古典 Eilenberger 方程式によって調べた。YNi_2B_2C ではカスプ的な $C(H)$ の振舞いが実験的に見出されており、超伝導ギャップにポイントノードが存在するのではないかと主張されてきた。しかし我々の解析によると、カスプの原因はむしろ Fermi 面のネスティングに帰着すべきものであることが分かった。[3, 30] また、κ-(BEDT-TTF)$Cu(NCS)_2$ について tight-binding model から Fermi 面を構成し、準古典 Eilenberger 方程式を自己無撞着に解いて $C(H)$ を計算したところ、渦糸格子の構造などに依らず $C(H)$ の振舞いがギャップ構造を反映する領域が安定して存在することを示した。

ルテニウム酸化物の高磁場中での新しい状態

スピン 3 重項超伝導体であると考えられているルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 において、低温高磁場での H_{c2} 近傍に新しい相があるのではないかと実験的に言われている。この相については今まで理論的に理解されていなかったが、我々はスピン 3 重項超伝導特有の新しい状態ではないかと考え、微視的なモデルを用いて調べた。スピン $S = 1$ の 3 重項超伝導のクーパー対には内部自由度があり、Sr_2RuO_4 ではスピンが面内を向いていると考えられている。この場合を $\hat{z}$ と表す。高磁場中では超伝導秩序変数の対称性は $k_y\hat{z}$ という状態であると一般に考えられているが、弱いスピン軌道相互作用と状態密度のフェルミ面近傍での傾きがある場合、新しく $k_y(\hat{z} - \mathrm{i}\alpha\hat{y})$ という状態が安定化するということを見出した。これは相転移ではなくクロスオーヴァーとなるが、この変化が実験で見られている比熱の 2 重ピーク構造を説明するのではいかと考えられる。[13, 50, 68, 71]

d 波超伝導体・ハーフメタルヘテロ構造系におけるスピン依存近接効果

銅酸化物高温超伝導体とマンガン酸化物を接合させると、d 波超伝導体とハーフメタルが接合した二層構造系ができる。このような新奇な状況での超伝導および磁気的な近接効果について、理論の定式化を行い、その物性を調べた。その結果、接合界面でのスピン混合及びスピン反転散乱によって、ハーフメタル側ではスピン・トリプレット超伝導近接効果、超伝導体側では磁気的近接効果が引き起こされることを明らかにした。ハーフメタルから超伝導体にしみ出した磁性は、超伝導体側にアンドレーフ束縛状態を形成し、長距離オーダーの交換ポテンシャルを誘起する。さらに超伝導体の結晶軸の方向と、２つのハーフメタルの磁化の方向の相対的な差によって、誘起された磁性の空間対称性が決定されることも明らかにした。[32, 46, 63, 94]

3.4.5 フラストレーションのある系での電子状態、スピン状態

三角格子 t-J モデルでの超伝導相関

コバルト酸化物や有機導体の超伝導に触発されて、純粋な２次元三角格子上での超伝導の可能性が非常に興味を持たれている。この場合には、正方格子である高温超伝導体とは異なり、フラストレーションによる新しい超伝導の可能性が秘められている。この可能性について、典型的な強相関電子系のモデルである t-J モデルを用いて、正方格子の場合と同様な高温展開の手法により超伝導相関関数を調べた。その結果、低温に行くにしたがって、d 波超伝導が有利な領域と、f 波超伝導が有利な領域が存在することが分かった。d 波超伝導は、高温超伝導の初期のころから提唱された RVB 理論による超伝導の発現と考えられる。一方 f 波の方は、離散フェルミ面に起因する新奇の超伝導であると思われ、今後の発展の興味がある。[10, 56] また、強相関極限において、電子数制御による金属絶縁体転移の振舞いを調べた。その結果、絶縁体に向けて有効質量が発散すること、またその臨界指数が特殊な値になることを見出した。[43]

フラストレーションのある古典スピン系の数値シミュレーション

磁気的フラストレーションのある古典 XY スピン系については、よく知られている Kosterlitz-Thouless (KT) 転移とともに、フラストレーションから生じるカイラリティ相転移という可能性がある。KT 転移は連続転移であるが、カイラリティ転移はイジング型の相転移である。三角格子においては、この２つの相転移がほとんど同じ温度で起こると考えられている。しかし三角格子から歪んだ場合には、接近した温度で相転移するという必然性はない。もし大きく異なる温度での相転移が見られると、２つの相転移温度の中間温度領域では、新奇な状態が実現する可能性がある。このことを明らかにするために、フラストレーションのある系にも応用可能な Wang-Landau アルゴリズムによるモンテカルロ法を、連続エネルギーの場合に拡張して調べた。[38]

3.4.6 電子系での新奇な物理量の理論

２次元絶縁体における disorder operator の性質

微小にホールが導入された絶縁体である Bi2212 や $CaNaCuO_2Cl_2$ に対する最近の走査型トンネル顕微鏡実験では、空間的にナノスケールで不均一となった電子状態が見出されている。このような絶縁体中での「電荷の不均一化」を理解するために、disorder (kink) operator というものを導入して調べた。電荷密度の平均値からのずれを自然な形で表すような秩序変数として、2 次元統計変換の際に用いられる disorder operator に注目し、いくつかの簡単な場合について、その量子力学的期待値を調べた。まず、disorder operator を格子上に拡張して定義し、金属状態を表す波動関数の場合に、その期待値が (一点非可縮なループの埋め込めない) 任意の Fermi 面に対して熱力学極限でゼロになることを示した。一方、バンド絶縁体または電荷自由度の励起にギャップがある場合には、disorder operator の期待値が有限な値に留まる。したがって、この物理量は金属と絶縁体を区別する秩序変数として扱えることを意味する。さらにその期待値が、局在長 λ を使って $e^{-\frac{1}{4}\lambda^2}$ と与えられることを明かにした [21, 33]。

Fermi 流体における「人工的電場」

最近の磁性体の異常ホール効果の研究から、結晶中の相互作用のない電子ガスは、ブロッホ関数を通して定義される「人工的磁場」を波数空間でのローレンツ力として感じるということがわかってきている。この研究の一般化として、多バンドモデルの Keldysh の定式化から出発して微分展開を用い、フェルミ面を構成する準粒子に対する有効ボルツマン方程式を導出した [19, 20]。さらに、この有効方程式から準粒子の従う実効的な運動方程式を調べ、人工的磁場の他に、繰り込まれたブロッホ関数の曲率によって決まる「人工的な電場」が、準粒子が波数空間で感じるローレンツ力のもう一つの原因になっていることを見出した。この人工的な電場に対応する電荷は量子化しないが、実空間のマックスウェル方程式に似た運動方程式に従う。この有効運動方程式から線型応答の範囲で導かれる自発的ホール伝導度は、TKNN 公式を多体問題に拡張した石川-松山公式と整合することも示された。また準粒子のスペクトル関数の大きさが、通常のくりこみ因子の他に、現実の電場磁場と人工的な電場磁場の内積で与えられる量で補正されることを見出した。このことは、人工的電磁場が原理的には ARPES などの実験において観測可能であることを意味している。

3.4.7 量子ドットでの近藤効果

量子ドットに導線（リード）をつないだ系は、新しい近藤効果の系として非常に興味が持たれている。例えば、スピン分極したリード（強磁性リード）を量子ドットに結合するとスピン依存性をもつ電荷揺らぎによってドットのエネルギー準位が分裂し、近藤効果が弱まることが理論的に予測されている。このことは、実験において微分コンダクタンスのゼロバイアス異常の分裂として観察されている。ドットの左右に結合した強磁性リードの分極方向が、お互いに平行か反平行の場合は既に調べられているが、これを任意の角度の場合に拡張し、スピン分裂の大きさ δ および近藤温度 T_K の表式をスケーリング法によって解析的に導出した。この結果、δ は左右のリードの分極方向の中間方向を量子化軸として生じ、リード

の分極率を p とすると $p\cos(\theta/2)$ に比例することを示した。また $\delta << T_K$ の場合には、$p\cos(\theta/2)$ の増加とともにドット中のスピンゆらぎが抑制されるので、T_K も低下することがわかった。さらに、スレーブ・ボソン平均場近似を用いて δ に対する T_K の依存性を調べ、近藤共鳴が δ によって分裂し T_K が低下することを明らかにした。これは近藤効果が弱まることを意味している。[48, 74]

＜受賞＞

[1] 小形正男、日本 IBM 科学賞。日本 IBM、2005 年 11 月 22 日。“新奇超伝導体における強相関領域での超伝導機構の理論的研究”

＜報文＞

(原著論文)

[2] J. Merino, H. Seo, and M. Ogata: Phys. Rev. B **71**, 125111-1-125111-5 (2005). “Quantum Melting of Charge Order due to Frustration in Two-Dimensional Quarter-Filled Systems”

[3] M. Udagawa, Y. Yanase and M. Ogata: Phys. Rev. B **71**, 024511-1-024511-11 (2005). “Effects of Fermi surface and superconducting gap structure in field-rotational experiments: A possible explanation for the cusplike singularity in YNi_2B_2C”

[4] M. Mochizuki, Y. Yanase and M. Ogata: Phys. Rev. Lett. **94**, 147005-1-147005-4 (2005). “Ferromagnetic fluctuation and possible triplet superconductivity due to the inter-orbital Hund's-rule coupling in $Na_{0.35}CoO_2{\cdot}1.3H_2O$: FLEX study of the multi-orbital Hubbard model”

[5] Y. Yanase, M. Mochizuki and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 430-444 (2005). “Multi-orbital analysis on the Superconductivity in $Na_xCoO_2 \cdot yH_2O$”

[6] T. Koretsune and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 1390-1393 (2005). “Development of Superconducting Correlation at Low Temperatures in the Two-dimensional t-J Model”

[7] C. Hotta, M. Ogata and H. Fukuyama: Phys. Rev. Lett. **95**, 216402-1 - 216402-5 (2005). “Interaction of the Ground State of Quarter-Filled One-Dimensional Strongly Correlated Electronic System with Localized Spins”

[8] Y. Yanase and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 1534-1543 (2005). “Kinetic Energy, Condensation Energy, Optical Sum Rule and Pairing Mechanism in High-T_c Cuprates”

[9] M. Mochizuki, Y. Yanase and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 1670-1673 (2005). “Ferromagnetic and triplet-pairing instabilities controlled by the trigonal distortion of the CoO_6 octahedra in $Na_xCoO_2 \cdot yH_2O$”

[10] T. Koretsune and M. Ogata: Phys. Rev. B **72**, 134513-1-134513-6 (2005). “Pairing correlation functions in the triangular t-J model: d-wave and f-wave superconductivity”

[11] Y. Yanase, M. Mochizuki and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 2568-2578 (2005). “Role of Spin-Orbit Coupling on the Spin Triplet Pairing in $Na_xCoO_2{\cdot}yH_2O$: I. d-Vector under Zero Magnetic Field ”

[12] H. Watanabe and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 2901-2904 (2005). “Charge Order and Superconductivity in Two-Dimensional Triangular Lattice at $n = 2/3$”

[13] M. Udagawa, Y. Yanase and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 2905-2908 (2005). “Formation of Non-Unitary State near the Upper-Critical Field of Sr_2RuO_4”

[14] Y. Tanaka and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 3283-3287 (2005). “Effects of Charge Ordering on the Spin Degrees of Freedom in One-Dimensional Extended Hubbard Model”

[15] Y. Yanase, M. Mochizuki and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 3351-3364 (2005). “Role of Spin-Orbit Coupling on the Spin Triplet Pairing in $Na_xCoO_2{\cdot}yH_2O$ II: Multiple Phase Diagram under the Magnetic Field”

[16] M. Kaneko and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 014710 (2006). “Mean-Field Study of Charge Order with Long Periodicity in θ-(BEDT-TTF)$_2$X”

[17] H. Watanabe and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, No. 6 (2006). “Novel Charge Order and Superconductivity in Two-Dimensional Frustrated Lattice at Quarter Filling”

[18] H. Seo, J. Merino, H. Yoshioka and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 051009 (2006). “Theoretical Aspects of Charge Ordering in Molecular Conductors”

[19] R. Shindou and K-i. Imura: Nucl. Phys. B **720**, 399 (2005). “Noncummtative geometry and non-abelian Berry phase in the wave-packet dynamics of Bloch electrons”

[20] R. Shindou and L. Balents: cond-mat/0603089. “Artificial electric field in Fermi Liquids”

[21] R. Shindou, K-i. Imura, and M. Ogata: preprint. “Characterization of 2D fermionic insulating states”

(会議抄録)

[22] M. Ogata, H. Yokoyama, Y. Yanase, Y. Tanaka, and H. Tsuchiura: The 7th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2004) (Sitges, 2004), J. Phys. Chem. Solids **67**, 37-40 (2006). “Kinetic energy pairing and condensation energy in cuprates”

[23] H. Yokoyama, Y. Tanaka, and M. Ogata: (SNS2004) J. Phys. Chem. Solids **67**, 47-49 (2006). “Stability of superconductivity and antiferromagnetism in two-dimensional Hubbard model with diagonal transfer”

[24] T. Watanabe, H. Yokoyama, Y. Tanaka, J. Inoue, and M. Ogata: (SNS2004) J. Phys. Chem. Solids **67**, 95-98 (2006). "Pairing Symmetry and Ferromagnetism in the t-J model on a Triangular Lattice"

[25] T. Watanabe, H. Yokoyama, Y. Tanaka, J. Inoue, and M. Ogata: (SNS2004) J. Phys. Chem. Solids **67**, 112-114 (2006). "Effect of Next-Nearest-Neighbor Transfer on Superconductivity and Antiferromagnetism in Two-Dimensional t-J Model"

[26] M. Mochizuki, Y. Yanase, and M. Ogata: The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems'04 (SCES'04), (Karlsruhe, 7.26-30, 2004) Physica B **359-361**, 594-596 (2005). "Ferromagnetic fluctuation and possible triplet superconductivity in $Na_{0.35}CoO_2{\cdot}1.3H_2O$: FLEX study of the multi-orbital Hubbard model"

[27] Y. Yanase, M. Mochizuki and M. Ogata: (SCES'04) Physica B **359-361**, 1351-1353 (2005). "Theoretical analysis on the multi-orbital model for the Superconductivity in Na_xCoO_2"

[28] T. Koretsune and M. Ogata: (SCES'04) Physica B **359-361**, 545-547 (2005). "Possible pairing symmetry in the two-dimensional t-J model on square and triangular lattices"

[29] Y. Tanaka, Y. Yanase and M. Ogata: (SCES'04) Physica B **359-361**, 591-593 (2005). "Superconductivity due to charge fluctuation in a triangular lattice"

[30] M. Udagawa, Y. Yanase and M. Ogata: (SCES'04) Physica B **359-361**, 536-538 (2005). "Theory of extracting superconducting gap structure from field-angle rotational experiments"

[31] T. Watanabe, H. Yokoyama, Y. Tanaka, J. Inoue, and M. Ogata: 17th International Symposium on Superconductivity (ISS2004), (Niigata, 2004), Physica C **426-431**, 289-294 (2005). "Variational Monte Carlo studies of a t-J model on an anisotropic triangular lattice"

[32] N. Yoshida and M. Fogelström: to be published in AIP Conference Proceedings (LT24). "Spin-dependent Proximity Effects in d-wave Superconductor/Half-metal heterostructures"

[33] R. Shindou, K-i. Imura, and M. Ogata: to be published in AIP Conference Proceedings (LT24). "Disorder operator in 2D insulating states"

(学位論文)

[34] 田中康寛："Charge ordering and Superconductivity in Organic Conductors" (東京大学大学院理学系研究科・博士論文)

[35] 金子真人："Mean-field study of charge order in θ =(BEDT-TTF)$_2$X" (θ =(BEDT-TTF)$_2$X における電荷秩序状態の平均場近似による研究) (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)

[36] 萬 直行："Effect of disorder on the superconducting transition in granular metals" (グラニュラー金属での超伝導転移に対する乱れの効果) (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[37] H. Watanabe and M. Ogata: First NAREGI International Nanoscience Conference (Nara, 2005, 6.14-6.18) "Charge order and superconductivity in two-dimensional electron systems: Effect of nearest-neighbor Coulomb interactions"

[38] R. Igarashi and M. Ogata: First NAREGI International Nanoscience Conference (Nara, June 14-17, 2005) "Frustration effect in a two-dimensional antiferromagnetic XY spin model"

[39] Y. Tanaka and M. Ogata: The Internatinal Symposium on Molecular Conductors (Hayama, 2005, 7.17-7.21) "Spin susceptibility of one-dimensional extended Hubbard model at quarter filling"

[40] C. Hotta, M. Ogata and H. Fukuyama: The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems'05 (SCES'05) (Vienna Austria, 2005, 7.26-7.30) "Ground state properties of the one-dimensional quarter-filled strongly correlated electrons interacting with S=1/2 Kondo spins"

[41] M. Mochizuki, Y. Yanase and M. Ogata: (SCES'05) "Electronic, magnetic and superconducting properties of $Na_xCoO_2{\cdot}yH_2O$: Theoretical study of multi-orbital Hubbard model"

[42] Y. Yanase, M. Mochizuki and M. Ogata: (SCES'05) "Role of Spin-Orbit Interaction on the Superconductivity in $Na_xCoO_2 \cdot yH_2O$: Phase Diagram under the Magnetic Field"

[43] T. Koretsune and M. Ogata: (SCES'05) "Effective mass divergence in the infinite-U Hubbard model"

[44] Y. Tanaka and M. Ogata: (SCES'05) "Spin susceptibility of one-dimensional extended Hubbard model at quarter filling"

[45] H. Watanabe and M. Ogata: (SCES'05) "Charge order and superconductivity in two-dimensional electron systems: Effect of nearest-neighbor Coulomb interactions"

[46] N. Yoshida: 24th International Conference on Low Temperature Physics (Orlando, Florida, 2005, 8.10-8.17) "Spin-dependent Proximity Efeects in d-wave Superconductor/Half-metal Heterostructures"

[47] Y. Yanase: International ICAM Workshop NMR/EPR of Correlated Electron Superconductors (Dresden, Germany, Oct. 2005) "Microscopic Inhomogeneity of Spin Fluctuation and SC Fluctuation in high-Tc cuprates."

[48] D. Matsubayashi and M. Eto: International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2006 (MS+S2006), (NTT R& D Center, Atsugi, 2006, 2.27-3.2) “The Kondo effect in a quantum dot coupled with noncollinear ferromagnetic leads”

[49] M. Mochizuki, Y. Yanase and M. Ogata: 2006 APS March Meeting (Baltimore, 2006, 3.13-3.17) Session R39.11 “Band Structures, Fermi Surface Topology and Superconductivity in $Na_xCoO_2 \cdot yH_2O$: Effects of the trigonal CoO_6 distortion”

[50] M. Udagawa, Y. Yanase and M. Ogata: 2006 APS March Meeting (Baltimore, 2006, 3.13-3.17) Session B39.09 “Formation of non-unitary state near the upper-critical field of Sr_2RuO_4”

[51] Y. Tanaka and M. Ogata: First France-Japan Advanced School on Chemistry and Physics of Molecular Materials (CPMM) (Rennes, 2006, 3.19-23) “Quantum Monte Carlo study of charge order phase transition in two-dimensional electron systems”

[52] H. Watanabe and M. Ogata: First France-Japan Advanced School on Chemistry and Physics of Molecular Materials (CPMM) (Rennes, 2006, 3.19-23) “Anomalous Charge Order and Superconductivity in Organic Conductor θ-$(ET)_2X$”

招待講演

[53] M. Ogata: Miniworkshop on Strongly Correlated Electron Systems (Hong Kong, November 4-10, 2005). “Mott Tarnsition and Superconductivity in Two-Dimensional t-t'-U Hubbard model”

[54] M. Ogata: CREST International Workshop “Highlights and New Perspectives in Strongly Correlated Electronic Systems” (Tokyo, January 11-12, 2006) “Relating t-J and Hubbard model”

[55] M. Ogata: 2006 Gordon Research Conference on Superconductivity (Santa Ynez Valley Marriot, California, January 22-27, 2006) “Microscipic Theories for Anisotropic Superconductivity in $Na_xCoO_2{\cdot}yH_2O$”

[56] M. Ogata: 2006 APS March Meeting (Baltimore, 2006, 3.13-3.17) Session Y6, Invited Symposium “Is the Hubbard/t-J Model a High Temperature Superconductor?” Y6.04 “Superconducting correlations and thermodynamic properties in 2D square and triangular t-J model”

(国内会議)

一般講演

[57] 小形正男、福山秀敏：同志社大学 2005, 9.19-9.22 （秋期大会）21pYG7 “Zn、Ni 不純物近傍の電子状態：t-J モデルによる描像”

[58] 小形正男、C.-M. Ho、C.-P. Chou、T. K. Lee：同志社大学 2005, 9.19-9.22 （秋期大会）19pYJ14 “t-J モデルでのトンネルスペクトルの非対称性の可能性について”

[59] 柳瀬陽一、宇田川将文、望月維人、小形正男：同志社大学 2005, 9.19-9.22 （秋期大会）21aXD1 “$Na_xCoO_2(H_2O)y$ におけるスピン三重項超伝導と磁場中相図：軌道効果，常磁性効果とスピン-軌道相互作用”

[60] 柳瀬陽一、小形正男：同志社大学 2005, 9.19-9.22 （秋期大会）19pYJ10 “高温超伝導体における超伝導揺らぎと磁気揺らぎの微視的な不均一性”

[61] 横山寿敏、小形正男、田仲由喜夫：同志社大学 2005, 9.19-9.22 （秋期大会）19pYJ11 “2 次元ハバードモデルにおける超伝導状態”

[62] 望月維人、柳瀬陽一、小形正男：同志社大学 2005, 9.19-9.22 （秋期大会）21aXD3 “多軌道型超伝導体 $Na_xCoO_2 \cdot yH_2O$ における軌道自由度に由来する物性現象”

[63] 吉田亘克：同志社大学 2005, 9.19-9.22 （秋期大会）“超伝導体・ハーフメタルヘテロ構造系における超伝導および磁気的近接効果の理論”

[64] 妹尾仁嗣、Jaime Merino、筒井健二、小形正男：同志社大学 2005, 9.19-9.22 （秋期大会）19pWB6 “フラストレーション下の電荷秩序系の性質”

[65] 堀田知佐、小形正男：同志社大学 2005, 9.19-9.22 （秋期大会）19aWB2 “局在スピンとカップルした 1/4-filling の 1 次元電子系の電荷秩序 II”

[66] 田中康寛、小形正男：同志社大学 2005, 9.19-9.22 （秋期大会）21aWB9 “擬一次元有機導体における超伝導の摂動論による解析”

[67] 田中康寛、小形正男：同志社大学 2005, 9.19-9.22 （秋期大会）19aWB3 “1/4 フィルド電子系の有限温度における電荷秩序転移の性質”

[68] 宇田川将文、柳瀬陽一、小形正男：同志社大学 2005, 9.19-9.22 （秋期大会）22aYJ8 “Sr_2RuO_4 の上部臨界磁場近傍における比熱の振舞いについて”

[69] 渡部洋、小形正男：同志社大学 2005, 9.19-9.22 （秋期大会）19pWB7 “θ-$(ET)_2X$ における 3 倍周期電荷秩序とその近傍での超伝導の可能性”

[70] 小形正男、福山秀敏：愛媛大学・松山大学 2006, 3.27-3.30 (年会) 30pTD1 “Zn、Ni 不純物近傍の電子状態：t-J モデルによる描像 II”

[71] 宇田川将文、柳瀬陽一、小形正男：愛媛大学・松山大学 2006, 3.27-3.30 (年会) 28aTC6 “Sr_2RuO_4 の磁場中多重相図の準古典理論による解析”

[72] 渡部洋、小形正男：愛媛大学・松山大学 2006, 3.27-3.30 (年会) 27pRB12 “θ-$(ET)_2X$ における 3 倍周期電荷秩序とその近傍での超伝導の可能性 II”

[73] 金子真人、小形正男：愛媛大学・松山大学 2006, 3.27-3.30 (年会) 27pRB13 “θ-$(BEDT\text{-}TTF)_2X$ における長周期電荷秩序状態”

[74] 松林大介、江藤幹雄：愛媛大学・松山大学 2006, 3.27-3.30 (年会) “noncollinear な強磁性リードと結合した量子ドットにおける近藤効果”

[75] 渡部洋：第 1 回 21 世紀 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム (東京大学 小柴ホール 2005, 11.21-22) “フラストレーションがもたらす新たな電荷秩序状態とその応用”

[76] 渡部洋、小形正男：新物性の理論研究会、(岡崎コンファレンスセンター 2005, 11.22-23) “θ-$(ET)_2X$ における電荷秩序と電荷揺らぎによる超伝導の可能性”

[77] 金子真人、小形正男：新物性の理論研究会、(岡崎コンファレンスセンター 2005, 11.22-23) “θ-$(BEDT\text{-}TTF)_2X$ における電荷秩序状態の平均場近似による研究”

[78] 渡部洋、小形正男：京都大学基礎物理学研究所 短期研究会「異方的超伝導現象の統一的理解を目指して」(京都大学 2005, 12.6-12.8) “有機導体 θ-$(ET)_2X$ における 3 倍周期電荷秩序と電荷揺らぎによる超伝導の可能性”

[79] 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相の物理」領域発足研究会 (東京大学 2005, 12.15-12.16) “Two-dimensional Fermion Systems in Triangular Geometry and its Future”

[80] 柳瀬陽一、望月維人、宇田川将文、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相の物理」領域発足研究会 (東京大学 2005, 12.15-12.16) “Microscopic Theory on the Multi-component Superconducting Order Parameter in Sr2RuO4 and $Na_xCoO_2\cdot yH_2O$”

[81] 小形正男、田中康寛、渡部 洋、金子真人：特定領域研究「新しい環境下における分子性導体の特異な機能の探索」第 4 回シンポジウム (東京大学 2006, 1.9-1.11) “θ 型を念頭においた電荷秩序と超伝導”

[82] 柳瀬陽一、小形正男：特定領域研究「異常量子物質の創生-新しい物理を生む新物質-」2005 年度成果報告研究会 (東北大学 2006, 1) “反強磁性と超伝導の多重臨界領域における乱れの効果”

招待講演

[83] 小形正男：金研共同利用ワークショップ「高温超伝導体における特異な電子状態と物性」(東北大学 2005, 8.24-8.25) “t-J モデルとハバードモデルにおける超伝導の数値的研究”

[84] 柳瀬陽一：金研共同利用ワークショップ「高温超伝導体における特異な電子状態と物性」(東北大学 2005, 8.24-8.25) “高温超伝導体におけるスピン揺らぎ・超伝導揺らぎとランダムネス”

[85] 小形正男：特別推進研究「4 次元空間中性子探査装置の開発と酸化物高温超伝導体の研究」研究会「量子ビームによる高温超伝導機構の解明」(五浦観光ホテル 2005, 11.1-11.2) “Previous and Recent Studies of High-T_c Superconductors”

[86] 小形正男：佐々木学術シンポジウム—高温超伝導体発見から足掛け 20 年— (東京大学 2005, 12.1-12.2) “銅酸化物以外のエキゾチック強相関超伝導を求めて”

[87] 小形正男：京都大学基礎物理学研究所短期研究会「異方的超伝導現象の統一的理解を目指して」(京都大学 2005 12.6-12.8) “t-J モデル、ハバードモデル、モット絶縁体”

[88] 柳瀬陽一：京都大学基礎物理学研究所短期研究会「異方的超伝導現象の統一的理解を目指して」(京都大学 2005 12.6-12.8) “$Na_xCoO_2\cdot yH_2O$’ における多軌道型超伝導と多成分秩序変数：Sr_2RuO_4, UPt_3 との関連も含めて”

(セミナー)

[89] M. Ogata: ETH theory group seminar, 2005 August 3. “Microscopic Theories for Anisotropic Superconductivity in $Na_xCoO_2{\cdot}yH_2O$”

[90] 小形正男、田中康寛、妹尾仁嗣、渡部洋、金子真人：東京大学総合文化研究科相関基礎科学系 合同セミナー 2006 年 1 月 19 日 “2 次元有機伝導体における電荷秩序と電荷揺らぎによる超伝導の可能性”

[91] 柳瀬陽一、望月維人、宇田川将文、小形正男：名古屋大学理学部「コバルト系超伝導に関するミーティング」名古屋大学 2005 年 5 月 “$Na_xCoO_2\cdot yH_2O$’ における多軌道型超伝導理論：スピン-軌道相互作用と磁場中相図のミクロ理論”

[92] 柳瀬陽一、望月維人、宇田川将文、小形正男：京都大学理学部凝縮系物理学研究室セミナー京都大学 2005 年 7 月 “コバルト系酸化物におけるスピン三重項超伝導：D-vector と磁場中相図”

[93] 柳瀬陽一：東京大学理学部物性セミナー 東京大学 2006 年 1 月 “複数の秩序変数を持つ超伝導の微視的理論”

[94] 吉田亘克：Institute of Physics, Academica Sinica (Taipei 2005,11.17) “Theory of Spin-dependent Proximity Efeects in d-wave Superconductor/Half-metal Heterostructures”

3.5 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２成分量子系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。

3.5.1 固体表面の電子状態と化学反応

有機分子/Si(100) 表面吸着系への強電場の影響の評価

走査トンネル顕微鏡 (STM) や走査トンネル分光 (STS) は表面科学の実験手法として欠くことのできないものであるが，その際に印加される電場は 1V/Åにも達する。これは我々の感覚からすれば「強電場」であるが，ナノスケールの系に対して構造や電子状態に及ぼす影響についての定量的な評価はまだ殆んど試みられていない。電場をかけない他の観察手法（UPS，HREELS など）によって得られた結果と組み合わせて議論を展開すること対して確たる基礎づけが与えられていないのである。

そこで，電場による効果として・ 吸着子由来の状態が基板由来の状態に対してエネルギーシフトを起こす・吸着子の構造に自由度があるとき，複数の構造間で相対的な安定性が変化する・ 分極や有機電荷によって特定の振動モードに影響があらわれるなどの事柄に注目し，これが有意な差として測定結果に顔を出すのかどうかを第一原理的な手法によって評価した。密度汎関数理論に基づく第一原理計算の枠組みの中で電場を扱うための方法としては，物性研究所の大谷・杉野によって提案された ESM (Effective Screening Medium) 法を採用した。

その結果，例えば昨年度までに詳細に吸着構造および電子状態を調べてきた「1,4-シクロヘキサジエン (C_6H_8)/Si(001)」系を選び，その 0.5ML 吸着系に 0.3V/Åの電場（6V 程度のサンプルバイアスに相当）を印加した場合には，

・ 吸着子由来の局所状態密度のピークは基板由来のピークに対して最大 0.6eV 程度シフトし，各軌道のシフト量は拡がりや位置に依存している・ 電場の効果による吸着子の構造が変化を受けることはない・最も振動数変化の大きな top most の C-H 伸縮でも，その変化量はたかだか 0.5%である。

といった知見を得た（図 3.5 a）。この分子は比較的緩やかな応答をするものであったが，芳香族的な電子状態を持つ分子では特に電子状態の電場への応答が大きく，現実的な電場の大きさで吸着系の HOMO-LUMO の分布がスイッチングされる可能性なども明らかになってきた。このように，STM/STS の実験結果を解釈する際に我々が持つべき「感覚」を定量的に提示し，異なる実験手法の間での議論に足場を与えることができるようになった。

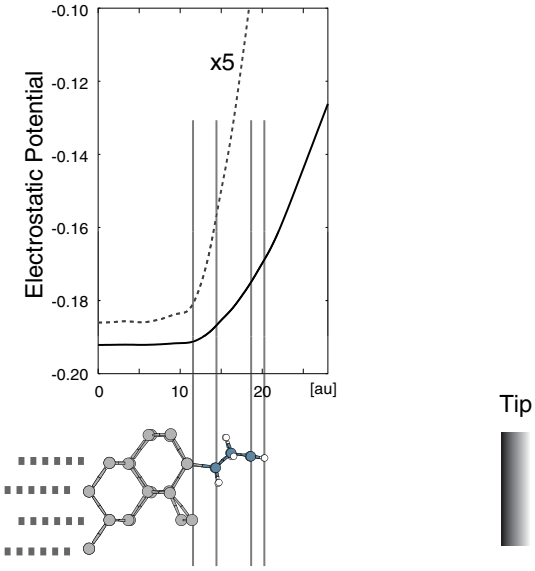


図 3.5 a: Si(100) 清浄表面に 1,4-シクロヘキサジエン分子を 0.5ML の被覆率で di-σ 吸着した系に 0.3V/Å の電場をかけたときの静電ポテンシャルプロファイル。点線は縦軸を 5 倍に拡大したもの。左側はシリコン基板内部になり、STM チップは右側に位置する。ポテンシャルは真空領域はリニアであるが、吸着分子にかかる付近から曲率が変化し、シリコン最表面でほぼ平坦になっている様子が分かる。これは分子が遮蔽に寄与していることを表わしており、電場をかけることで分子由来の軌道のエネルギーが基板由来の軌道のエネルギーに対して相対的にシフトすることが期待される。この図の条件の場合、そのシフト量は 0.6eV と見積もられた。

Si 表面系の有機化学

従来の有機化学の概念を拡張してシリコン表面での有機分子の化学吸着プロセスを系統的に理解する試みの一環として，プロペンや 2-メチルプロペンといった２重結合のまわりに非対称な分子について物性研究所の吉信研究室（実験）と研究を進めた。その結果，Si(100) 表面のダウンダイマーサイトを求電子試薬と解釈すれば，化学吸着状態への前駆体が「マルコフニコフ則」におけるカルボカチオン型中間体として理解できることが明らかとなり，実験で見られる位置選択型の反応プロセスも有機化学の言葉で理解できた。

3.5.2 強誘電体と不純物効果

ペロブスカイト型酸化物中にドープした Mn の第一原理電子状態計算

Mn は電子部品として多用されるペロブスカイト型 $ATiO_3$(A=アルカリ土類金属) 酸化物材料への典型的な微量添加元素であり，酸素欠陥の生成によって放出された電子に対するアクセプターとして働くことが知られている。ESR(Electron Spin Resonance) 等の測定方法により測定温度に対する Mn 価数の複雑な変化と電気抵抗等との関係について以前から報告がなされているが，未だ十分に解釈がなされているとは言い難い。我々はこれらの現象解明を目的とし，密度汎関数法に基づく第一原理電子状態計算手法によりペロブスカイト酸化物（$SrTiO_3$, $BaTiO_3$）中にドープした Mn の電子状態が酸素欠陥や格子定数変化から受ける影響を計算した。これにより従来報告されている実験結果に理論的な解釈を与えるとともに，実験的には報告されていない新たな構造 (格子歪) の存在を予測した。ペロブスカイト中の Mn は酸素欠陥とペアを組んで安定化し，これによって Mn の電子状態は $(t_{2g})^5$ の High Spin 状態S=5/2(Mn^{2+}) になり，良好なアクセプターとして振舞うことが示された。また Mn に対して遠方に酸素欠陥が生成した場合，フェルミレベル付近に位置する Mn-3d 軌道の電子占有数は $BaTiO_3$ の構造相転移や体積変化に伴う配位子場の影響を受けやすく，これが Mn の価数の複雑な変化の原因である事を明らかにした。さらに，Cubic Phase $SrTiO_3$ 中における Mn を中心とした酸素 8 面体は，Mn^{4+} から Mn^{2+} に変化する際に 3 軸等方的な回転歪を伴って安定化することを示し，この歪が $SrTiO_3$ 中で Mn が High Spin 状態を達成するために重要な役割を果たしていることを予測した。

$BaTiO_3$ 中の水素原子の働きについて

絶縁体ペロブスカイト酸化物中に進入した水素は，酸化物の絶縁性を低下させることが知られており，セラミックスコンデンサの実装に鉛フリー半田を用いた場合に顕著に現れる現象として問題になっている。また，水素雰囲気下におけるセラミックスの焼成は多くの電子部品の製造過程で行われており，ペロブスカイ型酸化物と水素に関係する現象の理解は電子部品の製造という視点からも重要な問題である。ところが，これら絶縁体ペロブスカイト中の水素については理論的な解釈がほとんど進んでいない。今回我々が $BaTiO_3$ 中の水素原子について第一原理計算を行った結果，下記の特徴があることが明らかになった。

無欠陥の $BaTiO_3$ においては，水素原子は格子間に入り込み酸化物を構成する酸素と結合・反結合軌道を形成する。フェルミレベルのシフトやマリケン解析からこの場合の水素はドナーとしてプラスにイオン化し，$BaTiO_3$ の絶縁性が低下する原因であることが示された。また，$BaTiO_3$ 中に酸素欠陥がある場合は，欠陥位置には二つの水素原子が入り込み，水素分子状の構造をとって安定化することが計算から予測された。この場合水素はアクセプターとしてマイナスにイオン化し，逆に絶縁性を若干向上させると考えられる。これらの結果は，最近報告されたスパッタリング法によって作製された $(Ba,Sr)TiO_3$ 薄膜において多量の水素がペロブスカイト中にあるにもかかわらず，絶縁性劣化が起こらない現象の理論的裏づけにもなっている。

3.5.3 超高圧下の物質変化

YH_3 の高圧下での絶縁体金属転移

金属水素化物である YH_x $(x = 1-3)$ は，$x = 2$ までは金属，$x = 3$ では絶縁体である。Y 薄膜を水素ガスにさらすと，ガス圧に応じて可逆的に金属絶縁体転移を起こすことが知られており，薄膜は金属の時だけ鏡のように光を反射することから，switchable mirror effect と呼ばれている。最近，絶縁体である YH_3 を超高圧圧縮すると金属転移することが，SPring-8 の青木勝敏らのグループによって発見された。この変化の前後で Y 格子は完全な fcc 構造を保ち（水素位置は不明），格子定数は滑らかに変化するのみであるのに対し，光学的なギャップは 1eV 程度の大きさから突然ゼロになるように見えることから，電子転移の機構に興味がもたれている。そこで第一原理電子状態計算手法を用いて，この圧力誘起電子相転移を詳細に検討している。

通常使われている密度汎関数理論では，YH_3 は常圧においてもバンドギャップの閉じた金属として計算されてしまう。これはおそらくは交換相関ポテンシャルに対する近似 (LDA, GGA など）の問題である。そこで今回は多体摂動論の一種である GW 法を使うことにした。ただし，通常の GW 法は密度汎関数法で計算された波動関数をもとにしているため，YH_3 のように密度汎関数法で絶縁体にならないものへの適用には危険である。そこで，自己無撞着な方程式を使うことで密度汎関数法の結果に依存しないように GW 法を改良した QPscGW 法を採用した。計算の結果，実験で絶縁体金属転移が観測された格子定数付近で，バンドオーバーラップ機構によって金属転移が起きること，またそれより低圧では第 1 ギャップが光学禁制であることがわかった。実験で不連続にギャップが閉じるように見えるのは，転移点より低圧側で第 2 ギャップが観測されているためであると考えられる。

圧力一定第一原理分子動力学法の開発と C60 ポリマーへの応用

圧力一定第一原理分子動力学法は，密度汎関数理論に基づき原子間相互作用を非経験的に計算しながら，任意の設定圧力のもとで原子を動かすことのできる手法であり，実験情報の少ない超高圧下の物質構造を探る上でますます重要性が高まりつつある。当研究室では，過去にノルム保存型擬ポテンシャル

のみに対応したプログラムを作成して，さまざまな物質の圧力誘起構造変化の研究に応用してきた実績がある。この擬ポテンシャルは扱いが容易である半面，遷移金属や第 1 周期の軽元素の計算に時間がかかるという難点があった。そこで今回新たに，より汎用性の高いウルトラソフト擬ポテンシャルにまで対応したプログラムを作成した。その最初の応用計算として，最近実験で合成された 3 次元 C60 ポリマーの構造最適化と電子状態計算を行い，この系が金属になることを示した。これは，半導体となる 2 次元ポリマーと異なり，π 電子系のつくるケクレ構造が結合によって切断されるためであると思われる。

3.5.4 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

密度汎関数理論 (Density Functional Theory, DFT) は固体の第一原理電子状態計算の基礎理論として最もよく知られたものである。DFT では，いわゆる相関交換ポテンシャルに対して適切な近似を用いることによって，固体中の電子密度分布，バンド構造，全エネルギー，格子振動数などを非経験的に，定量的に評価することができる。このとき，電子系の多体波動関数ではなく，一電子密度分布（もしくは平均場中の一電子波動関数）を扱えば良いというのが，DFT の優れた点である。

一方で，現在の近似に基づく DFT の限界もまた明らかになりつつある。たとえば固体の凝集エネルギーや表面吸着エネルギーの精度が悪い，とくにファンデルワールス相互作用の評価ができない，化学反応の活性障壁や半導体のバンドギャップが過小評価される，電子相関効果による絶縁体が記述できないといった点である。高圧物性研究の大問題である固体水素の金属化を例にとると，通常の DFT 計算では，高圧実験で金属化の認められない低い圧力でバンドオーバーラップによる金属化が起きてしまうことが知られている。さらに深刻な問題として，DFT で用いられる相関交換ポテンシャルに関して，近似の精度を系統的に向上する方法が無いことがあげられる。そこで我々は，DFT を使った物性研究を続ける傍ら，波動関数理論 (Wave Function Thory, WFT) の一種であるトランスコリレイティッド (TC) 法に基づく固体の電子状態計算の実現を目指して基礎研究を行っている。

WFT でもっとも良くられているのは，全波動関数を一電子軌道のスレーター行列式 1 個で記述するハートリー・フォック (HF) 法であるが，HF 法を固体に適用した場合，金属のフェルミ準位で状態密度がゼロになる，あるいは半導体のバンドギャップが実際の数倍まで過大評価されるといった重大な問題が生じることが知られている。これは HF 法で電子相関効果が無視されるためである。TC 法は，電子間距離に依存する重み因子であるジャストロウ関数 F をスレーター行列式に掛けることによって，電子相関効果を取り入れる。さらにハミルトニアン $\mathcal{H}$ を F によって相似変換して得られた有効ハミルトニアン ($\mathcal{H}_{\rm TC} = F^{-1}\mathcal{H}F$) に対して，エネルギー分散を最小化するような変分操作を行うことにより，一電子軌道の満たすべき自己無撞着方程式を得るというものである。この方程式の固有値には，HF 法におけるクープマンの定理と同様の意味があるため，全エネルギー計算と同時に固体のバンド構造を得ることができる。ハバードモデルもような格子模型に対しては，ジャストロウ関数の代わりにグッツビラー因子を用いることで，まったく同じ定式化ができる。

TC 法は HF 法に比べて原理的に優位な特徴をもつが，HF 法には無かった 3 体積分が必要となるため実装が難しく，とくに周期系では不用意な近似を行った場合に長距離相互作用の項から発散の問題が生じる困難があるため応用例が無かった。そこで我々はハバードモデルに TC 法を適用してその方法論としての特性を調べる一方，平面波を基底関数に用いた第一原理 TC 法のプログラム開発を行ってきた。今年度その第 1 版が完成し，ダイヤモンド構造をもつ Si と C のバンド計算を行った結果，ハートリー・フォック法で過大評価されていたバンドギャップが大幅に改善し，実測値に近づくことがわかった（図 3.5 b）。これはジャストロウ因子によってスクリーニング効果が取り入れられたためであると考えられる。

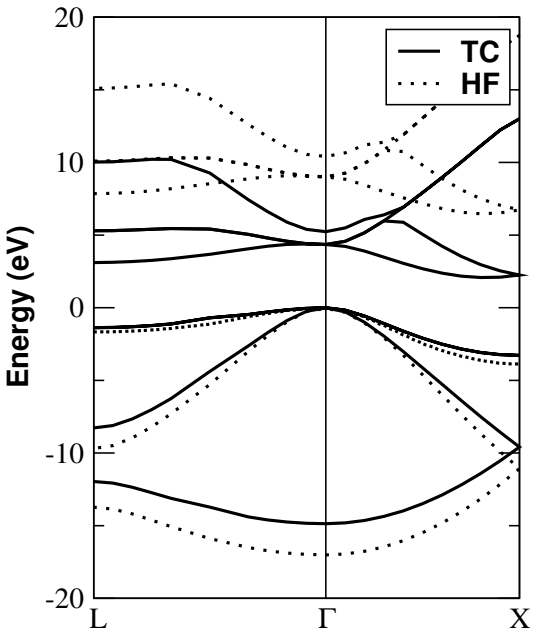


図 3.5 b: トランスコリレイティッド法（実線）とハートリー・フォック法（破線）によって計算されたシリコンのバンド構造。

第一原理計算に基づくモデルハミルトニアンの構築

遷移金属や遷移金属酸化物などの解析で重要なパラメータであるオンサイト有効クーロン斥力 U を，最局在ワニエ関数と制限付き密度汎関数法によって第一原理的に評価する為の方法論開発を行い，汎用バンド計算プログラム「東京大学 ab initio program package (TAPP)」への組み込みを行った。東京大学物性研究所の「SR11000」にて高速稼動させる為のチューニングを行い，計算時間をパソコンを用いた場合に比べて 1/40 まで短縮化させることに成功した。これまでにこの手法を用いて，3d 遷移金属（Sc〜Cu）の d 軌道について U の評価を行い，実験でわかっていた物質依存性の起源を明らかにする成果をあげている（図 3.5 c）。現在は，上記の手法を用いたモデルハミルトニアン構築とこの多体ハミルトニアンを効率的に解くための計算アルゴリズムの開発を行っている。

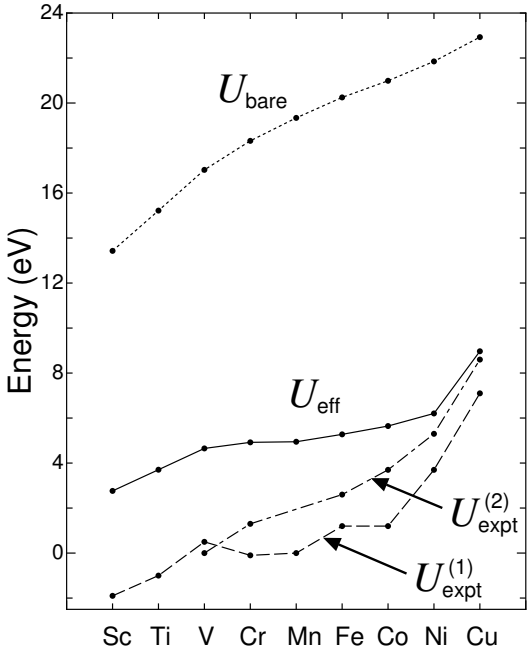


図 3.5 c: 遷移金属 3d 軌道の裸のクーロン斥力 U_{bare} と，最局在ワニエ関数および制限付き密度汎関数法を使って計算されたクーロン斥力 U_{eff}。スクリーニング効果の繰り込まれた後者の U は，実測値（$U^{(1)}_{\mathrm{expt}}$: E. Antonides et al. (1977), $U^{(2)}_{\mathrm{expt}}$: L.I. Yin et al. (1977)）を半定量的に再現する。

非経験的モデルハミルトニアンの構築・解析は「ダウンフォールディング」と呼ばれ，現行の密度汎関数理論に基づく第一原理計算では直接的には取り扱うことの難しい問題 (強相関電子系，電子励起状態など) を間接的ではあるが非経験的なやり方で取り扱うための方法として近年注目を集めている。多体ハミルトニアンに対する解法として配置間相互作用 (CI) 計算を採用し，光学吸収スペクトルを計算するプログラムの開発を進めている。固体での CI 計算は過去に例がなく，実現されれば世界初の試みとなる。

＜報文＞

(原著論文)

[1] N. Umezawa1, S. Tsuneyuki, T. Ohno, K. Shiraishi and T. Chikyow, A Practical Treatment for the Three-body Interactions in the Transcorrelated Variational Monte Carlo Method: Application to Atoms from Lithium to Neon, J. Chem. Phys., 122 (2005) 224101.

[2] H. Kageshima, M. Uematsu, K. Akagi, S. Tsuneyuki, T. Akiyama and K. Shiraishi, Mechanism of oxide deformation during silicon tehrmal oxidation, Physica B 376-377 (2006) 407.

[3] R. Sakuma and S. Tsuneyuki, Electronic structure calculations of solids with a similarity transformed Hamiltonian, submitted.

[4] K.Nakamura, R. Arita, Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki, First-principles Calculation of Effective Onsite Coulomb Interactions of 3d Transition Metals: Constrained Local Density Functional Approach with Maximally Localized Wannier Function, submitted.

(学位論文)

[5] （修士論文）小杉太一, Theoretical study of polymerized fullerene, the University of Tokyo (2006).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[6] Kazuto Akagi and Shinji Tsuneyuki: Adsorption Structure and Electronic State of "Unsaturated-Hydrocarbon/Si(001)" Interface: A First-Principles Approach, 1st NAREGI International Nanoscience Conference, Nara, Japan, Jun. 16, 2005.

[7] Kazuto Akagi and Shinji Tsuneyuki: Chemisorption Process of Alkene and Alkyne Molecules on a Si(001) Surface, 3rd International Conference on Materials for Advanced Technologies, Singapore, Singapore, Jul. 5 2005.

[8] Kazuto Akagi and Shinji Tsuneyuki: Unsaturated hydrocarbon molecules chemisorbed on Si(001) surface in electric field: A first-principles approach, ECOSS-23 (The 23rd European Conference on Surface Science), Berlin, Germany, Sep. 6, 2005.

[9] Kazuto Akagi, Minoru Otani, Osamu Sugino and Shinji Tsuneyuki: "Unsaturated hydrocarbon / Si(001)" systems in electric field: A first-principles approach", Ψ-k 2005 Conference, Scwaebisch Gmund, Germany, Sep. 17, 2005.

[10] Kazuto Akagi, Minoru Otani, Osamu Sugino and Shinji Tsuneyuki: Adsorption Structure and Electronic State of "Unsaturated-Hydrocarbon/Si(001)" Interface: A First-Principles Approach, 4th International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, Omiya, Japan, Nov. 16, 2005.

[11] Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki: Continuum Modeling of The Strain-Induced Nano-Pattern In N/Cu(001) Surface by First-Principles Calculations, Ψ-k 2005 Conference, Sep. 17, 2005.

[12] Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki: First-principles study and modeling of strain relaxation involved with self-organizing nano-pattern of N/Cu(001), International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, Nov. 14, 2005.

[13] Kazuma Nakamura, Ryotaro Arita, Yoshihide Yoshimoto, and Shinji Tsuneyuki: First-principles calculation of Hubbard parameter; Constrained local density functional approach with Maximally localized Wannier function, 1st NAREGI International Nanoscience Conference, Nara, Japan, June 14-17, 2005.

[14] Kazuma Nakamura, Ryotaro Arita, Yoshihide Yoshimoto, and Shinji Tsuneyuki: First-principles calculation of Hubbard parameter; Constrained local density functional approach with Maximally localized Wannier function, Ψ-k conference 2005, Schwabisch Gmund, Germany, September 17-21, 2005.

[15] Kazuma Nakamura, Ryotaro Arita, Yoshihide Yoshimoto, and Shinji Tsuneyuki: First-principles calculation of Hubbard parameter; Constrained local density functional approach with Maximally localized Wannier function, 2006 March Meeting Edition Bulletin of the American Physical Society, Baltimore, USA, March 13-17, 2006.

[16] Rei Sakuma and Shinji Tsuneyuki : The transcorrelated method for first-principles study of solids, Ψ-k 2005 conference, Schwäbisch Gmünd, Germany, September 17-21, 2005.

招待講演

[17] S. Tsuneyuki: A New Wave Function Theory for Solids under Extreme Condition, The 3rd Meeting of the Study of Matter at Extreme Conditions (SMEC2005), Miami, USA, April 17-21, 2005.

[18] S. Tsuneyuki and Y. Yoshimoto, First-Principles Study of Self-Organization at N/Cu(001) Surface, The 4th International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-4), Omiya, Japan, November 14-17, 2005.

[19] S. Tsuneyuki, R. Sakuma and N. Umezawa, Transcorrelated method: A new first-principles theory for solids, PACIFICHEM 2005, Honolulu, Hawaii, December 15-20, 2005.

(国内会議)

一般講演

[20] 常行真司:「量子化学的手法による固体の第一原理電子状態計算」, 学術創成研究「新しい研究ネットワークによる電子相関系の研究-物理学と化学の真の相関を目指して」全体会議, 犬山, 2006 年 1 月 30 日, 2 月 1 日.

[21] 常行真司:「第一原理からのアプローチ」, 理研シンポジウム「電子複雑系科学」研究会, 理研 (和光), 2006 年 2 月 18 日.

[22] 赤木和人, 加藤浩之, 川合真紀, 常行真司:「Si(001) 表面における水分子の解離反応および H/D 交換反応: 水素結合形成による反応性変化の理論計算による検討」, 固体における水素の科学, 物性研究所, 2005 年 11 月 24 日.

[23] 赤木和人, 大谷実, 杉野修, 常行真司:「「不飽和炭化水素／ Si(001)」吸着系への電場の影響の第一原理計算による評価半導体表面に吸着した有機分子への電場効果」, 日本物理学会 年次大会, 松山 (愛媛), 2006 年 3 月 29 日.

[24] 中村和磨, 有田亮太郎, 吉本芳英, 常行真司: 「First-principles Calculation of Effective Hubbard Parameter: Constrained Local Density Functional Approach with Maximally Localized Wannier Function」, 物性研究所短期研究会「次世代ナノエレクトロニクスのための電子状態計算の基礎理論」, 物性研究所, 2004 年 12 月 26-27 日.

[25] 中村和磨, 有田亮太郎, 吉本芳英, 常行真司: 「第一原理からの CNDO モデルハミルトニアン構築: グラファイトへの応用」, ミニワークショップ 「beyond LDA としての新しい電子状態計算手法」, 東京大学, 2006 年 2 月 22-23 日

[26] 中村和磨, 有田亮太郎, 吉本芳英, 常行真司: 「第一原理からの CNDO モデルハミルトニアン構築: グラファイトへの応用」, 2006 日本物理学会春季大会, 愛媛・松山大学, 2006 年 3 月 27-30 日

[27] 岩崎誉志紀, 鈴木利昌, 茶園広一, 常行真司:「$BaTiO_3$ 中にドープした Mn の第一原理電子状態計算」日本セラミックス協会, 第 18 回秋季シンポジウム,2005 年 9 月 27 日.

[28] 岩崎誉志紀, 鈴木利昌, 茶園広一, 常行真司:「$SrTiO_3$ 中にドープした Mn に関する第一原理計算」第 53 回応用物理学関係連合講演会,2006 年 3 月 25 日.

[29] 佐久間怜:「トランスコリレイティッド法による固体の電子状態計算」, 平成 17 年度東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会「次世代ナノ・エレクトロニクスのための光スピン電荷制御の理論」, 東北大学電気通信研究所, 2005 年 10 月 27 日.

[30] 佐久間怜:「トランスコリレイティッド法による固体の電子状態計算」, 科研費特定領域「次世代量子シミュレータ・量子デザイン手法の開発」ミニワークショップ「Beyond LDA としての新しい電子状態計算手法」, 東京大学, 2006 年 2 月 23 日.

[31] 佐久間怜:「YH_3 の圧力誘起絶縁体金属転移の理論計算」, 水素量子アトミクス研究会, 国際会議場つくばエポカル, 2006 年 3 月 24 日.

[32] 佐久間怜, 小谷岳生, 三宅隆, 常行真司：「YH_3 の圧力誘起絶縁体金属転移:準粒子 self-consistentGW 近似による第一原理計算」, 日本物理学会第 61 回年次大会, 愛媛大・松山大, 2006 年 3 月 29 日.

[33] 小杉太一，常行真司:「重合フラーレンの理論的研究」，日本物理学会第 61 回年次大会, 愛媛大・松山大, 2006 年 3 月 27 日.

招待講演

[34] 常行真司，赤木和人：「凝集水に見られるプロトンリレー型反応」，分子研研究会「多様な水素結合系と量子効果」，分子科学研究所，2005 年 7 月 8 日,9 日.

[35] 常行真司：「表面吸着構造の理論計算」，物性研究所研究会 「固体表面におけるナノサイエンス」，物性研究所，2005 年 7 月 27 日, 28 日.

[36] 常行真司：「水素ダイナミックスにおける量子効果」，日本物理学会 2005 年秋季大会シンポジウム「電子励起と不純物ダイナミックスのコントロール」，大阪市立大学，2005 年 9 月 19 日.

[37] 常行真司：「第一原理計算の現状と可能性」，三鉱シンポジウム，愛媛大学，2005 年 9 月 24 日.

[38] 常行真司：「第一原理電子状態計算を用いた誘電材料研究」，日本セラミックス協会第 18 回秋季シンポジウム，大阪府立大学, 2005 年 9 月 27 日-29 日.

[39] 常行真司：「固体中の電子と水素 − 2 成分量子系の第一原理計算」，基研研究会「ミクロからマクロへ，マクロからミクロへ– 秩序形成，精密計算への理論的アプローチ –」，京都大学，2005 年 11 月 16 日-18 日.

[40] 常行真司：「極限超高圧下の物質シミュレーション」熊本大学拠点形成研究Ｂシンポジウム「極限環境下での凝縮系物質の原子レベル構造とマクロな挙動」，熊本大学，2006 年 1 月 11 日-12 日.

[41] S. Tsuneyuki, First-principles electronic structure calculation of solids with a similarity-transformed Hamiltonian, 札幌電子相関研究会, 札幌，2006 年 1 月 26 日, 27 日.

[42] 常行真司：「トランスコリレイティッド法による電子状態計算」，日本物理学会第 61 回年次大会 領域 4，領域 11 合同シンポジウム「次世代第一原理量子シミュレーションによる量子デザイン手法の展開」，愛媛大学，2006 年 3 月 28 日.

[43] 赤木和人:「半導体表面に吸着した有機分子への電場効果」, 次世代ナノ・エレクトロニクスのための電子状態計算の基礎理論, 物性研究所, 2005 年 12 月 27 日.

(セミナー)

[44] Kazuma Nakamura：First-principles Calculation of Effective Hubbard Parameter: Constrained Local Density Functional Approach with Maximally Localized Wannier Function, 産業技術総合研究所計算化学研究部門セミナー, 2005 年 10 月 25 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，軟 X 線磁気円二色性測定等の手法により，固体電子物性の研究を行っている．とくに，複雑物質・強相関電子系の示す特異な物性の発現機構の解明を目指す．具体的には，遷移金属酸化物，磁性半導体などが示す金属-絶縁体転移（モット転移，アンダーソン転移，電荷・軌道整列など），高温超伝導，巨大磁気抵抗，巨大熱電能などの機構解明と，これらの物質が作るヘテロ界面・ナノ構造の新規電子構造の探索と解明をめざす．実験室光源を用いた測定の他に，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，スタンフォード放射光研究所，バークレー放射光施設で放射光を用いた実験を行っている．

4.1.1 高温超伝導

母物質 La_2CuO_4 の角度分解光電子スペクトルにおけるポーラロン効果

高温超伝導体 $La_{2-x}Sr_xCuO_4$，$La_2CuO_{4+\delta}$ の母物質である反強磁性絶縁体 La_2CuO_4 の角度分解光電子スペクトル形状を解析し，従来の強相関電子モデル（ハバード・モデル，t-J モデル，p-d モデルなど）では説明できず，強いポーラロン効果を取り入れることが重要であることを示した．

自己エネルギーにおける電子-フォノン結合の効果

高温超伝導体 $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ の角度分解光電子スペクトルで観測される準粒子ピークの “キンク構造” を高精度で測定し，自己エネルギー解析を行った．自己エネルギーの構造を中性子散乱で得られたフォノン・スペクトルと比較し，非常によい対応があることを見出した．このことは，高温超伝導体において強い電子-フォノン相互作用が存在することを明確に示している．

$Ca_{2-x}Na_xCuO_2Cl_2$ における化学ポテンシャル・シフト

価電子帯の角度分解光電子スペクトルが，ホールドーピングによる大きな化学ポテンシャルを示している $Ca_{2-x}Na_xCuO_2Cl_2$ について，内殻 X 線光電子分光測定を行った．その結果，価電子帯，内殻ともにほぼ同じ量のシフトが見られ，角度分解光電子分光も化学ポテンシャルシフトの定量的な研究に用いることがきることがわかった．

4.1.2 強相関遷移金属酸化物

バンド幅制御系 $Ca_{1-x}Sr_xRuO_3$ におけるスペクトル強度の移動

典型的なモット・ハバード型バンド幅制御系である $Ca_{1-x}Sr_xVO_3$ において，スペクトル関数のコヒーレント部分と非コヒーレント部分の間にスペクトル強度の移動がないという主張が “バルク敏感光”電子分光の実験に基づいてなされている．我々は，パルス・レーザー蒸着で作製され表面構造のよく制御されたバンド幅制御系 $Ca_{1-x}Sr_xRuO_3$ の光電子分光を行い，表面成分の補正も行った結果，コヒーレント部分と非コヒーレント部分の間に明瞭なスペクトル強度の移動を観測した．

3 次元フェルミ液体系 $SrVO_3$ の角度分解光電子分光

電子相関効果がバンド構造にどのような影響を与えるかという問題は，２次元系で軌道縮退のない “擬ギャップ金属”である高温超伝導体について非常に詳しく調べられてきたが，典型的なフェルミ液体系については詳細な実験的情報が得られていなかった．我々は，軌道縮退のある典型的な 3 次元モット・ハバード型フェルミ液体 $SrVO_3$ について角度分解光電子分光を行い，質量繰り込みを観測した．繰り込みの強さは，電子比熱の増大も説明した．

電荷不均化を示す $Bi_{1-x}La_xNiO_3$ の金属-絶縁体転移

電荷不均化 Bi^{3+} と Bi^{5+} がおこっている $BiNiO_3$ において，Bi 原子を La に置換すると系は金属に転移する．その原因として，Bi の電荷融解 $Bi^{3+} + Bi^{5+} \rightarrow 2Bi^{4+}$ と Ni^{2+} へのホールドーピングが考えられてきた．光電子分光と X 線吸収分光を用いて，La 置換による Ni，Bi の価数変化を調べたところ，La 置換量 x と等しいホールが Ni にドープされ，Bi の価数変化は観測されず電荷融解と矛盾しない結果が得られた．

単結晶薄膜を用いた $La_{1-x}Sr_xFeO_3$ の電子構造の研究

パルス・レーザー蒸着法で作成した $La_{1-x}Sr_xFeO_3$ の単結晶薄膜試料についてその場（*in situ*）光電子分光測定を行い，温度変化に伴う電子構造の変化を高精度で調べた．また，$x = 0.4$ については詳細な角度分解光電子分光を行い，得られたバンド分散は，タイト・バインディング近似で計算したバンド構造とよい一致を示した．ただし，実験で得られたバンドは，計算に比べフェルミ準位から遠ざかる方向にシフトしており，ポーラロン効果あるいは局所的・動的な電荷整列が起こっていることが示唆された．

層状物質 $La_{1-x}Sr_{1+x}MnO_4$ における電荷･軌道整列

3次元構造をもつ $PrMnO_3$ 等に50%ホールをドープした物質では，CE 型と呼ばれる反強磁性秩序を伴う電荷整列が起こることが知られており，同時に起こる軌道秩序も知られている．これに類似の層状化合物 $LaSrMnO_4$ に 50%ホールをドープした物質でも CE 型反強磁性秩序が起こるために，同じ軌道秩序が起こると考えられていた．我々は，軟X線吸収の偏光依存性測定を行い，異なる新しい形状の軌道秩序が起こっていることを示したが，これを確かめるために，Hartree-Fock 近似のバンド計算を行い，ある格子変形のもとで実際に新しい軌道秩序が起こることを示した．

4.1.3 磁性半導体

GaN に Mn をドープした系

室温で強磁性を示すという報告がある $Ga_{1-x}Mn_xN$ の電子状態を，MBE により作製した常磁性試料を用い，共鳴光電子分光，内殻光電子分光，内殻吸収分光測定により調べた．内殻吸収スペクトルの形状から，Mn は2価イオンとなって Ga を置換していることがわかった．にもかかわらず試料が絶縁体である原因は，置換により放出されたホールが何らかの格子欠陥から放出される電子に補償されているためと考えられる．価電子帯の Mn $3d$ 部分状態密度と Mn $2p$ 内殻の MnN_4 クラスター・モデルを用いた解析から，Mn の局在スピンと GaN 母体の電子のスピンは非常に強い交換相互作用で結合していることが示された．

ZnO をベースにした室温強磁性半導体 $Zn_{1-x}Co_xO$

室温を超えるキューリー点を示す希釈磁性半導体として最近注目されている $Zn_{1-x}Co_xO$ の電子状態を軟X線吸収分光，内殻吸収磁気円二色性および光電子分光を組み合わせて調べた．内殻吸収分光により試料全体の Co の価数とスピン状態を調べ，内殻吸収磁気円二色性で実際に強磁性を担っている Co 原子の価数とスピン状態を調べた結果，両者は一致し，強磁性が不純物相によるものではないことが示された．

＜受賞＞

[1] 和達大樹：表面科学会放射光部会シンポジウム，ポスター賞（平成17年11月）

[2] 和達大樹：第19回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム，学生会員発表賞（平成18年1月）

＜報文＞

(原著論文)

[3] S. Ghosh, N. Kamaraju, M. Seto, A. Fujimori, Y. Takeda, S. Ishiwata, S. Kawasaki, M. Azuma, M.Takano and A. K. Sood: Raman Scattering in $CaFeO_3$ and $La_{0.33}Sr_{0.67}FeO_3$ across the Charge Disproportionation Phase Transition, Phys. Rev. B **71** (2005) 245110–1-7.

[4] W.B. Wu, D.J. Huang, J. Okamoto, A. Tanaka, H.-J. Lin, F.C. Chou, A. Fujimori and C.T. Chen: Orbital Symmetry and Electron Correlations in Na_xCoO_2, Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 146402–1-4; cond-mat/0408467

[5] M. Takizawa, D. Toyota, H. Wadati, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, A. Fujimori, M. Oshima, Z. Fang, M. Lippmaa, M. Kawasaki and H. Koinuma: Manifestation of Correlation Effects in the Photoemission Spectra of $Ca_{1-x}Sr_xRuO_3$, Phys. Rev. B **72** (2005) 060404(R)–1-4; cond-mat/0412718

[6] J.I. Hwang, Y. Ishida, M. Kobayashi, H. Hirata, K. Takubo, T. Mizokawa and A. Fujimori, J. Okamoto, K. Mamiya, Y. Saito, Y. Muramatsu, H. Ott, A. Tanaka, T. Kondo and H. Munekata: High-Energy Spectroscopic Study of the III-V Nitride-Based Diluted Magnetic Semiconductor $Ga_{1-x}Mn_xN$, Phys. Rev. B **72** (2005) 085216–1-6; cond-mat/0504048

[7] X. J. Zhou, J. Shi, T. Yoshida, T. Cuk, W. L. Yang, V. Brouet, J. Nakamura, N. Mannella, S. Komiya, Y. Ando, F. Zhou, W. X. Ti, J. W. Xiong, Z. X. Zhao, T. Sasagawa, T. Kakeshita, H. Eisaki, S. Uchida, A. Fujimori, Z. Zhang, E. W. Plummer, R. B. Laughlin, Z. Hussain, and Z.-X. Shen: Multiple Bosonic Mode Coupling in Electron Self-Energy of $(La_{2-x}Sr_x)CuO_4$, Phys. Rev. Lett., **95** (2005) 117001–1-4; cond-mat/0405130

[8] T. Yoshida, K. Tanka, H. Yagi, A. Ino, H. Eisaki, A. Fujimori and Z.-X Shen: Direct Observation of the Mass Renormalization in $SrVO_3$ by Angle-Resolved Photemission Spectroscopy, Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 146404–1-4; cond-mat/0504075

[9] H. Wadati, M. Takizawa, T.T. Tran, K. Tanaka, T. Mizokawa, A. Fujimori, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, S. Ishiwata, M. Azuma,

and M. Takano: Valence Changes Associated with the Metal-Insulator Transition in $Bi_{1-x}La_xNiO_3$, Phys. Rev. B **72** (2005) 155103–1-5; cond-mat/0505646.

[10] M. Kobayashi, Y. Ishida, J. l. Hwang, T. Mizokawa, A. Fujimori, J. Okamoto, K. Mamiya, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Tanaka, H. Saeki, H. Tabata and T. Kawai: Characterization of Magnetic Components in the Diluted Magnetic Semiconductor $Zn_{1-x}Co_xO$ by X-ray Magnetic Circular Dichroism, Phys. Rev. B **72** (2005) 201201(R)–1-4; cond-mat/0505387

[11] D. Toyota, I. Ohkubo, H. Kumigashira, M. Oshima, T. Ohnishi, M. Lippmaa, M.Takizawa, A. Fujimori and K. Ono: Thickness Dependent Electronic Structure for Ultrathin $SrRuO_3$ Films Studied by *in-situ* Photoemission Spectroscopy, Appl. Phys. Lett. **87** (2005) 162508–1-3.

[12] O. Rösch, O. Gunnarsson, X. J. Zhou, T. Yoshida, T. Sasagawa, A. Fujimori, Z. Hussain, Z.-X. Shen and S. Uchida: Polaronic Behavior of Undoped high-T_c Cuprates, Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 227002–1-4; cond-mat/0504660.

[13] K. Ebata, T. Mizokawa and A. Fujimori: Orbital Ordering in $La_{0.5}Sr_{1.5}MnO_4$ Studied by Model Hartree-Fock Calculation, Phys. Rev. B **72** (2005) 233104–1-4; cond-mat/0511244

[14] J. Okamoto, S.-i. Fujimori, T. Okane, A. Fujimori, M. Abbate, S. Yoshii and M. Sato: Evolution of the Electronic Structure across the Filling-Control and Bandwidth-Control Metal-Insulator Transitions in Pyrochlore-Type Ru Oxides, Phys. Rev. B **73** (2006) 035127–1-6; cond-matt/0603286

[15] T. Okane, J. Okamoto, K. Mamiya, S.-i. Fujimori, Y. Takeda, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Fujimori, Y. Haga, E. Yamamoto, T. Honma, Y. Inada, Y. Onuki: Soft X-ray Absorption Magnetic Circular Dichroism Study of Ferromagnetic Superconductor UGe_2, J. Phys. Soc. Jpn. **75** (2006) 024704–1-5.

[16] S-i. Fujimori, K. Terai, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Fujimori, H. Yamagami, T. Matsuda, Y. Haga, E. Yamamoto, Y. Tokiwa, S. Ikeda and Y. Onuki: Itinerant U $5f$ Band States in the Layered Compound $UFeGa_5$ Observed by Soft X-Ray Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, Phys. Rev. B **73** (2006) 125109–1-6; cond-mat/0602404

[17] H. Wadati, A. Chikamatsu, R. Hashimoto, M. Takizawa, H. Kumigashira, A. Fujimori, M. Oshima, M. Lippmaa, M. Kawasaki, and H. Koinuma: Temperature-Dependent Soft X-Ray Photoemission and Absorption Studies of Charge Disproportionation in $La_{1-x}Sr_xFeO_3$, J. Phys. Soc. Jpn., in press; cond-mat/0410202

[18] A. Chikamatsu, H. Wadati, H. Kumigashira, M. Oshima, A. Fujimori, N. Hamada, T. Ohnishi, M. Lippmaa, K. Ono, M. Kawasaki and H. Koinuma: The Band Structure and Fermi Surface of $La_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$ Thin Films Studied by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, Phys. Rev. B, in press; cond-mat/0503373

[19] H. Kumigashira, A. Chikamatsu, R. Hashimoto, M. Oshima, T. Ohnishi, M. Lippmaa, H. Wadati, A. Fujimori, K. Ono, M. Kawasaki, H. Koinuma: Robust Ti^{4+} States in $SrTiO_3$ Layers of $La_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3/SrTiO_3/La_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$ Junctions, Appl. Phys. Lett., in press; cond-mat/0510501

[20] H. Yagi, T. Yoshida, A. Fujimori, Y. Kohsaka, M. Misawa, T. Sasagawa, H. Takagi, M. Azuma and M. Takano: Chemical Potential Shift in Lightly-Doped to Optimally-Doped $Ca_{2-x}Na_xCuO_2Cl_2$, Phys. Rev. B, in press.

[21] K. Mamiya, T. Koide, A. Fujimori, H. Tokano, H. Manaka, A. Tanaka, H. Toyosaki, T. Fukumura and M. Kawasaki: Indication of Intrinsic Room-Temperature Ferromagnetism in $Ti_{1-x}Co_xO_{2-\delta}$ Thin Film: An X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study, Appl. Phys. Lett., in press; cond-mat/0603149

[22] S-i. Fujimori, A. Fujimori, K. Shimada, T. Narimura, K. Kobayashi, H. Namatame, M. Taniguchi, H. Harima, H. Shishido, S. Ikeda, D. Aoki, Y. Tokiwa, Y. Haga and Y. Onuki: Direct Observation of Quasi-Particle Band in $CeIrIn_5$: Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy Study, Phys. Rev. B, in press; cond-mat/0602296

(会議抄録)

[23] A. Fujimori, J. Okabayashi, Y. Takeda, T. Mizokawa, J. Okamoto, K. Mamiya, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, M. Oshima, S. Ohya and M. Tanaka: Photoemission and Core-Level Magnetic Circular Dichroism Studies of Diluted Magnetic Semiconductors, *Proceedings of XIV-th International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics*; J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **144-147** (2005) 701-705.

[24] R. Hashimoto, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, N. Nakagawa, T. Ohnishi, M. Lippmaa, H. Wadati, A. Fujimori, K. Ono, M. Kawasaki and H. Koinuma: Spectral Evidence for Inherent "Dead Layer" Formation at $La_{1-y}Sr_yFeO_3/La_{1-x}Sr_xMnO_3$ Heterointerface, *ibid*; J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **144-147** (2005) 479-481.

[25] A. Chikamatsu, H. Wadati, M. Takizawa, R. Hashimoto, H. Kumigashira, M. Oshima, A. Fujimori, N. Hamada, T. Ohnishi, M. Lippmaa, K. Ono, M. Kawasaki and H. Koinuma: *In-situ* Angle-Resolved Photoemission Study on $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ Thin Films Grown by Laser MBE, *ibid*; J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **144-147** (2005) 511-514.

[26] Y. Saitoh, K. Kobayashi, A. Fujimori, Y. Yamamura, M. Koyano, H. Tsuji and S. Katayama: Photoemission and Core-Level Absorption Spectroscopy of Fe_xNbS_2, *ibid*; J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **144-147** (2005) 829-832.

[27] H. Wadati, D. Kobayashi, A. Chikamatsu, R. Hashimoto, K. Horiba, M. Takizawa, H. Kumigashira, T. Mizokawa, A. Fujimori, M. Oshima, M. Lippmaa, M. Kawasaki, and H. Koinuma: *In situ* Photoemission Study of $La_{1-x}Sr_xFeO_3$ Epitaxial Thin Films, *ibid*; J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **144-147** (2005) 877-880.

[28] T. Okane, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, K. Terai, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Fujimori, E. Yamamoto, Y. Haga and Y. Onuki: Soft X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of UFe_2, *Proceedings of the International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES'05)*; Physica B, in press.

[29] S.-i. Fujimori, K. Terai, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saito, Y. Muramatsu, A. Fujimori, H. Yamagami, S. Ikeda, T. Matsuda, Y. Tokiwa, Y. Haga, E. Yamamoto, Y. Onuki: Soft X-Ray Synchrotron Radiation Photoemission Study on Uranium Compounds, *ibid*, Physica B, in press.

[30] K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, M. Higashiguchi, S.-i. Fujimori, Y. Saitoh, A. Fujimori, M.S. Kim, D. Hirata, T. Takabatake: High-Resolution Photoemission Study of CeRhX (X = Sn, In), *ibid*, Physica B, in press.

[31] Y. Ishida, A. Fujimori, H. Ohta and H. Hosono: Photoemission Study of $Na_{0.8}CoO_2$ Epitaxial Thin Film with Large Thermoelectric Power, *Proceedings of the 24th International Conference on Low Temperature Physics*; AIP Conference Proceedings, in press.

[32] M. Hashimoto, K. Tanaka, T. Yoshida, A. Fujimori, Z.-X. Shen, D. Lu, S. Ono and Y. Ando: Doping Evolution of the Electronic Structure in the Single-Layer Cuprate $Bi_2Sr_{2-x}La_xCuO_{6+\delta}$, *ibid*; AIP Conference Proceedings, in press.

[33] H. Kumigashira, R. Hashimoto, A. Chikamatsu, M. Oshima, T. Ohnishi, M. Lippmaa, H. Wadati, A. Fujimori, K. Ono, M. Kawasaki, H. Koinuma: *In-situ* Resonant Photoemission Characterization of $La_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$ Layers Buried in Insulating Perovskite Oxides, *Proceedings of MMM*, J. Appl. Phys., in press.

[34] T. Okane, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, Y. Saitoh, J. Okamoto, K. Mamiya, Y. Muramatsu, A. Fujimori, A. Ochiai, Y. Haga, E. Yamamoto and Y. Onuki: Soft X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of Ferromagnetic Uranium Compounds, *Proceedings of the 5th International Symposium on Advanced Science Research – Advances in the Physics and Chemistry of Actinide Compounds (ASR '05)*, in press.

[35] J. I. Hwang, Y. Ishida, M. Kobayashi, Y. Osafune, T. Mizokawa, A. Fujimori, Y. Takeda, K. Terai, S-i. Fujimori, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Tanaka, T. Kondo, H. Munekata, M. Hashimoto, H. Tanaka, S. Hasegawa and H. Asahi: Photoemission and X-Ray Absorption Studies of the Electronic Structure of GaN-Based Diluted Magnetic Semiconductors, Proceedings of 6th International Conference on Nitride Semiconductors; Physica Status Solidi B, in press

[36] M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, K. Tanaka, D. Lu, Z.-X. Shen, S. Wakimoto, M. Oksusawa and K. Yamada: Photoemission Study of Excess Oxygen-doped $La_2CuO_{4.10}$, *Proceedings of the 18th International Symposium on Superconductivity*; Physica C, in press

[37] K. Shimada, M. Higashiguchi, S.-i. Fujimori, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Namatame, M. Taniguchi, T. Sasakawa, T. Takabatake: High-Resolution Photoemission Study of $Ce_{1-x}La_xRhAs$: A Collapse of the Energy Gap in the Kondo Semiconductor, *Proceedings of 3rd Hiroshima Workshop – Novel Functional Materials with Multinary Freedoms –*; Physica B, in press.

[38] K. Mamiya, T. Koide, Y. Ishida, Y. Osafune, A. Fujimori, Y. Suzuki, T. Katayama, and S. Yuasa: Angle-Resolved Soft X-Ray Magnetic Circular Dichroism in a Monatomic Fe Layer Facing an MgO(001) Tunnel Barrier, Rad. Phys. Chem., in press.

(編著書)

[39] H. Wadati, T. Yoshida and A. Fujimori: High-Resolution Photoemission Spectroscopy of Perovskite-Type Transition-Metal Oxides, in *High Resolution Photoemission Spectroscopy*, edited by S. Hüfner (Springer-Verlag, Berlin) in press

(学位論文)

[40] 石田行章：High-Energy Spectroscopic Studies of Functional Oxide Thin Films and Heterojunction（博士論文）

[41] 八木創：Photoemission Study of the High-Temperature Superconductor $YBa_2Cu_3O_y$（博士論文）

[42] 長船義敬：High-Energy Spectroscopic Study of Mn-Based Magnetic Semiconductors (修士論文)

[43] 池田正樹：Photoemission Study of Electron-Doped High-T_c Superconductors（修士論文，新領域創成科学研究科）

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[44] T. Okane, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, K. Terai, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Fujimori, E. Yamamoto, Y. Haga and Y. Onuki: Soft X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study ofUFe$_2$, *International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES'05)* (Vienna, July 2005)

[45] K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, M. Higashiguchi, S.-i. Fujimori, Y. Saitoh, A. Fujimori, M.S. Kim, D. Hirata, T. Takabatake: High-resolution photoemission study of CeRhX (X = Sn, In), *ibid*

[46] M. Kobayashi, Y. Ishida, J. I. Hwang, T. Mizokawa, A. Fujimori, J. Okamoto, K. Mamiya, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Tanaka, H. Saeki, H. Tabata and T. Kawai: X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of the Diluted Magnetic Semiconductor $Zn_{1-x}Co_xO$, *3rd International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (SPINTECH III)* (Awaji Island, August 2005)

[47] K. Mamiya, T. Koide, A. Fujimori, H. Tokano, H. Manaka, A. Tanaka, H. Toyosaki, T. Fukumura and M. Kawasaki: X-Ray Magnetic Circular Dichroism in the Co L-Edge X-Ray Absorption Spectrum of Rutile-Type $Ti_{1-x}Co_xO_{2-y}$, *ibid*

[48] Y. Ishida, A. Fujimori, H. Ohta and Hideo Hosono: Photoemission Study of $Na_{0.8}CoO_2$ Epitaxial Thin Film with Large Thermoelectric Power, *24th International Conference on Low Temperature Physics* (Orlando, USA, August 2005)

[49] M. Hashimoto, K. Tanaka, T. Yoshida, A. Fujimori, Z.-X. Shen, D. Lu, S. Ono and Y. Ando: Doping Evolution of the Electronic Structure in the Single-Layer Cuprate $Bi_2Sr_{2-x}La_xCuO_{6+\delta}$, *ibid*

[50] J.I. Hwang, Y. Ishida, M. Kobayashi, Y. Osafune, T. Mizokawa, A. Fujimori, Y. Takeda, K. Terai, S.-i. Fujimori, Y. Saito, Y. Muramatsu, A. Tanaka, T. Kondo and H. Munekata, M. Hashimoto, H. Tanaka, S. Hasegawa and H. Asahi: Photoemission and X-Ray Absorption Studies of the Electronic Structure of GaN-Based Diluted Magnetic Semiconductors, 6th International Conference on Nitride Semiconductors (Bremen, August 2005)

[51] T. Okane, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, Y. Saitoh, J. Okamoto, K. Mamiya, Y. Muramatsu, A. Fujimori, A. Ochiai, Y. Haga, E. Yamamoto and Y. Onuki: Soft X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of Ferromagnetic Uranium Compounds, *5th International Symposium on Advanced Science Research – Advances in the Physics and Chemistry of Actinide Compounds (ASR '05)* (Tokai, August 2005)

[52] H. Wadati, A. Chikamatsu, M. Takizawa, R. Hashimoto, H. Kumigashira, T. Mizokawa, A. Fujimori, M. Oshima, M. Lippmaa, M. Kawasaki and H. Koinuma: *In-situ* Angle-Resolved Photoemission Study of $La_{1-x}Sr_xFeO_3$ Epitaxial Thin Films, *12th International Workshop on Oxide Electronics* (Cape Cod, USA, October 2005)

[53] M. Takizawa, H. Wadati, M. Kobayashi, K. Tanaka, H. Yagi, M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, K. Shibuya, T. Mihara, T. Ohnishi, M. Lippmaa, M. Kawasaki and H. Koinuma, Photoemission Study of $LaTiO_3/SrTiO_3$ Interfaces, *ibid*

[54] Y. Hotta, H. Wadati, L. Fitting, Y. Mukunoki, T. Susaki, D.A. Muller, A. Fujimori and H.Y. Hwang: Electronic Structure of $LaVO_3/LaAlO_3$ Interfaces and Multilayers, *ibid*

[55] H. Kumigashira, R. Hashimoto, A. Chikamatsu, M. Oshima, T. Ohnishi, M. Lippmaa, H. Wadati, A. Fujimori, K. Ono, M. Kawasaki and H. Koinuma: *In-situ* Resonant Photoemission Characterization of $La_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$ Layers Buried in Insulating Perovskite Oxides, *50th Magnetism and Magnetic Materials Conference* (San Jose, October 2005)

[56] D. Toyota, I. Ohkubo, H. Kumigashira, M. Oshima, T. Ohnishi, M. Lippmaa, M.Takizawa, A. Fujimori, K. Ono, M. Kawasaki and H. Koinuma: Ferromagnetism Stabilization of Ultrathin $SrRuO_3$ Films Probed by *in-situ* Photoemission Spectroscopy, *ibid*

[57] M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, K. Tanaka, D. Lu, Z.-X. Shen, S. Wakimoto, M. Oku-sawa and K. Yamada: Photoemission Study of Excess Oxygen-doped $La_2CuO_{4.10}$, *18th International Symposium on Superconductivity*, (Tsukuba, October 2005)

[58] M. Ikeda, T. Yoshida, H. Yagi, M. Hashimoto, A. Fujimori, K. Tanaka, D. H. Lu, Z.-X. Shen, K. Unosawa, T. Sasagawa, H. Takagi: Angle-Resolved Photoemission Study of $Eu_{1.85}Ce_{0.15}CuO_4$, *ibid*

[59] A. Chikamatsu, H. Wadati, H. Kumigashira, M. Oshima, A. Fujimori, T. Ohnishi, M. Lippmaa, K. Ono, M. Kawasaki and H. Koinuma: The Band Structure and Fermi Surface of $La_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$ Thin Films Studied by *in-situ* Angle-Resolved Photoemission, *International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-4)*, (Saitama, November 2005)

[60] T. Yanagida, H. Tanaka, T. Kawai, Y. Saitoh, Y. Takeda, A. Fujimori: Investigation on Ferromagnetism in $La_{1-x}Ce_xMnO_3$ Thin Films Using Soft X-Ray Absorption Magnetic Circular Dichroism, 2005 Materials Research Society Fall Meeting (Boston, USA, November 2005)

[61] T. Yanagida, H. Tanaka, T. Kawai, Y. Saitoh, Y. Takeda, A. Fujimori: Structural, Magnetic Properties and X-ray Absorption Spectroscopy of $Nd_{1-x}Ce_xMnO_3$ Thin Films, *ibid*

[62] D. Toyota, M.Takizawa, I. Ohkubo, H. Kumigashira, M. Oshima, T. Ohnishi, M. Lippmaa, A. Fujimori, K. Ono, M. Kawasaki and H. Koinuma: Thickness Dependence of $SrRuO_3$ Thin Films

Studied by *in-situ* Photoemission Spectroscopy, *ibid*

[63] M. Kobayashi, K. Tanaka, A. Fujimori, S. Ray, and D. D. Sarma: High-Resolution Photoemission Study of Fe/Mo Antisite Disorder Effects in the Double Perovskite Sr_2FeMoO_6, *6-th Taiwan-Korea-Japan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems* (Hialien, Taiwan, December 2005)

[64] T. Yoshida, X. J. Zhou, K. Tanaka, W. L. Yang, Z. Hussain, Z.-X. Shen, A. Fujimori, S. Komiya, Y. Ando, H. Eisaki, T. Kakeshita and S. Uchida: Doping Evolution of the Underlying"Fermi Surface" in $La_{2-x}Sr_xCuO_4$, *ibid*

[65] K. Ebata, H. Wadati, M. Takizawa, A. Fujimori, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, Y. Tomioka, and Y. Tokura: Photoemission Study of $Pr_{1-x}Ca_xMnO_3$, *ibid*

[66] J. I. Hwang, Y. Osafune, Y. Ishida, K. Ebata, Y. Ooki, A. Fujimori1, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh and K. Kobayashi: High-Energy Spectroscopic Study of Mn-Doped GaN Prepared by Thermal Diffusion of Mn, *ibid*

[67] S. Ray, D.D. Sarma, K. Tanaka, M. Kobayashi, A. Fujimori, P. Sanyal, H.R. Krishnamurthy and C. Das Gupta: Unconventional Magnetoresistance in Sr_2FeMoO_6 from a Magnetic Tunnel Barrier Mechanism, *Pacifichem 2005*, (Honolulu, December 2005)

[68] X.J. Zhou, T. Yoshida, W.L. Yang, S. Komiya, Y. Ando, T. Sasagawa, F. Zhou, W.X. Ti, J.W. Xiong, Z.X. Zhao, T. Kakeshita, H. Eisaki, S. Uchida, A. Fujimori, Z. Hussain and Z.-X. Shen: Pseudogap and Superconducting Gap in $(La_{2-x}Sr_x)CuO_4$, *American Physical Society March Meeting* (Baltimore, March 2006)

[69] T. Kamo, K. Yamazaki, T. Yamasaki, H. Anzai, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, A. Fujimori, Z.-X. Shen, K. Fujita, S. Uchida: ARPES Study of Nodal Quasiparticles of $Bi_2Sr_{1.6}La_{0.4}CuO_{6+\delta}$ Using Low-Energy Excitation Photons, *ibid*

[70] T. Yamasaki, T. Kamo, H. Anzai, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, A. Fujimori, Z.-X. Shen, M. Ishikado, S. Uchida: Doubling the Selective Observation of Bilayer-Split Nodal Quasiparticles in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ by ARPES Using Low-Energy Tunable Photons, *ibid*

[71] K. Tanaka, W. S. Lee, D. H. Lu, T. Fujii, A. Fujimori, Z. Hussain, Z.-X. Shen: ARPES investigation of deeply underdoped BISCO 2212, *ibid*

招待講演

[72] A. Fujimori: Understanding Thermodynamic and Transport Properties of Underdoped Cuprates from ARPES Data, *Strong Correlations and ARPES: Recent Progress in Theory and Experiment (CORPES05)* (Dresden, April 2005)

[73] T. Yoshida, A. Fujimori, K. Tanaka, H. Yagi, Z.-X. Shen, X.-J. Zhou, Z. Hussain, S. Uchida, T. Kakeshita, M. Goto, H. Eisaki, K. Segawa, S. Ono, S. Komiya, A. N. Lavrov, Y. Ando, T. Fujii and I. Terasaki: Material Dependence of the Electronic Structure in Lightly-Doped High-T_c Cuprates, *Study of Matter at Extreme Conditions (SMEC)* (Miami, April 2005)

[74] A. Fujimori: Soft X-Ray Magnetic Circular Dichroism of Ferromagnetic Semiconductors, *AFOSR Workshop on Wide Bandgap Ferromagnetic Semiconductors* (Edinburgh, May 2005)

[75] A. Fujimori: Photoemission Spectroscopy of Transition-Metal Oxide Thin Films and Interfaces, *2005 CERC/ERATO-SSS International Workshop on Phase Control of Correlated Electron Systems* (Maui Island, Hawaii, June 2005)

[76] A. Fujimori: Photoemission Spectroscopy of Transition-Metal Oxides, High-T_c Cuprates and Magnetic Semiconductors *2005 APCTP Summer School on Strongly Correlated Electron Systems* (Pohang, July 2005)

[77] A. Fujimori: Spectral Weight Transfer and Chemical Potential Shift in Cuprates and Manganites, *Complexity in Strongly Correlated Electron Systems* (Kavli Institute for Theoretical Physics, Santa Barbara, July 2005)

[78] A. Fujimori: Photoemission and Magnetic Circular Dichroism Studies of Ferromagnetic Semiconductors, *3rd International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (Spintech III)* (Awaji Island, August 2005)

[79] A. Fujimori: Electron Spectectroscopy and Synchrotron Rdiation for Material Sciences, *4th International Workshop on Quantum Particles and Fields* (Baku, Azerbaijan, September 2005)

[80] A. Fujimori: Angle-resolved Photoemission Spectroscopy of Perovskite-Type Transition-Metal Oxides, *Indo-US Conference on Novel and Complex Materials* (Kolkata, India, October 2005)

[81] T. Yoshida: Material Dependence of the Electronic Structure in High-T_c Cuprates, *International Workshop on Electron State and Lattice Effects in Cuprate High Temperature Superconductors* (AIST, Tsukuba, October 2005)

[82] T. Yoshida: Material Dependence of the Electronic Structure in High-T_c Cuprates, *18th International Symposium on Superconductivity (ISS2005)* (Tsukuba, October 2005)

[83] A. Fujimori: XMCD Characterization of Complex Magnetism in Diluted Magnetic Semiconductors *5th NAREGI International Nano-Scoence Symposium "Theories and Simulation Methods for Soft X-Ray Solid State Spectroscopy"* (Tsukuba, November 2005)

[84] A. Fujimori: Photoemission from Transition-metal Oxide Interfaces, *3rd JSPS-DST Symposium on Surfaces and Interfaces for Nanostructured Materials* (Department of Chemitry, University of Tokyo, November 2005)

[85] A. Fujimori: Temperature Evolution of Pseudogaps and Chemical Potential in High-T_c Cuprates, *6-th Taiwan-Korea-Japan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems* (Hualien, Taiwan, December 2005)

[86] A. Fujimori: Soft X-Ray Magnetic Circular Dichroism Studies of Diluted Magnetic Semiconductors, *Joint Seminar on Novel Giant Magnetoresistive Materials and their Electronic Structures* (Indian Institute of Sciences, Bangalore, January 2006)

(国内会議)

一般講演

[87] 江端一晃，和達大樹，滝沢優，近松彰，組頭広志，藤森淳，尾嶋正治，富岡泰秀，十倉好紀：$Pr_{1-x}Ca_xMnO_3$ の光電子分光，PF 研究会「アンジュレータ放射光による固体物性研究の展望」（物質構造研究所，2005 年 4 月）

[88] 滝沢優，豊田大介，和達大樹，近松彰，橋本龍司，組頭広志，藤森淳，尾嶋正治，Mikk Lippmaa，川崎雅司，鯉沼秀臣：$Ca_{1-x}Sr_xRuO_3$ の光電子スペクトルにおけるスペクトル強度の移動，同上

[89] 和達大樹，近松彰，滝沢優，橋本龍司，組頭広志，溝川貴司，藤森淳，尾嶋正治，Mikk Lippmaa，川崎雅司，鯉沼秀臣：$La_{1-x}Sr_xFeO_3$ 薄膜の *in situ* 角度分解光電子分光，同上

[90] 長船義敬，石田行章，黄鐘日，小林正起，藤森淳，間宮一敏，戸叶洋之，小出常晴，南和幸，石橋隆幸，佐藤勝昭：$MnGeP_2$ の光電子分光と内殻吸収磁気円二色性，同上

[91] 八木創，田中清尚，藤森淳，吉田鉄平，X.-J.Zhou，D.-H. Lu，Z.-X. Shen，久保田正人，小野寛太，A. N. Lavrov，瀬川耕司，安藤陽一：希薄ドープ $YBa_2Cu_3O_y$ の角度分解光電子分光，同上

[92] 豊田大介，近松彰，大久保勇男，組頭広志，尾嶋正治，大西剛，Mikk Lippmaa，滝沢優，藤森淳，小野寛太，川崎雅司，鯉沼秀臣：*In-situ* 放射光光電子分光による $SrRuO_3$ 極薄膜電子状態の膜厚依存性，同上

[93] 近松彰，和達大樹，組頭広志，尾嶋正治，藤森淳，大西剛，Mikk Lippmaa，小野寛太，川崎雅司，鯉沼秀臣：$La_{1-x}Sr_xMnO_3$ 薄膜の *in-situ* 角度分解光電子分光；組成依存性，同上

[94] 竹田幸治，石田行章，藤森淳：軟 X 線磁気円二色性による磁性半導体の研究，科研費特定研究「半導体ナノスピントロニクス」平成 17 年度夏の研究会（東北大学通研，2005 年 6 月）

[95] 吉田鉄平，藤森淳：遷移金属酸化物の光電子分光：電子とホールのダイナミクス，科研費特定研究「異常量子物質」キックオフ・ミーティング（東大駒場キャンパス，2005 年 7 月）

[96] 和達大樹，高石理一郎，近松彰，滝沢優，組頭広志，藤森淳，尾嶋正治，Mikk Lippmaa，川崎雅司，鯉沼秀臣：$Nd_{1-x}Sr_xMnO_3$ 薄膜の *in-situ* 光電子分光，日本物理学会秋季大会（同志社大学，2005 年 9 月）

[97] 和達大樹，近松彰，組頭広志，吉田鉄平，溝川貴司，藤森淳，尾嶋正治：３次元ペロブスカイト型酸化物の ARPES のタイトバインディング計算によるシミュレーション，同上.

[98] 吉田鉄平，永崎洋，田中清尚，八木創，橋本信，井野明洋，藤森淳，Z.-X. Shen：$SrVO_3$ の角度分解光電子分光，同上.

[99] 橋本信，八木創，池田正樹，田中清尚，吉田鉄平，藤森淳，奥沢誠，山田和芳，掛下照久，永崎洋，内田慎一：光電子分光による $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ の擬ギャップのホール濃度および温度依存性，同上.

[100] 江端一晃，橋本信，田中清尚，和達大樹，滝沢優，藤森淳，近松彰，組頭広志，尾嶋正治，富岡泰秀，十倉好紀：$Pr_{1-x}Ca_xMnO_3$ の光電子スペクトルの温度・組成依存性，同上.

[101] 池田正樹，吉田鉄平，八木創，橋本信，藤森淳，宇野沢圭一，笹川崇男，高木英典，Donghui Lu，Z. X. Shen：$Eu_{1.85}Ce_{0.15}CuO_4$ の角度分解光電子分光，同上.

[102] 八木創，吉田鉄平，藤森淳，田中清尚，W. L. Yang，N. Mannella，X.-J. Zhou，Z.-X. Shen，相浦義弘，久保田正人，小野寛太，A. N. Lavrov，瀬川耕司，安藤陽一：角度分解光電子分光で見た $YBa_2Cu_3O_y$ の 2 つの Fermi 面，同上.

[103] 黄鐘日，長船義敬，石田行章，江端一晃，大木康弘，藤森淳：熱的拡散による希薄磁性半導体 GaN:Mn の作製と *in-situ* 光電子分光，同上.

[104] 小林正起，田中清尚，長船義敬，黄鐘日，石田行章，藤森淳，S. Ray，D. D. Sarma：ダブルペロブスカイト Sr_2FeMoO_6 における Fe/Mo アンチサイト欠陥効果の光電子分光による研究，同上.

[105] 石田行章，黄鐘日，小林正起，藤森淳，竹田幸治，岡根哲夫，藤森伸一，斎藤祐児，村松康司，田中新，斎藤秀和，安藤功兒：$Zn_{1-x}Cr_xTe$ の光電子分光と内殻磁気円二色性，同上.

[106] 滝沢優，和達大樹，小林正起，田中清尚，八木創，橋本信，藤森淳，近松彰，組頭広志，尾嶋正治，渋谷圭介，三原尚士，大西剛，Mikk Lippmaa，川崎雅司，鯉沼秀臣：モット絶縁体 $LaTiO_3$ －バンド絶縁体 $SrTiO_3$ 界面の光電子分光 II，同上.

[107] 近松彰，和達大樹，組頭広志，尾嶋正治，藤森淳，大西剛，Mikk Lippmaa，小野寛太，川崎雅司，鯉沼秀臣：*in-situ* 角度分解光電子分光による $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ 薄膜のバンド構造；組成依存性，同上.

[108] 組頭広志, 豊田大介，滝沢優, 大久保勇男，尾嶋正治，大西剛，Mikk Lippmaa，藤森淳，小野寛太，川崎雅司，鯉沼秀臣：*in-situ* 光電子分光による $SrRuO_3$ 薄膜電子状態の膜厚依存性，同上.

[109] 藤森伸一，岡根哲夫，斎藤祐児，小林啓介，藤森淳，山上浩志，池田修悟，松田達麿，芳賀芳範，山本悦嗣，大貫惇睦：UPd_2Al_3 のバンド構造とその温度依存性：角度分解光電子分光，同上.

[110] 岡根哲夫，竹田幸治，藤森伸一，寺井恒太，斎藤裕児，小林啓介，藤森淳，芳賀芳範，山本悦嗣，大貫惇睦：UFe_2 の軟X線吸収磁気円二色性測定，同上.

[111] 竹田幸治，岡本淳，岡根哲夫，藤森伸一，斎藤祐児，村松康司，藤森淳，岡林潤，尾嶋正治，大矢忍，Pham Nam Hai，田中雅明: GaMnAs の XMCD の磁場・温度・濃度依存性，同上.

[112] 三澤真人，笹川崇男，八木創，吉田鉄平，藤森淳，高木英典：$La_2Cu_{1-x}Li_xO_4$ における化学ポテンシャルシフト，同上.

[113] 島田賢也，東口光晴，生天目博文，谷口雅樹，藤森伸一，斉藤祐児，藤森淳，金武星，平田大輔，高畠敏郎: CeRhSn および CeRhIn の高分解能光電子分光, 同上.

[114] 近松彰，和達大樹，組頭広志，尾嶋正治，藤森淳，大西剛，Mikk Lippmaa，小野寛太，川崎雅司，鯉沼秀臣：*In-situ* 角度分解光電子分光による $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ 薄膜のバンド構造，第 25 回表面科学講演大会（大宮ソニックシティ，2005 年 11 月）

[115] 和達大樹，近松彰，滝沢優，橋本龍司，組頭広志，溝川貴司，藤森淳，尾嶋正治，Mikk Lippmaa，川崎雅司，鯉沼秀臣：$La_{1-x}Sr_xFeO_3$ 薄膜の *in-situ* 角度分解光電子分光，日本表面科学会「放射光表面科学部会シンポジウム 」（東大化学，2005 年 11 月）

[116] 近松彰，和達大樹，組頭広志，尾嶋正治，藤森淳，大西剛，Mikk Lippmaa，小野寛太，川崎雅司，鯉沼秀臣：*In-situ* 角度分解光電子分光による $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ 薄膜のバンド構造，同上

[117] 和達大樹，近松彰，組頭広志，吉田鉄平，溝川貴司，藤森淳，尾嶋正治：3 次元ペロブスカイト型酸化物の ARPES のタイトバインディング計算によるシミュレーション，日本放射光学会（名古屋，2006 年 1 月）

[118] 和達大樹，堀田育志，滝沢優，藤森淳，椋木康滋，須崎友文，Harold Y. Hwang，高田恭孝，堀場弘司，松波雅治，辛埴，矢橋牧名，玉作賢治，西野吉則，三輪大五，石川哲也：光電子分光による $LaAlO_3/LaVO_3$ 界面の電子状態の観測，同上

[119] Y. H. Lin, K. Terai, H. Wadati, M. Kobayashi, M. Takizawa, J. I. Hwang, A. Fujimori, S.-I. Fujimori,T. Okane, Y. Saitoh, K. Kobayashi: Investigation of Ferroelectric Stability of Perovskite Ti-oxide Thin Films by PES and XAS, 同上

[120] 滝沢優，和達大樹，小林正起，田中清尚，八木創，橋本信，吉田鉄平，藤森淳，近松彰，組頭広志，尾嶋正治，渋谷圭介，三原尚士，大西剛，Mikk Lippmaa，川崎雅司，鯉沼秀臣：モット絶縁体 $LaTiO_3$ －バンド絶縁体 $SrTiO_3$ 界面の光電子分光，同上

[121] 近松彰，和達大樹，組頭広志，尾嶋正治，藤森淳，大西剛，Mikk Lippmaa，小野寛太，川崎雅司，鯉沼秀臣：$La_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$ 薄膜の *in-situ* 角度分解光電子分光；温度依存性，同上

[122] 近松彰，和達大樹，組頭広志，尾嶋正治，藤森淳，大西剛，Mikk Lippmaa，小野寛太，川崎雅司，鯉沼秀臣：$La_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$ 薄膜の *in-situ* 角度分解光電子分光；温度依存性，同上

[123] 豊田大介，滝沢優，大久保勇男，組頭広志，尾嶋正治，Mikk Lippmaa，藤森淳，川崎雅司，鯉沼秀臣：*In-situ* 放射光光電子分光による $SrRuO_3/SrTiO_3$ 界面と電子状態，同上

[124] 豊田大介，滝沢優，大久保勇男，組頭広志，尾嶋正治，Mikk Lippmaa，藤森淳，川崎雅司，鯉沼秀臣：$SrRuO_3/SrTiO_3$ ヘテロ界面の *in-situ* 放射光光電子分光評価，同上

[125] 島田賢也，有田将司，東口光晴，生天目博文，谷口雅樹，藤森伸一，斉藤祐児，藤森淳，笹川哲也，高畠敏郎：$Ce_{1-x}La_xRhAs$ の高分解能光電子分光，同上

[126] 藤森伸一，岡根哲夫，斎藤祐児，小林啓介，藤森淳，山上浩志，池田修悟，松田達麿，芳賀芳範，山本悦嗣，大貫惇睦：磁性と超伝導の共存を示すウラン化合物 UPd_2Al_3 の電子状態：軟 X 線角度分解光電子分光による研究，同上

[127] 加茂剛，山崎健太郎，山崎達也，安斎太陽，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：単層系銅酸化物高温超伝導体 $Bi_2Sr_{1.6}La_{0.4}CuO_{6+\delta}$ のノード準粒子の温度依存性，同上

[128] 山崎達也，加茂剛，安斎太陽，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を用いた Bi2212 の二重層バンドの選択的観測，同上

[129] 寺井恒太，岡根哲夫，竹田幸治，藤森伸一，齋藤祐児，吉井賢資，小林啓介，藤森淳：PLD 法による $CaMn_{1-x}Ru_xO_3$ 薄膜の作製と磁気円二色性測定，同上

[130] 岡根哲夫，竹田幸治，藤森伸一，寺井恒太，斎藤祐児，小林啓介，藤森淳，芳賀芳範，山本悦嗣，大貫惇睦：UFe_2 の軟 X 線吸収磁気円二色性測定，同上

[131] 藤森淳：高温超伝導体における擬ギャップと化学ポテンシャルの組成・温度依存性，科研費特定研究「異常量子物質」成果報告会（東北大金研，2006 年 1 月）

[132] 藤森淳：強磁場中の内殻吸収 XMCD 測定による希薄磁性半導体の強磁性発現機構の研究，JAEA 放射光科学研究シンポジウム（SPring-8，2006 年 3 月）

[133] 江端一晃，滝沢優，和達大樹，藤森淳，桑原英，富岡泰秀，十倉好紀：$Nd_{1-x}Sr_xMnO_3$ の化学ポテンシャルシフト，日本物理学会第 61 回年次大会（愛媛大学，2006 年 3 月）

[134] 和達大樹，堀田育志，滝沢優，藤森淳，椋木康滋，須崎友文，Harold Y. Hwang，高田恭孝，堀場弘司，松波雅治，辛埴，矢橋牧名，玉作賢治，西野吉則，三輪大五，石川哲也：$LaAlO_3/LaVO_3$ 界面の電子状態の観測，同上

[135] 前川考志，滝沢優，和達大樹，藤森淳，長尾洋平，村岡祐治，廣井善二：TiO_2 でキャップした VO_2 薄膜の光電子分光，同上

[136] 大木康弘，黄鐘日，江端一晃，長船義敬，藤森淳，閔宗俊，田畑仁：(Ni,Zn,Fe,Ti)3O4 薄膜の光電子分光，同上

[137] 滝沢優，豊田大介，小林正起，大久保勇男，組頭広志，尾嶋正治，竹田幸治，寺井恒太，藤森伸一，岡根

哲夫，斎藤祐児，藤森淳，Mikk Lippmaa，川崎雅司，鯉沼秀臣：$SrRuO_3$ 薄膜の軟 X 線磁気円二色性の膜厚依存性，同上

[138] 橋本信，八木創，池田正樹，田中清尚，吉田鉄平，藤森淳，奥沢誠，山田和芳，掛下照久，永崎洋，内田慎一：光電子分光による $La_{2-x}Sr_xCuO_4$，$La_2CuO_{4.10}$ の擬ギャップのホール濃度および温度依存性 II，同上

[139] 黄鐘日，長船義敬，小林正起，江端一晃，大木康弘，石田行章，藤森淳，田中新，竹田幸治，岡根哲夫，斎藤祐児，小林啓介：熱拡散により作製した希薄磁性半導体 GaN:Mn の *in-situ* 共鳴光電子分光と内殻磁気円二色性，同上

[140] 長船義敬，石田行章，黄鐘日，江端一晃，大木康弘，藤森淳，岡林潤，金井謙，高橋晴彦，尾嶋正治：GaAs(001) に蒸着した Mn の熱拡散の光電子分光による深さ方向分析，同上

[141] 石田行章，黄鐘日，小林正起，竹田幸治，間宮一敏，岡本淳，藤森伸一，岡根哲夫，寺井恒太，斎藤裕児，村松康司，藤森淳，田中新，佐伯洋昌，川合知二，田畑仁：$Zn_1 - xV_xO$ の軟 X 線磁気円二色性，同上

[142] 池田正樹，吉田鉄平，橋本信，藤森淳，久保田正人，小野寛太，宇野沢圭一，笹川崇男，高木英典：$Sm_{1.85}Ce_{0.15}CuO_4$ の角度分解光電子分光，同上

[143] 藤森伸一，岡根哲夫，斎藤祐児，小林啓介，藤森淳，山上浩志，池田修悟，松田達麿，芳賀芳範，山本悦嗣，大貫惇睦：磁性と超伝導の共存を示すウラン化合物 UPd_2Al_3 の軟 X 線角度分解光電子分光，同上

[144] 島田賢也，東口光晴，生天目博文，谷口雅樹，藤森伸一，斉藤祐児，藤森淳，笹川哲也，高畠敏郎：$Ce_{1-x}La_xRhAs$ の高分解能光電子分光，同上

[145] 山崎達也，加茂剛，安斎太陽，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：低エネルギー角度分解光電子分光による $Bi_2Sr_{1.6}La_{0.}4CuO_{6+\delta}$ のノード準粒子構造の研究，同上

[146] 加茂剛，山崎健太郎，山崎達也，安斎太陽，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 $Bi_2Sr_{1.6}La_{0.4}CuO_{6+\delta}$ のノード準粒子構造の研究，同上

[147] 和達大樹，堀田育志，滝沢優，藤森淳，椋木康滋，須崎友文，Harold Y. Hwang，高田恭孝，堀場弘司，松波雅治，辛埴，矢橋牧名，玉作賢治，西野吉則，三輪大五，石川哲也：光電子分光による $LaAlO_3/LaVO_3$ 量子井戸構造の電子状態観測２，応用物理学会タグジャンプファイル（武蔵工大，2006 年 3 月）

[148] 堀田育志，和達大樹，椋木康滋，須崎友文，藤森淳，Harold Y. Hwang：光電子分光による $LaAlO_3/LaVO_3$ 量子井戸構造の電子状態観測１，同上

[149] 柳田剛，斉藤祐児，中村哲也，田中秀和，川合知二，藤森淳：軟 X 線吸収磁気円二色性を用いた $(Nd,Ce)MnO_3$ 薄膜における強磁性起源の探索，同上

[150] 豊田大介，高石理一郎，滝沢優，大久保勇男，組頭広志，尾嶋正治，Mikk Lippmaa，藤森淳，川崎雅司，鯉沼秀臣：$SrRuO_3/Nb:SrTiO_3$ ヘテロ界面電子状態の *in-situ* 放射光光電子分光評価，同上

[151] 寺井恒太，岡根哲夫，竹田幸治，藤森伸一，齋藤祐児，吉井賢資，大和田謙二，稲見俊哉，有田将司，島田賢也，生天目博文，谷口雅樹，小林啓介，小林正起，藤森淳：軟 X 線吸収磁気円二色性測定による $CaMn_{1-x}Ru_xO_3$ 強磁性発現機構の理解，同上

[152] 岡野圭央，摩庭篤，大久保勇男，組頭広志，尾嶋正治，和達大樹，Mikk Lippmaa，藤森淳，川崎雅司，鯉沼秀臣：$Pr_{1-x}Ca_xMnO_3$ 薄膜の放射光光電子分光による電子状態解析，同上

[153] 摩庭篤，近松彰，和達大樹，組頭広志，尾嶋正治，藤森淳，Mikk Lippmaa，川崎雅司，鯉沼秀臣：エピタキシャル応力を制御した La0.6Sr0.4MnO3 薄膜の放射光光電子分光，同上

招待講演

[154] 吉田鉄平：擬ギャップとフェルミアーク，金研研究会「高温超伝導体における特異な電子状態と物性」（東北大金研，2005 年 8 月）

[155] 藤森淳：希薄磁性半導体の XMCD，金研研究会「ワイドギャップ希薄磁性半導体」（東北大金研，2005 年 10 月）

[156] 藤森淳：ARPES による高温超伝導体の研究，科研費特別推進研究「量子ビームによる高温超伝導機構の解明」研究会（五浦海岸，2005 年 11 月）

[157] 吉田鉄平：ペロブスカイト型酸化物の角度分解光電子分光，日本表面科学会「放射光表面科学部会シンポジウム 」（東大化学，2005 年 11 月）

[158] 藤森淳：強磁性半導体の光電子分光と XMCD による評価，科研費特定研究「半導体ナノスピントロニクス」成果報告会（東工大大岡山キャンパス，2006 年 1 月）

[159] 藤森淳：強相関遷移金属酸化物の角度分解光電子分光，第 23 回 PF シンポジウム（高エネ研，2006 年 3 月）

セミナー

[160] 吉田鉄平：光電子分光で見た高温超伝導体の準粒子構造（電気通信大学, 2005 年 4 月）

[161] A. Fujimori: Photoemission Spectroscopy of Transition-Metal Oxides and High-Temperature Superconductors (Yonsei University, Seoul, July 2005)

[162] 吉田鉄平：遷移金属酸化物の角度分解光電子分光：銅酸化物とバナジウム酸化物（産総研，2005 年 8 月）

[163] A. Fujimori: Photoemission and XMCD Studies of Diluted Ferromagnetic Semiconductors"(Tata Institute for Fundamental Research, Mumbai, February 2006)

4.2 内田研究室

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), 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), Science (1999), 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), Science (2002))。

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))。

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 19 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。

4.2.1 梯子型 Cu 酸化物の電荷秩序と超伝導

高温超伝導は 2 次元 Cu 酸化物の CuO_2 面で起こる超伝導現象である。CuO_2 面内では、Cu 原子が四方を酸素で囲まれ（CuO_2 ユニット）、その酸素を隣同士共有する形で（端共有）2 次元のネットワークを形成している。CuO_2 ユニットを基本とする構造をもつ物質は高温超伝導体だけではない。CuO_2 ユニットが酸素を端共有して、一方向のみに連なっている 1 次元 Cu 酸化物、Sr_2CuO_3、が存在する。Sr_2CuO_3 は化学的操作によるキャリアードーピングが難しいが、光励起によって電子ー正孔対をつくることができる。その正孔のダイナミックスを角度分解光電子分光（ARPES）で調べ、正孔のスピンと電荷が独立に運動している事を示した。これは、理論的に予想されていた 1 次元電子のスピン・電荷分離の最初の実験的検証となった。

上記の実験からは、1 次元 Cu 酸化物でどのような電子相が実現するかはわからない。しかし、正孔ドープされた 1 次元 Cu 酸化物は、偶然、高温超伝導体 $YBa_2Cu_3O_7$ あるいは非超伝導体 $PrBa_2Cu_3O_7$ 中に存在している。Pr123 が超伝導体にならないことから、間接的ながら、ドープされた CuO 鎖の基底状態は超伝導ではないことがわかる。

様々な形態の結晶構造を示す Cu 酸化物の中でもユニークなのは梯子型構造である。基本的に 1 次元系であるが、2 次元の高温超伝導体と、いくつかの点で共通の電子的性質をもつため、高温超伝導発現にとって本質的な要素を含むかもしれない系として、理論、実験の両面で注目されている。我々は、$Sr_{14-x}Ca_xCu_{24}O_{41}$ という 2 本脚梯子化合物に注目し、その結晶成長、ドーピング制御、そして、この系での超伝導実現の条件を様々な物性測定で調べている。

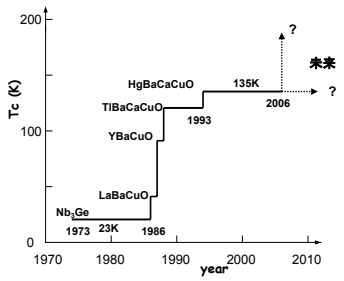


図 4.2 a: 超伝導体 T_c の上昇の歴史（1973 年以降）

電荷秩序

この系の超伝導は 3GPa 以上の高圧下で実現する（T_c は最高 12K）。正孔ドーピング量や圧力変化に伴い、梯子上の正孔が整列したり（電荷秩序）クーパー対形成により超伝導になる。

超伝導は高ドープ (x >10)、高圧下 (>3GPa) で絶縁体ー超伝導（SI) 転移を経て実現する。それ以外の状況下では常に絶縁体となる。絶縁体の起源が梯子上の正孔あるいは正孔対の電荷整列（CDW）であり、秩序形成に伴う集団励起モードが存在することを、ラマン散乱やマイクロ波伝導そして X 線共鳴散乱の実験で明らかにした。

4.2.2 正常状態の磁気ボルテックス

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がかかったとすると、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。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）まで観測できる。しかし、擬ギャップ温度 T^* に比べると、T 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、CuO2 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 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。

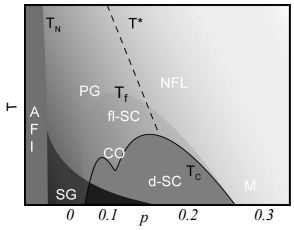


図 4.2 b: 高温超伝導体の電子相図

4.2.3 高温超伝導体のナノスケール不均一性と秩序競合

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。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。

通常の超伝導体では、多数のクーパー対の波動関数が空間的に重なり合い、均一に分布する事により、その位相を揃えて超伝導状態が実現する。d 波対称性をもつクーパー対が形成され、またクーパー対の半径が極端に短く (∼2nm)、その数も少ない高温超伝導体中でも、そのような均一な状態が実現しているものと考えられてきた。s 波クーパー対は運動量空間での等方的な対形成を意味するが、d 波の場合は運動量空間に異方性を生じさせる。

STM/STS は原子スケールでの電子状態を調べる有力なプローブである。コーネル大学 J. C. Seamus Davis グループと共同で Bi 系超伝導体に対して STM 観察を行ったところ、実空間においてもナノメートルのスケールで超伝導電子状態に不均一性が生じている事が明らかになってきた。Bi 系高温超伝導体の表面で、超伝導ギャップの大きさが幅広い空間分布をもつことが判明した。ギャップの小さい領域ではクーパー対の位相が揃っていて超伝導秩序が形成されている。ところが、ギャップの大きな領域ではギャップは開いているものの超伝導秩序が形成されていないのである。このような超伝導、非超伝導領域が 2-3nm のスケールでパッチ状に分布しているというのが STM 観測の高温超伝導体像である。

最近、我々は Bi 系物質においてドーパント原子（過剰酸素）の位置を同定することに成功した。これとギャップ不均一性には相関が見出される。ドーパント原子の近傍の CuO_2 面ではギャップが大きくなっており、同時に超伝導のコヒーレンスが弱くなっている。すなわち、結晶格子の乱れが高温超伝導状態の電子不均一性の原因になっていることが判明した。

ノード準粒子とアンチノード準粒子

STM で観測された不均一状態は、単純な相分離状態ではない。不均一性が際立つのは、超伝導ギャップの最大値の分布をみたときである。すなわち STM のバイアス電圧（エネルギー）、従って STM 探針から生成される準粒子のエネルギーと運動量に依存した不均一性になっている。バイアス電圧が小さいとき、生成されるのはギャップノード近くの準粒子であり、それを通してみた超伝導状態はほぼ均一である。ノード準粒子は超伝導、非超伝導領域を区別せず、結晶中を自由に動き回っていることがわかる。その結果、準粒子の波動関数は容易に量子力学干渉を

起こし、その干渉縞が表面全体にわたって観測される。干渉縞のパターン、間隔は STM バイアスにより劇的に変化するが、これはノード付近での準粒子の大きな分散と d 波対称性超伝導ギャップに起因するものである。　バイアス電圧を増加させてゆくと、干渉縞のパターンが変化するとともに、それが観測される領域がギャップマップ上の超伝導領域に限られてくる。これは、アンチノード準粒子が超伝導領域でのみコヒーレントになっていることを意味している。逆に、非超伝導領域では、アンチノード準粒子が存在しない（定義できない）ということで、運動量空間の「異方性」が実空間の「不均一性」と密接に関係していることを示している。

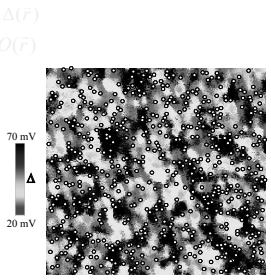


図 4.2 c: ドーパント原子とギャップ不均一性との相関

＜報文＞

(原著論文)

[1] K. McElroy, D. -H. Lee, J. E. Hoffman, K. M. Lang, J. Lee, E. W. Hudson, H. Eisaki, S. Uchida, and J. C. Davis: Coincidence of Checkerboard Charge Order and Antinodal State Decoherence in Strongly Underdoped Superconducting $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$, Phys. Rev. Lett. 94, 197005 (2005).

[2] K. McElroy, Jinho Lee, J. A. Slezak. D. -H. Lee, H. Eisaki, S. Uchida and J. C. Davis: Atomic-Scale Sources and Mechanism of Nanoscale Electronic Disorder in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$, Science 309, 1048-1052 (2005).

[3] K. Fujita, T. Noda, K. M. Kojima, H. Eisaki, and S. Uchida: Effect of Disorder Outside the CuO_2 Plane on T_c of Copper Oxide Superconductors, Phys. Rev. Lett. 95, 097006 (2005).

[4] X. J. Zhou, Junren Shi, T. Yoshida, T. Cuk, W. L. Yang, V. Brouet, J. Nakamura, N. Mannella, Seiki Komiya, Yoichi Ando, F. Zhou, W. X. Ti, J. W. Xiong, Z. X. Zhao, T. Sasagawa, T. Kakeshita, H. Eisaki, S. Uchida, A. Fujimori, Zhenyu Zhang, E. W. Plummer, R. B. Laughlin, Z. Hussain, and Z. -X. Shen: Multiple Bosonic Mode Coupling in the Electron Self-Energy of $(La_{2-x}Sr_x)CuO_4$, Phys. Rev. Lett. 95, 117001, (2005).

[5] P. M. Singer, T. Imai, F. C. Chou, K. Hirota, M. Takaba, T. Kakeshita, H. Eisaki, and S. Uchida: ^{17}O NMR study of the inhomogeneous electronic state in $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ crystals, Phys. Rev. B72, 014537 (2005).

[6] T. Nakanishi, N. Motoyama, H. Mitamura, N. Takeshita, H. Takahashi, H. Eisaki, S. Uchida, and N. Mori: Magnetic field effect on the pressure-included superconducting state in the hole-doped two-leg ladder compound $Sr_2Ca_{12}Cu_{24}O_{41}$, Phys. Rev. B72, 054520 (2005).

[7] O. Rösch, O. Gunnarsson, X. J. Zhou, T. Yoshida, T. Sasagawa, A. Fujimori, Z. Hussain, Z. -X. Shen, and S. Uchida: Polaronic Behavior of Undoped High-T_c Cuprate Superconductors from Angle-Resolved Photoemission Spectra, Phys. Rev. Lett. 95, 227002 (2005).

[8] Yayu Wang, Lu Li, M. J. Naughton, G. D. Gu, S. Uchida, and N. P. Ong: Field-Enhanced Diamagnetism in the Pseudogap State of the Cuprate $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ Superconductor in an Intense Magnetic Field, Phys. Rev. Lett. 95, 247002 (2005).

[9] 服部真司: 高温超伝導体ストライプ相における磁場中光学応答。(修士論文)

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[10] S. Uchida: Role of Disorder in High- T_c Superconductivity (The 4th Asia-Pacific Workshop on Strongly Correlated Systems, Beijing, China, May 27, 2005).

[11] S. Uchida: Inhomogeneity and t' Physics in high- T_c Cuprates (Workshop on Complexity in Strongly Correlated Electron Systems, Santa Barbara, USA, July 11, 2005).

[12] S. Uchida: Grand challenges in Complex Adaptive Matter- Correlated Electron Materials (ICAM/I2 Annual Conference, Sata Fe, USA, November 12, 2005).

[13] S. Uchida: Nanoscale control of T_c in high temprature superconductors (NEDO Workshop on functional oxides, Kona, Hawaii, USA, November 27, 2005).

[14] S. Uchida: Effect of Disorder on T_c and Nanoscale Electronic Inhomogeneity of High- T_c Cuprates (The 6th Taiwan-Korea-Japan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems and the 4th Workshop on Physics of Metal Oxides, Taroko, Taiwan, December 01, 2005).

[15] S. Uchida, Electron-Phonon Interaction and Isotope Effect in High- T_c Cupartes (The 3rd Workshop on Electron-Phonon Interaction in Strongly Correlated Electron Systems, Hongo, Japan, January 12, 2006).

[16] S. Uchida, T_c of Cuprate Superconductors: How hich can T_c be raised and how low can Tc be reduced? (The 2nd Topical SCENET-2 Workshop and Chem-HTSC-X1 Workshop, Majorca, Spain, March 16, 2006).

一般講演

[17] K. Fujita, S. Uchida, and H. Eisaki: Superconductor-Insulator transition induced by disorder outside the CuO_2 plane. 24th International Conference on Low Temperature Physics. (Florida, USA, August 2006).

[18] K. Fujita, K. M. Kojima, H. Eisaki, and S. Uchida: Effect of Disorder Outside the CuO_2 planes on T_c of Copper Oxide Superconductors. APS March Meeting, (Baltimore, USA, March 2006).

[19] K. Fujita, A.M. Wang, J. Lee, J. Slezak, H. Eisaki, S. Uchida, and J. C. Davis: High Presicion Spectroscopic Imaging of Single Layer Cuprate : $Bi_2Sr_1.6La_0.4CuO_{6+\delta}$. APS March Meeting, (Baltimore, USA, March 2006).

(国内会議)

招待講演

[20] 内田慎一：高温超伝導体の T_c 物理、t' 物理，科研費特定領域研究「異常量子物質」キックオフミーティング（駒場，2005 年 7 月 17 日）.

[21] 内田慎一：高温超伝導物語，物性若手夏の学校（妙高高原，2005 年 8 月 8-10 日）.

[22] 内田慎一，藤田和博，永崎洋：高温超伝導体電荷不均一性と擬ギャップ，東北大金研ワークショップ「高温超伝導体における特異な電子状態と物性」（仙台，2005 年 8 月 24 日）.

[23] 内田慎一，小嶋健児：高温超伝導体のテラヘルツ光学応答，日本物理学会 2005 年秋季大会領域 8 シンポジウム（同志社大京田辺，2005 年 9 月 21 日）.

[24] 内田慎一：高温超伝導研究の進展，九州大学理学部特別セミナー（福岡，2005 年 12 月 14 日）.

[25] 内田慎一：高温超伝導－夢のつづき，応用物理学会支部講演会（名古屋，2006 年 1 月 7 日）.

一般講演

[26] 服部真司，藤田和博，小嶋健児，永崎洋，内田慎一：LSCO ストライプ相における磁場中光学応答，日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学京田辺キャンパス，2005 年 9 月）.

[27] 藤田和博，内田慎一，永崎洋：アンダードープ Bi2201 における面間不純物効果日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学京田辺キャンパス，2005 年 9 月）.

[28] 小嶋健児：高温超伝導体のテラヘルツ光学応答，日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学京田辺キャンパス，2005 年 9 月）.

[29] 藤巻洋介, 小嶋健児, 内田慎一: 一次元スピン系における赤外吸収と磁気励起　日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学京田辺キャンパス，2005 年 9 月）.

[30] 石角元志，藤田和博，小嶋健児，内田慎一：Bi 系高温超伝導体の面外の乱れと光学応答，日本物理学会 2006 年春季大会（愛媛大学・松山大学，2006 年 3 月）.

[31] 保房宏昭、藤田和博、石角元志、小嶋健児、内田慎一：(Bi,Pb)2Sr2(Ca,Y)Cu2O8+ δ の面外の乱れと超伝導の系統的な研究、日本物理学会 2006 年春季大会（愛媛大学・松山大学，2006 年 3 月）.

4.3 長谷川研究室

4 月から修士課程 1 年生として永村直佳と久保敬祐が新しくメンバーに加わり、平原徹と吉本真也が修士課程を修了して博士課程に進学した。8 月には日本学術振興会特別研究員 Marie D'angelo がパリ第 7 大学の助教授としてフランスに帰国した。3 月には，宮田伸弘と細村嘉一が修士課程を修了し、宮田は博士課程に進学，細村は企業に就職した。また，劉燦華が博士課程を修了して，物質材料研究機構に博士研究員として転出した。

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、それらに固有の電子状態の電子輸送特性を明らかにし、3 次元結晶のバルク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、表面近傍での電子励起、エレクトロマイグレーションなどの表面質量輸送現象など、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

Au/Si(553) 擬一次元鎖構造の電気伝導特性

低次元物質では、電子の閉じ込めによるエネルギーの離散化、状態密度の発散や金属-絶縁体転移などの興味深い物理現象が現れる。階段状の Si(553) 表面上に Au 原子を真空蒸着すると数原子幅の「原子鎖」の列が作成され、表面全体に一様な擬一次元金属的な構造となる。これは金属 - 絶縁体転移することが光電子分光 (PES) や走査トンネル顕微鏡（STM）の研究から報告されている。この表面の電気伝導度の温度依存性を測定した結果、金属 - 絶縁体転移を観測したが、PES や STM の結果と異なる転移温度を示した。測定方法による解釈の違いのほかに、欠陥が重要な役割をもっていることがわかった。今後は欠陥の量をコントロールすることで、欠陥の影響をより明らかにできると考えている。

表面電気伝導に対する微量吸着原子の影響

金属的で二次元自由電子的な表面電子バンドを持つ Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Ag 表面上に微量な（0.02〜0.14 原子層）Au 原子を吸着させると、キャリアがドーピングされて表面電気伝導度が増大する。今年度は、その二次元伝導電子の散乱機構を明らかにするために、温度可変のマイクロ 4 端子プローブ法を用いて、室温から 120 K までの範囲で伝導度の温度依存性を調べた。Au 原子を吸着させる前の清浄な $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Ag 表面の伝導度は冷却とともに上昇し，フォノン散乱が支配的に効く金属的な伝導であった。これに対して、Au 原子吸着した $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Ag 表面の伝導度は冷却とともに減少するという非金属的な振る舞いを示した。これは $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Ag 表面上に散在する Au 原子がキャリアに対して無秩序なポテンシャルを与えた結果だと考えられる。

Bi 量子薄膜の表面状態伝導

Bi バルク結晶は，フェルミ準位にわずかしかキャリアーが存在しない半金属であるのに対して，表面状態が非常に強い金属性を示すことが光電子分光測定から明らかになった。そこでマクロ及びマイクロ 4 端子プローブ法によって，Bi(001) 超薄膜の電気伝導度の膜厚依存を測定し、表面およびバルク成分の寄与を識別した。その結果、これらの超薄膜の電気伝導度は表面状態が支配的であることが分かった。さらにその伝導度は他の物質系の表面状態電気伝導度に比べて一桁大きい値であったが、ボルツマン方程式を用いて定量的にバンド構造やフェルミ面の大きさから見積もった結果、その値は妥当であることが明らかになった。また温度依存性測定は室温から 10 K まで金属的な振る舞いを示し、従来から言われていた表面状態の電荷密度波転移は起こらないことが示された。

Si(111)-In 表面：金属伝導と金属-絶縁体転移

In が 1 原子層程度吸着した Si(111) 上の種々の表面超構造の電気伝導度の温度依存性を系統的に調べた。光電子分光により半導体的な表面であることがわかっている $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ と $\sqrt{31}\times\sqrt{31}$ 表面の電気伝導度は室温でそれぞれ $2\mu S/$□,$20\mu S/$□ と低く、その温度依存性は明確に半導体的であった。また，低温で電荷密度波ギャップを形成して金属絶縁体転移する 4×1 表面の電気伝導度は，過去の報告と同様 120 K 前後で金属-絶縁体的な転移を再現し、さらに酸素暴露を行って欠陥を導入したところ抵抗値の上昇を確認した。フェルミ準位で高い電子密度と大きいフェルミ波数をもつ $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ 表面は， 10 K の低温でも約 $700\mu S/$□ と極めて高い電気伝導度を持ち、その温度依存性は室温から 10 K まで金属的であった。このような低温領域まで金属的な振る舞いが保たれる表面超構造は他に例が無い。定量的にもこれらの電気伝導およびその温度依存性は光電子分光からえられたフェルミ面構造から簡潔に説明できた。そこから λ〜1 程度の大きい電子格子相互作用を持つことがわかったため、今後さらに低温で表面超構造における超伝導転移の可能性をさぐることを計画している。また、この表面に 100 L 程度の酸素を暴露したり、In の蒸着量を不足させたりすることで意図的に乱れ・欠陥を導入した場合、Mott 可変領域ホッピング伝導型の半導体的な振る舞いに変化することを見出した。今後は、このような外的な要因でもたらされる乱れが $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ の金属-絶縁体転移にもたら影響を明らかにしていく予定である。[韓国 Inha 大学との共同研究]

Si(111)-Au 表面：乱れとホッピング伝導のタイプ

1 原子層程度以下の Au 原子を Si(111) 表面に吸着させると，吸着量や温度処理の違いによって 5 種類の表面超構造 [5×2(擬 1 次元的), $\alpha-\sqrt{3}\times\sqrt{3}$(２次元金属), $2\sqrt{21}\times2\sqrt{21}$, $\beta-\sqrt{3}\times\sqrt{3}$(２次元ガラス半導体), 6×6(２次元結晶半導体)] が得られる。これらの電気伝導度の温度依存性を室温から 10 K まで測定した。同じ Au 吸着量である 6×6 表面と $\beta-\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 表面は原子配列の長距離秩序が違い，互いに結晶とガラスの関係にあるが、結晶表面 (6×6) がガラス表面 $(\beta-\sqrt{3}\times\sqrt{3})$ より高い電気伝導度を持つことを明らかにした。また、30 K 以下の温度依存性の解析から前者では ES 型の可変領域ホッピング伝導、後者では極度の乱れにより最近接のホッピング伝導になるという質的な違いがあることを明らかにした。

Au 超薄膜の電気伝導：下地表面構造と弱局在

Si(111) 表面に Au 原子を数原子層蒸着すると比較的乱れた Au 膜が形成され、これはしばしば乱れと電気伝導に関する研究対象とされてきた。本研究においては下地の表面超構造を 7×7 と 6×6-Au に作り分け， Au 蒸着時の温度処理を変えることで，成長した Au 膜の形態の違い，電子状態，およびその電気伝導を STM，内殻光電子分光法，マイクロ 4 端子プローブ法によって系統的に調べた。電気伝導度はすべての膜に共通して温度の対数に比例する弱局在状態の温度依存性を示した。その比例定数は電子の散乱の機構や電子電子相互作用の強さなどによって決まってくるが、電気伝導度を支配する膜の形態にかかわりなく下地の表面超構造によって決まっていた。弱局在の様相が下地の表面超構造よって影響を受けていることを示唆している。

Si(111)-Au,In 複合系：微量な In 添加の影響

Si(111)-Au 表面超構造の 1 つである $\alpha-\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Au 表面は金属的な表面バンドをもつ。一方で STM による観察からこの表面はドメインウォール (DW) と呼ばれるある幅を持つ位相境界線で 20%程度の領域が覆われている。この表面の電気伝導度を測定した結果、10 K 付近の低温領域においては数 $\mu S/\square$ という金属としては非常に低い値を示した。一方，近年この表面に微量の In 原子を添加、加熱することで DW が消失し、全体が単一ドメインの $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 領域で覆われた表面に転移することが報告された。この表面の 10 K における電気伝導度は上述の $\alpha-\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Au 表面の約 100 倍になった。これは微量な In 原子によって表面の電子構造が劇的に変化した可能性のほかに、ＤＷの消失やステップ間の電気的な接続などのナノスケールの電気回路的な接続の変化が考えられるので，光電子分光法やＳＴＭを用いてそれらを明らかにする予定である。

Si(111)$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Pb 表面の電気伝導

Si(111)-7×7 表面に 1/3 原子層の Pb が吸着すると、$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 周期の表面再構成が起こる。この表面の電気伝導の測定を行った。この表面は、単位胞あたりの電子数から金属的であることが予想されるが、その伝導度の温度依存性は半導体的であった。これは光電子分光測定において金属的バンドが存在しないことと符合する。しかし、伝導機構を熱活性型として見積もった活性エネルギーの値は、光電子分光における表面準位のギャップ値とは符合せず，この表面伝導の機構がバンド伝導による機構とは異なることが示唆される。

4.3.2 表面ナノ構造

吸着子誘起の局在状態と表面自由電子の相互作用

二次元自由電子系に引力ポテンシャルを持つ欠陥があると、必ず局在（束縛）状態を作る。逆に，この局在状態が二次元自由電子系の分散関係にも影響を及ぼすと予想されるが、実験的にははまだ観察されていない。そこで，二次元自由電子系である Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Ag 表面の上に微量（$\sim$ 0.02 原子層）の一価金属原子（Au,Ag,Cs) を吸着させ、バンド分散の変化を角度分解光電子分光法で調べた。この表面上の一価金属吸着原子は下地に電子を供与して陽イオンになり、局在状態を作る。室温では、吸着子が拡散しやすく吸着サイトが特定しないため、はっきりしないが，低温になると、吸着子が特定の吸着サイトに固定され、散在した局在状態が共鳴バンドを作る。この共鳴バンドが二次元自由電子的な表面電子バンドを横切るため、表面バンドを上下に分裂させた。これは吸着子の誘起した局在状態と自由電子の混成相互作用の結果である。

表面合金相と Hume-Rothery 型化合物

バルク固溶体の金属合金の中には、Cu-Zn 系で知られているように、電子数と原子数の割合によって結晶構造が決まるものがあり、それらは Hume-Rothery 型化合物 (電子化合物) と呼ばれている。形成にはフェルミ球とブリルアン・ゾーン境界の接触が重要であることが分かっているものの、その安定性は現在でも議論されており、最近では準結晶との密接な関係も指摘されている。様々な表面合金相の中で Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Ag 表面上の一価金属 (アルカリ金属、貴金属) 吸着系で形成される $\sqrt{21}\times\sqrt{21}$ 相は、そのフェルミ面とブリルアン・ゾーン境界の位置が近いので表面 (2次元) 系における Hume-Rothery 型化合物の研究対象として適している。この観点から $\sqrt{21}\times\sqrt{21}$ 相について内殻光電子分光、光電子フェルミ面マッピング、STM を用いて調べた。Hume-Rothery 則からすれば、２種類の吸着原子の全吸着量が同じであれば組成比を変えても $\sqrt{21}\times\sqrt{21}$ 相になるはずであ

るが，実際，いくつかの異なる組成比で $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 相が形成されることを見出した。しかし，それらの STM 像は異なることもわかったが，これらの表面相は酷似した金属的なバンド構造 (フェルミ面) を有していた。このように Hume-Rothery 型合金相の振る舞いが確認できた。さらに自由電子近似に基づいてそのフェルミ面・ゾーン境界効果による系の安定性を計算したところ、フェルミ電子の遮蔽効果も取り入れれば今回の実験結果を説明できることが分かった。[お茶ノ水大学との共同研究]

Bi 量子薄膜の表面状態と量子井戸状態の混成

Si(111) 表面上に Bi 原子を蒸着すると 6 原子層以上で非常に結晶性が良く原子レベルで平坦なエピタキシャル Bi(001) 超薄膜が形成される。本研究では光電子分光法を用いてこの薄膜の電子状態の膜厚依存性を測定した。フェルミ面は膜厚依存性がなく表面状態由来であることが分かった。一方フェルミ準位以下では膜厚が増加するにつれて状態数が増えており、明瞭な量子井戸状態が観測された。Bi はスピン軌道相互作用が強いため、反転対称性の破れにより Rashba 効果が効いて表面状態バンドのスピン・軌道分裂が理論計算により予言されていたが、量子井戸状態も薄膜の両界面における非対称性からスピン分裂するのではないかと思われた。そこでバンドのスピン特性を調べるために第一原理計算との比較を行ったところ、どうやら Bi と Si との界面での相互作用が非常に弱いため、そのようなことは起こらないという結論に至った。しかし表面状態とフェルミ準位近傍の量子井戸状態は混成し、同一バンドの中でスピンの性質が変化していることが示唆され，今後，スピン分解光電子分光を行い，これを確かめる予定である。[物質材料研究機構とスペイン DIPC との共同研究]

Ag 量子薄膜における異方的な量子井戸状態

擬 1 次元金属的な表面超構造である Si(111)-4×1-In を 150 K 以下にして，その上に Ag を 3〜30 原子層蒸着した後室温までアニールすると，原子レベルで平坦なエピタキシャル Ag 超薄膜が形成される。本研究では，この系の角度分解光電子分光測定を行った。その結果、Ag 薄膜中の量子井戸状態が検出され，さらに面内分散を測定したところ、In 鎖と平行方向には放物線的なバンド分散、In 鎖と垂直方向には分散の無い平らなバンドが見出され、強い異方性を持つ量子井戸状態となっていた。これは下地の 4×1-In の周期をひきずって成長した積層欠陥を持つ Ag 薄膜自体の異方性を反映したものである。また、下地を等方的な Si(111)-7×7 にした Ag 薄膜と比較したところ、量子井戸状態のエネルギー準位が低束縛エネルギー側にシフトしていた。下地界面での反射位相シフトが異なることだけでなく，厚み方向の閉じ込めに加えて積層欠陥による面内方向の閉じ込めが加わって擬 1 次元系の量子細線状態になっていることが示唆される。[物質材料研究機構との共同研究]

Pb 量子薄膜の量子井戸状態と電気伝導

Si(111) 表面上に成長した Pb 超薄膜において、超伝導転移温度、ホール係数、電気伝導度などが薄膜の厚さに対して振動するという強い量子サイズ効果が相次いで報告されている。そこで、角度分解光電子分光により、バンド構造およびフェルミ面の測定を行ったところ、過去に当研究室で行われた電気伝導度の厚さに対する振動現象が量子井戸状態と直接関連していることがわかった。薄膜の厚さを増やしていくと、ある厚さにおいて、フェルミ準位を横切る新しい量子井戸状態が形成される。このとき準位間遷移による散乱の寄与が増大し、緩和時間の減少を引き起こす。電気伝導度の “くぼみ” は、この準位間散乱の増大による緩和時間の減少によって引き起こされると解釈された。

Si 表面上でのナノドットの形成と電子状態

Si 結晶表面の 2 原子層程度を酸化させ、その上に Ge を蒸着すると、下地 Si 基板に対してエピタキシャルおよび非エピタキシャルに成長した Ge ナノドットが高密度に形成され、その平均粒径は Ge 蒸着量によって制御することができる。本研究では、ドット内に形成された量子化最高占有状態のエネルギー位置を光電子分光法により測定した。そのドットサイズ依存性を理論式でフィッティングして得られた実効的な閉じ込めポテンシャル高さは、エピタキシャルドットの方が非エピタキシャルドットより著しく低かった。エピタキシャルドットの下には極薄 Si 酸化膜に直径 1 nm 程度の小孔が存在し、ドットと Si 基板とが「連結」しているが、閉じ込めポテンシャルの低下はこの小孔に起因すると考えられる。一方、ナノドット層の電気伝導度をマイクロ 4 端子プローブ法によって測定し、エピタキシャルドットが非エピタキシャルドットに比べて著しく高いことがわかった。これは、上述の小孔がキャリア輸送効率に大きくに寄与していることを示しているが，その詳細は不明なので，今後、電気伝導度の温度依存性やプローブ間隔依存性を測定して伝導メカニズムの解明を目指す。[東京大学物理工学教室との共同研究]

探針接触法と表面エレクトロマイグレーション

超高真空走査電子顕微鏡（SEM）の中で Au 探針を高温の Si(111) 基板表面に直接接触させて Au 原子を基板上に移動させると，接触点近傍に 3 次元的な島（アイランド）が形成される。このアイランドは，基板に流す直流電流によって常に電流方向と反対に移動する（表面エレクトロマイグレーション）。また，基板シリコンと反応して基板を削って溝を形成しながら移動した。アイランドの移動速度からその活性化エネルギーを求めた。また，ステップに沿う移動速度がテラス上に比べて約 20 倍ほど速かった。これらの観察に基づき，それぞれのアイランドのエレクトロマイグレーションのメカニズムを考察中である。

4.3.3 新しい装置・手法の開発

グリーン関数 STM 装置の開発

液体 He 温度までの低温で動作可能な独立駆動型４探針ＳＴM装置を数年かけて開発している。これは独立駆動型室温４探針ＳＴMと温度可変マイクロ４端子プローブ法を包含する測定手法となる。また、この装置では遅延グリーン関数の実空間マッピングも可能となる。グリーン関数は輸送現象の本質的な特性を表しているが、直接測定する手法が無かった。グリーン関数測定のためには、２本以上の探針を電子のコヒーレント長以内まで近づけ、１つの探針に与えられた電気刺激に対する応答を他の探針で検出する必要があり、10 pA オーダーの高精度なトンネル電流検出機構，液体 He 程度の低温，数十 nm まで近づけられる鋭い探針が要求される。今年度は内部除震機構を追加し、2〜4 探針での同時トンネルコンタクトの維持を達成し、探針間の干渉が少なく、実用に耐えうることを実証した。また、冷却機構の改善をおこない、低温を十分長時間維持できることと低温での試料作成を実現した。来年度は、室温から液体 He 温度までの温度範囲での各種表面の電気伝導度測定を行うとともに、実空間における遅延グリーン関数のイメージングを目指す。

金属被覆カーボンナノチューブ STM 探針の開発

当研究室では多探針 STM の探針間隔を電子の平均自由行程程度まで近づけるという目的で金属被覆カーボンナノチューブ (CNT) 探針を開発してきた。昨年度は PtIr 被覆 CNT 探針が非常に高い導電性を持つことを示した。今年度は大気中で電気泳動法を用いて CNT を接合することで生産性を向上させ、SEM の電子線照射でアモルファスカーボンを CNT/W 探針接合部付近に成長させることで高い強度を実現し、より実用性の高い探針作成のレシピを確立した。また、これらの CNT 探針を実際に用いて、PtIr 被覆 CNT やコバルトシリサイドナノワイヤの 4 探針電気伝導測定に成功した。この測定での最小探針間隔は約 150 nm であり，W探針の場合に比べて約 1 桁小さくすることができた。今後、最小探針間隔をさらに縮め、電気伝導の研究やグリーン関数マッピングに応用していく。[大阪大学工学部での共同研究]

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われた。記して感謝いたします。
・科研費 基盤研究Ｓ「グリーン関数ＳＴMの開発とそれによるナノ電子輸送ダイナミクスの研究」（代表者 長谷川修司）
・科研費　萌芽研究 「新しい表面電気伝導測定法の開発：電子輸送中のフェルミ面測定」（代表者　松田巌）
・科学技術振興機構先端計測分析技術・機器開発事業 「４探針 STM の制御系および多機能ナノチューブ探針の開発」（代表者 長谷川修司）
・科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 「超高密度・超微細ナノドット形成とナノ物性評価技術」（代表者 市川昌和）

＜受賞＞

[1] 守川春雲、松田巌、長谷川修司: 日本表面科学会第 17 回論文賞 (2005 年度), 「シリコン表面上での電荷密度波の格子整合効果とソリトンダイナミクス」(2005 年 11 月).

[2] I. Matsuda: ISSS-4 Best Poster Award, *Transport Phenomena of a Two-Dimensional Metallic Monolayer Studied By Photoemission and Conductivity Measurements*, at International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, 2005 年 11 月 13-17 日 (大宮).

[3] H. Okino: ISSS-4 Travel Award, *Resistance measurements of cobalt silicide nanowires epitaxially grown on Si(110)*, at International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, 2005 年 11 月 13-17 日 (大宮).

＜報文＞

(原著論文)

[4] C. Liu, I. Matsuda, R. Hobara, and S. Hasegawa: *Interaction between adatom-induced localized states and a quasi-two-dimensional electron gas*, Physical Review Letters **96**, 036803 (Jan 2006).

[5] A. Konchenko, I. Matsuda, S. Hasegawa, Y. Nakamura, and M. Ichikawa: *Observation of Quantum Confinement in Ge nanodots on an oxidized Si surface*, Physical Review B **73**, 113311(Mar 2006).

[6] I. Matsuda, T. Hirahara, M. Konishi, C. Liu, H. Morikawa, M. D'angelo, S. Hasegawa, T. Okuda, and T. Kinoshita: *Evolution of Fermi surface by electron doping into a free-electron-like surface state*, Physical Review B **71**, 235315 (Jun 2005).

[7] T. Hirahara, I. Matsuda, C. Liu, R. Hobara, S. Yoshimoto, and ShujiHasegawa: *Direct measurement of the Hall effect in a free-electron-like surface state*, Physical Review B, in press (2006).

[8] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobara, Y. Hosomura, S. Hasegawa, and P. A. Bennett: *In situ resistance measurements of epitaxial cobalt silicide nanowires on Si(110)*, Applied Physics Letters, **86**, 233108 (Jun 2005).

[9] I. Matsuda, T. Hirahara, M. Ueno, R. Hobaram and S. Hasegawa: *Electrical Conduction through a Monatomic Step*, Journal de Physique IV **132**, 57 (Apr 2006).

[10] M. D ' angelo, M. Konishi, I. Matsuda, C. Liu and S. Hasegawa: *Alkali metal-induced Si(111)-*$\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ *structure: the Na case*, Surface Science **590**, 162-172 (Oct 2005).

[11] T. Nagao, S. Yaginuma, M. Saito, T. Kogure, T. Ohno, S. Hasegawa, and T. Sakurai: *Strong Lateral Growth and Crystallization via Two-dimensional Allotropic Transformation of Semi-metal Bi Film*, Surface Science **590**, L247-252 (Sep 2005).

[12] H. Konishi, S. Honda, M. Kishida, Y. Murata, T. Yasuda, D. Maeda, K. Tomita, K. Motoyoshi, S. Yoshimoto, R. Hobara, I. Matsuda, J.-G. Lee, H. Mori, K. Oura, S. Hasegawa, and M. Katayama: *Synthesis of Metal-Alloy Nanowires toward Functional Scanning Probe Microscope*, Japanese Journal of Applied Physics **45**, 3690-3692 (Apr 2006).

[13] Y. Murata, S. Yoshimoto, M. Kishida, D. Maeda, T. Yasuda, T. Ikuno, S. Honda, H. Okado, R. Hobara, I. Matsuda, S. Hasegawa, K. Oura, and M. Katayama: *Exploiting Metal Coating of Carbon Nanotubes for Scanning Tunneling Microscopy Probes*, Japanese Journal of Applied Physics **44**, 5336-5338 (Jul 2005).

[14] S. Yoshimoto, Y. Murata, R. Hobara, I. Matsuda, M. Kishida, H. Konishi, T. Ikuno, D. Maeda, T. Yasuda, S. Honda, H. Okado, K. Oura, M. Katayama, and S. Hasegawa: *Electrical Characterization of Metal-Coated Carbon-Nanotube Tips*, Japanese Journal of Applied Physics **44**, L1563-L1566 (Dec 2005).

[15] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobara, Y. Hosom,ura, S. Hasegawa, and P. A. Bennett: *Resistance measurements of metallic silicide nanowires on a Si substrate with a four-tip scanning tunneling microscope*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3**, 362 (Nov 2005).

[16] M. Kishida, H. Konishi, Y. Murata, D. Maeda, T. Yasuda, T. Ikuno, S. Honda, M. Katayama, S. Yoshimoto, R. Hobara, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Coating Carbon Nanotubes with Compound Ultrathin Film: A Novel Route to Functional SPM tips*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3**, 417-420 (Dec 2005).

[17] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa and S. Hasegawa: *Electrical Conduction on Various Au/Si(111) Surface Superstructures*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3**, 497 (Dec 2005)

(国内雑誌)

[18] 松田巌、上野将司、平原徹、保原麗、守川春雲、劉燦華、長谷川修司: 結晶表面上単原子ステップの電気抵抗，表面科学 **27**, 182-187 (Mar 2006).

[19] 山崎詩郎、松田巌、沖野泰之、守川春雲、長谷川修司: Au/Si(111) 表面超構造のガラス・結晶化転移での電気伝導の研究、表面科学 **26**, 468-473 (Jul 2005).

[20] 長尾忠昭、柳沼晋、J. T. Sadowski、斉藤峯雄、藤川安仁、大野隆央、長谷川修司、櫻井利夫: シリコン表面上の半金属 Bi 超薄膜の同素変態，表面科学 **26**, 344-350 (Jun 2005).

(著書)

[21] 長谷川修司（分担執筆）: SPM ロードマップ 2005（森田清三編集、丸善 Dec 2005）.

(学位論文)

[22] Canhua Liu: Structures and Electronic Transport of Two-Dimensional Phases on Ag-terminated Si Surface (博士論文).

[23] 宮田伸弘: 半導体表面上の鉛の表面超構造および量子薄膜のフェルミ面と電子構造（修士論文）.

[24] 細村嘉一: In 吸着表面超構造の電気伝導の研究（修士論文）.

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[25] I. Matsuda: *Fermiology of two-dimensional metal layers on the semiconductor surface*, The 10th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, 2006 年 3 月 16 日 (広島).

[26] S. Hasegawa: *Electronic Transport at Nanostructures on Silicon Surfaces*, Asian Workshop on Surface Nano-Science, 2006 年 2 月 9 日 (Pheonix park, 韓国).

[27] S. Hasegawa: *Electrical Conduction through Atomic/Nano Wires on Silicon*, The 3rd International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT2005)/The 3rd Vacuum and Surface Sciences Conference of Asia and Australia (VASSCAA-3), 2005 年 7 月 4 日 (Singapore).

[28] S. Hasegawa: *Electrical Conduction through Atomic/Nano Wires on Silicon*, 13th International Congress on Thin Films/8th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ICTF-13/ACSIN-8), 2005 年 6 月 20 日 (Stockholm, Sweden).

[29] S. Hasegawa: *Electrical Conduction through Atomic/Nano Wires on Silicon Measured by Four-Tip STM*, The 4th International Workshop on Surfaces and Workshop on Water-Surface Interactions, 2005 年 5 月 30 日 (北京, 中国).

一般講演

[30] I. Matsuda: *In situ resistance measurements of atomic and nanometer wires on solid surfaces*, NSFC-JSPS A3 Foresight Program Seminar on Sub-10 nm Wires; new physics and chemistry: The First A3 Workshop, 2005 年 12 月 13 日 (北京，中国).

[31] S. Hasegawa: *Topics and Facilities in Hasegawa(S) Group of University of Tokyo*, NSFC-JSPS A3 Foresight Program Seminar on Sub-10 nm Wires; new physics and chemistry: The First A3 Workshop, 2005 年 12 月 13 日 (北京，中国).

[32] S. Hasegawa: *Adatoms on a Free-Electron-Like Surface State of Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Ag*, Symposium on Surface Physics (SSP06), 2006 年 1 月 12 日 (雫石).

- **The 13th International Congress on Thin Films/8th International Conference on**

Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ICTF 13/ACSIN 8), 2005 年 6 月 19-23 日,(Stockholm, Sweden)

[33] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *Surface electronic transport study of glass-crystal transition on Au/Si(111) surface from room temperature to ultra-low temperature.*

[34] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobara, Y. Hosomura, S. Hasegawa, Z. He and P.A. Bennett: *Transport properties of epitaxial cobalt silicide nanowires on Si(110).*

[35] C. Liu, I. Matsuda, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Influence of adatoms on the two-dimensional electron gas in the surface of Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Ag surface.*

- **The 13th International Conference on Scanning Tunneling Microscopy/Spectroscopy and Related Techniques (STM'05)**
  2005 年 7 月 3-7 日 (札幌)

[36] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobara, Y. Hosomura, S. Hasegawa, Z. He and P.A. Bennett: *Resistance measurements of epitaxial cobalt silicide nanowires on Si(110).*

[37] S. Yoshimoto, R. Hobara, I. Matsuda, Y. Murata, M. Kishida, H. Konishi, T. Ikuno, D. Maeda, T. Yasuda, S. Honda, H. Okado, M. Katayama, K. Oura, and S. Hasegawa: *Electrical Characterization of Metal-Coated Carbon Nanotube Tip.*

[38] C. Liu, I. Matsuda, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Influence of adatoms on the two-dimensional electron gas in the surface of Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Ag surface.*

[39] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa and S. Hasegawa: *Study of Surface Electric Conduction at Glass-Crystal Transition in Au/Si(111) Surface Superstructures: Variable Range Hopping at Glass Phase.*

[40] Y. Murata, M. Kishida, H. Konishi, D. Maeda, T. Yasuda, K. Motoyosi, K. Tomita, S. Honda, H. Okado, S. Yoshimoto, R. Hobara, I. Matsuda, S. Hasegawa, K. Oura and M. Katayama: *Metal-coated Carbon Nanotube Tips for Multi-Probe STM.*

[41] H. Konishi, M. Kishida, Y. Murata, T. Yasuda, D. Maeda, K. Tomita, K. Motoyoshi, S. Honda, J.-G. Lee, H. Mori, S. Yoshimoto, R. Hobara, I. Matsuda, S. Hasegawa, K. Oura, and M. Katayama: *Coating Carbon Nanotubes with Inorganic Compounds toward Functionalized Nanoprobe Applications.*

- **The 10th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces(ICFSI-10)**, 2005 年 7 月 4-7 日 (Aix-en-Provence, France)

[42] T. Hirahara, I. Matsuda, R. Hobara, S. Yoshimoto, S. Hasegawa: *Hall Effect and Electrical Conductivity of Free-Electron Like Surface States of Ag/Si(111).*

[43] I. Matsuda, T. Hirahara, C. Liu, R. Hobara, M. Ueno, and S. Hasegawa: *Transport Phenomena of a Two-Dimensional Metallic Monolayer on a Semiconductor Surface.*

[44] N. Miyata, I. Matsuda, H. Morikawa, T. Hirahara, M. D'angelo, and S. Hasegawa: *STM observation of Si(111)c(12×2)-Ag surface at low temperature.*

- **The 13th General Meeting of the European Physical Society (EPS-13): Beyond Einstein - Physics for the 21st Century**
  2005 年 7 月 12-15 日（Bern 大学, Switzerland）

[45] I. Matsuda, T. Hirahara, C. Liu, R. Hobara, M. Ueno, and S. Hasegawa: *Transport Phenomena of a Two-Dimensional Metallic Monolayer on a Semiconductor Surface.*

[46] N. Miyata, I. Matsuda, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Photoemission and electronic transport study of the quantum well states in Pb film on Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Pb surface.*

[47] T. Hirahara, I. Matsuda, M. Ueno, S. Hasegawa, *Fermi surface mapping of two-dimensional metallic surface states on Si(111).*

[48] I. Matsuda, T. Hirahara, C. Liu, M. D ' angelo, and S. Hasegawa: *Fermi Surface Evolution Upon Monovalent Atom Adsorption on a Surface Superstructure.*

- **International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-4)**
  2005 年 11 月 13-17 日 (大宮)

[49] N. Nagamura, I. Matsuda, T. Uchihashi, T. Hirahara, N. Miyata, C. Ohbuchi, and S. Hasegawa: *Quantum well states of ultra-thin Ag films prepared on one dimensional atomic array.*

[50] R. Hobara, S. Yoshimoto, I. Matsuda, S. Hasegawa: *Development of Low Temperature Four-Tip STM.*

[51] Y. Nakayama, A. Konchenko, I. Matsuda, S. Hasegawa, Y. Nakamura, and M. Ichikawa, *Direct Observation of Quantum Confinement Effect in Ge Nanodots on oxidized Si surface.*

[52] I. Matsuda, C. Liu, T. Hirahara, T. Tanikawa, M. Ueno and S. Hasegawa, *Transport Phenomena of a Two-Dimensional Metallic Monolayer Studied by Photoemission and Conductivity Measurements* [Best Poster Award].

[53] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobara, Y. Hosomura, S. Hasegawa, Z. He and P.A. Bennett: *Resistance measurements of cobalt silicide nanowires epitaxially grown on Si(110)* [Travel Award].

[54] T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, Yu. M. Koroteev, E. V. Chulkov, P. M. Echenique, M. Saito, S. Hasegawa, *An ARPES Study on Quantum-well states of Ultrathin Bi films on Si(111).*

[55] N. Miyata, I. Matsuda, H. Morikawa, T. Hirahara, M. D'angelo and S. Hasegawa: *STM observation of Si(111)c(12×2)-Ag surface.*

[56] S. Yoshimoto, K. Kubo, H. Okino, R. Hobara, I. Matsuda, Y. Murata, M. Kishida, H. Konishi, T. Ikuno, D. Maeda, T. Yasuda, S. Honda, H. Okado, M. Katayama, K. Oura, and S. Hasegawa: *Electrical Characterization of Metal-Coated Carbon Nanotube Tip.*

[57] T. Hirahara, I. Matsuda, R. Hobara, S. Yoshimoto, S. Hasegawa: *Surface Conductivity and Hall Effect of Free-Electron Like Surface States of Ag/Si(111).*

[58] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa and S. Hasegawa: *Surface Electrical Conductio in Au/Si(111) Surface Superstructures and Thin Films.*

[59] C. Liu, I. Matsuda, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Interaction between the adatom-induced localized state and the free-electron-like surface state.*

- **JSPS-NSFC-KOSEF A3 Foresight Program on sub-10 nm wires; new physics and chemistry: 1st Project Seminar**
  2006 年 2 月 7 日-3 月 1 日 (千葉).

[60] S. Yoshimoto, K. Kubo, H. Okino, R. Hobara, I. Matsuda, Y. Murata, M. Kishida, H. Konishi, T. Ikuno, D. Maeda, T. Yasuda, S. Honda, H. Okado, M. Katayama, K. Oura, and S. Hasegawa: *Four-Terminal Conductivity Measurement Using PtIr-Coated Carbon Nanotube Tips.*

[61] T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, Yu. M. Koroteev, E. V. Chulkov, P. M. Echenique, M. Saito, S. Hasegawa, *Role of Spin-Orbit Coupling and Hybridization Effects in the Electronic Structure of Ultrathin Bi Films.*

[62] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa and S. Hasegawa: *Electrical Conduction in Au/Si(111) Surface Superstructures:Suppression of Variable Range Hopping in Extremely Disordered Glass Surface.*

[63] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobara, Y. Hosomura, S. Hasegawa, Z. He, and P. A. Bennett: *Resistance measurements of silicide nanowires epitaxially grown on Si(110).*

[64] Y. Nakayama, I. Matsuda, S. Hasegawa, and M. Ichikawa, *Electronic structure and electric conductivity of Ge nanodots with controlled confining potential barrier.*

(国内会議)

招待講演

[65] 松田巌：*Fermiology of Hall and Electrical Conduction through a Two-Dimensional Metallic Monolayer*, 第 39 回放射光セミナー、2005 年 7 月 21 日 (東京大学、柏).

[66] 長谷川修司：4 探針型走査トンネル顕微鏡の開発と表面・ナノ電子輸送の研究，日本電子顕微鏡学会（瀬藤賞受賞講演)、2005 年 6 月 2 日（筑波）.

[67] 長谷川修司：4 探針ＳＴＭによる表面・ナノ構造の電気特性の計測，第８回キヤノン基盤技術フォーラム, 2005 年 7 月 15 日 (新丸子）.

[68] 長谷川修司: 多探針 STM によるナノ計測 -ナノスケール電気伝導からグリーン関数マッピングまで-，JST ナノ計測ワークショップ、2005 年 8 月 11 日（静岡）.

[69] 長谷川修司：ナノ電気伝導計測用導電性プローブ，日本学術振興会ナノプローブテクノロジー第 167 委員会第 40 回研究会、2005 年 10 月 19 日（大阪大学）.

一般講演

[70] 長谷川修司，山崎詩郎、松田巌、沖野浩之、守川春雲: 表面構造のガラス結晶化転移での電気伝導，平成１７年度東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会「ナノ半導体物理の構築とその作製・計測技術の開拓」，2005 年 10 月 14 日（岩沼，宮城）.

[71] 沖野泰之、松田巌、保原麗、吉本慎也、Z. He, P. A. Bennett、長谷川修司：自己組織化によって作製されたナノワイヤの電気特性、第 1 回 21 世紀 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム、2005 年 11 月（東京大学）.

[72] 坂本克好、名取晃子、河野勝泰、長谷川修司: Si(111) 微斜面における Au アイランドのエレクトロマイグレーション，第 53 回応用物理学関係連合講演会，2006 年 3 月 22 日（武蔵工業大学）.

- **日本物理学会 2005 秋季大会**
  2005 年 9 月 19-22 日　(同志社大学).

[73] C. Liu, 松田巌, 平原徹, 長谷川修司: *ARPES evidence of surface-state localization at atoms on the Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Ag surface.*

[74] C. Liu, 松田巌, 長谷川修司: *Influence of local band bending on the shapes of Si2p core-level spectra of the Au adsorbed Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Ag surface.*

[75] 永村直佳、松田巌、内橋隆、大渕千種、箕輪雅章、宮田伸弘、平原徹、長谷川修司: Si(111)8 × 2-In 上 Ag 薄膜の量子井戸状態の研究.

[76] 松田巌，A. Konchenko，中村芳明，中山泰生，長谷川修司，市川昌和：酸化 Si 表面上 Ge ナノドットの量子サイズ効果の直接観測.

[77] 山崎詩郎、松田巌、沖野泰之、守川春雲、長谷川修司: Au 吸着 Si(111) 表面の STM 観察と電気伝導.

[78] 保原麗、吉本真也、松田巌、長谷川修司: 低温型四探針 STM 装置の開発と電気伝導測定.

[79] 平原徹、長尾忠昭、松田巌、G. Bihlmayer, Yu. M. Koroteev, E. V. Chulkov, P. M. Echenique, 斎藤峯雄、長谷川修司: Si(111) 表面上 Bi(001) 超薄膜の光電子分光測定.

[80] 宮田伸弘、松田巌、平原徹、長谷川修司： 光電子分光による Si 上の Pb 薄膜の量子井戸状態の研究 II.

[81] 長谷川修司、加賀山朋子、滝川洋二: 物理チャレンジ 2005 報告　ー実験問題ー.

- **日本表面科学会 第 25 回表面科学講演大会**
  2005 年 11 月 17-19 日 (大宮).

[82] 永村直佳、松田巌、内橋隆、箕輪雅章、宮田伸弘、平原徹、大渕千種、長谷川修司: Si(111)4×1-In および 7x7 上 Ag 薄膜の量子井戸状態の研究.

[83] 宮田伸弘、松田巌、守川春雲、平原徹、M. D'angelo、長谷川修司：Si(111)-c(12×2)-Ag 表面の STM 観察.

[84] 劉燦華, 松田巌, 長谷川修司:内核準位光電子分光法による金原子吸着した Si(111)$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Ag 表面の研究.

[85] 保原麗、吉本真也、松田巌、長谷川修司: 低温型四探針 STM 装置の開発と電気伝導測定.

[86] 山崎詩郎、松田巌、沖野泰之、守川春雲、長谷川修司：Au 薄膜に対する乱れのＳＴＭ観察および弱局在の電気伝導測定.

[87] 松田巌, 平原徹, 劉燦華, 永村直佳, 宮田伸弘, 長谷川修司: 固体表面上２次元自由電子的金属単原子層のフェルミオロジー.

[88] 平原徹、松田巌、保原麗、吉本真也、長谷川修司: 自由電子的な表面状態のホール効果測定.

[89] 中山泰生，A. Konchenko，松田巌，長谷川修司，中村芳明，市川昌和：極薄Ｓｉ酸化膜上のＧｅナノドットの電子状態.

- **日本物理学会第 61 回年次大会**
  2006 年 3 月 27-30 日 (愛知大学・松山大学).

[90] C. Liu, 松田巌, 吉本真也，長谷川修司: Surface electronic transport of Au adsorbed Si(111)-$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$-Ag surface.

[91] 永村直佳、松田巌、内橋隆、宮田伸弘、平原徹、長谷川修司: Si(111)4 × 1-In 表面上擬 1 次元的 Ag 薄膜の量子サイズ効果に関する研究 II、.

[92] 松田巌，永村直佳，山崎詩郎，平原徹，C.Liu，宮田信弘，W.H.Choi，小林功佳，H.W.Yeom，長谷川修司：半導体表面上 2 次元貴金属合金相のフェルミ面.

[93] 中山泰生，松田巌，長谷川修司，市川昌和: 極薄Ｓｉ酸化膜上Ｇｅナノドットの閉じ込めポテンシャルと電気伝導特性.

[94] 山崎詩郎、松田巌、沖野泰之、守川春雲、長谷川修司： 全 Au/Si(111) 表面超構造シリーズの電気伝導とその違い.

[95] 沖野泰之、松田巌、山崎詩郎、保原麗、長谷川修司：Au/Si(553) 表面の電気伝導度の温度依存性.

[96] 長谷川修司, 鈴木亨, 毛塚博史, 江尻有郷, 大山光晴, 杉山忠男, 田中忠芳, 北原和夫, 並木雅俊: 若者にチャレンジの機会を IV: 国際物理オリンピック 2006(シンガポール大会) に向けて.

(セミナー)

[97] 長谷川修司: ナノテクノロジーと物理学, 栃木県立宇都宮高等学校 SSH 特別講義、2005 年 5 月 17 日（宇都宮）.

[98] S. Hasegawa: *Electrical Conduction through Atomic/Nano Wires on Silicon Measured by Four-Tip STM*, Institute of Automation and Process Control, Russian Academy of Science, 2005 年 7 月 24 日（Vladivostock, Russia）.

[99] 長谷川修司: ナノスケールの世界と電子, 日本表面科学会 平成 17 年度市民講座 「ナノスケールの世界を覗いてみませんか」、2005 年 8 月 6 日（東京大学）.

[100] 長谷川修司：1 原子層，1 原子列の電気伝導を測る，九州大学理学府凝縮系科学専攻 物理教室談話会 2005 年 11 月 29 日 (九州大学).

(講義等)

[101] 長谷川修司：ナノサイエンスと表面物理学と電気伝導、九州大学理学府凝縮系科学専攻 物理コース, 集中講義 2005 年冬学期　11 月 28-30 日.

[102] 長谷川修司：原子をみる、電子をみる、表面をみる　-ナノワールドへの挑戦 -，成蹊大学　国際教養科目「現代を生きる -最先端科学の挑戦～医療からナノまで-」, 2005 年 11 月 25 日、12 月 2 日、12 月 9 日.

[103] 長谷川修司、松田巌、吉本真也 (TA)：物理学実験 I（3 年生）電子回折、 2005 年度冬学期（本郷）.

[104] 長谷川修司：固体物理学 II（学部 4 年生講義） 2005 年度冬学期（本郷）.

[105] 長谷川修司：物理学ゼミナール (学部 3 年生) 2005 年度冬学期（本郷）.

4.4 福山研究室

福山研究室ではマイクロケルビン（μK）に至る低温極限で発現する量子多体系の新奇な量子相や相転移現象、さらにそれらに対する空間次元の効果について、主に液体および固体ヘリウム、低次元伝導体、異方的超伝導体などを対象に研究している。

4.4.1 2次元 ^{3}He の新奇な量子相

グラファイト表面に吸着した単原子層ヘリウム3は、強く相互作用する2次元フェルミ粒子系の量子物性を研究する上で理想的な実験系である。この系の吸着第2層には第1層に整合な4/7整合相が存在することが知られていたが、最近我々の行った熱容量測定から、吸着第2層の面密度（ρ）を徐々に増してゆくとフェルミ流体的な振舞いから特異な性質をもつ異常量子流体相を経て、4/7整合相へと連続的に変化することが分かった。

この連続転移の詳細や、4/7相より高密度の過剰粒子域の性質を調べるため、本研究では1層目を非磁性の ^{4}He でプレコートした系で340 μK の超低温から500 mK の広い温度範囲かつ幅広い面密度範囲で、核磁気共鳴 (NMR) 測定および熱容量測定を行った。以下では低面密度のフェルミ流体相を領域Iとし、面密度の増加とともに異常量子相（領域II）、過剰粒子相（領域III）、弱い強磁性相（領域IV）にいたる多彩な量子相を概説する。

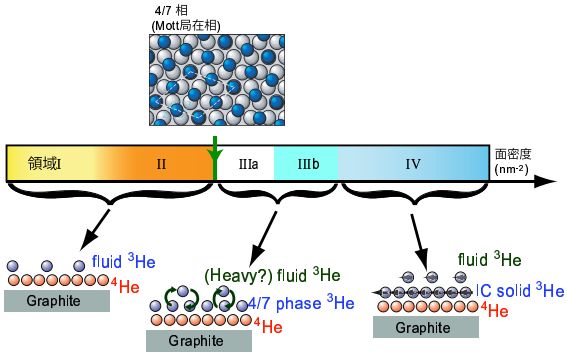


図 4.4 a: 4/7整合相を中心とした2次元 ^{3}He の量子相図。

領域 I~II: フェルミ流体相から異常量子相へ

領域Iはランダウのフェルミ流体論でよく記述できる。しかし、領域IIではcw（連続波）-NMR測定から単純な2相分離では説明できない一様磁化の測定結果が得られた。これは熱容量測定の結果ともコンシステントである。しかし、局所的な内部磁場（D）を反映する共鳴磁場シフトの測定結果は、この領域が古典的な一様相として説明できない新奇な量子流体であることを示している（図4.4 b)。すなわち、磁化同様 D^{-1} も領域IIで非線型な面密度依存性をもつ一方、D と磁化の間にはよい比例関係が見られる。さらに奇妙なことに領域IからIIに移行する密度域では、局在スピン系の分子場計算（図中点線）に比べて非常に大きな共鳴磁場のシフトが観測されている。この振舞いは未だ定量的に説明されていない。

また今年度はパルスNMR測定を開始し、静磁場コイルの不均一性の影響を受けないスピンエコー法によりスピン-スピン緩和時間 (T_2) を測定した（図4.4 c)。その結果、例えば領域IIにおいては $T_2 \sim 4$ ms と得られた。さらに ^{3}He 面密度を4/7整合相直下まで増加させると T_2 は急速に減少するが、これは局在相に近づくにつれ ^{3}He 移動度が減少することによるブロードニングと考えられる。

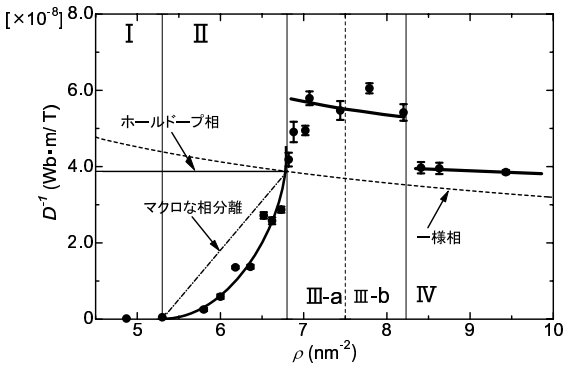


図 4.4 b: cw-NMR から求められた2次元 ^{3}He の局所場係数の逆数の面密度依存性。領域IIは単純なモデルで説明できない異常量子相。領域IIIからIVへは1次相転移に伴うとびが見られる。

領域 III~IV: 過剰粒子の重い流体相から弱強磁性相へ

4/7整合相より高面密度の領域III-aでは、4/7整合相に特徴的な1 mK の熱容量ピークは変化せず、過剰粒子は4/7整合相を壊さずに第3層で非常に重い（縮退温度の低い）流体として振舞っていると考えられる。(図4.4 a)。この領域における cw-NMR 測定では500 μK 以下の低温で過剰磁化が $T = 0$ に向かって消失する現象を観測した。これは過剰粒子がスピン1重項的な何らかの秩序状態に入ったことを示唆しており非常に興味深い。領域III-bでは領域III-aの性質を保ちつつ、過剰熱容量は5 mK 付近でなだらかな強磁性的ピークをもつ。これは第3層において過剰粒子間の相関が強くなり、弱強磁性的な性質をもった流体に変化したものと考えられる。

さらに面密度を増したより高密度の領域IV（弱強磁性相）に入ると4/7整合相の1 mK 熱容量ピーク

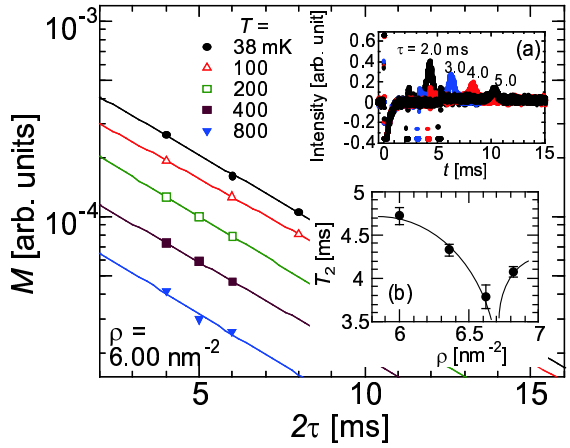


図 4.4 c: パルス NMR 測定による 2 次元 ^{3}He（領域 II）のスピンエコーシグナル（挿入図 (a)）。磁化の減衰率からスピン-スピン緩和時間（T_2）が求められる。挿入図 (b) は得られた T_2 の面密度変化。4/7 整合相に近づくにつれ T_2 は急速に減少する。

が突然消失し、代わりに 3 mK に強磁性的なピークが成長する。ここでは第 2 層目の整合相が壊れて非整合相に 1 次転移すると考えられる。(図 4.4 b)。

4.4.2 走査トンネル分光法による 2 次元電子系の研究

走査トンネル顕微/分光 (STM/STS) 法はナノメートルの空間分解能をもって局所状態密度 (LDOS) を観測する分光法で高磁場中での観測も可能である。今年度は独自開発した超低温（$T_{min} = 20$ mK）、高磁場（$B_{max} = 6$ T）、超高真空（$P \ll 10^{-8}$ Pa）で作動する超低温 STM を使用して、以下の研究を行った。

整数量子ホール状態のナノスケール観測

磁場中 2 次元電子系で観測される量子ホール効果は、物性研究の中で最も基本的かつ重要な量子現象の 1 つである。一般に、ホール抵抗が量子化値をとる局在状態では、電子は不純物や試料端の作る等ポテンシャル線に沿って磁気長程度の幅をもって運動すると信じられているが、それを明確に実空間観測した例はこれまで報告されていない。そこで我々は超低温 STM を使って、高配向性熱分解グラファイト (HOPG) の表面 2 次元電子系における格子欠陥周りの LDOS を STS 観測した。

試料－探針間のバイアス電圧を掃引すると、ランダウ準位間の谷のエネルギーでは欠陥の周りに局在した状態が、またランダウ準位のピークエネルギーでは試料全体に拡がった電子状態が交互に観測された。欠陥付近に局在した LDOS 分布は磁気長程度の半径をもっており（図 4.4 d(a), (b)）、磁場中で $1/r$ ポテンシャルに捕獲された 2 次元電子系の基底状態に対する波動関数の計算結果とほぼ一致する（図 4.4 d(d)）。また、1 種類の局在した LDOS 分布、つまり基底状態しか束縛されないという実験事実は、電子間クーロン相互作用が本質的に重要であることを示している。

これらのことから、HOPG 表面で観測されたエネルギーに依存した欠陥付近の電子状態は、量子ホール効果の局在状態と非局在状態に対応していると結論付けられる。これは磁場中 2 次元電子系の特異な 1 電子束縛状態を初めて直接観測した実験である。

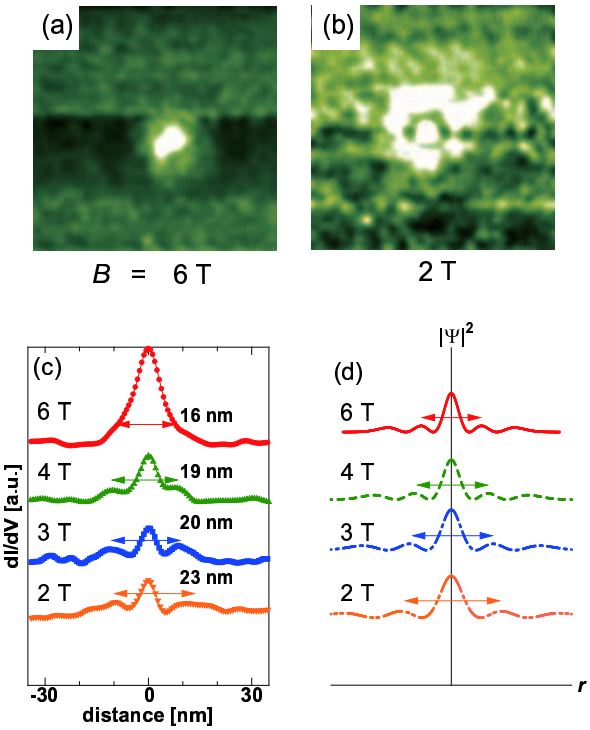


図 4.4 d: 量子ホール状態にある HOPG 表面の電子局在を示す $\mathrm{d}I/\mathrm{d}V$ 像。画面中央に原子サイズの点欠陥が存在している。(80×80 nm^2、$T = 30$ mK); (a) $B = 6$ T, (b) 2 T。(c) 各磁場における $\mathrm{d}I/\mathrm{d}V$ 像の断面図。矢印は (a), (b) で観測された円環の直径を示す。(d) $1/r$ ポテンシャルに捕獲された磁場中 2 次元電子系の基底状態に対する波動関数分布の計算結果。

半導体 2 次元電子系の磁場中ランダウ量子化

分子線エピタキシャル (MBE) 成長法で GaAs(111)A 上に積層した InAs 薄膜では、電子蓄積層の形成によ

り表面 2 次元電子系が実現することが知られている。我々はこの系（InAs/GaAs(111)A）の面垂方向に磁場を印加して、表面 2 次元電子系の磁場中 STS 観測を行った。図 4.4 e(a) は E_F 付近の DOS の磁場変化である。2 次元電子系の現れる-80 mV 以上のバイアス電圧で、ランダウ量子化に伴うピークが観測され、それらのエネルギーが磁場にほぼ比例して変化する様子が分かる。6 T でのピーク間隔は約 24 mV で、この系の有効電子質量 ($m^* \simeq 0.03m$) から見積もられるランダウ準位間エネルギー (23 meV) とよく一致する。

これとは別に高バイアス電圧では、磁場に依存しない約 60 meV 間隔の DOS 振動が観測された（図 4.4 e(b)）。この振動現象は InAs 薄膜を InAs 基盤上に MBE 成長させると現れない。したがって、InAs と GaAs の界面の Schottky 障壁をトンネルする際の透過確率に起因したものである可能性が高い。本研究は NTT 物性基礎研究所の平山グループとの共同研究である。

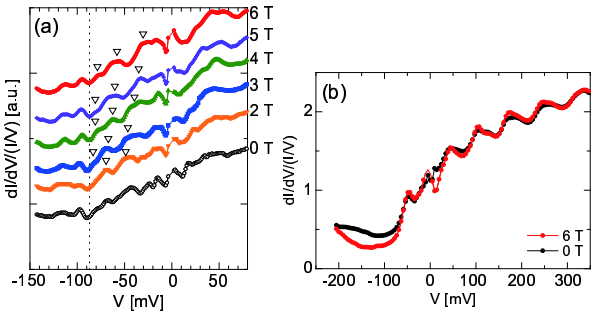


図 4.4 e: (a) InAs/GaAs(111)A 表面で STS 観測されたランダウ準位の磁場変化 ($T = 30$ mK)。(b) 広いバイアス電圧範囲で現れる磁場に依存しない約 60 mV 間隔の DOS の振動。

グラファイトエッジ状態

2 次元グラファイトシートの端の形状には、幾何学的にジグザグ型とアームチェア型の 2 種類が存在する。このうちジグザグ端のみに、π 電子の局在状態（「グラファイトエッジ状態」とよばれる）がフェルミエネルギー (E_F) に存在することが tight-binding 計算により理論的に予測されていた。前年度行った STM/STS 測定で我々は初めてグラファイトエッジ状態の存在を実験的に確認することに成功した。今年度はこれをより詳細に調べるために、HOPG 表面の数多くの単原子ステップ端で同様な STM/STS 観測を行った。その結果、グラファイトエッジ状態に起因する $\mathrm{d}I/\mathrm{d}V$ ピークは E_F 直下の $-100 \sim -20$ meV 付近に現れ（図 4.4 f）、その減衰長 (ξ) は $\xi = 1.2 \pm 0.3$ nm であることがわかった。これは田上-塚田 (早稲田大学) による non-orthogonal tight-binding model を用いたシミュレーション結果ともよく一致する。

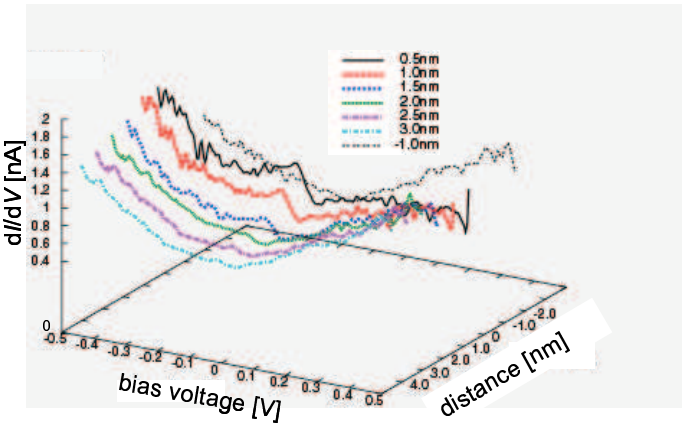


図 4.4 f: グラファイトのジグザグ端付近におけるトンネルスペクトルの 3 次元プロット。-40 meV 付近にグラファイト端状態に起因する $\mathrm{d}I/\mathrm{d}V$ ピークが見られる。

4.4.3 異方的超伝導体の STS 研究

Sr_2RuO_4 の表面電子状態

Sr_2RuO_4 は内部スピン自由度を有する p 波スピン 3 重項超伝導物質（$T_c = 1.5$ K）として注目されている。我々は超低温 STS 法により、この物質の電子状態の研究を行っている。多数の劈開試料について調べたところ、超高真空中 ($< 1 \times 10^{-7}$ Pa) で ab 面に平行に劈開した清浄表面はほとんど SrO 面であり、超伝導を担う RuO_2 面はこれまでのところ直接観察できていない。一方で、100 K 以下で低温劈開すると常に $\Delta \sim 5$ meV の大きなギャップ（常伝導ギャップ）が観測されることが分かった。図 4.4 g はステップエッジ近傍での常伝導ギャップの空間変化であるが、何らかの理由によりステップ直上ではこの常伝導ギャップは抑制される。低速電子線回折実験では劈開面直下の RuO_2 面の酸素位置が回転する再構成が起きるとされており、表面ではバルクと異なる電子状態が形成されているようである。

これに対して高温（室温）・超高真空中で劈開した試料表面では何らかの乱れのために原子分解能は得られず、STS では $\sqrt{V}$ に比例した状態密度が得られた。このエネルギー依存性は不規則ポテンシャル中の 3 次元アンダーソン局在状態と同じである。最表面 SrO 面とその下の RuO_2 面の電子状態は混合しており、それが STM/STS 観測されていることを示唆している。

銅酸化物高温超伝導体における不純物束縛状態

銅酸化物高温超伝導体 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$(Bi2212) は BiO-BiO 層間がファン・デル・ワールス力で弱く結合しているため、層方向に容易に劈開する。さら

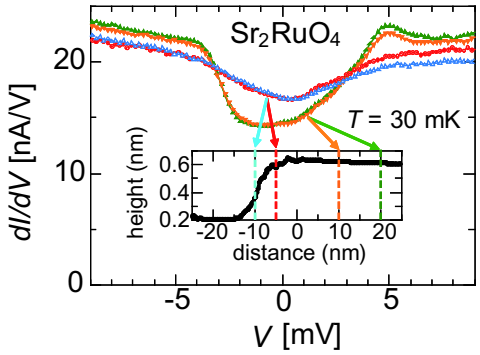


図 4.4 g: Sr_2RuO_4 劈開面上のステップ近傍でのトンネルスペクトルの空間変化（$T = 30$ mK）。平坦な領域で観測される $\Delta \sim 5$ meV の常伝導ギャップはステップ直上では抑制される。

に超伝導を担う CuO_2 層が表面から半導体 1 層と絶縁体 1 層下に “保護” されているため、STM 測定に非常に適したスピン 1 重項の異方的超伝導体である。これまで Cu 原子の一部を非磁性の Zn 不純物で置換した試料の STS 実験で、不純物原子近傍で準粒子状態密度のゼロエネルギーピーク（ZEP）と空間的な 4 回対称性が観測されている。一般に ZEP の起源は準粒子ペアポテンシャルの符号が粒子の運動方向によって変化する際に生じるアンドレーエフ共鳴状態と考えられている。しかし、Zn 不純物は周囲に磁気モーメントを誘起することも知られているので、ZEP の由来が近藤共鳴状態であるとする理論もある。この場合は近藤温度 (∼20 K) 程度でピークが減衰または消失すると考えられる。そこで同じ物理教室の内田研究室が作成した純良単結晶試料を使ってピークの温度変化の観測を開始した。これまでのところ図 4.4 h に示すように、明瞭な原子分解能をもつ劈開面の STM 像と d 波クーパー対の対称性を反映した超伝導ギャップ、そして不純物原子直上で ZEP のスペクトルの観測に成功した。

4.4.4 グラファイト化合物における超伝導

グラファイトは層間がファン・デル・ワールス力で弱く結合した層状物質であり、層間に異種の原子・分子が容易に進入してグラファイトインタカレーション化合物（GIC）を形成する。層間物質からの電荷移動によって GIC の物性は多様に変化する。ごく最近、6.5 K、11.5 K と高い超伝導転移温度をもつ GIC 超伝導物質（C_6Yb、C_6Ca）が相次いで発見された。我々も C_6Yb について試料合成し、図 4.4 i のように超伝導性を追試した。また、超高真空中でグラファイト表面に蒸着した Yb をアニールし、*in situ* での GIC 作成も試みており、新たな表面電子状態の可能性も探っている。今後はこれらの物質の超伝導ギャップの STS 測定に取り組む計画である。

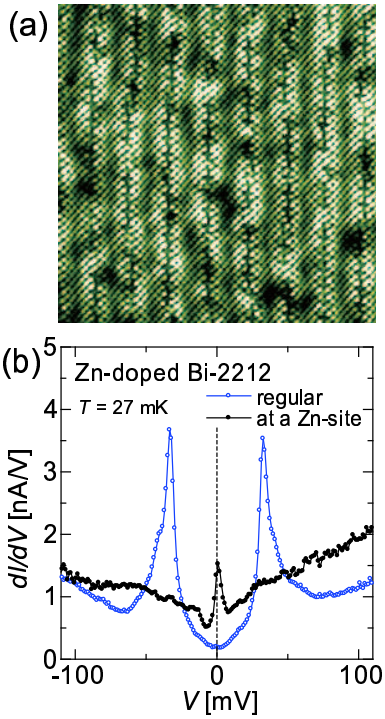


図 4.4 h: (a) Bi2212 の劈開面の STM 像（20×20 nm^2）。BiO 層に特有の変調構造が観測されている。(b) トンネルスペクトル（$T = 27$ mK）。超伝導ギャップ（$\Delta = 33$ meV）の他、Zn 直上では明瞭なゼロエネルギーピークが観測されている。

4.4.5 低温実験技術の開発

極低温比熱測定用のメカニカル熱スイッチ

極低温の比熱測定において幅広い低温域（50 mK $< T <$ 5 K）を単独でカバーできる新型のメカニカル熱スイッチ (MHSW) を開発した。熱リンクとなる銅板を対向する 2 つのベローズで挟みこむ構造となっており、ベローズ伸縮の圧力媒体として液体 ^{4}He を使用している（図 4.4 j）。従来の MHSW に比べ、スイッチ閉時の熱伝導度が 10^4 倍も大きい上、開閉時の熱発生量も 1/3 に抑えることに成功した。

第 2 世代の極低温走査トンネル顕微鏡

希釈冷凍機温度（$T \geq 20$ mK）で作動する超低温 STM の開発に続き、^{3}He クライオスタット温度（$T \geq 250$ mK）で作動する第 2 の極低温 STM の開発に着手した。ボア径の小さなより強い磁場を発生する超伝導マグネット内に収まるように、できるだけ外径を小さく（26 mm）設計したが、これまで通り探針/試料の交換もできるよう工夫した。製作したプロトタイプの STM ヘッドの性能を室温から液体

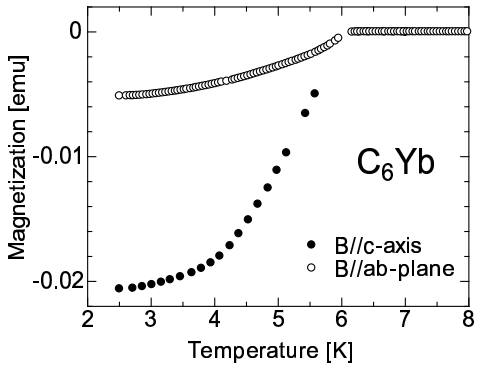


図 4.4 i: C_6Yb の超伝導転移（$T_c = 6.0$ K）を示す磁化の温度依存性（$B = 3$ mT）。

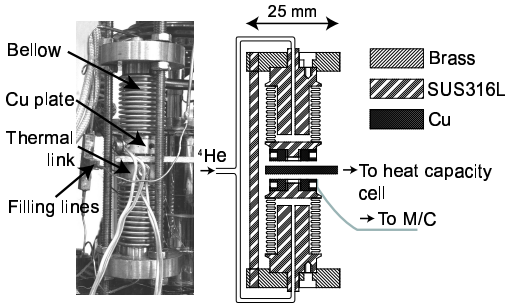


図 4.4 j: 開発した新型のメカニカル熱スイッチの写真と断面図。

窒素温度までテストし、良好な原子像が得られることを確認した。現在は、除振台およびクライオスタットの設計・製作が進んでいる。

＜報文＞

(原著論文)

[1] T. Matsui, H. Kambara, Y. Niimi, K. Tagami, M. Tsukada, and Hiroshi Fukuyama: STS Observations of Landau Levels at Graphite Surfaces, Physical Review Letters **94**, 226403 (2005).

[2] H. Kambara, T. Matsui, Y. Niimi, and Hiroshi Fukuyama: Development of an Ultra-Low Temperature Scanning Tunneling Microscope and Applications for Low Temperature Physics, Journal of Physics and Chemistry of Solids **66**, 1552-1555 (2005).

[3] Y. Niimi, T. Matsui, H. Kambara, K. Tagami, M. Tsukada, and Hiroshi Fukuyama: Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy of the Electronic Local Density of States of Graphite Surfaces near Monoatomic Step Edges, Physical Review B **73**, 085421 (2006).

[4] H. Kambara, T. Matsui, Y. Niimi, and Hiroshi Fukuyama: Construction of a Dilution Refrigerator Based Ultra-Low Temperature Scanning Tunneling Microscope, Japanese Journal of Applied Physics **45/3B**, 1909-1912 (2006).

(国内雑誌)

神原 浩、松井朋裕、福山 寛：超低温走査トンネル顕微鏡の製作、固体物理 **41**, 99-107 (2006).

(学位論文)

[5] 村川 智：核磁気共鳴法による単原子層ヘリウム 3 の量子相転移の研究（博士論文）

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[6] H. Kambara, T. Matsui, Y. Niimi, and Hiroshi Fukuyama: Construction of a Dilution Refrigerator Based Ultra-Low Temperature Scanning Tunneling Microscope, 13th International Conference on Scanning Tunneling Microscopy/Spectroscopy and Related Techniques in conjunction with 13th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy: STM2005 (Sapporo Convention Center, Japan, July 3-8, 2005).

[7] Y. Niimi, T. Matsui, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: STM/STS Measurements of Two-dimensional Electrons Trapped around Surface Defects in Magnetic Fields, 16th International Conference on Electronic Properties of Two- Dimensional Systems: EP2DS-16 (Albuquerque, New Mexico, USA, July 10-15, 2005).

[8] H. Kambara, Y. Niimi, K. Takizawa, H. Yaguchi, Y. Maeno, and Hiroshi Fukuyama: Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy of Sr_2RuO_4, 24th International Conference on Low Temperature Physics: LT24 (The Hilton in the Walt Disney Resort, Orlando, Florida, USA, August 10-17, 2005).

[9] S. Murakawa, H. Akisato, Y. Matsumoto, D. Tsuji, K. Mukai, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: NMR Measurements on New Quantum Phases in 2D ^{3}He, 24th International Conference on Low Temperature Physics: LT24 (The Hilton in the Walt Disney Resort, Orlando, Florida, USA, August 10-17, 2005).

[10] Y. Matsumoto, D. Tsuji, S. Murakawa, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: Anomalous Coexistence of Heat Capacity Peaks near a Registered Phase of Two-dimensional ^{3}He, 24th International Conference on Low Temperature Physics: LT24 (The Hilton in the Walt Disney Resort, Orlando, Florida, USA, August 10-17, 2005).

[11] S. Murakawa, H. Akisato, Y. Matsumoto, D. Tsuji, K. Mukai, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: Research for New Quantum Phases in 2D ^{3}He with NMR Measurements, The International Conference on Ultra-Low Temperature Physics: ULT2005 (University of Florida, Gainesville, Florida, USA, August 18-20, 2005).

招待講演

[12] Hiroshi Fukuyama: Novel Quantum Phases in 2D ^{3}He Near Localization, 24th International Conference on Low Temperature Physics: LT24 (The Hilton in the Walt Disney Resort, Orlando, Florida, USA, August 10-17, 2005).

[13] Hiroshi Fukuyama: Nuclear Magnetic Orderings and Frustration in BCC ^{3}He in High Magnetic Fields, The International Conference on Ultra-Low Temperature Physics: ULT2005 (University of Florida, Gainesville, Florida, USA, August 18-20, 2005).

(国内会議)

一般講演

[14] 村川 智，向 賢一，辻 太輔，松本洋介，神原 浩，福山 寛: 2 次元 ^{3}He の NMR 測定 I（不足粒子領域)、日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学京田辺キャンパス、2005 年 9 月）

[15] 向 賢一，村川 智，辻 太輔，松本洋介，神原 浩，福山 寛: 2 次元 ^{3}He の NMR 測定 II (過剰粒子領域)、日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学京田辺キャンパス、2005 年 9 月）

[16] 辻 太輔，松本洋介，村川 智，向 賢一，神原 浩，福山 寛: グラファイト上 2 次元 ^{3}He の過剰粒子域の熱容量測定および高温域測定への拡張、日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学京田辺キャンパス、2005 年 9 月）

[17] 神原 浩，新見康洋，滝沢恵一，矢口 宏，前野悦輝，福山 寛: Sr_2RuO_4 の STM/STS 観測、日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学京田辺キャンパス、2005 年 9 月）

[18] 向 賢一，村川 智，辻 太輔，神原 浩，福山 寛: Pulsed-NMR Measurements for Monolayer ^{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」領域発足研究会（東京大学本郷キャンパス小柴ホール、2005 年 12 月）

[19] 辻 太輔，村川 智，向 賢一，神原 浩，福山 寛: グラファイト上の 2 次元 ^{3}He の熱容量測定 II、日本物理学会第 61 回年次大会（愛媛大学 · 松山大学、2006 年 3 月）

[20] 村川 智，向 賢一，辻 太輔，神原 浩，福山 寛: 単原子層 ^{3}He の NMR 測定、日本物理学会第 61 回年次大会（愛媛大学 · 松山大学、2006 年 3 月）

[21] 新見康洋，蟹澤 聖，小島治樹，神原 浩，平山祥郎，樽茶清悟，福山 寛: 表面 2 次元電子系に対する磁場中 STM/STS 観測、日本物理学会第 61 回年次大会（愛媛大学 · 松山大学、2006 年 3 月）

[22] 神原 浩，新見康洋，C. Winkelmann，滝沢恵一，矢口 宏，前野悦輝，福山 寛: Sr_2RuO_4 の STM/STS 観測 II、日本物理学会第 61 回年次大会（愛媛大学 · 松山大学、2006 年 3 月）

招待講演

[23] 福山 寛: 超低温走査トンネル顕微/分光法による低次元電子系の状態密度イメージング、日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学京田辺キャンパス、2005 年 9 月）

[24] 福山 寛: New Horizon of Low Temperature Physics in the Twenty First Century、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」領域発足研究会（東京大学本郷キャンパス 小柴ホール、2005 年 12 月）

[25] 福山 寛: Quantum Phases in 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」領域発足研究会（東京大学本郷キャンパス 小柴ホール、2005 年 12 月）

[26] 神原 浩，新見康洋，C. Winkelmann，滝沢恵一，矢口 宏，前野悦輝，福山 寛: STM/STS Experiments of Sr_2RuO_4 and Related Compounds、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」領域発足研究会（東京大学本郷キャンパス 小柴ホール、2005 年 12 月）

(セミナー)

[27] Hiroshi Fukuyama: Recent STS Studies of the Edge States and the Possible QHE in 2DES at Graphite Surfaces (University of Hamburg, Hamburg, Germany, Dec. 19, 2005).

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。若いメンバーの自由で柔軟な発想と行動力を最大の武器として研究を推進している。

4.5.1 劈開表面に形成された２次元電子系

量子ホール効果などの２次元系における重要な輸送現象は、これまですべてデバイス中に閉じ込められた界面２次元系に対して行われてきた。一方、InAs や InSb の清浄表面に金属原子などを堆積させることにより表面にキャリアが誘起されることが光電子分光や STS などの測定からわかっていたが、面内伝導の測定は電極技術の困難などから行われていなかった。表面に形成された２次元電子系は、表面に堆積させる物質の自由度や走査型プローブ顕微鏡との相性の良さなどから非常に大きな可能性を持つ。近年、我々は、表面２次元電子系の面内伝導測定手法を確立し、銀を蒸着した InAs へき開表面において整数量子ホール効果の観測に成功した。本年度は、堆積物質と２次元電子との相互作用を明らかにすべく、さまざまな堆積物質に研究を拡張した。

Ge を堆積させた InAs 劈開表面２次元電子系

0.2 単原子層（ML）程度の Ge を InAs 劈開表面に堆積させて誘起した２次元電子系において、整数量子ホール効果を観測した。２次元電子密度が高すぎると複数のサブバンドに電子が収容されるようになり量子ホール効果の観測は困難になるが、Ge を堆積させた場合には電子密度が低く、かつ高い移動度を持つ２次元電子系が形成されるので、整数量子ホール効果の観測に適している。

２次元電子密度の被覆率に対する依存性に関して、Ag や Cr などの金属原子を堆積させた場合には、単純なドナーモデルで説明することができ、低被覆率領域においては表面に吸着した原子が一個ずつの電子を InAs 側に供出すると考えることができた。ところが Ge を堆積させた場合には、約 0.1ML 程度までは劈開面の電気伝導は観測されずに、0.2ML 付近からようやく２次元電子系が形成されることがわかった。堆積原子が金属か半導体かの違いによって、表面ドナー準位の形成過程が異なる可能性を示唆していると考えている。

堆積物質による反局在効果の違い

堆積物質と２次元電子との相互作用は、豊富な研究の自由度をもたらすと考えられる。Ag を堆積させた InAs 劈開表面の電子密度と移動度との関係から、イオン化ドナーとなった吸着物質とのクーロン相互作用が２次元電子系の散乱の主原因であることがわかっている。さらに、スピンが関与する相互作用が存在すれば、多くの新奇な物理現象が期待できる。

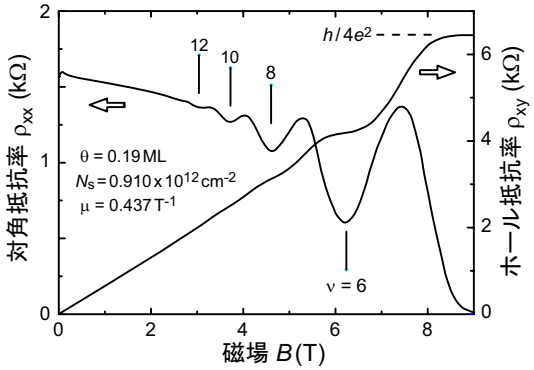


図 4.5 a: Ge を堆積させた InAs 劈開表面において観測された整数量子ホール効果。

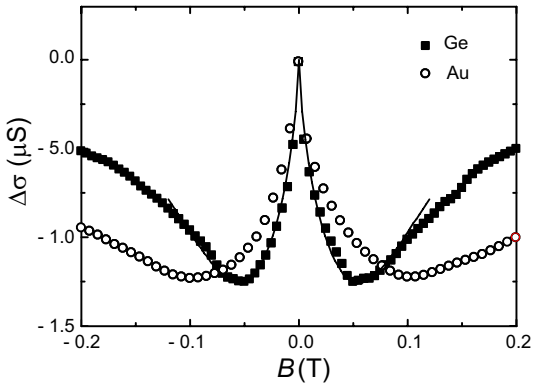


図 4.5 b: Ge-、または、Au-InAs 表面反転層の伝導率の磁場依存性。実線は ILP 理論で Ge-InAs 表面反転層の磁気伝導をフィッティングしたもの。

通常、不規則ポテンシャルによる散乱による量子干渉効果は電子の局在傾向を強めるが、スピン-軌道相互作用が働く散乱の場合には反局在効果をもたらす。量子干渉効果は磁場によって破壊されるため、電気抵抗の磁場依存性からそれを抽出することが可能である。例えば、Mg 金属薄膜にスピン軌道相互作用が強い Au を混入させていくと、磁気抵抗効果の符号が負から正に変わることが報告されている。今回、我々はスピン軌道相互作用が強い Au と弱い Ge をそれぞれ堆積させた InAs 劈開表面に対して磁気抵抗効果の比較実験を行った。Rashba 効果（非対称井戸中のスピン軌道相互作用による有効磁場）の大きさを等しくするために２次元電子密度が等しくなるように調節した。Ge を堆積させた InAs 劈開表面における磁気抵抗効果は、Rashba 効果を考慮した ILP 理論により定量的に再現できる。一方、Au を堆積させた場合の結果は、ILP 理論だけでは再現できず、表面に堆積した Au によるスピン軌道散乱が加わった

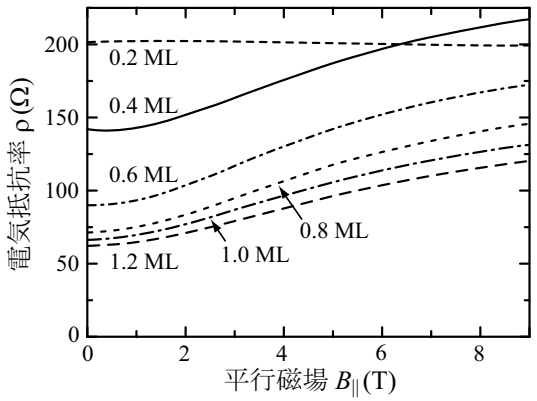


図 4.5 c: 鉄を吸着させた InAs 劈開表面の電気抵抗率の平行磁場依存性。表面被覆率の増加に伴いゼロ磁場の電気抵抗率は小さくなると大きな正の磁気抵抗効果が観測されるようになる。

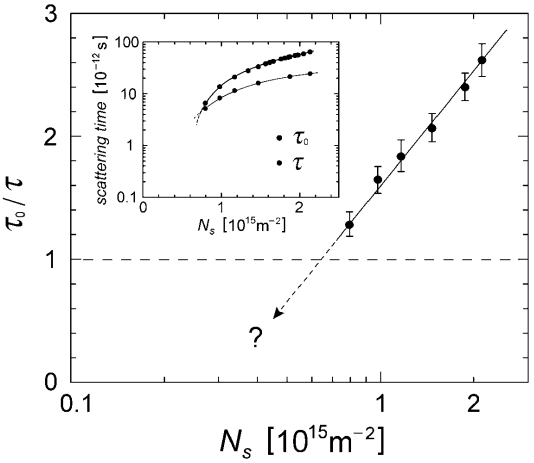


図 4.5 d: Si/SiGe 量子井戸試料中の電子の散乱時間。サイクロトロン共鳴吸収線幅からもとめた散乱時間 τ と電子移動度からもとめた散乱時間 τ_0 を比較した。電子密度 N_s の低下に伴い、τ は τ_0 に近づき、絶縁体相では逆転する可能性も示唆される。

結果として説明された。

Fe を堆積させた InAs 劈開表面２次元電子系

吸着原子の局在磁気モーメントが２次元電子の伝導に与える影響を調べるために、Fe を堆積させた InAs 劈開表面２次元系の平行磁場下における磁気抵抗効果の測定を行った。電子の面内運動は直接的な影響を受けないので、スピンが関与する効果のみを抽出することができる。表面被覆率を増やしていくと大きな正の磁気抵抗効果が観測された。パウリ常磁性から単純に見積もられる InAs 表面の２次元電子のスピン偏極率は 10 T においても 1 %程度であり、このような大きな効果を引き起こすとは考えにくい。我々は、鉄の磁気モーメントの偏極が２次元電子系の抵抗増加に大きく関与していると考えている。

しかし、正の磁気抵抗効果の機構については明らかではない。貴金属に少量の磁性不純物を混ぜた合金系では、磁場により局在スピンの向きが固定されるために散乱が抑制されて磁気抵抗効果が観測されるが、その符号は負であった。局在磁気モーメントの偏極によって交換相互作用を通じた強い内部磁場が生じ２次元電子のスピンが偏極する可能性が考えられていたが、試料回転により垂直磁場を導入した SdH 振動の測定からそれは否定された。

4.5.2 強相関２次元電子系

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、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。一方では、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が、最近では電子状態やスピン状態に関する直接的な知見を得るためにミリ波照射応答測定に研究を拡張している。

シリコンヘテロ構造電子系におけるサイクロトロン共鳴

強相関２次元電子系の電子状態に関する知見を得るためにサイクロトロン共鳴の測定に着手した。電子状態を大きく変えない低磁場で共鳴を観測するために、測定にはミリメートル波（100GHz）を用いた。今回は、非常に高い移動度をもつ Si/SiGe 量子井戸試料（武蔵工大白木先生より頂いた）に対して実験を行った。電気抵抗の温度変化（金属的）が大きいため試料自身をボロメーターとして使用し、吸収熱量をジュール発熱による温度上昇と比較して算出した。サイクロトロン共鳴吸収線幅から得られる緩和時間 τ をゼロ磁場の移動度から得られる緩和時間 τ_0 と比較すると、高電子密度領域では $\tau < \tau_0$ であるが、電子密度の低下とともに、急速に両者は近づいた。単純に補外すると逆転する可能性も示唆される。今回用いた試料においては電極抵抗等の問題から低電子濃度領域の測定が困難であったが、今後、他の試料を用いて金属絶縁体点近傍まで測定を拡張する。

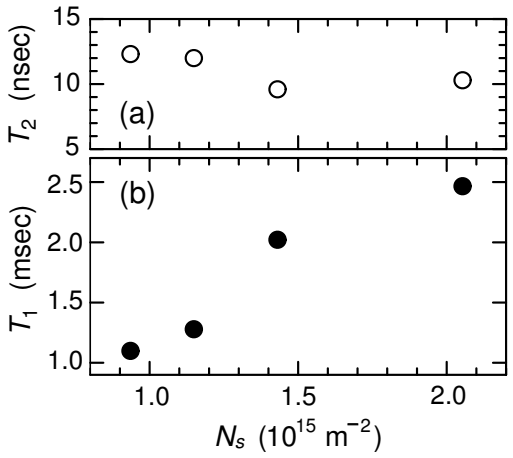


図 4.5 e: シリコンヘテロ構造試料の電子スピン共鳴吸収の線幅とピーク値からもとめた横スピン緩和時間 T_2 と縦スピン緩和時間 T_1。磁場は２次元面に対して平行にかけられており、その大きさは 3.55 T。

シリコンヘテロ構造電子系での電子スピン共鳴

シリコンデバイス中のスピンは、量子計算やスピントロニクスなどの応用分野でも注目されている。電子スピン共鳴はスピンを制御するための有効な手段であり、またその抵抗検出はデバイスの微細化のために不可欠である。シリコンは、長いスピン緩和時間が期待されることと集積回路技術の応用ができるため最も有望な母物質である。我々は、これまでの研究で電子スピン共鳴による抵抗変化の原因が電子加熱ではなく、共鳴によるスピン偏極率の減少によるものであることを実証した。また、強相関２次元系で観測される平行磁場下の正の磁気抵抗効果の原因がスピン偏極によるものであることを確証づけた。さらに、共鳴吸収線幅から横緩和時間 T_2 を導出するとともに、吸収の強さから縦緩和時間 T_1 を導出することに成功した。平行磁場下での抵抗の大きさがスピン偏極率の優れたインジケーターとなること、ミリ波照射による振動磁場の大きさがサイクロトロン共鳴吸収時の振動電場の大きさと比例関係にあることなどを巧みに利用した。得られた縦緩和時間 T_1 はミリ秒のオーダーであったが、これまで半導体２次元系で報告されているものの中では最も長い。これまでの実験（~10GHz）よりも高い周波数（100 GHz）で行われたことと、用いた試料の移動度が非常に高かったことによるものとして説明できた。

4.5.3 半導体２次元系における新奇物性の開拓と新機能デバイスの開発

半導体２次元系は、非常に豊かな物理を内包しており、加工の自由度の高さからバラエティに富んだ実験研究が行われている。この半導体２次元系に強磁場を印加した量子ホール系の電子物性について、輸送現象測定、光学（特にテラヘルツ光）測定の両面から探求している。本年度は、これまでの成果のまとめと公表を主として行うとともに、以下の研究を行った。

磁性体ドットによる磁場変調をかけた２次元系の遠赤外光応答

量子ホール素子はテラヘルツ光に対する検出器として用いることができるが、高感度である理由の一つとして光照射により励起されたキャリアの緩和時間が非常に長い（ミリ秒）ことが挙げられる。その原因として、ランダウ準位内に生成された電子と正孔がそれぞれ不規則ポテンシャルの谷と山に捕獲されて再結合の確率が激減することが考えられる。このモデルを検証するため、試料表面に磁性体ドットを並べることによって、２次元系に磁場変調を人工的にかけた試料に対する遠赤外光応答の研究に着手した。磁場変調によってランダウ準位が変化するためにポテンシャル変調と同等の効果が期待できる。予備実験を行い、磁性体ドットの有無による遠赤外光応答の違いを観測した。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Y. Tsuji, T. Mochizuki and T. Okamoto: Two-dimensional electrons at a cleaved semiconductor surface: Observation of the quantum Hall effect, Applied Physics Letters **87**, 062103-1-3 (2005) (also selected by the Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology **12** (7), 2005).

[2] M. Ooya, K. Toyama and T. Okamoto: Magnetoresistance and spin polarization in the insulating regime of a Si two-dimensional electron system, Physical Review B **72**, 075344-1-5 (2005).

[3] Y. Kawano and T. Okamoto: Macroscopic Channel-Size Effect of Nonequilibrium Electron Distributions in Quantum Hall Conductors, Physical Review Letters **95**, 166801-1-4 (2005).

[4] Y. Kawano and T. Okamoto: Noise-voltage mapping by a quantum-Hall electrometer, Applied Physics Letters **87**, 252108-1-3 (2005).

[5] Y. Kawano and T. Okamoto: Spatial imaging of noise voltages by a quantum Hall scanning electrometer, Journal of Physics: Conference Series (2006), in press.

[6] J. Matsunami, M. Ooya and T. Okamoto: Electron spin resonance of the two-dimensional metallic state and the quantum Hall state in a Si/SiGe quantum well, Physica E (2006), in press.

[7] K. Toyama, M. Ooya, T. Okamoto, Y. Hashimoto, S. Katsumoto and Y. Iye: Magnetoresistance

in the strongly insulating regime of GaAs two-dimensional hole systems, Physica E (2006), in press.

[8] Y. Tsuji, T. Mochizuki and T. Okamoto: Observation of the quantum Hall effect in cleaved InAs surfaces, Physica E (2006), in press.

[9] J. Matsunami, M. Ooya and T. Okamoto: Electrically detected electron spin resonance in a high-mobility silicon quantum well (submitted).

(会議抄録)

[10] Yukihide Tsuji and Tohru Okamoto: Magnetotransport measurements on the defect-induced conduction electrons near InAs(111) surface, Proceedings of the 27th International Conference on the Physics of Semiconductors, Flagstaff 2004, AIP Conference Proceedings Vol. 772 (eds. J. Menendez and C. G. Van de Walle, AIP, New York, 2005) 469-470.

[11] Y. Kawano and T. Okamoto: Imaging of intra and inter Landau level scattering in quantum Hall devices, Proceedings of the 27th International Conference on the Physics of Semiconductors, Flagstaff 2004, AIP Conference Proceedings Vol. 772 (eds. J. Menendez and C. G. Van de Walle, AIP, New York, 2005) 527-528.

[12] Yosuke Komori and Tohru Okamoto: Ettingshausen effect in integer quantum Hall systems, Proceedings of the 27th International Conference on the Physics of Semiconductors, Flagstaff 2004, AIP Conference Proceedings Vol. 772 (eds. J. Menendez and C. G. Van de Walle, AIP, New York, 2005) 555-556.

(国内雑誌)

[13] 岡本徹、辻幸秀、望月敏光: 半導体劈開表面の２次元電子系と量子ホール効果の観測, 固体物理, in press.

(学位論文)

[14] 大屋満明：「強相関シリコン２次元電子系における磁気輸送とサイクロトロン共鳴」（博士論文）

[15] 辻 幸秀：「吸着金属により誘起された半導体表面二次元電子系の輸送特性」（博士論文）

[16] 高瀬恵子：「量子ホール素子を用いたテラヘルツ検出器の機構」（修士論文）

[17] 望月敏光：「InAs へき開表面二次元電子系と吸着磁性原子との相互作用の研究」（修士論文）

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[18] J. Matsunami, M. Ooya and T. Okamoto: Electron spin resonance of the two-dimensional metallic state and the quantum Hall state in a Si/SiGe quantum well, 16th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Albuquerque, USA), 10-15 July, 2005.

[19] K. Toyama, M. Ooya, T. Okamoto, Y. Hashimoto, S. Katsumoto and Y. Iye: Magnetoresistance in the strongly insulating regime of GaAs two-dimensional hole systems, 16th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Albuquerque, USA), 10-15 July, 2005.

[20] Y. Tsuji, T. Mochizuki and T. Okamoto: Observation of the quantum Hall effect in cleaved InAs surfaces, 16th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Albuquerque, USA), 10-15 July, 2005.

招待講演

[21] Y. Kawano and T. Okamoto: Spatial imaging of noise voltages by a quantum Hall scanning electrometer, 7th International Conference on New Phenomena in Mesoscopic Structures/5h International Conference on Surfaces and Interfaces of Mesoscopic Devices (Hawaii, USA), Nov. 27-Dec. 2, 2005.

[22] J. Matsunami and T. Okamoto: Spin relaxation in a high mobility silicon two-dimensional electron system, Workshop on Electron Spin Resonance and Related Phenomena in Low Dimensional Systems (Sanremo, Italy), 6-8 March, 2006.

(国内会議)

一般講演

[23] 大屋満明、松並絢也、武市泰男、西岡貴央、岡本徹：Si/SiGe ヘテロ構造２次元電子系におけるサイクロトロン共鳴と電子相関、日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学）2005 年 9 月 19 日-22 日.

[24] 松並絢也、大屋満明、岡本徹: シリコン量子ホール系における電子スピン共鳴、日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学）2005 年 9 月 19 日-22 日.

[25] 當山清彦、大屋満明、岡本徹、橋本義昭、勝本信吾、家泰弘：GaAs ２次元正孔系の強局在領域における正の巨大磁気抵抗、日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学）2005 年 9 月 19 日-22 日.

[26] 小森陽介：２次元電子系における熱電効果、第１回２１世紀 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム（東京大学）2005 年 11 月 21 日-22 日.

[27] 望月敏光、辻幸秀、日尾真之、岡本徹：Two-dimensional electron systems at cleaved semiconductor surfaces and observation of the quantum Hall effect, 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」領域発足研究会（東京大学）2005 年 12 月 15 日-16 日.

[28] 望月敏光、辻幸秀、日尾真之、岡本徹: 強磁性体を吸着させた InAs 劈開表面二次元電子系の平行磁場下における正の巨大磁気抵抗と発現機構、日本物理学会第 61 回年次大会（愛媛大学）2006 年 3 月 27 日-30 日.

招待講演

[29] 河野行雄：量子ホール系輸送現象のイメージング観測、日本物理学会秋季大会シンポジウム「半導体物性研究におけるイメージング計測の現状」、（同志社大学、2005 年 9 月）

(セミナー)

[30] 河野行雄：量子ホール効果の新しい応用とそれを用いた物性開拓：テラヘルツ光顕微鏡と走査型エレクトロメータ、慶応大学理工学部物理学科談話会、（慶応大学）2005 年 7 月.

[31] 河野行雄：量子ホール効果の新しい応用：TH z 発光、電位、雑音電圧の空間イメージング、慶応大学日吉物理学教室コロキウム、（慶応大学）2005 年 10 月.

[32] 岡本徹、松並絢也：シリコン２次元系における物理：電子相関とスピン、武蔵工大、2006 年 1 月.

(その他)

[33] 河野行雄：近接場 TH z 光と電位の複合顕微鏡開発：電子輸送の新観察法、科学技術振興機構（JST）さきがけ「構造機能と計測分析」第３回領域会議（熊本）2005 年 11 月.

4.6 島野研究室

本研究室では、レーザー分光の手法を用いて、凝縮系を中心とす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求に取り組んでいる。特に、基底状態、光励起状態における電子相関、多体効果によって発現する秩序をプローブするために、可視光領域の光学応答に加えて、低エネルギー (∼meV)、テラヘルツ (THz) 周波数帯での電磁応答に着目し、その分光手法の開拓を進めている。

研究対象としては、高密度光励起半導体電子正孔系、カーボンナノチューブ、擬一次元有機導体を取り上げている。2005 年度からは大学院修士課程学生を迎え、本格的に研究を開始することができた。

4.6.1 新分光法の開発

低温強磁場環境下での THz 分光計測

低温、強磁場環境下での THz 分光装置の開発を進めた。強磁場低温下での測定を行う上では、磁石やクライオスタット光導入部の開口径の制限や窓材の吸収により入射光量が減衰し、計測のダイナミックレンジが減少することが難点であった。この点を補うために、THz 波発生の高出力化、検出の高感度化を行った。高強度の THz 波を発生させる方法として、半導体 p 型 InAs 表面からの THz 発生を試み、電気光学 (e-o) サンプリング法を用いて THz 波電場振幅の定量的な評価を行った。高繰り返しモード同期フェムト秒レーザー 76MHz、500mW の励起条件下で、瞬間電場強度で 10kV/m の THz パルスを発生させることが可能となった。さらに、InAs の結晶方位依存性、励起強度依存性の系統的な測定を行い、p 型 InAs の表面電場に起因する光励起瞬時電流と表面電場誘起の二次の非線形光学過程の両者により THz 波が発生していることを明らかにした。検出系についても改善を進め、THz 波の代表的な検出法の一つである e-o サンプリング法の高感度化を進めた。光のショットノイズ限界で動作する差動光検出器を作成することで、光電流変化率 $\Delta I/I = 2 \times 10^{-8}$ の検出が可能になった。この THz 発生、検出器の最適化により、電場振幅で 5 桁弱のダイナミックレンジを得ることができた (図 1)。同手法を用いて、最低到達温度 1.3K、最大磁場 7T の環境下での THz 透過計測が可能となった。

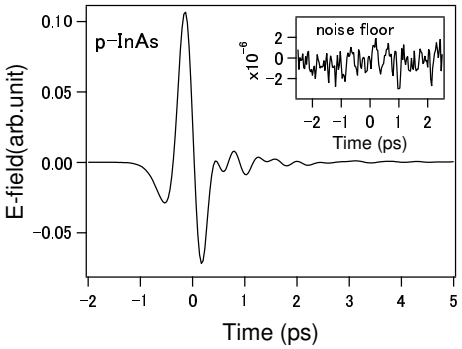


図 4.6 a: p 型 InAs から発生した THz 波の時間波形。挿入図は検出系のノイズレベルを示す。

THz エリプソメトリーによるホール測定

磁気光学カー効果、ファラデー効果などの磁気光学効果は、電子の軌道運動や磁化を光学的に検出する手段として利用されている。例えば磁気光学スペクトルの測定によりホール伝導度の周波数依存性を評価することで、キャリアの微視的な散乱機構についてより深い知見が得られるものと期待される。しかし、光領域でのホール伝導度測定では、バンド間遷移などの寄与が加わる為、直流測定の結果とはつながらないことも多い。そこで輸送現象測定の高周波極限として THz 周波数帯におけるホール測定に注目し、THz 周波数帯における偏光分光法、磁気光学分光法の開発を進めている。現時点では、電場振幅計測としての THz 時間領域分光法の特徴を利用し、室温下で 0.1mrad の偏光回転検出感度を得るに至った。本手法を前述した低温磁場環境下での測定システムに組み込み、半導体のホール効果測定、超伝導体の磁束量子のダイナミクスの観測に用いる予定である。

局所領域おける THz 分光と FDTD シミュレーションによる電磁波解析

THz 光の波長はサブ mm のオーダーと可視光に比較して非常に長いため、レンズや放物面鏡で回折限界まで絞ってもそのスポット径が測定対象物質に比べ無視できない程大きいことが多い。例えば、次節で述べるゼオライト空孔中カーボンナノチューブの試料は、幅が約 $100\mu m$ 程度であり、1THz($300\mu m$) の場合の回折限界 $150\mu m$ 以下の大きさとなっている。このため、テラヘルツ光を試料上のみに集光することができず、試料周辺から回り込んだテラヘルツ光が検出器に入ることにより、定量的な透過測定を行うことが非常に困難となる。

この問題を回避するため、微小開口 (ピンホール) 型の THz 顕微分光計測を検討した。具体的には、試料と同程度あるいはそれ以下の直径のピンホールを試料直前に配置し、余分な背景光を除去し試料を透過した光のみを検出するようにした。ピンホール透過後に試料を配置した場合としない場合とを比較することにより試料の透過率スペクトルを波長以下のサイズ領域で計測することができる。一方、このような波長以下のサイズ領域では、通常の幾何光学的取り扱いによる透過率解析を行うことができない。そこで我々は時間領域差分法 (FDTD 法) を用いてマックスウェル方程式を数値的に解き、微小開口配置におけるテラヘルツ電磁波透過率のシミュレーション

を行った。シミュレーションコードは自作した。回折限界以下のサイズ領域では、ピンホール背後に誘電体が存在することによって幾何光学で予想される値より透過率が著しく増大することを見出し、半導体 (Si) を用いた実験によりそれを実証した。さらに、誘電関数が既知の試料 (Si) について、幾何光学近似による透過解析の妥当性、適用限界を調べた。

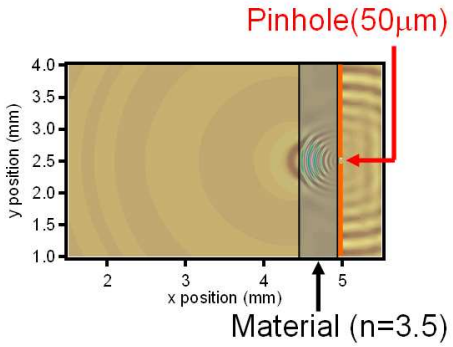


図 4.6 b: ピンホールに誘電体を貼り合わせた時の、透過テラヘルツ電場の空間分布（数値計算シミュレーション）。テラヘルツ波は図の右側から左側へと伝播し、ピンホール透過直後の電場分布を等高線表示している。

4.6.2 擬 1 次元電子系の THz 分光

カーボンナノチューブ

カーボンナノチューブは、構造（直径と螺旋構造）によって、金属、半導体どちらにもなり、1 次元系の物性を探求する格好の舞台となっている。金属ナノチューブでは電子の後方散乱の消失が予想され、バリスティックな伝導による高移動度の電子デバイスへの応用が期待されている。半導体ナノチューブでは、大きな光非線形性と速いキャリア緩和が見出され、超高速の光-光制御素子材料の有力候補と考えられている。さて、1 次元電子系の特徴の一つは、電子間相互作用の顕在化である。実際、コンダクタンスの温度依存性や光電子分光の結果には 1 次元系特有のべき乗則が見出され、朝永ラッティンジャー液体の発現が示唆されている。1 次元系では、電子相関は高周波の伝導、光学応答両者に本質的な影響を及ぼすものと予想されるが、その影響は dc あるいは低周波領域の伝導測定の結果からは必ずしも外挿されない。そこで我々は、カーボンナノチューブにおける電子相関の役割を浮彫りにさせる新しい切り口として、テラヘルツ (THz) 分光法による光学伝導度計測に注目し、カーボンナノチューブの基底状態、光励起状態のダイナミクスの研究を開始した。

本年度は、電極フリーの非接触伝導計測としてのテラヘルツ分光の利点を活かし、まずナノチューブの線形伝導度スペクトルの計測を進めた。チューブ間相互作用のない環境下で、単層ナノチューブ本来の応答を調べるために、1) ゼオライト空孔中に成長された完全配向ナノチューブ、2）ポリマー中に孤立分散したナノチューブ、を対象としている。1）は試料の典型的なサイズが、幅 $100\mu m$、長さ $300\mu m$（典型値）であり、プローブとする THz 波の波長より小さいことから、前述の微小開口型 THz 顕微分光を適用した。偏光依存性の測定から、完全配向したナノチューブに起因する信号を示唆する結果が得られた。2）については、THz 帯での実効複素誘電関数の決定が可能となった。目下、有効媒質理論 (Maxwell-Garnett Theory) に基づき、実験により得られた実効誘電関数から媒質中に分散しているナノチューブの誘電応答を評価することを試みている。今後は、周波数帯域を拡充し、得られた誘電応答の起源について明らかにしていく予定である。

擬 1 次元有機導体

擬 1 次元有機導体 $(TMTSF)_2PF_6$ は、12K で金属絶縁体転移を起こしスピン密度波 (SDW) 相が出現する。この低温相における光誘起絶縁体金属転移、SDW 相における光励起ダイナミクスを調べることを目的として、その THz 分光を開始した。試料は THz 周波数帯で不透明であることから、反射配置の測定系が必要となる。そこで我々は新しい光学系を構築し、0.5 THz-2.5 THz(光子エネルギー 2 meV-10 meV) の範囲での THz 反射分光測定を可能とした。さらに、冷凍器を用いることで室温から 15K までの測定が可能となった。冒頭に述べた p 型 InAs による強いテラヘルツ電場の発生とショットノイズレベル差動検出器との組み合わせにより、反射測定系では現在電場振幅で約 1×10^3 の S/N 比を実現している。今後はより低温下での測定を目指すとともに、まず基底状態における複素誘電関数（光学伝導度）を計測することを計画している。

＜報文＞

(原著論文)

[1] R. Shimano, H. Nishimura, and T. Sato, Frequency Tunable Circular Polarization Control of Terahertz Radiation, Japanese Journal of Applied Physics, Part2-Letters 44, L676-L678 (2005).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[2] H. Nishimura, Y. Ikebe, S. Watanabe, and R. Shimano: THz spectroscopy of Subwavelength space region,the 3rd COE workshop ”Frontiers of Laser and Optical Sciences” (the University of Tokyo, October 1-2,2005)

招待講演

[3] Ryo Shimano: Terahertz Hall measurements by megneto optical spectroscopy, The 3rd COE workshop "Frontiers of Laser and Optical Sciences" (the University of Tokyo, October 1-2,2005)

(国内会議)

一般講演

[4] 西村久明、島野　亮:周波数可変円偏光テラヘルツ発生法の開発, 日本物理学会 2005 年秋季大会, (同志社大学、2005 年 9 月)

[5] 島野　亮 : 高感度 THz 磁気光学測定と半導体評価への応用, 応用物理学会 THz 電磁波技術研究会主催「テラヘルツデバイス研究会」, (箱根、2005 年 12 月)

(セミナー)

[6] Ryo Shimano : Polarization sensitive THz spectroscopy: application to ac Hall measurements, (Rensselaer Polytechnique Institute, New York, USA, May 2005).

[7] 島野　亮 : テラヘルツ電磁波で観る固体の高密度光励起現象、物理学教室物性セミナー (東京大学、2005 年 4 月) .

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、須藤助教授、樽家助手、向山助手、および二十数名の大学院学生、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中心にブラックホールもしくは中性子星を形成し超新星爆発を起こす。「超新星・高密度天体」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子物質へ移行するのか、さらに密度の上昇によりクオーク物質へと相転移を起こすかという基礎過程の研究が必要である。さらにこれらを組合せ一般相対論的な流体力学計算、爆発のシミュレーションを行なわなければならない。1987 年、大マゼラン星雲中に起こった超新星 1987A からのニュートリノバーストが神岡の観測装置で観測された。これはニュートリノ天文学の始まりを告げる歴史的出来事であった。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。従来中性子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。これらのシミュレーションとともに、実際の超新星ニュートリノの将来観測から得られる、超新星モデルあるいは素粒子モデルへの示唆・予言に関する研究も行なっている。また近年、超新星爆発との関連が示唆されているガンマ線バーストや、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

重力のヒッグス機構

ダークエネルギーは、現代宇宙論における最も興味深い謎の１つである。現在の宇宙の大分部を占めていると考えられているにも関わらず、我々はその正体を知らない。この状況は、宇宙規模の長距離における重力に、新しい物理を紐解くヒントが隠されているかもしれないと予感させる。そこで、一般相対性理論を宇宙規模の長距離において変更する可能性を探るため、重力にヒッグス機構を応用することを提唱し、その性質についての研究を行なった。素粒子論においてヒッグス機構が果たしている役割を思い起こせば、これが重力法則を長距離で変更する恐らく唯一の方法であると予想される。実際、このシナリオでは、他の理論（massive gravity や Dvali-Gabadadze-Porrati ブレーンモデル等）が抱える問題（巨視的スケールでの強結合によって生じる、制御不能な量子補正）を回避できることが分かっている。

具体的には、まず、重力のヒッグス機構の最も簡単な例である「ゴースト場凝縮」について、ブッラクホール周辺での振舞いや、その他の非線形ダイナミクスを詳細に調べた [6, 42, 210, 211, 212, 213] 。また、この理論の持つシフト対称性をゲージ化する事で、理論を拡張し、その性質を調べた [11, 161] 。

超弦理論における宇宙論

初期宇宙論において揺るぎない予言をするには、２つの立場がある。１つは、低エネルギー有効理論における対称性または対称性の破れのパターンを用いて、量子論的に安定な議論を展開することである。これは、上記の「重力のヒッグス機構」において採用した立場である。もう１つの立場は、超高エネルギーの基礎理論に立ち返って、そこから帰結される予言を引き出すことである。

最近、超弦理論における加速膨張宇宙の理解が目覚しく進展し、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。本研究では、超弦理論におけるワープしたコンパクト化 (KKLT シナリオ) において、反 D ブレーンの動きがダークマターとして振舞う事を示した [7, 43, 148, 214, 215, 216, 217] 。この様な性質は、反 D ブレーンに限らず、サイクルに巻きつけた D ブレーンにも共通で、ワープしたコンパクト化から正の 4 次元宇宙項を得るシナリオにおいて、非常に一般的な帰結であると考えられる。

６次元ブレーン宇宙モデル

上述の KKLT シナリオでは、ワープしたコンパクト化の大局的な解が知られていない為、簡単なモデルの解析によって、一般的性質を調べる事が有益である。そこで、６次元のブレーン宇宙モデルを提唱し、その性質を詳しく調べた [8, 10, 44, 69, 198, 148, 149, 150, 105, 159, 160, 214, 215, 216, 217]。このモデルは、(i) ブレーン上の 4 次元時空 、(ii) ワープした余剰次元、(iii) フラックスによる余剰次元の安定化等の、KKLT シナリオの重要な特徴を捉えたものになっている。また、Randall-Sundrum5 次元ブレーンワールドを、6 次元に拡張したものとみなすこともできる。

宇宙背景重力波の検出について

現在、重力波をとらえようと、世界各地で重力波検出器の建造、または計画が活発化しており、宇宙を見る新しい窓として大変期待されている。CMB の重力波版ともいえる宇宙背景重力波 (CGB) は、重力の相互作用が極めて弱いことからもわかるように、その強い透過力から宇宙誕生の瞬間にまで迫ることのできる観測対象になる。しかしながらこのことは同時に、重力波検出が極めて難しいことを意味する。そこでこのような性質を併せ持つに CGB に対して、効率の良い検出方法について模索してきた。非常に微弱である CGB の信号は、基本的には検出器のノイズに埋もれてしまう。このような現実的状況から、CGB の検出を可能にするためには、効率のよい統計処理 (データ解析) ならびに検出器の感度向上の工夫が必要となる。そこで CGB の信号ならびにノイズに対して、非ガウス性まで考慮した効率のよい統計処理について研究を行った。また、検出器のデザインも重力波を捕らえる上で、大事な要素となる。そこで、次世代のデザインを考慮に入れた検出器の感度曲線を明確にし、CGB の検出可能性について議論した。

次世代宇宙重力波干渉計による宇宙背景重力波 (GWB) の探査

長年の実験準備期間を経て、(地上) 重力波干渉計による科学的データが入手可能となり、重力波観測実験は現在新たな時代に突入した。一方、宇宙空間に重力波干渉計を打ち上げる (LISA) 計画も着実に進んでおり、次世代型の干渉計を議論する機運が近年になって高まっている。こうした状況を踏まえ、我々は次世代型の宇宙重力波干渉計について具体的な研究を行った。候補となる幾つかの干渉計の設計をモデル化し、それらによって宇宙背景重力波の探査をどの程度向上させることが可能か、具体的な評価を行なった。フォアグランドとなりうる重力波源を考慮したうえで、現在検討がすすめられている Faby-Perot 型の宇宙重力波干渉計が、LISA 型のものよりも優れていることを示し、さらには、背景重力波の双極子成分の観測可能性についても議論を行なった。

高次元ブラックホール・ブレーンとその安定性

ブラックホールのトポロジー変化を具体的に研究しうるひとつの例として、高次元におけるブラックホール・ストリング相転移を挙げることができる。

この (相転移) 現象は多様な性質を持つことが指摘されている。我々は、高次元方向にチャージが特殊な形で広がった場合 (smeared と呼ばれる) について、ブラックブレーンのトポロジカルな相転移について研究を行った。この結果、次元数に応じて相転移の次数が変化することを見出し（臨界次元の存在）、また臨界次元が統計平均の取り方に依存することを発見した。一方、ブラックブレーンがもつ Gregory-Laflamme 不安定性の一般性およびその物理的起源を探るため、ブラックブレーンの安定性についての研究を行った。可能なすべての摂動についての安定性を調べた結果、ブラックブレーンには唯一つの不安定性 -Gregory-Laflamme 不安定- しか存在しないことが示された。この事実は、我々にこの不安定性の特殊性と起源について理解を深める洞察を与えた。

タキオニックな場による宇宙再加熱と PBH 生成

インフレーション後の再加熱時に起こるパラメトリック共鳴 (preheating) は、指数関数的な揺らぎの成長を引き起こすことが知られている。本研究では、この急激な揺らぎの成長のために引き起こされる (初期宇宙起源) ブラックホール (PBH) の生成について、タキオニックな場によるモデルを用いて議論を行なった。PBH の存在量は観測から上限が得られており、大量な PBH 生成は preheating モデルに制限を与えることになる。この研究では 2 および 3 次元のシュミレーションを行い、揺らぎの進化等を非摂動的な領域まで追うことに成功した。その結果、期待された PBH の大量生成は起こりえず、タキオニックな場による宇宙再加熱のシナリオの妥当性が確認された。

ワープしたフラックスコンパクト化の動的安定性

我々が提唱した 6 次元のワープしたフラックスコンパクト化モデルの動的安定性を調べた。背景時空に対する軸対称な摂動を考え、スカラー・ベクトル・テンソル全てのタイプについて解析を行った。結果として、不安定なモードはどのタイプにも存在せず、ゼロモードはテンソル型にだけ存在することがわかった。このゼロモードは 4 次元の重力子に対応するものである。また、各タイプの Kaluza- Klein モードも求めた。[10, 150, 69]

膜宇宙での始原的ブラックホールの生成と蒸発

始原的ブラックホールの生成と蒸発に着目し、Randall と Sundrum の提案したブレイン宇宙モデルの検証を進める研究を行なった。始原的ブラックホールが蒸発し放出される光子および反陽子の量をブレイン宇宙の性質を取り込んで計算し、地球近傍における測定結果と比較した。成果として、ブラックホールの存在量およびブレイン宇宙を特徴付けるパラメターへの制限が得られた [57, 97, 102, 124]。

スライシングによる 4 次元膜上のブラックホールの構成

Dvali と Gabadadze と Porrati によって提案された高次元膜宇宙における 4 次元ブラックホール解を構成するために、バルクを「切る」スライシングの手法を用いて解析を行なった。結果として、5 次元ブラックストリング解におけるスライスの存在と唯一性、および 5 次元・4 次元 Schwarzschild 解、5 次元静的 Black Ring 解、4 次元 C-metric 解それぞれにおけるスライスの非存在を見出した [142]。

ブレーンワールドにおけるインフラトン揺らぎ

Randall-Sundrum の 5 次元ブレーン宇宙モデルにおけるインフラトンの量子揺らぎについて調べた。ブレーン上のインフラトンの揺らぎは、5 次元のバルク時空の計量の揺らぎと結合するため、結果的に作られる曲率揺らぎのパワースペクトルは、4 次元のインフレーション理論の予言からずれることが予想される。本研究では、インフラトンと 5 次元計量の結合系の時間発展を数値的に追うことで、曲率揺らぎのパワースペクトルが高周波側で減衰し、その減衰分が 5 次元計量の揺らぎへと転嫁されることが確かめられた [154]。

ブレーンワールドにおける背景重力波

インフレーション中の時空の量子論的揺らぎを起源とする背景重力波には、宇宙自体が極めて小さいスケールだったころの情報を保持していると考えられており、超弦理論やM理論が示唆する高次元空間に対する唯一の直接的なプローブとなる。本研究では、Randall と Sundrum による 5 次元ブレーン宇宙モデルを用いて、背景重力波のスペクトルに現れる高次元の効果について考察した。標準的なシナリオでは輻射優勢期に高次元効果が現れるが、本年度はより一般的な状況を想定し、宇宙の状態方程式を変えて背景重力波の進化のシミュレーションを行った。その結果、Kaluza-Klein モードの励起の度合いが、状態方程式に依存しないある一定の法則に従うことを発見した。これにより、高次元効果の相殺は輻射優勢期特有のものであることが示された [19, 93, 101, 120, 219, 220, 50, 51]。また、この法則は 5 次元のバルク時空の詳細に関係なく、ブレーンの速度に対するローレンツファクタにのみ依存することを示唆するシミュレーション結果を得た [163]。

ブレーンワールドにおける Kaluza-Klein モードによるエネルギー損失

ブレーンワールドでの動的現象からは、ブレーン上を伝わる重力波の他に余剰次元方向へ伝わる重力波の Kaluza-Klein(KK) モードが生成される。重力波はエネルギーを運ぶためこのようなモードの存在

は重力波源の新たなエネルギー損失として寄与する。そこで本研究では Randall-Sundrum モデルにおいて、線形摂動の KK モードからの反作用をあらわす重力場の２次摂動を考えることにより、重力波の KK モードによる重力波源のエネルギー損失率を求めた [5, 40, 41, 91, 104, 147, 139]。

宇宙初期のバリオン数生成

最近の観測から、宇宙の化学組成の進化がこれまで考えられてきたより早い段階から始まっていることが明らかになってきた。また、宇宙初期のバリオン数生成機構から小さなスケールでバリオン数密度が非常に高くなる可能性が示唆されている。これをうけ、バリオン数密度が非常に高い領域でどのような元素合成がおこるのかを重元素まで含めて解析をおこなった。その結果元素合成は中性子過剰核、陽子過剰核の両サイドを通って反応が進むというこれまで全く知られていなかった反応経路を通ることがわかった。またこれまで起源が明らかでなかった陽子過剰核も生成される事が分かった。[20, 94]

タキオン凝縮による低次元 D ブレーンへの崩壊

我々の住む宇宙はＤブレーンというソリトンに閉じ込められていると考えられている。non-supersymmetric なＤブレーンはタキオン凝縮によって次元の異なる supersymmetric なＤブレーンに崩壊する。宇宙初期にはこのような次元の移り変わりが激しく起こり、その結果現在の 4 次元の宇宙が出来てきたと考えるのが自然である。我々はタキオン凝縮のダイナミカルな過程を超重力理論の枠組で解析した。[155]

ブラックホールのミクロな状態

ブラックホールは一般相対論の帰結として存在すると考えられているが、ブラックホールの存在する時空上で量子論を考えると、量子論の基盤としているユニタリー性が一見保たれていないようにみえるという問題ある。またブラックホールはエントロピーを持っているが、そのエントロピーに相当する内部自由度がどこにあるのかこれまで知られていなかった。これらの問題に対し、Ｄブレーンの解析からブラックホールの一つ一つのミクロな状態は特異点をもたない滑らかな幾何学で表現できる可能性が分かってきた。我々は non-supersymmetric なブラックホールにおける特異/非特異性の解析を行った。[106, 52, 164]

5.1.2 観測的宇宙論

低周波帯域での宇宙背景重力波のスカイマップ作成

[24, 100, 126, 175, 195] 現在、地上でレーザー干渉計を主とする重力波の検出装置が建設・稼働中だが、近い将来、スペース干渉計の打ち上げにより、幅広い周波数帯での重力波観測が可能となる。そのスペース干渉計のターゲットの１つに考えられているのが、背景重力波であり、その起源は、連星系や重力崩壊星などから放射される天体起源と、宇宙初期の高エネルギー状態で生成される初期宇宙起源とに大別される。本研究では、背景重力波の種類と起源の特定に貴重な手がかりを与え、かつ、宇宙論的情報としても有用な、背景重力波の全天マップの構築方法について考察した。具体的には、干渉計の１次元時系列データから、２次元強度分布を再構成する方法論を定式化し、スペース干渉計 LISA を念頭に、低周波帯域でのスカイマップ作成についての具体的デモンストレーションを行った。その結果、低周波帯域での角度分解能は、多重極成分で $\ell \leq 5$ に限られるものの、銀河系内・系外から来る背景重力波の区別に使えることがわかった。

一般化変分原理を用いた自己重力多体系の非平衡進化の解析

[127, 107, 165, 196] 孤立した N 体自己重力系は、一般に、自由落下時間で力学的に安定な状態に落ち着き (ビリアル平衡)、その後、2 体緩和により、じわじわと構造が進化していく。だが、重力熱的不安定性と呼ばれる熱力学的不安定性のせいで、安定な熱平衡状態には移行しない。我々は、以前、系統的な恒星衝突系の N 体シミュレーションを行い、重力熱的不安定性が起こる前に、準平衡な状態が存在し、系の特徴は、恒星ポリトロープと呼ばれる 1-パラメーター系列の分布関数で、よく近似できることを発見した。本研究では、こうしたシミュレーションの振る舞いを解析的な立場から理解するために、自己重力系のフォッカー・プランクモデルをベースに、準平衡状態のタイムスケールの定量的な評価を行った。自己随伴性が満たされない拡散方程式系にも適用可能な一般化変分原理を用いて、恒星ポリトロープを特徴づける 1-パラメーター、ポリトロープ指数の時間発展方程式を導出、その方程式を近似的に解くこと、解析的なタイムスケールの表式を得た。得られた結果は、以前のシミュレーション結果ともよく一致し、不安定状態に入る臨界点近傍では、一般的に、ポリトロープ指数の進化はスローダウンすることが示された。

銀河団の温度推定の系統誤差と宇宙の密度ゆらぎ振幅

我々が現在目にしている宇宙マイクロ波背景放射の温度ゆらぎや宇宙の大規模構造，銀河団などの天体は宇宙初期に生成された質量密度のゆらぎがその形成の起源であると考えられている．この意味で，密度ゆらぎのパワースペクトルは宇宙の平均質量密度などと並ぶ基本的な物理量である．スペクトルの形状に関しては理論予言が可能であり，観測的にもおおむね一致した結果が得られつつある．その一方で，スペクトルの振幅に関しては観測データによる一致

が得られていない．スペクトルの振幅を表すパラメータとしては σ_8 と呼ばれるものが用いられるが，観測される銀河団の数密度から推定した σ_8 は 0.7 程度の値になるのに対し，宇宙マイクロ波背景放射の温度ゆらぎスペクトルなどから得られる値は 0.9 程度と大きく異なっている．しかし，最近になり，銀河団の数値シミュレーションなどから銀河団の質量の推定に系統的な誤差がある可能性が指摘された．銀河団の数密度から σ_8 を推定する方法は，観測的に見積もられた銀河団の質量と銀河団ガスの温度の相関関係を利用するため，その系統誤差の度合に応じて σ_8 の値も系統的に変化する．我々は，その度合をさまざまに変化させながら，銀河団の個数密度から求まる σ_8 の値がどのように変化するのかを調べた．その結果，観測的に推定された銀河団の質量の，真の質量に対する比が 0.7 程度であれば，σ_8 の値が 0.9 程度になり，宇宙マイクロ波背景放射の温度ゆらぎスペクトルなどから得られる値と無矛盾となることを指摘した．[17]

ガンマ線バーストとクェーサーを背景光とした WHIM 吸収線系の検出可能性

WHIM（Warm/Hot Intergalactic Medium) を検出する新たな試みとして、ガンマ線バースト（GRB）の X 線残光（GRB 残光）を背景光源とした場合の金属吸収線に着目した。これは QSO 吸収線による WHIM 検出の QSO を GRB 残光に置き換えたものである。この方法の利点のひとつは、GRB が宇宙論的距離（例えば z=1 程度）で起こるので、長い距離を稼ぐことができ、そのため間に WHIM が存在する確率が高くなることである。一方、明るいクエーサーは比較的近く（Mkn421 の場合、z=0.03）に存在するので短い距離しか稼げない。また、もう一つの利点は、残光が充分暗くなった後に WHIM 自身からの輝線観測が可能になる点であり、これ は常時輝き続けているクエーサーでは不可能である。我々は次世代衛星（例えば XEUS）の性能を仮定し、宇宙流体シミュレーションを用いて、GRB 残光中の金属吸収線の模擬スペクトルを衝突、光電離平衡を仮定して作成し、GRB 残光中の WHIM による吸収線が検出可能であることを示した。また、DIOS の性能を仮定した輝線の模擬観測も同時に行った。この結果、XEUS を用いれば明るいガンマ線バーストを背景光とした WHIM 吸収線系の検出が可能であること、さらに、数十個程度の明るいクエーサーもこの方法論のターゲットとなり得ることを示した [72]。

重力多体専用計算機 GRAPE-5/GRAPE-6 システムを用いた PPPM 法 · TreePM 法による宇宙論的 N 体シミュレーション

宇宙論的な N 体シミュレーションは宇宙の大規模構造形成の研究において大きな役割を果たしている。宇宙論的な N 体シミュレーションの特徴としては境界条件として周期境界条件を採用することにある。この為、PPPM 法や TreePM 法といった長距離力を PM 法で計算する手法が使われる場合が多い。この場合、単距離力は逆自乗則ではなく、それにカットオフが入った形になる為これまでは GRAPE を用いた計算の高速化が不可能であった。GRAPE-5 及び GRAPE-6 では、逆自乗則にカットオフの入った力も高速に計算可能であり、これらを用いて PPPM 法と TreePM 法の高速化及び並列化を行なった。[27]

WHIM における重元素イオンの非平衡電離状態

これまでの、WHIM の研究では理論・観測を問わず WHIM 中のイオンは電離平衡状態にある仮定していたが、密度が極めて希薄な WHIM では、電離平衡に達するまでの時間が宇宙年齢に匹敵する程長くなるため、電離平衡の仮定は正しくない。そこで、電離平衡の仮定を外してイオンの電離状態の時間進化を直接解くことによって、より現実的な酸素イオンの電離状態を調べた。より具体的には、宇宙の大規模構造形成の数値流体シミュレーションで得られたバリオンの熱史に沿って、水素・ヘリウムの他に酸素・鉄・窒素・炭素などの重元素の電離状態の時間進化を調べた。その結果、輝線や吸収線の強度比が電離平衡を仮定した場合と比較して

大きく異なるため、電離平衡を仮定して WHIM の温度などを評価すると、実際の温度を正しく評価できなくなる可能性があることが分かった。[78, 87, 177]

重力レンズによるクェーサーの狭輝線放射領域のサイズ測定

近傍のクェーサーを含む活動銀河核周辺の狭輝線放射領域は、そのサイズと光度が理論で予想されたとおりの正の相関を示す。しかし遠方のクェーサーにおいては、同じ理論では説明できない、近傍と異なる様相を示しているという示唆がなされている。これは狭輝線放射領域やクェーサーそのものの進化が関連していると考えられるが、示唆そのものの根拠に議論の余地がある。それは、遠方になればなるほど見かけのサイズが小さくなることから、サイズの測定そのものが困難となること、実際にこの示唆が直接のサイズ測定を行っていないことにひとつの原因がある。そこで、重力レンズ効果が光源天体の見かけ上のサイズを引き伸ばすことを利用し、このような研究を次の段階へと導くためのサイズの直接測定の可能性を調べた。レンズ天体の質量分布の不定性を考慮すると、既存の観測データからはサイズ測定が困難であることが判明したが、今後の観測によって実際のサイズ測定が可能であること、またその手法を示した。[26]

大分離角重力レンズクエーサー SDSSJ1004+4112 による背景銀河の多重像の発見

強い重力レンズの効果で4重像をもっているクエーサー SDSSJ1004+4112 をハッブル宇宙望遠鏡で観測した結果、$z = 0.68$ にあるレンズ天体銀河団の影響で多重像をもつ3つの背景銀河を発見した。これらのうち2個はケック望遠鏡での分光フォローアップ観測の結果、$z = 3.33$ および $z = 2.74$ であることが確認された。このような多重像の同定は、銀河団の質量分布の再構築と宇宙論パラメータの制限にユニークなツールとなる [34]。

3 軸不等楕円体ハローモデルの解析的導出

冷たい暗黒物質モデルのもとで形成される暗黒ハローは一般に球対称分布から大きく外れた構造を持つことが知られている。この構造をゼルドビッチ近似を用いて解析的に計算したところ、すでに数値シミュレーションから得られている3軸不等楕円体近似の軸比の分布関数を良く再現することを発見した。この結果は、暗黒ハローの質量分布プロファイルを理論的により正確に予言する道を開くと考えられる [36]。

宇宙論的密度ゆらぎの位相相関解析

通常、宇宙論的密度ゆらぎの研究は、理論的にも観測的にほとんど2点統計の解析に限られている。スローンデジタルスカイサーベイの銀河カタログから、2点相関に登場する (線形) バイアスの、銀河環境依存性についてはかなり詳細な研究が可能となった [35]。一方、2点統計には登場しない、位相の相関についての研究はまだ発展途上である。我々は、ジーナス統計を用いたスローンデジタルスカイサーベイの銀河カタログ解析から、位相相関の定量化を行った [37]。さらに、摂動論から計算される位相の確率分布関数を用いた新たな位相相関解析方法を開発し、シミュレーションデータ及びスローンデジタルスカイサーベイの銀河カタログに応用した。その結果、バイアスの摂動展開の2次の係数と1次の係数 (線形バイアス) の間に、有意な相関があることを経験的に発見した [38]。

SDSS クエーサー 2 点相関関数とバリオン密度パラメータ

典型的なクエーサーは銀河よりも数百倍も明るく、スローンディジタルスカイサーベイ (SDSS) によって得られたクエーサーの分布は赤方偏移にして２３といった深宇宙にまで及んでいる。このようなクエーサーサンプルを用いると銀河よりも遥かに大きなスケールの宇宙の大規模構造を探る事が可能となる。我々はSDSS によって得られた過去最大のクエーサーサンプルを用い、赤方偏移空間のクエーサー２点相関関数を求め、バリオン密度パラメター及び宇宙定数に対して制限を与えた。[33]

SDSS 銀河を用いた銀河系ダストマップの検証

我々の銀河によるダスト吸収はあらゆる天文学的観測に重要な影響を及ぼす最も基本的なデータである。現在広く利用されている銀河吸収のマップは Schlegel,Finkbeiner & Davis(1998) によるものであるが、これはダストの放射量にいくつかの仮定を与えて推測された値である。これらの仮定は、光学的に厚い領域が存在する場合、視線方向に様々な温度のダストが重なり合っていた場合等で、観測的に重要となる真の吸収量との間に系統的な誤差が生じている可能性がある。我々は SDSS によって得られた銀河の光度分布と計数からダスト吸収量を見積もり、Schlegel らのダスト吸収マップの検証を行っている。[171, 86]

すばる望遠鏡によるトランジット惑星系の大気元素探索

本研究室ではすばる望遠鏡・高分散分光器を用いて、太陽系外惑星系の中でも惑星による恒星の「食」が観測されている「トランジット惑星系」の観測的研究を行っている。このような惑星系では、惑星が主星の前面にいる時といない時のスペクトルを比較することで、惑星の外層大気中にある元素に由来した追加吸収を探すことができる。(このような手法は Transmission Spectroscopy と呼ばれている)

我々は 2002 年にトランジット惑星系 HD 209458 の可視領域での高分散分光観測を行い、Na, Li, Hα, Hβ, Hγ, Fe,Ca などの元素について Transmission Spectroscopy の手法を用いて惑星大気の探索を行った。その結果、大気による追加吸収は検出できなかったが、全ての元素の追加吸収に対して、これまでの地上観測で最も強い制限を与えた [21, 53, 54, 55, 95, 121, 122, 123]。

太陽系外トランジット惑星 HD209458b のロシター効果

トランジットを起こす太陽系外惑星系は、トランジットの最中に Rossiter 効果と呼ばれる現象を起こす。そのため、恒星の視線方向速度をドップラー効果を用いて測定すると、トランジット中は本当の速度からずれて見える。この現象は、恒星同士の連星の場合に対しては、古くから知られ研究されている。Rossiter 効果を観測すると、恒星の自転軸の向きと惑星の公転軸の向きのずれを測定できる。これは、惑星系の角運動量の起源や進化を考える上で、重要な情報である。

我々のグループは太陽系外トランジット惑星系 HD 209458 のデータを解析し、親星の自転軸と惑星の公

転軸に小さなずれがあることを検出した。軸のずれの大きさは $4.4 \pm 1.4°$ で、太陽系の場合の値 $3 - 10°$ と同程度であることがわかった。これほど細かい精度で軸のずれの大きさを求めたのは初めてである。[22]

太陽系外トランジット惑星のリングの検出可能性

ロシター効果は主星の自転速度が十分速ければ惑星のシグナルの増幅器として使用することもできる。このことを用いると、太陽系外惑星の周りにあるリングや衛星といった、微細な構造を検出することが可能になると予想される。我々は特に惑星のリングについて、ロシター効果を用いた検出可能性がどの程度のものか、定量的に議論をした。

宇宙論スケールでの重力法則のずれに対する制限

現在様々な観測により、我々の宇宙のエネルギーの７割がダークエネルギーであり、このため宇宙は加速膨張を行っているとされている。しかし、ダークエネルギーの起源・正体は謎のままである。このような状況下で近年、ダークエネルギーを「重力法則の変更」として理解する視点が出始めてきた。このように重力が変更された場合、その影響が宇宙論スケールでの Newton 重力の変更として現れることが期待される。しかし、これまでは太陽系以上のスケールで Newton 重力が成り立っているかはわかっていなかった。

このような観点から我々は、ダークエネルギーを重力理論の変更という観点から捉え、その結果として生じるであろう宇宙論スケールでの Newton ポテンシャルのずれにより、大規模構造形成がどのように変更されるかを調べている。Newton ポテンシャルが変更した場合のクラスタリングを、準解析的な手法もしくは N 体シミュレーションを用いて予言する。そして、その結果と銀河のクラスタリングの観測とを比較することで、宇宙論スケールでの Newton ポテンシャルの変更に対し制限を行った [58, 98, 89, 173, 183, 194]

ダークハローのバイアスの非線形性とバイスペクトル

宇宙論的密度ゆらぎの２点統計は銀河の光度・色・形状に依存することが知られている。しかし、最近の観測によると３点統計を見るとこのような銀河の性質に対する依存性は見られない。我々はハロー、ピークのバイアスモデルによりこのことを解析的に説明した。さらに、シミュレーションデータ、スローンデジタルスカイサーベイの銀河カタログを使った３点統計の計算を行うことで、赤方偏移歪み、サーベイの形状の効果を検証し、最終的に上述の３点統計の性質はバイアスの非線形性に起因するものであると結論づけた。[88],[179]

5.1.3 天体核・素粒子物理

ガンマ線バースト起源の背景重力波

ガンマ線バースト（ＧＲＢ）に付随する莫大なニュートリノ放射に着目し、その際に発生する重力場のメモリー効果について調べた。まずは一つ一つのＧＲＢからのメモリー効果の大きさについて定式化を行い、さらにＧＲＢの赤方偏移分布を考慮して宇宙論的距離まで足しあげることで、メモリー効果を背景重力波と見なしたときのスペクトルを作成した。その結果、インフレーション起源の背景重力波に対する観測の窓とされる 0.1Hz 帯において $\Omega_{\rm GW} \sim 10^{-20}$ 程度の寄与があることを示した [18]。

特殊相対論的流体計算によるマグネター、ガンマ線バーストの起源

超新星爆発という現象は重い星の重力崩壊から生じるが、その時に達成される高温高密度な環境は地上では達成できず、極限的な状態の実験場として長年注目を集めてきた。近年の観測で超新星とは別の現象だと考えられてきたガンマ線バーストもある種の重力崩壊の結果とわかり、この重力崩壊現象の多様性に更なる注目が集まっている。我々はその多様性の原因として自転や磁場の違いに着目しており詳細な数値シミュレーションを行ってきた。強磁場中での流体計算には特殊相対性理論に基いた計算を行う必要があるが本年度は完全特殊相対論的磁気流体コードを完成させ、世界に先駆けた研究を行った。その結果強磁場中での重力崩壊で生じる将来マグネターとなるであろう原始中性子星はもともとの自転プロファイルにより保有する磁場の形状が大きく異なることを示した。また、このような強磁場重力崩壊では極方向にジェット状の衝撃波が生じることが知られていたが、このジェットが星の外まで伝播する様子のシミュレーションに成功した。このことにより、星の中心部の重力崩壊と星の外で起こるガンマ線バーストをつなげて議論できるようになった。また、多様性を述べるために質量、自転、磁場の初期条件化に関して広いパラメータ領域でたくさんのモデルの計算を行った。このことにより、ジェット放出の有無に対して臨界的な初期条件が分かった。[48, 49, 92, 118, 119, 191, 141, 169, 170, 152, 153, 192, 181, 218]

第一世代星の自転磁場重力崩壊

近年、HE0107-5240 のような極端に金属量の少ない星が見つかりはじめている。このような超金属欠乏星は宇宙のごく初期に生まれた第一世代の星と関係性が強いと考えられるので、そのような星が観測できるようになったことで、初期宇宙の進化を解き明かす鍵となる第一世代の星への関心が高まっている。

このような第一世代星の重力崩壊のシミュレーションはほとんど行われていない。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、初期に十分強い磁場 (10^{12}G) を持つような天体は、重力崩壊の際にジェット状の爆発を起こすことを示した。また、最終的に残るブラックホールの大きさや放出されるニュートリノの量と、初期の回転則・強さの相関関係も明らかにした [46, 47, 117, 111, 140, 151, 168]。さらに、そのような天体の起こす現象の質量依存性についても計算を行い、あまりに重い天体は強磁場を有していても爆発は起こさないことを示した [180]。

暗黒物質対消滅とガンマ線背景放射

観測されている宇宙背景ガンマ線のうち，多くの部分はブレーザーなどの天体起源と考えられているが，そのうち一部のエネルギー領域では，暗黒物質対消滅の兆候が見えているという可能性が以前から指摘されてきた．今回我々は，暗黒物質ハローの密度プロファイルが，シミュレーションから指摘されているように普遍的であるという仮定の元，いかなるエネルギー領域においても暗黒物質対消滅は，背景ガンマ線の主要構成要素となることはできないということを証明した．[1, 144, 167, 138].

また宇宙ガンマ線背景放射の起源を探る手法として，非等方性の議論を行った．まず最初に暗黒物質対消滅による非等方性の等式化を行い，それによりブレーザーなど通常の天体起源によるシグナルとは異なったものが得られることを示した．さらに GLAST 衛星による検出可能性の評価を行い，1 年程度の観測で有意なシグナルを得られることを示した [4, 110, 186].

さらに暗黒物質対消滅による銀河外ガンマ線背景放射への寄与として、中間質量ブラックホール (IMBH) 周りの暗黒物質の増加 (スパイク構造) の効果を議論した。今回我々は、中間質量ブラックホールの進化を考慮し、それらの周りからの暗黒物質対消滅が、観測されている背景ガンマ線にどの程度の寄与を与えうるかを定量的に評価した結果、観測を上回ってしまうことを証明した。[185]

重力崩壊型超新星でのジェット生成と高エネルギーニュートリノ放射

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．この事実は，我々の GRB に対する理解を大きく深めると同時に，新たな疑問を投げかけている．すなわち「全ての超新星は GRB にみられるような，相対論的ジェットを伴っているのか?」という事である．この疑問に対する完全な答えは，光による観測からだけでは得ることができない．我々は，ジェット中の粒子加速により作られるニュートリノを検出する事により，この疑問に答えることができ, さらにいくつかの物理的示唆が得られる事を示した．[2, 39, 113, 143, 187, 188].

近傍銀河からの超新星ニュートリノの検出可能性

超新星爆発を引き起こす機構である，重力崩壊の際にはおびただしい量のニュートリノが，10 秒程度の時間スケールで放出されると考えられている (ニュートリノバースト)．今回我々は，比較的近く (数メガパーセク) の銀河でおこった超新星からのニュートリノバーストの検出可能性と，それが与えうる示唆についての研究を初めて行った．この手法で，現在提案されているハイパーカミオカンデや UNO といったメガトン (SK の 20 倍程度) 級の体積を持つ検出器を用いれば，10 メガパーセク以内の銀河で起こった超新星から，統計的にも超新星 1987A に匹敵する程度のイベントが稼げる事を示された．これにより超新星ニュートリノのスペクトルの情報を着実に得ることができるうえ，重力崩壊の時間を 10 秒の精度で知ることができる．後者に関しては，関連する重力波や，その他のシグナルに強い制限を与える上でも，非常に重要な情報となることが期待される．[3, 145]

数値シミュレーションを用いた超高エネルギー宇宙線の伝搬

荷電粒子である宇宙線は宇宙空間に存在する磁場と相互作用し、その軌道を曲げる。これは超高エネルギー宇宙線でも例外でなく、伝搬中に有意な角度曲がるということがいくつかの先行研究で指摘されてきた。この曲がりのため、宇宙線のソースから地球までの伝搬過程を解き、到来方向分布を計算することには膨大な計算時間がかかるという困難があった。多くの宇宙線は磁場による曲がりにより地球に届かないからである。我々はこの計算上の困難を、宇宙線伝搬過程の逆過程に着目し、地球に届くものだけの計算を扱うという手法を開発し、解決した。この手法を用い、今まで誰もなし得なかった銀河磁場と銀河間空間磁場を同時にとり入れた伝搬計算を行なうことによって、地球での到来方向分布を計算した。また、これを AGASA 観測の結果と比較することにより、宇宙線ソースの数密度を求めた。[23, 71, 59, 60, 61, 99, 125, 112] 銀河間空間磁場は観測においても不定性が大きいため、観測に矛盾しない範囲で磁場の大きさを変え、銀河間空間磁場が伝搬に与える影響を考察した。[156] また、超高エネルギー宇宙線は磁場による曲がりが小さいことから、ソースの分布を反映した到来方向分布が実現されることが予想される。この様子を定量的に考察した。[174, 112]

原子核パスタの相図

超新星や中性子星のような高密度天体の内部では原子核がその形状を球形から棒形、板形へと変化させる可能性があることが指摘されている。我々は量子分子動力学法 (QMD) と呼ばれるシミュレーションによって原子核パスタがこれら高密度天体中に存在することを示し、その相図が核パラメータの不定性の範囲内でどの程度変化するか温度ゼロ、有限温

度の両方について調べた。[45, 70, 116, 162, 200] また、超新星におけるパスタ相のニュートリノオパシティについても QMD の結果を用いて計算を行ない、方向、温度によって著しく散乱断面積が変化することを示した。[70]

5.1.4 その他

宇宙理論研究室が主体となって、国際会議「The 59th Yamada conference: Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology」(June 20-24, 2005) を開催した。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Shin'ichiro Ando: "Can Dark Matter Annihilation Dominate the Extragalactic Gamma-Ray Background?"; Phys. Rev. Lett. **94**, 171303 (2005)

[2] Shin'ichiro Ando and John F. Beacom: "Revealing the Supernova–Gamma-Ray Burst Connection with TeV Neutrinos"; Phys. Rev. Lett. **95**, 061103 (2005)

[3] Shin'ichiro Ando, John F. Beacom, and Hasan Yüksel: "Detection of Neutrinos from Supernovae in Nearby Galaxies"; Phys. Rev. Lett. **95**, 171101 (2005)

[4] Shin'ichiro Ando and Eiichiro Komatsu: "Anisotropy of the cosmic gamma-ray background from dark matter annihilation"; Phys. Rev. D **73**, 023521 (2006)

[5] Shunichiro Kinoshita, Hideaki Kudoh, Yuuiti Sendouda, and Katsuhiko Sato: Quadrupole formula for Kaluza-Klein modes in the braneworld, Class. Quant. Grav. **22**, 3911 (2005).

[6] S. Mukohyama, "Black holes in the ghost condensate," Phys. Rev. D **71**, 104019 (2005).

[7] S. Mukohyama, "anti-D-brane as dark matter in warped string compactification," Phys. Rev. D **72**, 061901 (2005).

[8] S. Mukohyama, Y. Sendouda, H. Yoshiguchi and S. Kinoshita, "Warped flux compactification and brane gravity," JCAP **0507**, 013 (2005).

[9] T. Shiromizu, S. Tomizawa, Y. Uchida and S. Mukohyama, "Kaluza-Klein bubble and celestial sphere in inflationary universe," Gen. Rel. Grav. **37**, 1823 (2005).

[10] H. Yoshiguchi, S. Mukohyama, Y. Sendouda and S. Kinoshita, "Dynamical stability of six-dimensional warped flux compactification," JCAP **0603**, 018 (2006).

[11] H. C. Cheng, M. A. Luty, S. Mukohyama and J. Thaler, "Spontaneous Lorentz breaking at high energies," arXiv:hep-th/0603010, to appear in JHEP.

[12] North-South Neutrino Asymmetry in Strongly Magnetized and Rotating Stellar Cores, Astrophys. J., 618 (2005) 474. (astro-ph/0409244)Kei Kotake, Shoichi Yamada and Katsuhiko Sato

[13] R-Process Nucleosynthesis in MHD Explosions of Core-Collapse Supernovae (astro-ph/0504100) Sunao Nishimura, Kei Kotake, Masa-aki Hashimoto, Shoichi Yamada, Nobuya Nishimura, Shinichiro Fujimoto, and Katsuhiko Sato

[14] Explosion Mechanism, Neutrino Burst, and Gravitational Wave in Core-Collapse Supernovae Reports on Progress in Physics 69 (2006), 971. (astro-ph/0509456) Kei Kotake, Katsuhiko Sato, Keitaro Takahashi

[15] Magnetohydrodynamic Simulations of A Rotating Massive Star Collapsing to A Black Hole Astrophy. J. in printing (astro-ph/0602457) Shinichirou Fujimoto, Kei Kotake, Shoichi Yamada, Masa-aki Hashimoto, and Katsuhiko Sato

[16] Explosive Nucleosynthesis in GRB Jets Accompanied by Hypernovae Astrophysical J in printing (astro-ph/0601111) Shigehiro Nagataki, Akira Mizuta, and Katsuhiko Sato

[17] Mamoru Shimizu, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, and Yasushi Suto: Systematic bias in an estimate of the cluster mass and the fluctuation amplitude from cluster abundance statistics; Publications of the Astronomical Society of Japan, **58**(2006) 291-297 (astro-ph/0602015)

[18] Takashi Hiramatsu, Kei Kotake, Hideaki Kudoh and Atsushi Taruya : "Gravitational wave background from neutrino-driven gamma-ray bursts", Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **364** (2005) 1063

[19] Takashi Hiramatsu : "High-energy effects on the spectrum of inflationary gravitational wave background in braneworld cosmology", Phys. Rev. D **73**(2006)084008

[20] S. Matsuura, S. Fujimoto, S. Nishimura, M. Hashimoto, K. Sato: Heavy Element Production in Inhomogeneous Big Bang Nucleosynthesis, Phys.Rev.**D72** (2005) 123505.

[21] Norio Narita, Yasushi Suto, Joshua N. Winn, Edwin L. Turner, Wako Aoki, Christopher J. Leigh, Bun'ei Sato, Motohide Tamura, and Toru Yamada: Subaru HDS Transmission Spectroscopy of the Transiting Extrasolar Planet HD209458b; Publications of the Astronomical Society of Japan **57**(2006) 471-480 (astro-ph/0504540)

[22] Joshua N. Winn, Robert W. Noyes, Matthew J.Holman, David B. Charbonneau, Yasuhiro Ohta, Atsushi Taruya, Yasushi Suto, Norio Narita, Edwin L. Turner, John A.Johnson, Geoffrey W. Marcy, R. Paul Butler, and Steven S.Vogt: Measurement of Spin-Orbit Alignment

in an Extrasolar Planetary System; The Astrophysical Journal **631** (2005) 1215 – 1226 (astro-ph/0504555)

[23] Hajime Takami, Hiroyuki Yoshiguchi, & Katsuhiko Sato: "Propagation of Ultra-high Energy Cosmic Rays above 10^{19} eV in a Structured Extragalactic Magnetic Field and Galactic Magnetic Field" , ApJ, 639, 803-815 (2006)

[24] Atsushi Taruya, Hideaki Kudoh: Probing anisotropies of gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer. II. Perturbative reconstruction of a low-frequency skymap; Physical Review D **72** (2005) 104015 (19 pages) (gr-qc/0507114)

[25] Atsushi Taruya, Masa-aki Sakagami: Antonov problem and quasi-equilibrium states in an N-body system; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **364** (2005) 990 – 1010 (astro-ph/0509745)

[26] Atsunori Yonehara: Constraining the size of the narrow line region in distant quasars, Astrophys. J. in press (astro-ph/0603802)

[27] Kohji Yoshikawa and Toshiyuki Fukushige: PPPM and TreePM Methods on GRAPE Systems for Cosmological N-Body Simulations; Publications of the Asronomical Society of Japan **57** (2005) 849–860

[28] Hideaki Kudoh and Umpei Miyamoto. On non-uniform smeared black branes, Class.Quant.Grav. pp3853-3874, 2005

[29] Hideaki Kudoh, Atsushi Taruya, Takashi Hiramatsu, Yoshiaki Himemoto. Detecting a gravitational-wave background with next-generation space interferometers. Phys.Rev. D73, 064006, 2006

[30] Teruaki Suyama, Takahiro Tanaka, Bruce Bassett, Hideaki Kudoh Black hole production in tachyonic preheating JCAP 0604:001,2006

[31] Masaki Ando et al. (the TAMA collaboration) Observation results by the TAMA300 detector on gravitational wave bursts from stellar-core collapses. Phys.Rev.D71:082002,2005

[32] Hideaki Kudoh Origin of black string instability Phys.Rev. 2006 (hep-th/0602001)

[33] Kazuhiro Yahata, Yasushi Suto, Issha Kayo, Takahiko Matsubara, Andrew Connoly, Daniel Vanden Berk, Ravi Sheth, István Szapudi, Scott F. Anderson, Neta Bahcall, Jon Brinkmann, István Csabai, Xiaohui Fan, Jon Loveday, Alexander S. Szalay, and Donald York: Large Scale Clustering of Sloan Digital Sky Survey Quasars: Impact of the Baryon Density and the Cosmological Constant; Publications of the Astronomical Society of Japan **57**(2005) 529 – 540 (astro-ph/0412631)

[34] Keren Sharon, Eran O. Ofek, Graham P. Smith, Tom J. Broadhurst, Dan Maoz, Christopher S. Kochanek, Masamune Oguri, Yasushi Suto, Naohisa Inada, and Emilio E. Falco: Discovery of multiply imaged galaxies behind the cluster and lensed quasar SDSS J1004+4112; The Astrophysical Journal **629**(2005) L73 – L76 (astro-ph/0507360)

[35] Idit Zehavi, Zheng Zheng, David H. Weinberg, Joshu A. Frieman, Andreas A. Berlind, Michael R. Blanton, Roman Soccimarro, Ravi K. Sheth, Michael A. Strauss, Issha Kayo, Yasushi Suto, M. Fukugita, O. Nakamura, N.A. Bahcall, J. Brinkmann, J.E. Gunn, G.S. Hennessy, Z. Ivezic, G.R. Knapp, J. Loveday, A. Meiksin, D.J. Schlegel, D.P. Schneider, I. Szapudi, M. Tegmark, M.S. Vogeley, D.G. York (for the SDSS Collaboration): The luminosity and color dependence of the galaxy correlation function; The Astrophysical Journal **630**(2005)1 – 27 (astro-ph/0408569)

[36] Jounghun Lee, Yipeng Jing and Yasushi Suto: An Analytic Model for the Axis-Ratio Distribution of Dark Matter Halos from the Primordial Gaussian Density Field; The Astrophysical Journal **632**(2005) 706–712 (astro-ph/0504623)

[37] Changbom Park, Yun-Young Choi, Michael Vogeley, J. Richard Gott III, Juhan Kim, Chiaki Hikage, Takahiko Matsubara, Myeong-Gu Park, Yasushi Suto, and David H. Weinberg: Topology Analysis of the Sloan Digital Sky Survey: I. Scale and Luminosity Dependences; The Astrophysical Journal **633**(2005) 11–22 (astro-ph/0507059)

[38] Chiaki Hikage, Takahiko Matsubara, Yasushi Suto, Changbom Park, Alexander S. Szalay, and Jon Brinkmann: Fourier phase analysis of SDSS galaxies; Publications of the Astronomical Society of Japan **57**(2005) 709-718 (astro-ph/0506194)

(会議抄録)

[39] 安藤真一郎:「Failed GRBからの高エネルギーニュートリノ」

[40] Shunichiro Kinoshita, Hideaki Kudoh, Yuuiti Sendouda and Katsuhiko Sato: Quadrupole formula for Kaluza-Klein modes in the braneworld, Proceedings of the 59th Yamada conference: "Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology" (Tokyo, June 2005) in press

[41] Shunichiro Kinoshita, Hideaki Kudoh, and Takahiro Tanaka: Second order perturbation and energy loss by the KK modes in the RS model, Proceedings of the 15th Workshop on General Relativity and Gravitation (Tokyo Institute of Technology, November 2005)

[42] S. Mukohyama, "Cosmology and Black Holes with the Ghost Condensate", Proceedings of the

59th Yamada conference “Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology”, Tokyo, Japan, June 2005.

[43] S. Mukohyama, “Cosmology with Warped String Compactification”, Proceedings of the 15th workshop on General Relativity and Gravitation, presented at Tokyo Institute of Technology, December 2005.

[44] Y. Sendouda, S. Mukohyama, S. Kinoshita, H. Yoshiguchi, “Covariant boundary conditions for perturbation in compactified codimension-two braneworlds,” Proceedings of the 15th Workshop on General Relativity and Gravitation, 261-264.

[45] Gentaro Watanabe and Hidetaka Sonoda: Recent progress on understanding “pasta” phases in dense stars, Proceedings of the 2nd Argonne/MSU/JINA/INT RIA Workshop on ”Reaction Mechanisms for Rare Isotope Beams” (AIP Conference Proceedings 791), ed. B. A. Brown, 101-111 (2005).

[46] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake and Katsuhiko Sato: ”Magnetorotational Collapse of Very Massive Stars : Formation of Jets and Black Holes”; Proceedings of International Symposium on ”Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG05)”, in press

[47] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake and Katsuhiko Sato: ”Magnetorotational Collapse of Very Massive Stars : Formation of Jets and Black Holes”; Proceedings of International Workshop on ”Energy Budget in the High Energy Universe”, in press

[48] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Shoichi Yamada and Katsuhiko Sato: Jet Formation from Strongly Magnetized Core-Collapse; ,Proceedings of Yamada Conference 2006

[49] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Shoichi Yamada and Katsuhiko Sato: Total Simulations of Magneto-driven jet from Core-Collapse Supernovae; ,Proceedings of COE Symposium Waseda

[50] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama and Atsushi Taruya: “Evolution of gravitational waves in the high-energy regime of brane-world cosmology”, 59th Yamada Conference, June 2005, Tokyo

[51] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama and Atsushi Taruya: “Evolution of gravitational waves in the high-energy regime of brane-world cosmology”, YKIS2005, June 2005, YITP

[52] S.Matsuura, S.Kobayashi: PROCEEDINGS OF THE FIFTEENTH WORKSHOP ON GENERAL RELATIVITY AND GRAVITATION in JAPAN, p.143 (2005)

[53] Norio Narita et al. in the 59th Yamada conference: ”Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology” June 20-24, 2005 at the University of Tokyo, ”A Search for the Exospheric Absorption in the Transiting Extrasolar Planet HD209458b with Subaru HDS”

[54] Norio Narita et al. in ”International Symposium on Origins of Life and Astrobiology: ISOLAB ’05” June 27-July 1, 2005 at Niigata, ”A Search for the Exospheric Components of the Transiting Extrasolar Planet HD209458b with Subaru HDS”

[55] Norio Narita et al. in Tenth Anniversary of 51 Peg-b: ”status of and prospects for hot Jupiter studies” August 22-26, 2005 at Observatoire de Haute-Provence(OHP), France, ”Subaru HDS Transmission Spectroscopy of the Transiting Extrasolar Planet HD 209458b”

[56] 成田 憲保: すばる望遠鏡を用いた太陽系外惑星系の観測的研究、第 1 回 21 世紀 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム (2005 年 11 月 21 日)

[57] Yuuiti Sendouda, Kazunori Kohri, Shigehiro Nagataki, Katsuhiko Sato, “Cosmic rays from primordial black holes in the Randall-Sundrum braneworld,” Proceedings of the 59th Yamada conference, in press.

[58] Akihito Shirata, Tetsuya Shiromizu, Naoki Yoshida, Yasushi Suto: ”Galaxy Clustering Constraints on Deviations from Newtonian Gravity at Cosmological Scales”; Proceedings of the 59th Yamada conference on Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology, Universal Academy Press, 2006, in press

[59] Hajime Takami, Hiroyuki Yoshiguchi, & Katsuhiko Sato: “Propagation of Ultra-high Energy Cosmic Rays above 10^{19} eV in a Structured Extragalactic Magnetic Field and Galactic Magnetic Field”, Proceedings of the 59th Yamada Conference, in press

[60] Hajime Takami, Hiroyuki Yoshiguchi, & Katsuhiko Sato: “Propagation of Ultra-high Energy Cosmic Rays above 10^{19} eV in a Structured Extragalactic Magnetic Field and Galactic Magnetic Field”, Proceedings of 29th International Cosmic Ray Conference, vol.17, 175

[61] Hajime Takami, Hiroyuki Yoshiguchi, & Katsuhiko Sato: “Propagation of Ultra-high Energy Cosmic Rays above 10^{19} eV in a Structured Extragalactic Magnetic Field and Galactic Magnetic Field”, Proceedings of , Energy Budget of High Energy Universe, in press

[62] Atsunori Yonehara: Constraining the size of narrow line region at high-z, Proceedings of Asian-Pasific Regional IAU Meeting 2005

(国内雑誌)

[63] 向山信治 : “M 理論が宇宙論の謎を解く”、月刊天文ガイド 2005 年 12 月号, pp.6-9.

[64] 佐藤勝彦 : 相対論百年【3】 宇宙の誕生と未来 天文教育（天文教育普及研究会） 2005 年 5 月号 74 号 Vol.17 No.3 2

[65] 須藤 靖: “学会誌の記事を楽しく読むために：宇宙物理編”、日本物理学会誌 **61** (2006) pp.52–53.

[66] 須藤 靖: “観測的宇宙論の来し方行く末”、パリティ **21**(2006) pp.4–13.

[67] 須藤 靖: “大学での教育・研究をとりまく環境 – 東京大学物理学教室の場合–”、日本天文学会誌 天文月報 **99**(2006)pp.97–101.

(学位論文)

[68] 安藤真一郎: “Neutrino Probes of Galactic and Cosmological Supernovae”(博士論文)

[69] 吉口寛之: “Brane gravity and dynamical stability in warped flux compactification” (博士論文)

[70] Hidetaka Sonoda: Nuclear pasta investigated by Quantum Molecular Dynamics (修士論文)

[71] Hajime Takami: “Propagation of Ultra-high Energy Cosmic Rays in Cosmic Magnetic Fields” (Master thesis)

[72] 河原 創: 軟 X 線精密分光を用いた宇宙の暗黒バリオン探査 (修士論文)

(著書)

[73] 佐藤勝彦:「アインシュタインの考えた宇宙」　実業の日本社、　２００５年１２月

[74] 佐藤勝彦:「ホーキング、宇宙のすべてを語る」(翻訳)　S. ホーキング　ランダムハウス講談社 2005 年

[75] 佐藤勝彦:「みるみる理解できる相対性理論」(監修)　Newton 別冊　ニュートンプレス　２００５

[76] 佐藤勝彦:「大宇宙・七つの不思議」(監修)　PHP 文庫, PHP 研究所　２００５

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[77] Katsuhiko Sato：From supernovae to inflation; The 59th Yamada Conference on Inflating Horizon of Particle Astrophysics and Cosmology (Univ. Tokyo, Japan, June 2005)

[78] Kohji Yoshikawa: Non-equilibrium Ionization State of Warm-Hot Intergalactic Medium on October 11, 2005 at Workshop on Measuring the Diffuse Intergalactic Medium (Kanagawa, Japan)

[79] 工藤秀明 Black holes with extra dimensions: the black-hole black- string transition; 研究会”Grand Challenge Problems in Computational Astrophysics : Relativistic Astrophysics” (2005 年 5 月 5 日、USA, カリフォルニア, UCLA)

[80] Yasushi Suto: The Rossiter effect of transiting extrasolar planets on January 19, 2006 at the 10th workshop on Gravitational Microlensing and Related Topics - extrasolar planets and cold dark matter (Nagoya, Japan)

[81] Yasushi Suto: Future plans of Subaru and HyperSuprime-Cam/WFMOS on February 22, 2006 at WFMOS Science Team meeting (Pasadena, USA)

[82] Yasushi Suto: Searching for emission and absorption signatures of warm/hot intergalactic medium with DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor on June 2, 2005 at ICTP conference on Numerical Cosmology (Trieste, Italy).

[83] Yasushi Suto: Constraints on deviations from Newton's law of gravity from large-scale structure on July 12, 2005 at The 18th University College London Astronomy Colloquium on; THE INTERFACE BETWEEN COSMOLOGY AND GALAXY FORMATION (London,UK)

・The 1st KChina-Japan-Korea workshop on; Galaxy formation and numerical simulation (November 9-12, 2005, Zhouzhuang, China)

[84] Yasushi Suto: Recent activities of observational cosmology group at University of Tokyo

[85] Yasushi Suto: Summary talk and discussion topics

[86] Kazuhiro Yahata, Atsunori Yonehara, Yasushi Suto,Edwin Turner & Tom Broadhurst Examining the reliability of the SFD dust map using the SDSS galaxy number counts

[87] Kohji Yoshikawa: Emission and Absorption Diagnostics of Warm-Hot Intergalactic Medium

[88] Takahiro Nishimichi, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Kazuhiro Yahata, Chiaki Hikage, Issha Kayo, Yipeng Jing: Non-linear biasing effects in three point statistics

[89] Akihito Shirata, Chiaki Hikage, Issya Kayo, Naoki Yoshida, Takahiko Matsubara, Tetsuya Shiromizu and Yasushi Suto: Constraints on the deviation from Newton's law of gravity from SDSS galaxy clustering 〜with 2 and 3 point statistics〜

一般講演

・The 59th Yamada Conference on Inflating Horizon of Particle Astrophysics and Cosmology (Univ. Tokyo, Japan, June 2005)

[90] Shin'ichiro Ando: “Neutrino Probes of Extragalactic Supernovae”

[91] Shunichiro Kinoshita, Hideaki Kudoh, Yuuiti Sendouda and Katsuhiko Sato: Quadrupole formula for Kaluza-Klein modes in the braneworld

[92] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Shoichi Yamada and Katsuhiko Sato: Jet Formation from Strongly Magnetized Core-Collapse

[93] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama and Atsushi Taruya: “Evolution of gravitational waves in the high-energy regime of brane-world cosmology”

[94] S. Matsuura, S. Fujimoto, S. Nishimura, M. Hashimoto, K. Sato: Heavy Elements production in Inhomogeneous BBN

[95] Norio Narita et al.: "Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology" June 20-24, 2005 at the University of Tokyo, "A Search for the Exospheric Absorption in the Transiting Extrasolar Planet HD209458b with Subaru HDS"

[96] Yasuhiro Ohta: The Rossiter Effect for Extrasolar Ringed Planets

[97] Yuuiti Sendouda: "Cosmic rays from primordial black holes in the Randall-Sundrum braneworld"

[98] Akihito Shirata, Tetsuya Shiromizu, Naoki Yoshida and Yasushi Suto: Galaxy clustering constraints on deviations from Newtonian gravity at cosmological scales

[99] Hajime Takami, Hiroyuki Yoshiguchi, & Katsuhiko Sato: "Propagation of Ultra-high Energy Cosmic Rays above 10^{19} eV in a Structured Extragalactic Magnetic Field and Galactic Magnetic Field"

[100] Atsushi Taruya, Hideaki Kudoh: Making the skymap of gravitational-wave backgrounds with space interferomete

・Yukawa International Seminar 2005 (Kyoto, Japan, June 2005)

[101] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama and Atsushi Taruya: "Evolution of gravitational waves in the high-energy regime of brane-world cosmology"

[102] Yuuiti Sendouda: "Cosmic rays from primordial black holes in the Randall-Sundrum braneworld"

・The 15th Workshop on General Relativity and Gravitation (Tokyo Institute of Technology, November 2005)

[103] Yoshiaki Himemoto: Detecting a stochastic background of gravitational waves in presence of non-Gaussianity

[104] Shunichiro Kinoshita, Hideaki Kudoh, and Takahiro Tanaka: Second order perturbation and energy loss by the KK modes in the RS model

[105] Yuuiti Sendouda: "Covariant boundary conditions for perturbation in compactified codimension-two braneworlds"

[106] S.Matsuura, S.Kobayashi: Geometrical Aspects of D-branes: Black Hole Microstates,

[107] Atsushi Taruya, Masa-aki Sakagami, Takashi Okamura: Generalized variational principle for stellar dynamics and quasi-equilibrium states in N-body system

[108] 工藤秀明、樽家篤史発表題目 "Gravitational-wave backgrounds probed with a space-based interferometer"

[109] 工藤秀明、樽家篤史、平松尚志、姫本宣朗発表題目 "Detecting a gravitational-wave backgrounds with next-generation space interferometers"

・International Workshop on Energy Budget in the High Energy Universe (ICRR, Japan, February 2006)

[110] Shin'ichiro Ando and Eiichiro Komatsu: "Cosmic Gamma-Ray Background Anisotropy from Dark Matter Annihilation"

[111] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake and Katsuhiko Sato: "Magnetorotational Collapse of Very Massive Stars : Formation of Jets and Black Holes"

[112] Hajime Takami, Hiroyuki Yoshiguchi, & Katsuhiko Sato: "Propagation of Ultra-high Energy Cosmic Rays above 10^{19} eV in a Structured Extragalactic Magnetic Field and Galactic Magnetic Field"

・その他

[113] Shin'ichiro Ando and John F. Beacom: "TeV neutrinos from jets in core-collapse supernovae"; TeV Particle Astrophysics (Fermi National Accelerator Laboratory, July 2005)

[114] Shin'ichiro Ando:"Relic supernova neutrino background: Current status and prospects of future detectors"; Next Generation of Nucleon and Neutrino Detectors (Centre Paul Langevin, Aussois, Savoie, France, April 2005)

[115] Yoshiaki Himemoto: Detecting a stochastic background I in the presence of non Gaussianity by the generalized crosscorrelation statistic; 6h Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Wave 沖縄万国津梁館 (2005 年 6 月 20 日)

[116] Hidetaka Sonoda, Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka, Toshikazu Ebisuzaki: Phase diagrams of nuclear "pasta" investigated by QMD simulation, Hawaii 2005 second joint meeting of the nuclear physics division of the APS and JPS, Kapalua, Hawaii, September 2005

[117] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake and Katsuhiko Sato: "Magnetorotational Collapse of Very Massive Stars : Formation of Jets and Black Holes"（Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG05)；2005 年 11 月

[118] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Shoichi Yamada and Katsuhiko Sato: Total Simulations of Magneto-driven jet from Core-Collapse Supernovae ,COE Symposium,Tokyo Waseda University (September 2005)

[119] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Shoichi Yamada and Katsuhiko Sato: Simulations of Magneto-driven Jet from Core-Collapse Supernovae ,Omeg2005,University of Tokyo(November 2005)

[120] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama and Atsushi Taruya: “Evolution of gravitational waves in the high-energy regime of brane-world cosmology”, COSMO05, August 2005, Germany

[121] Norio Narita et al. in ”International Symposium on Origins of Life and Astrobiology: ISOLAB ’05” June 27-July 1, 2005 at Niigata, ”A Search for the Exospheric Components of the Transiting Extrasolar Planet HD209458b with Subaru HDS”

[122] Norio Narita et al. in Kobe International School of Planetary Sciences 2005: ”Origin of Planetary Systems” July 11-17, 2005 at Awaji Yumebutai International Conference Center, Hyogo, ”Subaru HDS Transmission Spectroscopy of the Transiting Extrasolar Planet HD 209458b”

[123] Norio Narita et al. in Tenth Anniversary of 51 Peg-b: ”status of and prospects for hot Jupiter studies” August 22-26, 2005 at Observatoire de Haute-Provence(OHP), France, ”Subaru HDS Transmission Spectroscopy of the Transiting Extrasolar Planet HD 209458b”

[124] Yuuiti Sendouda: “Cosmic rays from primordial black holes in the Randall-Sundrum braneworld,” Albert Einstein Century International Conference, Paris, France, July 2005

[125] Hajime Takami, Hiroyuki Yoshiguchi, & Katsuhiko Sato: “Propagation of Ultra-high Energy Cosmic Rays above 10^{19} eV in a Structured Extragalactic Magnetic Field and Galactic Magnetic Field”, 29th International Cosmic Ray Conference (August 3-12, 2005, University of Pune, India)

[126] Atsushi Taruya, Hideaki Kudoh: Making the skymap of gravitational-wave backgrounds with space interferometer, Post-YKIS, Yukawa Institute of Theoretical Physics, Kyoto University, July 27 - 28, 2005

[127] Atsushi Taruya, Masa-aki Sakagami: Description of quasi-equilibrium states in self-gravitating N-body system , The 3rd 21COE Symposium “Astrophysics as interdisciplinary science”, Waseda University, September 1 – 3, 2005

[128] Atsunori Yonehara: Constraining the size of narrow line region at high-z, Asian-Pacific Regional IAU Meeting 2005 (parallel session 3:Compact Objects, AGN and High Energy/Cosmic Ray Astrophysics), Bali, July 2005

[129] Atsunori Yonehara, Hiroyuki Hirashita, Philipp Richter: The Origin of chromatic feature in multiple quasars, “the 10th workshop on Gravitational Microlensing and Related Topics - extrasolar planets and cold dark matter”, Nagoya, January 2006

[130] 工藤秀明 Black holes with extra dimensions: the black-hole black- string transition 国際会議 Grand Challenge Problems in Computational Astrophysics: Relativistic Astrophysics (University of California, Los Angeles, USA) 2005 年 5 月

[131] 工藤秀明”Black Hole/String Transition :Origin of the Instability and the Effects of Charge” 国際会議 Scanning New Horizons:GR Beyond 4 Dimensions, University of California, Santa Barbara, USA, 2006 年 1 月

[132] 工藤秀明題名 Discussion: Do Static Black Holes Exist on Randall-Sundrum Branes? 国際会議 Scanning New Horizons:GR Beyond 4 Dimensions,University of California, Santa Barbara, USA, 2006 年 1 月

[133] Yasushi Suto: Searching for warm/hot intergalactic medium with DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor), on June 7, 2005 at cosmology seminar at Department of Astronomy, University of Bologna, Italy.

[134] Yasushi Suto: Investigation of the Rossiter effect of a transiting planet to determine the spin-orbit misalignment on Ku;y 15, 2005 at Astrophysics Research Institute, Liverpool John Moores University, UK.

[135] Yasushi Suto: High-resolution spectroscopic observations of a transiting extrasolar planet HD209458b, on October 19, 2005 at Planet and life seminar, University of Texas at Austin, USA.

[136] Yasushi Suto: Exploring warm/hot intergalactic medium with DIOS(Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) on October 20, 2005 at Cosmology seminar, University of Texas at Austin, USA.

[137] 佐藤勝彦：宇宙の誕生と未来第 7 回アジア・太平洋高度衛星通信国際フォーラム　１１月２９日

(国内会議)

一般講演

・RESCEU 研究会 (嬬恋村鹿沢、2005 年 8 月)

[138] 安藤真一郎：「宇宙背景ガンマ線に於ける暗黒物質対消滅の寄与」

[139] 木下俊一郎，工藤秀明，仙洞田雄一，佐藤勝彦: ブレーンワールドにおける孤立系からの Kaluza-Klein モードとその 2 次摂動

[140] 諏訪 雄大、滝脇 知也、固武 慶、佐藤 勝彦：巨大質量星の自転磁場重力崩壊とジェット・ブラックホール形成

[141] 滝脇知也, 固武慶, 山田章一, 佐藤勝彦:
大質量星を伝搬する磁気優勢ジェットのシミュレーション

[142] 仙洞田雄一: “DGP ブレーンモデルでのブラックホール解”

・日本物理学会 2005 年秋季大会（大阪市立大学、2005 年 9 月）

[143] 安藤真一郎，John F. Beacom: 「重力崩壊型超新星からのジェット生成に伴う高エネルギーニュートリノ放射」

[144] 安藤真一郎:「宇宙背景ガンマ線に於ける暗黒物質対消滅の寄与」

[145] 安藤真一郎，John F. Beacom, Hasan Yüksel: 「近傍銀河からの超新星ニュートリノの検出可能性」

[146] 姫本 宣朗: Detecting a stochastic background of gravitational waves in the presence of non-Gaussianity II

[147] 木下俊一郎，工藤秀明，仙洞田雄一，佐藤勝彦: ブレーンワールドにおける孤立系からの Kaluza-Klein モードとその 2 次摂動

[148] 向山信治： “Cosmology with Warped Flux Compactification”

[149] 向山信治、仙洞田雄一、吉口寛之、木下俊一郎: “Warped Flux Compactification and Brane Gravity”

[150] 吉口寛之、木下俊一郎、仙洞田雄一、向山信治: “Dynamical stability of 6D warped flux compactification”

[151] 諏訪 雄大、滝脇 知也、固武 慶、佐藤 勝彦：巨大質量星の自転磁場重力崩壊とジェット・ブラックホール形成

[152] 滝脇知也, 固武慶, 山田章一, 佐藤勝彦: 強磁場超新星の特殊相対論的シミュレーション

[153] 滝脇知也, 固武慶, 山田章一, 佐藤勝彦: 大質量星中の磁気優勢ジェットのシミュレーション

[154] 平松尚志、小山和哉： “Numerical study of brane inflaton perturbations”

[155] 松浦俊司、高橋慶太郎、小林晋平、姫本宣朗: Creation of brane world via tachyon cndensation

[156] 高見 一、吉口寛之、佐藤勝彦超高エネルギー宇宙線の到来方向分布と大規模構造磁場

[157] 樽家 篤史, 工藤 秀明, 姫本 宣朗, 平松 尚志: On the optimcal detection of a stochastic gravitational-wave background in presence of noise norrelation

[158] 工藤秀明、樽家篤史、平松尚志、姫本宣朗、題名 GW background in the LISA data and Extraction method of their multipoles

・日本物理学会 2006 年春季大会（愛媛大学・松山大学 2006 年 3 月）

[159] 仙洞田雄一、向山信治、吉口寛之、木下俊一郎: “コンパクトな 2 次元余剰空間を持つブレイン時空の安定性”

[160] 木下俊一郎、向山信治、仙洞田雄一、吉口寛之: “コンパクトな 2 次元余剰空間を持つ black hole 時空の性質”

[161] 向山信治： “Gauged Ghost Condensation”

[162] 園田英貴、渡邉元太郎、佐藤勝彦、泰岡顕治、戎崎俊一：QMD によるパスタ相の相図の不定性の研究

[163] 平松尚志、Sanjeev Seahra、小山和哉、樽家篤史： “Transfer function of tensor perturbations in braneworld cosmology”

[164] 松浦俊司、小林晋平: D-brane,geometry and thermodynamics.

[165] 樽家 篤史, 阪上 雅昭, 岡村 隆史 : 一般化変分原理を用いた自己重力多体系の準平衡状態の解析

[166] 工藤秀明、宮本雲平題名 Origin of black string instability

・日本天文学会 2005 年秋季年会（札幌コンベンションセンター、2005 年 10 月）

[167] 安藤真一郎:「宇宙背景ガンマ線に於ける暗黒物質対消滅の寄与」

[168] 諏訪 雄大、滝脇 知也、固武 慶、佐藤 勝彦：巨大質量星の自転磁場重力崩壊とジェット・ブラックホール形成

[169] 滝脇知也, 固武慶, 山田章一, 佐藤勝彦: 大質量星の強磁場重力崩壊とジェット生成、伝播のシミュレーション

[170] 滝脇知也, 固武慶, 山田章一, 佐藤勝彦: 強磁場超新星とプロトマグネターの誕生

[171] 矢幡 和浩、米原 厚憲、須藤 靖、Edwin Turner、Tom Broadhurst SDSS 銀河データを用いたダスト吸収マップの検証

[172] 成田 憲保: トランジット惑星系における Rossiter 効果 I. HD209458 での観測結果

[173] 白田 晶人、加用 一者、日影 千秋、吉田 直紀、松原 隆彦、白水 徹也、須藤 靖：宇宙論スケールでの Newton 重力の破れに対する SDSS からの観測的制限 II：高次相関

[174] 高見 一、吉口寛之、佐藤勝彦超高エネルギー宇宙線を用いた大規模構造の探査可

[175] 樽家 篤史, 工藤 秀明: Mapping gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer

[176] 米原厚憲: 狭輝線アークから得られた狭輝線放射領域のサイズ

[177] 吉川 耕司: Non-equilibrium Ionization State of Warm-Hot Intergalactic Medium

[178] 須藤 靖: 太陽系外惑星系の主星自転軸と惑星公転軸間の角度の決定

・日本天文学会 2006 年度春季年会 (和歌山大学、2006 年 3 月)

[179] 西道 啓博, 矢幡 和浩, 日影 千秋, 加用 一者, 樽家 篤史, Yipeng Jing: ダークハローバイアスの非線形性とバイスペクトル

[180] 諏訪 雄大、滝脇 知也、固武 慶、佐藤 勝彦：巨大質量星の重力崩壊とその質量依存性

[181] 滝脇知也, 固武慶, 山田章一, 佐藤勝彦: 超新星の磁気駆動爆発の系統的研究

[182] 成田 憲保: 分野の枠を越えた若手研究者が発信する新しい理科教育の試み

[183] 白田 晶人、日影 千秋、加用 一者、吉田 直紀、松原 隆彦、白水 徹也、須藤 靖：宇宙論スケールでの Newton 重力の破れに対する SDSS からの観測的制限 III：摂動論を用いた 3 点統計量の推定

[184] 高見 一、吉口 寛之、佐藤勝彦超高エネルギー宇宙線の到来方向分布と起源天体分布の相関

[185] 堀内俊作、安藤真一郎、佐藤勝彦：中間質量ブラックホール周りでの暗黒物質対消滅：銀河外ガンマ線背景放射への寄与

・その他

[186] 安藤真一郎，小松英一郎：“Cosmic Gamma-Ray Background Anisotropy from Dark Matter Annihilation and Detectability at GLAST”; 研究会「次世代ガンマ線衛星 GLAST で切り開く高エネルギー宇宙物理学」 (東京工業大学，2005 年 11 月)

[187] 安藤真一郎，John F. Beacom: 「Failed GRB からの高エネルギーニュートリノ」; 研究会「ガンマ線バースト 2005 — HETE-2, Swift, Suzaku で築く GRB 観測 —」(石川厚生年金会館，2005 年 12 月)

[188] 安藤真一郎，John F. Beacom: 「Failed GRB からの高エネルギーニュートリノ」; 理論天文学懇談会シンポジウム (京都大学基礎物理学研究所，2005 年 12 月)

[189] 佐藤勝彦：宇宙年齢、暗黒エネルギー問題と人間原理 宇宙論山田財団理事会・評議会講演、　5月２９日

[190] 佐藤勝彦：宇宙の誕生 ー　物理学の描く創世記　— 日本電気学会特別講演、東京　5月２０日

[191] 滝脇知也, 固武慶, 山田章一, 佐藤勝彦: 現実的状態方程式、ニュートリノ冷却入リ SRMHD; 相対論的 MHD ミニワークショップ;(千葉大 9 月)

[192] 滝脇知也, 固武慶, 山田章一, 佐藤勝彦: 強磁場超新星と GRB; GRB2005 (金沢大学　１２月)

[193] 成田 憲保: すばる望遠鏡を用いた太陽系外惑星系の観測的研究、第 1 回 21 世紀 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム (2005 年 11 月 21 日)

[194] 白田 晶人、日影 千秋、加用 一者、吉田 直紀、松原 隆彦、白水 徹也、須藤 靖：宇宙論スケールでの Newton 重力の破れに対する SDSS からの観測的制限　高次相関；東京工業大学 21 世紀 COE プログラム「量子ナノ物理学」第２回公開シンポジウム（五反田ゆうぽうと、2006 年 3 月 16 日ー17 日）

[195] 樽家 篤史, 工藤 秀明, 姫本 宣朗, 平松 尚志: スペース干渉計で背景重力波の非等方性を探る (DECIGO-WG ミーティング, 国立天文台, 2005/5/12)

[196] 樽家 篤史, 阪上 雅昭, 岡村 隆史：一般化変分原理を用いた自己重力多体系の準平衡進化の解析 (天体力学 N 体力学研究会, 潮来富士屋ホテル, 2006/3/1–4)

招待講演

[197] 安藤真一郎: “Neutrino Probes of Extragalactic Supernovae”; 第 17 回ニュートリノ研究会 (東京大学宇宙線研究所，2005 年 6 月)

[198] S. Mukohyama, “Warped Flux Compactification and Brane Gravity”, Post-YKIS2005 Workshop “Extra-dimensions — Achievements, Unsolved problems and Prospects —”, Kyoto, Japan, July 2005.

[199] 向山信治：“Black hole entropy and related topics”, 東京工業大学　宇宙物理学理論グループ研究会、群馬 (2005 年 10 月 16 日)

[200] 園田英貴：高密度天体で現れる原子核パスタへの QMD によるアプローチ、ミクロからマクロへ、マクロからミクロへ–秩序形成、精密計算への理論的アプローチ–(京都大学基礎物理学研究所、2005 年 11 月)

[201] 平松尚志： “重力波天文学の夜明け ··· の少し前”, 国立天文台, 天塾（2005 年 11 月 26 日）

[202] 米原厚憲: 天体の構造と重力レンズ現象、基礎物理学研究所研究会「ミクロからマクロへ、マクロからミクロへ　ー秩序形成、精密計算への理論的アプローチ」、京都、2005 年 11 月

[203] 須藤 靖: 宇宙の果てから太陽系外惑星へ、科研費特定領域研究会「太陽系外惑星科学の展開」西はりま天文台（2005 年 9 月 6 日）

[204] 須藤 靖: 太陽系外惑星系 HD209458 におけるロシター効果の観測、 連星・変光星ワークショップ 2005 国立科学博物館新宿分館（2005 年 10 月 30 日）

[205] 須藤 靖: ダークエネルギーと WFMOS、超広視野撮像／分光器で目指す観測的宇宙論国立天文台（2006 年 3 月 13 日）

[206] 須藤 靖: HSC/WFMOS への道:open discussion、超広視野撮像／分光器で目指す観測的宇宙論国立天文台（2006 年 3 月 14 日）

（セミナー）

[207] Shin’ichiro Ando: “Neutrino Probes of Extragalactic Supernovae”; Astroparticle Physics group, Max-Planck-Institut für Physik (April 2005)

[208] 安藤真一郎: “Neutrino Probes of Galactic and Cosmological Supernovae”; 東京大学宇宙線研究所 佐々木研究室 (2005 年 5 月)

[209] 安藤真一郎：“Astroparticle Physics with Supernova Neutrinos”; 京都大学基礎物理学研究所 (2005 年 10 月)

[210] 向山信治：“Ghost Condensation and Gravity in Higgs Phase”, 東北大学　素粒子論研究室　セミナー (2005 年 6 月 9 日)

[211] 向山信治：“Ghost Condensation and Gravity in Higgs Phase”, KEK Theory Seminar (2005 年 6 月 14 日)

[212] 向山信治：“Ghost Condensation and Gravity in Higgs Phase”, 首都大東京　素粒子理論研究室　セミナー (2005 年 6 月 15 日)

[213] 向山信治：“Dynamics of Gravity in a Higgs Phase”, 京都大学基礎物理学研究所　セミナー (2005 年 7 月 11 日)

[214] 向山信治：“Gravity and Cosmology with Warped Flux Compactification”, University of Victoria, Departmental Seminar (2005 年 8 月 31 日)

[215] 向山信治：“Gravity and Cosmology with Warped Flux Compactification”, University of Toronto, CITA Seminar (2005 年 9 月 8 日)

[216] 向山信治：“Gravity and Cosmology with Warped Flux Compactification”, 大阪市立大学　宇宙物理研究室　セミナー (2005 年 11 月 17 日)

[217] 向山信治：“Cosmology with Warped String Compactification”, University of California at Davis, Joint Theory Seminar (2006 年 2 月 13 日)

[218] 滝脇知也, 固武慶, 山田章一, 佐藤勝彦: 重力崩壊型超新星の磁気流体シミュレーション; 首都大学東京セミナー (１２月)

[219] 平松尚志：“Numerical study of cosmological tensor perturbations in brane-world”, 早稲田大学, 理論宇宙物理学研究室セミナー（2005 年 4 月 22 日）

[220] 平松尚志：“Numerical study of cosmological tensor perturbations in brane-world”, 大阪市立大学, 宇宙物理（重力）研究室コロキウム（2005 年 7 月 8 日）

[221] 工藤秀明 ”Probing anisotropies of gravity-wave backgrounds with space interferometers” (2005 年 9 月, イスラエル, エルサレム大学)

[222] 須藤 靖: 第 2 の地球を探す、サイエンスカフェ　丸ビルカフェイーズ (2005 年 4 月 23 日)

[223] 須藤 靖: 宇宙の組成を探る、 上智大学理工学部物理学科コロキュウム（2005 年 4 月 28 日）

[224] 須藤 靖: 銀河宇宙から宇宙背景輻射へ、中央大学理工学部物理学科談話会（2005 年 5 月 26 日）

[225] 須藤 靖: 太陽系外惑星探査最前線、杉並区立科学館講演会（2005 年 6 月 11 日）

[226] 須藤 靖: 太陽系外惑星の公転軸はちょっぴり傾いていた、日本天文学会 2005 年度秋季年会記者発表 札幌かでる２・７（2005 年 10 月 5 日）

[227] 須藤 靖: 進化する宇宙像、日本大学文理学部桜麗祭講演会（2005 年 10 月 29 日）

[228] 成田 憲保: Transmission Spectroscopy and the Rossiter-McLaughlin Effect、第 25 回系外惑星系セミナー 国立天文台 (2005 年 4 月 19 日)

(集中講義他)

[229] 佐藤勝彦: 明星大学理工学部 12 月 20-22 日

[230] 佐藤勝彦: 東京大学学術俯瞰講義　　物質の生い立ち －素粒子、原子、宇宙－　　１０月ー１１月

(その他)

[231] 向山信治：アインシュタイン メモリアル「弦が結ぶ音楽と科学のハーモニー」、パネリスト（世界物理年冬のイベント、東京オペラシティ、2005 年 12 月 13 日）

[232] 宇宙理論研究室が主体となって、国際会議「The 59th Yamada conference: Inflating horizon of particle astrophysics and cosmology」(June 20-24, 2005) を開催した。

[233] 成田 憲保: もうひとつの地球探しをしよう、科学技術館ユニバースゲスト (2005 年 7 月 23 日)

[234] 成田 憲保: 太陽系外惑星研究の面白さ～研究の現状とこれからの展望について～、第 16 回天塾 国立天文台 (2005 年 7 月 23 日)

[235] 成田 憲保: もうひとつの地球を探して、サマーサイエンススクール 2005 in 妙高高原 (2005 年 7 月 31 日)

[236] 佐藤勝彦：宇宙の誕生 ～　物理学の描く創世記　～ 東京大学５月祭講演　５月２９日

[237] 佐藤勝彦：暗黒物質、暗黒エネルギー問題は現代物理学の暗雲か？経団連技術同友会　東京、１０月１８日

[238] 佐藤勝彦：宇宙の誕生と進化　ー現代物理学の描く創世記ー東レ市民講演会、朝日マリオン、９月２２日

[239] 佐藤勝彦：相対性理論と宇宙論江戸川大学講演、柏　１１月５日

[240] 佐藤勝彦：宇宙の誕生と未来岐阜大学フォーラム講演　１２月７日

5.2 村尾研究室

本研究室では、物理学の中でも最も新しい研究分野の一つである量子情報の理論的研究を行っている。量子情報とは、0 と 1 からなる 2 進数の「ビット」を基本単位とするような古典力学的な状態で表される従来の情報（古典的情報）に対して、0 と 1 のみならず 0 と 1 の任意の重ね合わせ状態を取ることができるような量子力学的な状態で表される情報を指し、量子 2 準位系の状態で記述される「量子ビット (qubit)」を基本単位とする。量子情報を用いると古典情報とはクラスの違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）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考えられているが、特に多体系や多準位系における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。

今年度は、Damian Markham 助手をはじめ、博士課程の大学院生である尾張正樹氏、修士課程の大学院生である大畑琢哉氏、田中雄氏、浜地慎一郎と共に、次に挙げるようなエンタングルメント理論に関する基礎研究とエンタングルメントの量子情報処理への応用研究を行った。

5.2.1 エンタングルメント理論

エンタングルメントは非局所的量子相関であり、エンタングルメントの本質を明らかにするためには、量子状態の持つ古典的な相関と量子相関を明確に区別する必要がある。その一つの方法として、古典相関を増やすことはあっても量子相関を平均としては増やさないような操作のもとで、量子状態がどのように変化し、量子状態や量子情報を用いたタスクを行うことができるか、ということを解析する方法がある。この操作は、Local Operation and Classical Communications (LOCC) と呼ばれる操作であり、一般化された測定を含むような局所的な演算とその測定結果を伝える古典情報の通信、そして測定結果に基づく更なる条件付測定が含まれる。我々は、次のようなタスクについて LOCC の下での量子系の解析を行った。

エンタングルメントの距離的測度と局所操作によってアクセス可能な情報

量子系の持つ非局所性が古典情報を量子系に符号化・復号化する際に与える影響を考えるために、古典情報を符号化した量子状態を多者間で共有している場合に、LOCC のみで復号化可能な古典情報の情報量を考察した。この問題は、LOCC 状態識別と呼ばれている。我々は、LOCC 状態識別の上限値を、量子状態の幾何学的エンタングルメント測度 (Geometric measure of entanglement) や相対エントロピー的エン

タングルメント (Entanglement of relative entropy) などのエンタングルメントの距離的測度 (distance-like measure) を用いて表すことに成功した。この結果を基に情報理論的な解析を行うことで、エンタングルメントの存在によってどれだけ情報への局所的アクセス可能性が制限されるかを知ることができた。今回の研究成果は、これまで数学的に定義されたものであり操作的な意味に乏しく、量子情報処理の解析には不向きであったエンタングルメントの距離的測度に、量子情報処理における操作的な意味を与えるものである。一方、エンタングルメントの距離的測度の大きい状態を探索することで、量子秘密共有などの量子情報プロトコルへの応用研究も進められている。この研究は、JST の ERATO 今井プロジェクトおよび東京大学大学院情報科学研究科の林正人助教授、英国 Imperial College の S.S. Virmani 博士との共同研究である。[1]

LOCC 状態識別と LOCC 状態複製について：状態集合の非局所性の視点より

状態集合全体に対する量子操作を考える場合においては、一般的に各状態に対するエンタングルメントだけでは説明ができない非局所性が存在することが知られている (Non-locality without entanglement)。このような非局所性の解析は、これまで主に LOCC による状態識別に対して行われてきたが、LOCC による状態複製 (コピー) という問題が最近提起された。状態複製のタスクでは、状態集合は与えられているが、与えられた状態が集合の中のどの状態であるかは未知であるような状態 (未知状態) と、既知の状態が一つが与えられ、既知状態と未知状態との間で演算を行うことにより、二つの未知状態を得ることを目的とする。LOCC 状態複製では、この演算が LOCC に制限されている。

我々は LOCC 状態識別と LOCC 状態複製に関する非局所性に注目し、特に素数次元の最大エンタングル状態の集合について、状態集合の非局所性の視点から研究した。そしてその結果として、最大エンタングル状態の集合については、Local copy 可能な集合を完全に特徴付け、そしてこれらの集合については LOCC 状態複製が LOCC 状態識別より難しいということを示した。これらの結果として、代数的対称性の欠如が余剰な非局所性をもたらすことがあることを示した。この研究は JST の ERATO 今井プロジェクトおよび東京大学大学院情報科学研究科の林正人助教授との共同研究である。[2]

LOCC 状態識別における一方向古典通信と双方向古典通信の違いについて

量子通信路はデコヒーレンスにさらされやすく不安定であるために、量子情報の分野では、しばしば遠距離二者もしくは遠距離多者間において、各々の系での局所的な量子操作は可能であるが、異なる系の間の量子通信はできないという制限の基での量子情報処理 (LOCC) を考える。このような状況で、古典通信路が一方向にしかないか、双方向に通信可能であるかに実行可能な量子情報処理が依存することがある。そのような例は、Entanglement distillation や量子通信路容量において既に知られていたが、LOCC 状態識別においては確認されていなかった。そこで、我々は任意の状態に対して、その最大混合状態からの LOCC 状態識別を考えることによって、LOCC 状態識別可能性が古典通信路が一方向の場合と二方向の場合とで差が生まれることを示した。この研究は JST の ERATO 今井プロジェクトおよび東京大学大学院情報科学研究科の林正人助教授との共同研究である。

エンタングルメント頑強性と低階数ノイズ

エンタングルメント頑強性 (Robustness of entanglement) は、ノイズに対する量子状態のエンタングルメント保持性を表す測度である。ノイズが量子状態に及ぼす効果は、その量子状態を表す密度演算子に別の密度行列を混合することでモデル化される。混合する密度行列の階数は、ノイズによって引き起こされる可能性のある異なるユニタリ変換の数を示す。我々は、低階数の密度行列で表されるノイズの多者間エンタングルメントを持つ量子状態に対する影響を考察した。そして、多者間エンタングルメントの一つの指標である、シュミット数から 1 を引いた階数を持つようなノイズは、量子状態の多者間エンタングルメントを完全には破壊することができないことを示した。この研究は、東京大学大学院数理科学研究科およびカリフォルニア大学デービス校の緒方芳子博士との共同研究である。

熱平衡状態における多者間エンタングルメント

ここ数年、物理の様々な分野でエンタングルメントの存在とその役割を理解するための多大なる努力がなされてきた。例えば、凝縮系物理の臨界現象や高エネルギー物理での対称性の破れ、ホーキング放射などにもエンタングルメントの存在が関連づけられてきており、マクロな系でもエンタングルメントが絶対零度以外で存在し得ることが証明された。

そこで我々は、マクロな系における多者間エンタングルメントの性質をよりよく理解するために、有限温度の熱平衡状態における多者間エンタングルメント保持性を、エンタングルメントの距離的測度を用いて解析した。その結果、エンタングルメントの距離的測度であるエンタングルメント頑強性の大きな基底状態を持つ熱平衡状態において、エンタングルメントの存在を保証する臨界温度を導出することに成功した。この研究は、英国 Leeds 大学 V. Vedral 教授、シンガポール国立大学 J. Anders 氏との共同研究である。

5.2.2 エンタングルメントの応用研究

量子情報フローの制御と一方向量子計算

2001 年に Raussendorf と Briegel は，クラスター状態と呼ばれる特殊なエンタングルメントを持つ多量子ビット状態を用いて，構成する量子ビットを一つづつ測定することとで，どのような量子計算も行うことができることを見出した。これによって，エンタングルメントが普遍的な量子計算の資源として使えることが示された。ゲート演算の列によって量子演算を定義するような回路モデルの量子計算に対して、このような量子計算のモデルは一方向量子計算 (one-way quantum computation) と呼ばれる。クラスター状態は格子点で定義されるような状態であるが、さらに一般的なグラフで定義されるようなグラフ状態と呼ばれるエンタングルメントを用いると、グラフ状態のグラフの種類と測定命令の列によって量子演算を定義することができる。

我々は、グラフ状態をさらに一般的なエンタングルメントを持つ状態へと拡張し、エンタングルメント資源と LOCC を用いて多者間量子情報処理を行う際の量子情報の保全・操作・制御プロセスを考察し、一方向量子計算で使うことのできるエンタングルメント資源の条件・測定の満たすべき条件の研究を行った。この研究は、英国オックスフォード大学の E. Kashefi 博士、フランス CNS の V. Danos 博士との共同研究である。

混合状態を用いた非対称量子情報分配

混合状態の２量子ビットに１ビット量子情報を符号化し、LOCC のみを用いてどちらか一方の量子ビットに量子情報を抽出することができるが、他方には抽出できないというような、非対称な量子情報の共有を行う方法を見出した。この符号化方法の応用として、遠隔量子通信スイッチプロトコルを提案し、このプロトコルの背後にあるエンタングルメントの性質について考察した。この遠隔量子通信スイッチは、一方向量子計算における量子情報フローの条件付き制御に有効であると考えられる。この研究は、東京大学大学院数理科学研究科およびカリフォルニア大学デービス校の緒方芳子博士との共同研究である。

量子錠プロトコル

量子情報における暗号的応用分野では、量子状態を用いて古典情報である乱数共有を行う BB84 プロトコルなどの量子鍵配送が成功している。我々は、量子情報そのものを用いた暗号プロトコルの可能性を模索し、群論的アプローチによる一方向性量子計算の暗号的応用の一例として、認証者を通じて証明者と確認者の間で認証を行うための量子錠プロトコルを提案した。このプロトコルでは、全行程を通してクローン禁止原理を持つ量子情報を用いることで、複製による情報漏洩の可能性が非常に低くなっていることが特色である。プロトコルは、証明者に配布される量子状態である量子鍵、確認者が持つ量子状態である量子確認鍵、認証者によって作成される最大エンタングル状態である量子錠からなる。そして、証明者が提出した量子鍵が量子確認鍵と同一の状態であることが確認者によって確認されれば、認証が成功することになる。ここで、量子鍵は認証者の行うパウリ群の演算によって暗号化されており、同じパウリ群の演算が組み込まれた量子錠によってのみ復号化することができる。一方、量子錠は、確認者の行うクリッフォード群の演算によって暗号化されており、認証者の知識のみでは、量子鍵と量子確認鍵を一致させることは不可能となっている。

秘匿量子計算

秘匿量子計算 (blind quantum computation) は、一方向量子計算を用いることにより、ユーザーが提供者に与えられたユニタリー演算をその内容を知ることなく実行することである。この場合、ユーザーの実行した演算の逆演算を行うことが可能であるのは、演算の提供者のみであるため、様々な量子暗号プロトコルへの応用が考えられる。我々は、普遍的な秘匿量子演算が不可能であることを証明し、また、一方向量子計算のうちの一つのモデルであるテレポーテーション型量子計算モデルにおいては、いかなる秘匿量子計算も不可能であることを証明した。

量子光学的な状態を用いた高精度測定

量子光学的な状態を用いた高精度測定について、所要エネルギーから見た測定精度の効率を、測定する物理量との関係に着目して研究した。先行研究では、生成消滅演算子に対して１次や２次のオーダーの変換について研究されていたが、これを一般の次数に拡張して調べた。結果として、１次では精度向上をもたらした、エンタングルメントを用いたエネルギー分割は、高次では精度を悪くすることを確かめた。また、特殊なシュレーディンガーの猫状態を使うことによって高次で高精度を得られることを確認した。この研究は、国立情報学研究所の根本香絵助教授と、英国 York 大学の S.L. Braunstein 教授と、英国 HP 研究所の W.J. Munro 博士との共同研究である。

＜報文＞

(原著論文)

[1] M. Hayashi, D. Markham, M. Murao, M. Owari and S. Virmani, *Bounds on Multipartite Entangled Orthogonal State Discrimination Using Local Operations and Classical Communication* Phys. Rev. Lett. **96** (2006), 040501

[2] Masaki Owari and Masahito Hayashi, *Local copying and local discrimination as a study for nonlocality of a set of states* quant-ph/0509062

(学位論文)

[3] 大畑琢哉, Robustness of entanglement and its applications　修士論文

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[4] D. Markham, M. Hayashi, M. Murao, M. Owari and S. Virmani, *Local Discrimination and Multipartite Entanglement Measures* ERATO Conference on Quantum Information Science 2005 (EQIS05), August 2005 (Tokyo, Japan)

[5] Masaki Owari and Masahito Hayashi, *The relationship between local copying and local discrimination*, ERATO Conference on Quantum Information Science 2005 (EQIS05), August 2005 (Tokyo, Japan)

[6] Masaki Owari and Masahito Hayashi, *Local discrimination: one-way LOCC VS two-way LOCC*, The 9th Workshop on Quantum Information Processing (QIP06), January 2006 (Paris, France)

[7] D. Markham, M. Hayashi, M. Murao, M. Owari and S. Virmani, *Entanglement bounds on multiparty LOCC accessible information*, The 9th Workshop on Quantum Information Processing (QIP06), January 2006 (Paris, France)

[8] Mio Murao and Yoshiko Ogata, *Mixed state asymmetric quantum information sharing*, The 9th Workshop on Quantum Information Processing (QIP06), January 2006 (Paris, France)

[9] Yu Tanaka, Masaki Owari and Mio Murao, *A quantum lock protocol*, The 9th Workshop on Quantum Information Processing (QIP06), January 2006 (Paris, France)

招待講演

[10] Damian Markham, M. Hayashi, M. Murao, M. Owari and S. Virmani, *Local Discrimination and Multipartite Entanglement Measures*, Workshop on Quantum Information Theory and Quantum Statistical Inference, November 2005 (Tokyo, Japan)

[11] Damian Markham, M. Hayashi, M. Murao, M. Owari and S. Virmani, *Bounds on Classical Capacity of LOCC Quantum Channels*, Workshop on Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography (TQC2006), February 2006 (Atsugi, Japan)

(国内会議)

一般講演

[12] 尾張正樹, Shashank Virmani, Damian Markham, 林正人, 村尾美緒, エンタングルメント単調関数と局所的観測による決定論的識別可能な状態数の関係について, 第 12 回量子情報技術研究会 (QIT12), ２００５年５月（厚木）

[13] Masaki Owari and Masahito Hayashi, *The relationship between local copying and local discrimination*, 第 2 回量子情報未来テーマ開拓研究会, 2005 年９月 (高知)

[14] 大畑琢哉, 緒方芳子, Damian Markham, 村尾美緒 多粒子純粋状態のエンタングルメント頑強性, 日本物理学会第 61 回年次大会, ２００６年３月 (松山)

[15] 浜地慎一郎、根本香絵、W. J. Munro, Samuel L. Braunstein, 量子光学による高精度測定, 日本物理学会第 61 回年次大会, ２００６年３月 (松山)

(セミナー)

[16] 村尾美緒, 量子力学を通じて世界の広さを知る, お茶の水女子大学世界物理年記念行事 公開講演会:「物理の世界を楽しもう」, ２００５年 11 月　(東京)

[17] 村尾美緒, *Quantum information, universe, earth and love*, 東京大学大学院理学系研究科　ユネスコ大学生交流プログラム　ー科学を通して考える宇宙・地球・愛ー　シンポジウム, ２００５年１１月　(東京)

[18] Damian Markham, *Bounds on multiparty LOCC accessible information via entanglement*, QOLS Seminar Imperial College, December 2005 (London, UK)

6　一般物理実験

6.1　小林研究室

本研究室では、レーザーを用いた非線形光学、量子光学、量子エレクトロニクスを中心に、光物性物理学、分子物理学、光生物物理学から量子光学・量子情報にわたる幅広い研究を行っている。研究は大きく二つの柱（超短パルス、量子光学・量子情報）に分かれ、特に前者は、世界最短可視光パルスレーザーを用いてフェムト秒（1 フェムト秒は 10^{-15} 秒)、ピコ秒（1 ピコ秒は 10^{-12} 秒)、ナノ秒（1 ナノ秒は 10^{-9} 秒）からマイクロ秒・ミリ秒に至る時間の流れに沿って擬縮系における非線形光学効果や動的光物性光生物初期過程の研究を行っている。研究対象としては、擬一次元系である共役高分子や分子会合体、と共にそれらを構成する分子を取り上げている。特にこれらの物質中の素励起（ワニア励起子、フレンケル励起子、電荷移動励起子、ソリトン、ポーラロン、バイポーラロン等）による超高速非線形型光学過程を解明している。また、量子情報の基礎となる量子光学の基本的問題（光子相関や量子絡み合い状態・量子鍵配送等に関する研究も行っている。今回が東京大学理学系研究科物理学専攻における小林研究室の最後であるので、今まで掲載していなかった新聞記事を整理のために発表リストに加えた。

6.1.1　超短パルスレーザーの開発

搬送波位相制御とその測定

搬送波位相 (carrier-envelope phase) とは、「レーザー電場の包絡線のピークに対する、搬送波の相対的な位相」として定義される。近年、搬送波位相は、軟X線まで達する高次高調波発生や超閾イオン化などの過程におけるその重要性が認識され、注目を集めている。更に、搬送波位相は、光周波数計測を始めとした精密計測学においても非常に重要な役割を果たすことが示された。このような研究の流れの中で、フィードバック機構を備えたレーザー発振器及び再生増幅した高強度パルスの搬送波制御技術、またそれらを光源とした搬送波位相に依存した現象の解明が、非常に興味ある一分野として成長しつつある。我々の研究室では、超高強度に依存せずまたフィードバック材料に依存しない搬送波位相測定、制御を世界に先駆けて研究し、成功した。

今年度では、昨年度までに開発していた絶対位相制御光パラメトリック増幅器レーザーシステムを用い、絶対位相変化 (パルスのスペクトル位相の 0 次項に相当) と、遅延時間を変化させたことによる副次的な位相変化 (同じくスペクトル位相の 1 次項に相当) との違いを実証することを目的として、実験を行った。位相制御ポンププローブと呼ばれる非線形分光手法を採用し、その信号の、絶対位相及び遅延時間依存性を測定したところ、その二者間に明確な違いが見受けられた。即ち、２つのポンプパルスの遅延時間を掃引した場合 (図 1 実線)、その干渉振幅は電子位相緩和時間程度で減衰して行くのに対して、絶対位相を掃引した場合では、干渉振幅の減衰は見受けられなかった。今回行った位相制御ポンププローブのみならず、ヘテロダイン検出誘導光エコー等の各種非線形分光実験、更には量子力学的干渉効果を用いたコヒーレント制御の実験において、位相制御は本質的に重要な意味合いを持つ。それら全ての実験において、絶対位相と遅延時間とを区別して議論する必要性を、今回の実験結果は示唆している。更に、絶対位相制御を行うことにより、これまでは不可能だった光領域での位相回し (phase cycling、NMR 等の実験において、位相を 90° 回転させることにより、実虚部の関係を逆転させる手法) 等の新たな制御を行うことができる。

6.1.2　第三高調波励起の NOPA の開発

本研究では、チタンサファイア再生増幅器の出力の第 3 高調波をポンプ光とした NOPA の設計・開発を行った。結果として得られる波長領域は、今までに例を見ない近紫外ー可視域２５０ THz にわたる。プリズム対・４ｆ系波形整形器（グレーティングとディフォーマブルミラーよる構成）を組み合わせた圧縮を行った。パルス幅の決定には充分な注意が必要であり、これからそれを行い検討する。

6.1.3　超高速分光

キノイダルオリゴチオフェン

本研究室で開発された sub-5fs 可視光パルスを用いて cis 型ポリアセチレンの閉じ込められたソリトンあるいはバイポーラロンの形成と関連づけることの出来るキノイド型オリゴチオフェンの超高速ダイナミクスをポンププローブ法により調べた。分子の端にジシアノメチレン基を有するキノイダルオリゴチオフェンのテトラヒドロフラン (THF) 溶液を試料として用いた。明瞭なシグナルの振動を観測しい修 Fourier 変換から Raman シフトの測定結果に対応する $1460cm^{-1}$ の振動成分が得られた。これは C = C 伸縮振動に帰属される。この周波数変調等から、どの様な振動が動的モード結合しているかを観測する事が出来た。

白金錯体 $[PtBr(en)_2][PtBr](ClO_4)_4$ (=PtBr) における過渡時間依存吸収変化の測定

白金錯体 $[PtBr(en)_2][PtBr](ClO_4)_4$ (=PtBr) における過渡時間依存吸収変化の測定・解析を行った。白金錯体 Pt-Br は、室温において擬一次元構造を持つパイエルス絶縁体である。この系は電荷密度波 (CDW) を持った状態にあり、電荷移動 (CT) と格子点の振動が強く結合している。この物質を光励起すると、結晶鎖上に巨大な CT 遷移が起こり、それとほぼ同時に格子点である原子が励振され、次いで自己束縛励起子 (STE) 状態を形成することが知られている。このような擬一次元錯体物質としては他に、電子強相関によるモット絶縁体となるものも知られており、巨大な非線形光学特性など興味深い物性が数多く観測されていることから、昨今、活発に研究がなされている。本研究の対象である PtBr は、擬一次元錯体物質として最も単純でかつ基本的な構造を有しており、電子-格子相互作用を知る上でのモデル化合物として、基礎研究に最も適した物質のひとつである。非同軸配置光パラメトリック発振器 (NOPA) の 5fs 程度という極端に短い白色パルスを光学測定に用いることで、物質が励起され緩和してゆくごく短時間の過程を高い時間分解能をもって観察することができる。試料形態は傾斜キャスト法によりガラス基板上に作成した結晶性超薄膜である。高速応答はポンプ-プローブ法により吸収率変化として記録された。我々は 128 チャンネルロックイン検出器を分光器と併せて用いることで、過渡時間応答をフォトンエネルギー領域上のスペクトル信号として得た。この信号をプロットすると、吸収率変化対過渡時間曲線上に、結晶格子の振動に起因する変調が明確にみられた。この信号を高速フーリエ変換することで変調のパワースペクトルを得ると、臭素原子の対称伸縮振動に対応した振動成分と、これまでに報告の無い幾つかの振動成分が観測された。一次元の直鎖上に並んだ格子の運動は古典的な力学計算により予測が可能であり、これにより振動周波数の分散曲線が得られる。我々は、これら実験結果と計算結果を比較することで、超短パルスを用いる過程においては、通常のラマン散乱測定では不活性な振動モードも観測できる場合があることを示した。また、以上の格子振動とは明確に異なる、非常に遅い振動周波数をもった変調成分も新たに観測された。この遅い変調成分は、通常の電子励起・緩和過程のみでは説明ができないが、我々は周波数チャープを含めた計算式によりスペクトルの全領域に渡りフィッティングが可能であることを示した。このようにして求められた遅い変調周波数は、その位相の挙動から励起状態の何らかの振動を表しているものだと考えられる。ここで上述の力学計算に当てはめると、50 個程度の格子点が集団で運動している状態であると考えられる。我々はこれを、自己束縛励起子の空間的な拡がりの大きさと結論付けた。周波数チャープは集団が拡大してゆく様子、つまりエネルギーの散逸を観測しているとすると、納得できる。このような観察により励起子の大きさ、およびエネルギーの散逸の様子を観測した実験例は、これまでにないものである。

ポルフィリン J 会合体

本研究室で開発された sub-5fs 可視光パルスを用いて一次元励起子のダイナミクスをポンププローブ法により調べた。サンプルはポルフィリン J 会合体のフィルムを用いた。ポルフィリン J 会合体はそれ自体が 1 次元励起子のダイナミクスという観点から興味の対象となるばかりでなく、ポルフィリンはビタミン B_{12}、ヘモグロビン、クロロフィル等の重要な生体分子の基本構造を与える分子でありこれらの応用的な観点からも興味が持たれるところである。J 会合体はファンデルワールス引力、静的双極子相互作用により分子が 1 次元状に並んだ構造をしており、光学励起された励起子はフレンケル 1 次元励起子として振舞う。今回、マルチチャンネルロックインアンプを用いて、約 1.6eV から約 2.1eV にわたる領域において過渡吸収変化スペクトルを sub-5fs の時間分解能で測定した。1 次元励起子のダイナミクスの励起光強度依存性を測定するために、強励起、弱励起の２つの条件で測定を行った。得られた２次元過渡吸収変化を強励起、弱励起のそれぞれの場合について、数個の指数減衰関数によるグローバルフィッティングを行った。その結果、弱励起の場合の減衰は単一の指数減衰と定数成分でよくフィットされるが、強励起の場合は少なくとも２つ以上の減衰成分を持つことが明らかになった。従来、J 会合体の励起子の緩和は多励起子状態から 1 励起子状態を経て基底状態に緩和する直列型緩和モデルで説明されてきた。グローバルフィッティングによって得られたスペクトルの構造を考えると、今回の実験結果はこの直列型緩和モデルでは説明できない。これらの特徴をうまく説明するモデルとして、直列型緩和に加え、“励起子の励起状態”もしくは多励起子状態へのオージェ過程を含めた緩和過程を考えた。これらの緩和過程をレート方程式で記述し、その解を数値計算で求めることによって、実験で得られた過渡吸収変化スペクトルの強励起、弱励起の両条件における振る舞いを定性的に説明することができた。この結果は、ポルフィリン J 会合体の緩和過程においてオージェ過程の寄与が大きいことをあらわしている。さらに、Spano らが提案した励起子ー励起子相互作用を含めたハミルトニアンに従い、過渡吸収変化スペクトルの形状を計算し、実験と対比した。この結果、従来の多励起子状態へのオージェ過程ではスペクトル形状が説明できず、“励起子の励起状態”へのオージェ過程が強い寄与を持っていることが明らかになった。これらの結果から、励起子の励起状態へのオージェ過程がポルフィリン J 会合体の緩和過程に強い影響を与えていることを確認できた。

生体試料の超高速時間分解過渡吸収分光測定

世界で我々のみが所有している、遷移状態測定に十分な安定で滑らかなスペクトルの可視光サブ 4fs 超短レーザーパルスと最高性能多チャンネルロックイン検出器を組み合わせた測定系により、試料の遷移状態分光を行った。この測定には我々の開発を行い完成させたマルチ（128ch）・ダブルロックインアン

プとその分光システムを用いた。これにより、大きな背景光に埋もれた微弱な信号の波長依存性を検出するとき、従来はロックインアンプと掃引分光器で波長の 1 点 1 点を測定していたものが、128 点の波長で同時に検出できるので、同じ測定時間では 10 倍以上の S/N 向上、同じ S/N ではパラメータを連続的に変化させて２次元分光が可能になった。特に、時間分解分光では広帯域光を試料に照射することにより、帯域幅の逆数にほぼ比例する時間分解能を得ることができるようになった。このような測定系を用いてヘモグロビンを試料とした測定を行うことで、その時間分解過渡吸収信号が得られた。結果をまとめるに先立って、この得られた信号の信頼性をあげるため、さらなる信号雑音比の改善を行っている。また、同じく生体高分子であるバクテリオロドプシン試料についても測定を行ったところ、新たな現象の観測が行われたため、これに関して信号の解析を行っている。

ポンププローブシグナルに現れる分子振動スクイージングの効果に対する理論的研究

変位調和振動子と結合した三つの電子状態から成る分子系とレーザ場との相互作用で構成されるモデルを用いてポンププローブシグナルの Fourier パワースペクトルを計算した。その結果 Fourier 成分比において顕著なパルス幅依存性を見出した。この変化が、励起される振動波束の古典力学的極限からのずれに起因することを示し系のポテンシャルにおける非調和性が無視可能な下でも励起条件によっては非調和成分の増大が測定結果に現れることを指摘した。分子振動波束のスクイージングを発生する励起パルス幅に対する条件に鑑み上述の Fourier 成分比の定量によりスクイージング発現を決定できることを示した。

対称 Mach-Zehnder 型（SMZ）全光学スイッチに対する非指数関数型減衰の影響

超小型、超高速でありかつ動作に必要な外部からの入力エネルギーが極めて小さいことに特長のある対称 Mach-Zehnder 型（SMZ）全光学スイッチのスイッチング動作は、光導波路中キャリアの指数関数的減衰を前提としている。スイッチング性能における、キャリア減衰の非指数関数的プロファイルの影響について理論的に研究した。特に減衰曲線が Stretching exponential の場合を取り上げ比較検討した結果減衰曲線の純粋指数関数曲線からのずれの増大によりスイッチオフに必要とされる第二パルス（制御パルス）強度が増大することが分かった。制御パルス強度の変化に対するスイッチの安定性を定量化するロバストネス因子を定義し Stretching exponential factor や減衰レートによってロバストネスが大きく変化することを示し、ロバストネスを最大化する条件を解明した。

6.1.4 電場変調分光

分子会合体・分子結晶・光合成蛋白質・希土類ドープ結晶・電解質水溶液-電極界面の電場・光変調分光

東京理科大との共同研究として、ポリマー中にドープしたポルフィリンＪ会合体と光合成蛋白質について、マルチチャンネルロックインアンプを用いて電場変調分光を行った。ＴＰＰＳ（tetraphenylporphyrin sulfonic acid）Ｊ会合体について、昨年度フレンケル励起子の少し低エネルギー側に電荷移動励起子と思われる構造を観測したが、これについて詳細に実験を行ったところ、信号の再現性が十分でなく、電荷移動励起子であると結論するには至っていない。また、高等植物（ほうれん草）の光化学系Ⅱアンテナ色素蛋白複合体の電場変調吸収スペクトルの解析を行い、構成色素分子の吸収スペクトルの微分形ではフィットできない信号から、クロロフィルｂとカロチノイドの間の電荷移動吸収帯を同定した。　さらに、これまで透明電極（ＩＴＯ）と電解液の界面のナノスケールの厚さの電気二重層起源と考えられる大きなポッケルス効果を観測しているが、信号の偏光依存性を詳しく調べたところ、水のポッケルス効果のみでは説明し難いことがわかった。しかし観測されたポッケルス係数は巨大なもので、その値は r13 = 80、r33 = 300[pm/V] にもなり、非線形光学結晶 $LiNbO_3$ の r 33 = 31[pm/V] より桁違いに大きい。

マルチチャンネルダブルロックインアンプによる単一量子点の非線形吸収分光

半導体量子点は閉じ込め効果による量子サイズ効果のみならず、多電子励起状態（多励起子状態）を 1 個の量子点中に作ることができるため、多体電子相関効果が分光スペクトルに目に見えて現れる（1 個の量子点の分光観測ができれば）面白い系である。しかし従来単一量子点（単一分子も）の観測はほとんど発光観測のみで行われ、吸収観測は困難だった。この問題を解決するため、東京理科大・筑波大との共同研究で、128 チャンネルダブルロックインアンプと白色光ランプを用いた弱励起極限の非線形吸収分光を行っている。今年度は光学系の改善を進めたことにより、単一量子点を再現性よく観測できるようになった。そして、励起子基底状態より高いエネルギー側に励起子の励起状態の吸収減少と考えられる明瞭な構造を初めて観測した。一方、同時に現れるはずの二励起子励起状態は明瞭でなかった。この理由として、二励起子状態は多様な組み合わせがあり振動子強度の分布に広がりを持つためである可能性を検討している。

6.1.5 量子情報

高効率な多光子絡み合い状態の生成

非線型光学結晶を用いた自然放出パラメトリック下方変換 (Spontaneous Parametric Down Conversion, SPDC) は、現在光子を用いた量子情報・量子光学実験において、絡み合い状態、二光子状態等のリソースとして頻繁に用いられている。SPDC は真空状態を非線型光学結晶内において増幅する過程とみなすことができるが、増幅を受けるモードにもともと真空でない電場が存在すると誘導放出が引き起こされる。この過程をパラメトリック増幅 (Optical Parametric Amplifier, OPA) と呼ぶ。従って出力状態は SPDC によるものとは本質的に異なり、SPDC と並んで量子情報・量子光学実験の新たなリソースとなることが期待される。我々この OPA を利用し、三光子 W 状態というもつれ合い状態を実験的に高効率で生成する方法を提案・実現し、その状態の完全な特定を行った。従来は多光子もつれ合い状態を効率的に生成する研究がなく、今回の成果が世界に先駆けてその方向性を提示したといえる。実際に得られた効率は従来のものより桁違いに高く、これにより三光子 W 状態の完全な評価が始めて可能になった。

パラメトリック下方変換の単一モード近似に関する理論的解析

実験において、パラメトリック下方変換により生成される光は一般には多モードで生成される。ところが、理想的な多光子絡み合い状態を得るためには、その中から単一のモードを取り出す必要がある。従来、干渉フィルターと単一モードファイバを用いてこれを実現する方法が知られており、実験でも頻繁に用いられているが、理論的にこの仕組みをはっきりと示した報告はなかった。我々はこの課題に取り組み、上記の厳密な過程を理論式から導くことに成功した。

量子ビット純粋化

マイケルソン干渉計において、水平直線偏光２光子のときと、水平と垂直直線偏光光子の２通りの組み合わせに関して量子干渉を理論的、実験的に調べた。どちらも同じ干渉縞を得たが、それぞれ異なるバンチング効果によるものであることを初めて明らかにした。また、混合状態になった単一量子ビットを２つ用意し、HBS を用いて CNOT 演算の一部を模擬し、単一量子ビットの純粋度を上げることに成功した。このスキームは時間的なタイミングの異なる光子対を共平行に伝播させて行うため、純粋化の過程を繰り返し行うことが可能であり、限りなく純粋状態に近づけることが可能である。

量子鍵配布の波長多重化に関する基礎実験

本研究は量子鍵配布を波長多重化して行うことを目指した基礎研究である。通常、光通信での波長多重化の場合には多重度の分だけ異なる光源を用意する方法を取る。しかし量子通信の場合、一つの光源に求められる光強度には上限があり、光強度が大きすぎると通信の安全性（秘匿性）を損なう可能性がある。本研究では、光源の能力を十分に生かすことを考え、一つの光源のみを用いて波長多重量子鍵配布を行うことを目指した。波長多重化する際に多重度ぶんだけ光源を用意する必要がないという利点がある。光子検出器のダークカウントや散乱光の影響を減らすために SPDC 光子対を生成し、一方の光子をトリガーとして利用した。光子対を広帯域に生成するために、まず数値計算によって発生する光子対のスペクトルを見積もった。そして実験によってほぼ一致する結果を得ることができた。860 nm 中心で 30 nm 程度のスペクトル幅を得た。これを干渉フィルタを用いてスペクトル分解し、波長多重量子鍵配布の原理検証実験を行った。光子対を用いたことで 30 dB の伝送損失があっても秘密鍵の生成を安全に行うことができた。今後古典光通信で用いられている技術を取り入れることで、波長多重量子鍵配布を実際に行うことが可能であることが示された。

自然放出パラメトリック下方変換光を用いた量子鍵配布実験

本研究ではパラメトリック下方変換（SPDC）光子対の片方をトリガー信号とする 1 光子源（同時発生する 2 光子を利用）を考察した。ここでは同時発生した 2 光子を空間的に分離し片方を検出器で捉えた場合、もう片方の存在がわかるという性質を利用する。既にいくつかのグループが実験的に生成しているが、この手法で生成される光はその光子数分布において他の 1 光子源（サブポアソン）と比較した場合複数光子確率が増加してしまうが、トリガー側で光子数識別を行うことができれば複数光子の場合には鍵として採用せずにすみレーザー光を用いた場合に比べより長距離での安全性を確保できることを示した。光子数識別器は、我々が保有している光子検出器と光ファイバーを用いて構成できる。そしてもう一つ SPDC 光を用いる利点として同時計数を取ることによるノイズ軽減効果がある。このノイズ軽減によって、レーザー光より長距離での鍵生成が可能になる。同時計数を測定することによるこれらの利点により、単一光子源としての相対的な信頼性の低さをカバーして安全性の高い量子鍵配布システムを構築することができる事を示した。(実験) 上で述べた、長距離での安全な秘密共有鍵生成を達成するために、SPDC を用いた量子鍵配布実験を行った。まず送信者側では SPDC 光の片側（シグナル）に電気光学変調器を用いて偏光変調を加え安全な鍵生成に必要な 4 つの偏光状態をランダムに付加した。ランダムな電圧は、PC 内でプログラムによって生成され、DA 変換ボードから出力した。その電圧は増幅器によって電気光学変調器の半波長電圧（300V）レ

ベルに増幅され、電気光学変調器に入力した。偏光情報（ビット情報）を付加されたシグナルは空気中を伝播し受信者側へと送られた。光路中には可変減衰器が挿入され、0〜50km までの光ファイバー中の伝送をシミュレートした。トリガー検出器として用いられる光子数識別器を製作し、複数光子信号を除去する論理回路をあわせて製作し実験に用いた。受信者側では、送られた光を検出する受信者側光検出器ユニットが設置されており、そのユニットを構成する検出器の出力電気信号の記録を行った。このユニットは、無偏光ビームスプリッターと偏光ビームスプリッター及び 4 つの光子検出器で構成されており、検出した検出器番号を用いて受信者と送信者は鍵生成を行うためにその記録を保存する必要がある。その後に古典通信（LAN）を通じて受信者送信者各々が用いた基底照合を行う事で最終的な鍵生成を行った。受信者側の時間および受信ビットの基底記録はデジタルオシロスコープで行い、各々の測定時間は 4ms とした。1 度測定が終わるごとにそのデータを受信者側 PC に送り送信者側 PC との通信を行った。この測定を繰り返すことで長い鍵が得られた。本実験では 20 回の繰り返しを行い（80ms）、測定結果として、18.3kbits/s のビットレートが得られた。またより小さな光透過率での実験もおこない、透過率 10 また作成した論理回路を用いて強度相関関数を測定する事で、複数光子確率を減少させられることを示した。

[1] 小林孝嘉、国際時間分解振動分光学会賞、May, 2005

[2] 小林孝嘉、松尾財団学術賞、Oct., 2005

[3] H. Mikami, Y. Li, K. Fukuoka, and T. Kobayashi, Best Student Presentaton Award, New high-efficiency source of a three-photon W state and its full characterization using quantum state tomography, IQEC / CLEO-PR2005, International Quantum Electronics Conference 2005and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics、Jul. 11-15, 2005

＜報文＞

(原著論文)

[4] S. Odate, H. Wang, and T. Kobayashi, Two-photon quantum interference in a Michelson interferometer, Phys. Rev. A, 72, 063812, 2005

[5] S. Adachi and T. Kobayashi, Carrier-envelope phase -controlled quantum interference in optical poling, Phys. Rev. Lett., 94, 153903, 2005

[6] H. Wang, S. Odate, Y. Li, and T. Kobayashi, The response characteristic of a quantum high-pass/low-pass filter for quantum state preparation, J. Opt. B, 712, S737, 2005

[7] T. Horikiri, H. Sasaki, H. Wang, and T. Kobayashi, Security and gain improvement of practical quantum-key distribution using a gated single-photon source and probabilistic photon-number resolution, Phys. Rev. A, 72, 012312, 2005

[8] T. Ogawa, E. Tokunaga, and T. Kobayashi, Giant electrooptic response of excitons in porphyrin J-aggregates, Chem. Phys. Lett, 408, 186-191, 2005

[9] Y. Li, H. Mikami, H. Wang, and T. Kobayashi, Single mode approximation of parametric down-conversion, Phys. Rev. A, 72, 063801, 5pages, 2005

[10] A. Ozawa, K. Takimiya, T. Otsubo, and T. Kobayashi, Sub-5fs time-resolved dynamic Franck-Condon overlaps associated with the S1 → S0 stimulated transition in oligothiophene 13-mer, Chem. Phys.Lett., 409, 224-229, 2005

[11] H. Wang, T. Horikiri, and T. Kobayashi, Polarization-entangled mode-locked photons from cavity-enhanced spontaneous parametric down-conversion, Phys. Rev. A, 70, 043804, 2005

[12] H. Wang, Y. Li, S. Odate, and T. Kobayashi, Generation of a sub-Poissonian state with quantum high- and low-pass filters, Phys. Rev. A, 72, 013822, 2005

[13] T. Ogawa, E. Tokunaga, and T. Kobayashi, Giant electrooptic response of excitons in porphyrin J-aggregates, Chem. Phys. Lett, 410, 18-23, 2005

[14] Y. Yuasa, M. Ikuta, and T. Kobayashi, Vibrational chirp in the dynamic Stokes-shift process due to ultrafast geometrical relaxation in a polydiacetylene, Phys. Rev. B, 72, 134302, 2005

[15] H. Mikami, Y. Li, K. Fukuoka, and T. Kobayashi, New high-efficiency source of a three-photon W state and its full characterization using quantum state tomography, Phys. Rev. Lett., 95, 150404, 2005

[16] M. Ikuta, A. Yabushita, The 1Bu+ → 3Ag- → 1Bu- → 2Ag- internal conversion in carotenoids following the energy-gap law identified by 5 fs spectroscopy, F. S. Rondonuwu, J.Akahane, Y. Koyama, and T. Kobayashi, Chem. Phys. Lett, 422 , 95-99, 2006

[17] T. Horikiri and T. Kobayashi, Decoy state quantum key distribution with a photon number resolved heralded single photon source, Phys.Rev.A, 73, 032331, 2006

[18] T. Taneichi, J. Janszky, and T. Kobayashi, Pump-probe anharmonic signal in a harmonic system induced by deformed wavepacket generated by an ultrashort pulse, Chem. Phys. Lett, 419, 540-544, 2006

(会議抄録)

[19] T. Kobayashi, Sub-5-fs real-time spectroscopy to clarify the mcechanism of ultrafast nonlinearity, Abstracts of 14th International Laser Physics Workshop, Kyoto, Japan, Jul. 4-8, 2005, 88, 2005

[20] A. Yang and T. Kobayashi, Third-order nonlinear susceptibitlity of canthaxanthin, Abstracts of POLYCHAR, Annual World Forum on Advanced Materials, ICMAT '05, International Conference

on Materials for Advanced Technologies, IUMRS-ICAM, 9th International Conference on Advaned Materials, Singapore, Jul.3-8, 2005, 16, 2005

[21] A. Yang, M. Kuroda, Y. Shiraishi and T. Kobayashi, Rotational diffusion dynamics of sexithiophene in dichloromethane, Abstracts of POLYCHAR, Annual World Forum on Advanced Materials, Singapore, Jul.3-8, 2005, 7, 2005

[22] T. Kobayashi, Sub-5fs spectroscopy of carotenoids, Technical Program of 2005 International Chemical Congres of Pacific Basin Societies, Pacific Chem '05, Honolulu, HI, USA, Dec. 15-20, 2005, 140, 2005

[23] T. Kobayashi and M. Ikuta, Ultrafast optical nonlinearity in polydiacetylenes studied by sub-5-fs laser, Proceedings of 8th ICFPAM, International Conference on Frontiers of Polymers and Advanced Materials, Cancun, Mexico, Apr.22-28, 2005: Mol. Cryst. Liq. Cryst., Taylor & Francis, 446, 193-207, 2006

(総説)

[24] H. Wang and T. Kobayashi, Phase measurement at the Heisenberg limit with three photons, Phys. Rev. A, 71, 021802, 2005

[25] 小林孝嘉、超短パルスレーザー広帯域測定装置の開発による高精度時間分解分光計測技術、月刊未来材料、エヌ、ティー、エス、6 号、24-30、2005

[26] 小林孝嘉、極限的超短パルスの発生とその物質との相互作用、平尾一之・邱建栄偏、フェムト秒テクノロジーー基礎と応用、化学同人、49-59、2006

[27] 小林孝嘉、超短パルスレーザーの開発とナノ構造物質への応用、月刊オプトロニクス、オプトロニクス社、１０月号、133-140、2005

[28] T. Kobayashi, M. Ikuta, and Y. Yuasa , Sub-5 fs spectroscopy of polydiacetylene, G. Lanzani ed., Photophysics of molecular materials, Wiley-VCH, 497-524, 2006

[29] 細川瑞彦、小林孝嘉、科学の発展をささえる 1 秒、ニュートンムック：時間とは何か？、ニュートンプレス、142-149、2006

(学位論文)

[30] 大館暁、マイケルソン干渉計を用いた２光子干渉と単一量子ビットの純粋化、Two-photon quantum interference in a Michelson interferometer and purification of Single-qubit, 博士論文、2006

[31] 三上秀治、光を用いた多体エンタングルメントの生成とその応用、Generation of multi-photon entanglement and its application, 博士論文、2006

[32] 福岡郷介、ビームディスプレイサーを用いた安定な干渉計による位置ー偏光絡み合い状態の生成と特性測定、修士論文、2006

[33] 竹野唯志、広帯域波長絡み合い光子対を用いた波長多重量子暗号鍵配布の実現のための基礎実験、修士論文、2006

[34] 小澤陽、J 会合体の超高速分光、修士論文、2006

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[35] Y. Yuasa and T. Kobayashi, Vibrational dynamics in the excited state of a semiconductiong polymer, IQEC / CLEO-PR2005, International Quantum Electronics Conference 2005and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005, Tokyo, Japan, Jul. 11-15, 2005

[36] H. Mikami, Y. Li, K. Fukuoda and T. Kobayashi, New high-efficiency source of a three-photon W state and its full characterization using quantum state tomography, IQEC / CLEO-PR2005, International Quantum Electronics Conference 2005and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005, Tokyo, Japan, Jul. 11-15, 2005

[37] T. Kobayashi, Sub-5-fs real-time vibrational spectroscopy of polydiaceylene, ICL'05, The 14th International Conference on Luminescence, Beijing, China Jul. 25-29, 2005

[38] P. Kumbhakar, S. Chatterjee, and T. Kobayashi, Some newly developed crystals for measurement of ultrafast laser pulses by second harmonic generation, UFO/HFSW2005, The Joint Conference on Ultrafast Optics 5 and Applications of High Field and Shortwavelength Sources 6, Nara, Japan, Sep. 25-30, 2005

[39] T. Horikiri, Y. Takeno, A. Yabushita, H. Wang, and T. Kobayashi, Quantum key distribution with a heralded single photon sorce and a photon number resolving detector, CLEO/QELS 2006, Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser, Long Beach, CA, USA, May, 21-26, 2006

招待講演

[40] A. Yang and T. Kobayashi, Third-order nonlinear susceptibitlity of canthaxanthin, POLYCHAR-13, Annual World Forum on Advanced Materials, Singapore, Jul. 3-8, 2005

[41] A. Yang, M. Kuroda, Y. Shiraishi and T. Kobayashi, Rotational diffusion dynamics of sexithiophene in dichloromethane, POLYCHAR-13, Singapore, Jul. 3-8, 2005

[42] T. Kobayashi, Sub-5-fs real-time spectroscopy to clarify the mechanism of ultrafast nonlinearity, 14th International Laser Physics Workshop, Kyoto, Japan, Jul.4-8, 2005

[43] T. Kobayashi and M. Ikuta, Phase analysise of vibrational wavepackets in the ground and the excited states in polydiacetylene, ERPOS '05, the 10th Electrical and Related Properties of Organic Solids and Polymers, Corsica Mediterranean island, France, Jul. 10-15, 2005

[44] T. Kobayashi and Y. Yuasa, Real-time molecular vibrational frequency and amplitude probing to resolve instantaneous structure, Femtochemistry, the 7th Conference, Washington DC, USA Jul. 17-22, 2005

[45] T. Kobayashi, Control in complex environments, 2005 GRC on Control of Light and Matter, Waterville, ME, USA, Jul. 31-Aug. 5, 2005

[46] T. Kobayashi, Carrier-envelope phase dependent optical nonlinearity in optical poling, ISMOAC'05, The 5th International Symposium on Modern Optics and Its Applications, Bandung, Indonesia Aug. 15-20, 2005

[47] T. Kobayashi, H. Wang, Y. Li, and S. Odate, Application of linear optical networks in quantum optics, ICAM'05, International Conference on Applied Mathematics, Bandung, Indonesia, Aug. 22-26, 2005

[48] S. Adachi and T. Kobayashi, Coherent control by carrier-envelope phase in an optical poling process, UFO/HFSW2005, Nara, Japan, Sep. 25-30

[49] T. Kobayashi, Optical poling process controlled by carrier-envelope phase, 4th International Workshop on Optimal Control of Quamtum Dynamics:Theory and Experiment, Ringberg Castle, Tegernsee, Germany Dec. 4-7, 2005

[50] T. Kobayashi, Sub-5fs spectroscopy of carotenoids, 2005 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, Pacific Chem '05, Honolulu, HI, USA, Dec. 15-20, 2005

(国内会議)

一般講演

[51] 竹野唯志、藪下篤史、堀切智之、小林孝嘉、広帯域偏光絡み合い光子対の生成、第６６回 (２００５年秋季) 応用物理学会学術講演会、徳島大学、Sep. 7-11, 2005

[52] 湯浅吉晴、吉野勝美、小林孝嘉、ポリフェニレンビニレンのフェムト秒時間分解分光、日本物理学会２００５年秋季大会、同志社大学京田辺キャンパス、Sep. 19-22, 2005

[53] 小澤陽、F. Kajzar, 小林孝嘉、アゾ色素の超高速分光、日本物理学会２００５年秋季大会、同志社大学京田辺キャンパス、Sep. 19-22, 2005

[54] 小林孝嘉、超短パルスレーザーを用いた共役高分子の超高速過程、第５４回高分子討論会、山形大学、小白川キャンパス、Sep. 20-22, 2005

[55] 湯浅吉晴、Vibrational dynamics in the excited state of a light-emitting polymer, The University of Tokyo COE21 Prigram" Quanmtum Extreme Systems and Their Symmetries",「極限量子系とその対称性」、東京大学、Oct. 1-2, 2005

[56] 奥村恒雄、徳永英司、小林孝嘉、李定植、西研一、桝本泰章、マルチチャンネルロックインによる単一量子点の非線形吸収分光 、第 61 回日本物理学会春季大会、愛媛大学・松山大学、Mar. 27-Mar. 30, 2006

[57] 徳永英司、平林正史、野坂勇悟、小林孝嘉、電気二重層内の水の巨大な電気光学効果、第 61 回日本物理学会春季大会、愛媛大学・松山大学、Mar. 27-Mar. 30, 2006

[58] 小林孝嘉、湯浅吉晴、松田宏雄、木村龍実、超短パルスレーダーを用いたポリジアセチレンの超高速過程、第 55 回高分子学会年次大会、名古屋国際会議場、May, 24-26,2006

[59] 藪下篤史、小林孝嘉、生体高分子バクテリオロドプシンの超高速分光、第 55 回高分子学会年次大会、名古屋国際会議場、May, 24-26,2006

招待講演

[60] T. Horikiri, Quantum key distribution with a heralded single photon source and a photon number resolving detector, Qulink, University of Tokyo, Jun. 9, 2005

[61] 小林孝嘉、ナノ構造物質の超高速特性に関する研究、「ブロードバンド光シンセサイザの開発」成果発表会、幕張メッセ、Jul. 15, 2005

[62] 小林孝嘉、超高速分光法を用いた共役高分子の超高速過程、第 54 回高分子討論会、山形大学小白川キャンパス、Sep. 20-22, 2005

[63] 小林孝嘉、非古典光の生成と応用、電子・光子等の機能制御ー平成 12 年度チーム終了シンポジウムー独立行政法人科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業、コクヨホール、Oct. 18-19, 2005

[64] 小林孝嘉、超高速非線型光学効果、第３回超高速エレクトロニクス研究会、琉球大学、Nov. 15-16, 2005

[65] 小林孝嘉、The generation, control, and application of extremely short optical pulses for the advancement of quantum science and technology research、台湾国立交通大学、Nov. 23-26, 2005

[66] 足立俊輔、小林孝嘉、搬送波位相制御下での量子干渉による有機分子の光ポーリング、レーザー学会第 26 回年次大会、大宮ソニックシティ、Feb. 9-10, 2006

[67] 小林孝嘉、湯浅吉晴、松田宏雄、木村龍実、超短パルスレーザーを用いたポリジアセチレンの超高速過程、第 55 回高分子学会年次大会、名古屋国際会議場、May 24-26, 2006

[68] 小林孝嘉、超短パルスによる二次非線形型材料制御、日本化学会第８６回春季年会、Mar. 27-30, 2006

[69] 「画期的測定システム・電気光学効果 東大小林助教授が開発・高電圧，偏光用いず」、化学工業日報、1988 年 8 月 24 日

[70] 「応答を fs 単位で測定・非線形の励起子相緩和時間・材料面への応用期待小林東大助教授が成功 PDA の一種を使い」、化学工業日報、1988 年 9 月 14 日

[71] 「実用化へ急ピッチ・非線形光電子材料のプロジェクトを推進する小林孝嘉氏（東京大学助教授)」、化学工業日報、1989 年 4 月 12 日

[72] 「26、27 日に東京で開催・次世代シンポ「光電子材料」」、化学工業日報、1990 年 11 月 14 日

[73] 「実部と虚部分数を fs 時間分解で同時測定・非線形材料の感受率・小林東大助教授グループが成功・周波数領域の干渉を利用」、化学工業日報、1993 年 3 月 10 日

[74] 「特性評価に新技術・非線形光学材料・東大小林助教授が開発」、日経産業新聞、1993 年 7 月 22 日

[75] 「10 兆分の 1 秒単位に・有機高分子の光変化把握・東大」、日経産業新聞、1993 年 8 月 2 日

[76] 「光の法則が崩れた？短い光で「吸収」「屈折」相互作用・東大助教授ら測定」、朝日新聞、1993 年 12 月 20 日

[77] 「波長可変で 10 フェムト秒切る極短光パルス 東大が新手法で発生・超高速現象観察が可能」、日刊工業新聞、1998 年 5 月 21 日

[78] 「短いパルス光発生 10 フェムト秒以下で成功・ 東大波長可変レーザーで」、日経産業新聞、1998 年 9 月 16 日

[79] 「4.7 フェムト秒パルス発生 可視光で世界最短」、日刊工業新聞、1999 年 11 月 1 6 日

[80] 「1000 兆分の 1 秒の世界が見えた・バクテリオロドプシンの変化写真・4.7 フェムト秒の可視光パルスを作る装置の写真」、朝日新聞、1999 年 11 月 24 日

[81] 「分子の構造変化ストロボ撮影・東大理学部研究チーム・医薬品など合成手助け」、日本経済新聞、1999 年 12 月 4 日

[82] 「フェムト秒分光で新記録”時間分解能”を追求・芽はくくむ研究室」、日刊工業新聞、1999 年 12 月 9 日

[83] 「世界最短フラッシュ成功・東大・小林教授・化学反応解明に光 ピカリ！0.0000000000000047 秒」、読売新聞、 2000 年 1 月 13 日

[84] 「「感受率」を効率測定・非線形光学材料・東大レーザー利用」、日経産業新聞、2000 年 5 月 9 日

[85] 「基本波 1 回で高精度測定・広波長範囲の連続した非線形感受率・東大フエムト秒短パルスで実現・光学材料開発を効率化」、日刊工業新聞、2000 年 5 月 18 日

[86] 「苦労の甲斐」、日刊工業新聞、2000 年 6 月 1 日

[87] 「たんぱく質の変化解明・世界最短フラッシュを当て・東大教授ら」、毎日新聞、2001 年 11 月 29 日

[88] 「フェムト秒で動き観察・東大、特殊レーザー利用・光を当てたたんぱく質」、日経産業新聞、2001 年 11 月 29 日

[89] 「遷移状態を初観測・東大フェムト秒レーザーで・生体分子の光異性化」、 日刊工業新聞、2001 年 11 月 29 日

[90] 「東大チームが観察成功・たんぱく質分子の光反応」、日本経済新聞、2001 年 12 月 3 日

[91] 「構造を刻々追跡・光を吸収し変化する物質・東大グループ」、赤旗、2001 年 12 月 9 日

[92] 「長短時間レーザーで視覚に迫る・小林孝嘉さん(57)」、朝日新聞、2001 年 12 月 14 日

[93] 「構造変化を観察・生きた細胞・東大が光学顕微鏡開発」、日経産業新聞、2002 年 1 月 21 日

[94] 「100 ナノ程度の物体判別・東大が顕微鏡、細胞観察用」、日本経済新聞、2002 年 1 月 21 日

[95] 「微小光とらえる顕微鏡」、読売新聞、2002 年 2 月 12 日

[96] 「光の絶対位相を制御・X 線レーザー小型化に道」、日本工業新聞、2002 年 3 月 8 日

[97] 「レーザー光の位相を固定・制御・非線形光学効果・ケタ違いに拡大・X 線レーザー発振器小型・効率化も・新たな応用に期待・短波長実験系を利用・電場微増でも効果は 10 乗で・分子の解離しやすさ促進」、日刊工業新聞、2002 年 3 月 26 日

[98] 「世界最短のフラッシュ・1000 兆分の 3.9 秒」、 毎日新聞、2002 年 4 月 1 日

[99] 「高分子の配向を制御・東大、フェムト秒レーザーで」、日刊工業新聞、2005 年 4 月 18 日

[100]]「分子の向き制御・特殊な光活用・高速通信向け期待・東大」、日経産業新聞、2005 年 4 月 18 日

[101] 「有機高分子の構造変化 1 フェムト秒単位で追跡・東大が成功」、日刊工業新聞、2004 年 4 月 20 日

[102] 「分子内電子計測半日で・光合成など解明に道」、日経産業新聞、2004 年 4 月 28 日

[103] 「絶対位相制御超短パルスレーザー、分子配向制御に応用へ・小林東大教授ら新技術開発」、科学新聞、2005 年 4 月 29 日

[104] 「量子もつれ合い効率生成」、日刊工業新聞、 2005 年 9 月 8 日

[105] 「量子暗号開発へ一歩ー小林東大教授ら成功ー」、科学新聞、 200 5 年 9 月 16 日

[106] 「超短パルスの絶対位相制御，分子配向制御に応用」、朝日、毎日、科学工業日報、日経、共同通信社、科学新聞、日刊工業新聞が集まる、東大理学部新 1 号館にて、2005 年 4 月 15 日

[107] 「多光子間のもつれ合い状態を持った光子の大量生成に成功」、朝日、毎日、科学工業日報、日経、共同通信社、科学新聞、日刊工業新聞、産経、時事通信社、東京新聞、東大新聞が集まる、東大理学部新 1 号館にて、2005 年 9 月 7 日

[108] 波長可変 10 フェムト秒光パルスの発生、1998 年 6 月発行 30 巻 1 号

[109] 2 光周期分のパルス幅の超短パルスレーザーで視覚の機構を探る、2002 年 2 月発行 33 巻 1 号

[110] 極限的超短パルスの絶対位相制御を実現し、それを分子の配向制御に応用することに成功した、2005 年 4 月 15 日プレスリリース、2005 年 7 月発行 37 巻 2 号

[111] 多光子間のもつれ合い状態の大量生成に成功、2005 年 11 月発行 37 巻 4 号

[112] 小林孝嘉、26 年間の研究・教育に没頭した本郷を去るに当たって、2006 年 3 月発行 37 巻 6 号

6.2 牧島研究室

6.2.1 宇宙X線衛星「すざく」の誕生

宇宙X線衛星 *Astro-E2* [36] は、2005 年 7 月 10 日の日本時間 12:30 に、三段固体式の M5 ロケット 6 号機を用い、鹿児島県内之浦から打ち上げられ、「すざく」(*Suzaku*, 朱雀) と名付けられた (口絵参照)。「すざく」は、「はくちょう」(1979 年)、「てんま」(1983 年)、「ぎんが」(1987 年)、「あすか」(1993 年) に続く日本 5 機目のX線衛星で、2000 年 2 月に打ち上げ失敗した *ASTRO-E* の再挑戦機である。「すざく」は地上高度およそ 565 km の円軌道をもち、1 日に地球を 15 周回する。

○ 硬X線検出器 (HXD) [17] [18] [19]

「すざく」搭載装置の 1 つである硬X線検出器 (HXD; Hard X-ray Detector) 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ものである。HXD は 10–600 keV の広いエネルギー域と極めて低いバックグラウンドを特徴し、検出器部 (HXD-S)、アナログ電子回路部 (HXD-AE)、デジタル処理部 (HXD-DE) などのコンポーネントから成る。これらは、2004 年 4 月末の時点でほぼ完成に漕ぎ着けており、同 7 月からは衛星上で、打ち上げ前の最終試験に供されていた。

○ HXD の立ち上げ [47] [48] [63] [105]

打上げの約 2 週間後、HXD の立ち上げが開始された。7 月 23 日には DE 部、同 25 日には AE 部に電源を投入し、7 月 26 からは 64 個の PIN ダイオード (500 V) と 36 本のフォトチューブ (900 V) の高圧電源の投入に進んだ。印加電圧を徐々に高め、またオン時間を次第に長くする段階を踏み、8 月 5 日には標準的な連続運転を達成できた。これにより HXD の各部が、打ち上げ時の振動などで破損することなく、正常に作動していることが確認された。ただし検出器部を放射冷却板につなぐ 2 本のヒートパイプのうち、1 本が動作せず、予定した $-20°$ ではなく、$-14°$ 前後で運用することとなった。

前後して、「すざく」に搭載された CCD カメラ (XIS) と、高精度X線分光計 (XRS) の立ち上げも完了した。しかし観測開始の矢先の年 8 月 8 日、XRS の冷媒である液体ヘリウムが一気に気化するという事故が起き、XRS は機能を失い、姿勢を崩した衛星は緊急避難モードに陥った。HXD は高圧をすべてオフし、放電の有無を仔細に検討したが、問題ないと判断されたので、8 月 15 日から高圧の再立ち上げを行なった。同 19 日には定常運用に復帰し、ケンタウルス座 A の観測でファーストライトを達成した [2]。この後「すざく」は、HXD と XIS の 2 種類の検出器で観測を行うことになり、国分は HXD 運用の司令塔を務めている。

○ HXD の軌道上較正

初期観測データを用いた HXD の健康診断 (ゲインの変動など)、機能検証、動作の詳しい較正などを、国分を中心に進めた [90] [91] [92] [96]。HXD はテレメトリ容量の制限のため、機上でフォスイッチ機能による粗いイベント選別行なって地上に伝送し、その後の地上データ処理で、詳細なフォスイッチ選別や反同時計数を施す。北口らは修士論文の一環として、初期観測データを用いて、機上と地上のイベント選別パラメータを最適化した [34] [97]。その結果、HXD は目的とする超低バックグラウンドを達成していることが確認された。図 6.2 a は、最適化されたパラメータでの HXD バックグラウンドである。

最適化された状態でも、HXD バックグラウドは 1 日に最大で 3 倍ほど変動する。その主要因は、地磁気 cutoff rigidity に応じた宇宙線強度の場所による違いと、南大西洋地磁気異常帯を通過したのちの検出器の放射化である。長期には、放射化成分の蓄積も問題になる。HXD はオフセット視野をもたないため、バックグラウンドは衛星の場所、反同時計数のカウントなどをもとに、推定して差し引く必要があり、鋭意そのモデル化を進めた [44] [94]。

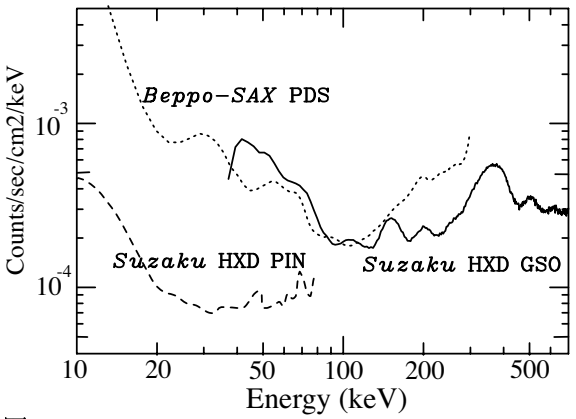


図 6.2 a: Non X-ray backgrounds, per unit effective area, of the HXD (PIN and GSO)[34] compared with that of the *BeppoSAX* PDS.

○ HXD のソフトウェア整備 [13] [48]

軌道上の較正と並び重要なのが、各種ソフトウェアの開発およびデータの基本処理である。理研や JAXA と共に、以下の 3 つ作業を進めた。

第 1 は、受信した HXD データに含まれる個々のX線イベントを処理し、公開すべきデータに変換する基本処理である。地上でのイベント選別、検出器ゲインの追跡、パルスハイトからエネルギーへの変換、イベント時刻づけなどの作業が含まれる。これらソフトウェアは、ユーザーには公開されない。第 2 は、データから得られるスペクトルを解析する際の、装置のエネルギー応答関数の構築と、視野の各位置における有効面積の較正情報で、これらは「較正データベース」として全世界に公開される。

第 3 は、データから差し引くべきバックグラウンドの推定方法を、観測者に公開することである [44] [94]。これには、典型的なバックグラウンドスペクトルの提供、差し引きに使うべき疑似イベントからなるデータファイルの提供、モデルバックグラウンドの生成ツールの公開など、さまざまな段階があり、世界のユーザーに向け最適な方法を模索中である。

○ **「すざく」による初期観測 [76]**

「すざく」打上げ後の約 1 年間に観測する天体は、2004 年末の時点で日米の衛星科学ワーキンググループ (SWG) により選定ずみだったが、XRS の機能喪失により全面的な見直しが必要となった。そこで 2005 年 10 月半ばまでは、SWG 主要メンバーの電話会議により天体を選び、それらの観測を実行した。2005 年 10 月 12–15 日、JAXA にて SWG 全体会議が開催され、2006 年 3 月末までに SWG として観測すべき約 70 天体を選定した。我々は SWG メンバーとして、この間に取得された全データにアクセス権をもつ。得られたおもな成果は、以下の各項に述べる。

「すざく」は 2006 年 4 月から、完全な公募体制に移行し、JAXA、アメリカ NASA、および欧州 ESA で競争的に選定された観測が実行される。我々も積極的な観測提案を通じて、観測時間を確保している。SWG データも公募観測データも、取得後 1 年を経過すると占有権は消失し、全世界に公開される。

○ **HXD シールド部による全天モニター機能** [49] [64] [93] [95] [98] [99]

HXD のシールド部は、主検出器部をアクティブにシールドする機能に加え、50 keV – 5 MeV の広帯域で、ガンマ線バースト、太陽フレア、明るいX線新星などを監視する、WAM (Wide-Band All-Sky Monitor) 機能をもつ。埼玉大、青学大、理研、広島大などと共同で、WAM による観測を進めた。2006 年 4 月末までに、すでに 50 例を越すガンマ線バースト (あるいはその候補) を検出しており、その一部は *Konus-Wind*、理研の *HETE-2*、アメリカの *Swift* などの衛星と同期したイベントである。

6.2.2 炭素合成プロセスの現場検証

村島らは 2005 年 9 月「すざく」を用い、惑星状星雲 BD+30° 3639 を観測した。これは中質量星が進化の最終段階に達し、外層を放出しつつ白色矮星に向かう途上の天体で、速い星風が放出物に衝突することで衝撃波が生じ、高温プラズマが生成され熱的X線を放射する。観測の結果、優れた軟X線感度をもつ「すざく」CCD カメラ (背面照射型の 1 台) により、電離した炭素からの強い特性X線を検出することに成功した (口絵カラー写真) [33] [58]。

スペクトルから求まる炭素と酸素の比は、宇宙組成比を 90 倍も凌駕する。これは星のヘリウム層の下部で、$3^4\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}\mathrm{C}$ の核融合で作られた炭素が、対流によりヘリウム層の上部に巻き上げられ、星風として放出されている結果と解釈できる [4] [45] [43] [65] [82]。星内部での炭素合成と放出の現場を直接に捉えた貴重な成果で [3] [29] [31] 、村島の学位論文の主要部分となった [33] [108] [117]。衛星の打ち上げから半年での博士誕生は、従来にない快挙である。

6.2.3 銀河団の物理学

○ **銀河団における重元素の空間分布**

川原田らは、*XMM-Newton* で観測された 12 個の銀河団・銀河群を選び、全重力質量、X線放射プラズマ、およびプラズマ中の鉄に対し、半径方向の質量分布を求めた。さらに対応する 2MASS サーベイの近赤外線データから、星 (銀河) の質量の空間分布を求めた。その結果いずれの天体でも、銀河、全重力質量、プラズマの順に半径方向に大きく広がること、またプラズマ中の重元素は、全重力質量とほぼ相似な半径プロファイルをもつことを発見した [60] [88] [107]。とくに図 6.2 b のように、銀河はプラズマ中の鉄より、ずっと中心に集中して存在する。これは、銀河が重元素を銀河間空間に放出しつつ、宇宙年齢かけてポテンシャルの底に沈み込んで来たことを示唆し、川原田の博士学位論文となった [32] 。

「すざく」を用いた銀河団の観測も開始された。Fornax 銀河団では、CCD カメラによる分光の結果、プラズマ中の Fe, Si, S などに比べ、酸素はより外に広がっており、プラズマ自体に近い質量プロファイルをもつことが確認された [74] [87]。これは川原田の博士論文からも示唆された結果で、II 型と Ia 型の超新星の発生頻度が進化して来たことを示唆する。

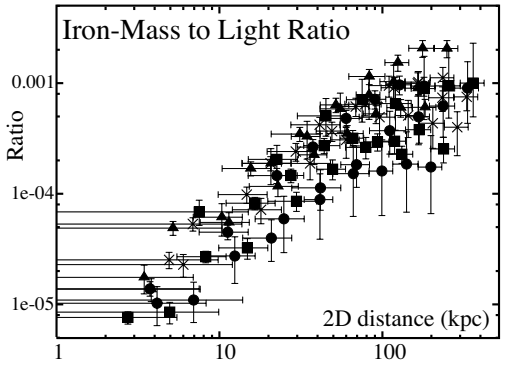


図 6.2 b: Iron-mass to light ratio profiles of 12 clusters of galaxies [32]. The iron mass contained in the hot plasma within a given projected radius is divided by the stellar mass within the same region.

○ **銀河団における銀河の中心落下**

牧島らは「銀河が銀河団ポテンシャルの底に沈む」現象は、運動する銀河が銀河団プラズマ中から磁気流体的な抵抗を受ける結果と解釈している。この描像が正しければ、X 線分布で規格化した銀河団の可視光 (銀河) の広がりは、宇宙の進化とともに減少するはずである。

北口らは近傍 ($z = 0.0183$) のペルセウス銀河団と、$z = 0.55$ の CL 0016+1609 銀河団で、じっさいにX線と可視光の空間分布を比較した。その結果、ペルセウス銀河団の銀河分布は、X線分布で規格化した時、CL 0016+1609 のものに比べ、確かに中心に集中していることを見出した [61]。今後は国立天文台や理研と協力して、「すばる」主焦点カメラの公開データなどを用い、研究を進める予定である。

○ 銀河群および銀河団からの非熱的X線

上記の銀河とプラズマの相互作用が起きると、解放された銀河の運動エネルギーは、プラズマ加熱や粒子加速を引き起こすと予測される。じっさい銀河群からは「あすか」により、銀河団からは *BeppoSAX* 衛星により、非熱的な放射の徴候が得られている。

そこで「すざく」で、Fornax 銀河団などの低温銀河団を観測したところ、CCD カメラ (XIS) のエネルギー帯域 (0.3–10 keV) で、熱的放射からの超過が検出され、「あすか」の結果を追認できた [87]。より高温の銀河団からは、「すざく」HXD による非熱的放射の検出が期待される。これまで NGC 3376 など数個の銀河団から、HXD-PIN により確かに非熱的信号の気配が得られているが、バックグラウンドの再現性がまだ詰め切れていないため、確定的ではない [75][89]。今後、改良したバックグラウンドのモデルを用いて取得ずみデータを解析することで、より確実な結論を導きたい。

6.2.4 コンパクト天体からのX線放射

○ 弱磁場中性子星からの放射

高橋や牧島らは昨年度に引き続き、また JAXA の三谷らと協力し、質量降着する弱磁場中性子星 (いわゆる LMXB) からの硬X線放射の研究を進めた [39] [27] [55]。降着率が Eddington 限界に近づくと、放射圧により電子が飛ばされ、生じた電荷分離によりイオンもひきずられ加速される、という描像を構築しつつある。硬X線は、加速された電子による非熱的制動放射かもしれない。「すざく」による 2 例の LMXB の観測も行なわれ、データ解析を待っている。

○ 質量降着型パルサー

強磁場中性子星に質量降着が起きると、X線パルサーとなり、スペクトル中には電子サイクロトロン共鳴による吸収線が現れる。高橋、岡田、榎戸らは理研などと協力し、*INTEGRAL* 衛星 [20] や *RXTE* 衛星 [10] [56] [57] を用い、いくつかのX線パルサーでサイクロトロン共鳴エネルギーの光度依存性を研究した。「すざく」では、おもにエネルギースケールの較正目的で Her X-1 を [80]、またアウトバーストした A0535+26 を科学目的で観測し [24] [81]、それぞれ 36 keV と 45 keV に、共鳴構造を再確認することができた [30] [66]。A0535+26 は 4×10^{35} erg s^{-1} という低い光度だったが、共鳴エネルギーは、過去に光度が 2 桁も高かったとき測定された値と、10% 以内で一致していた。以上のことから、サイクロトロン共鳴エネルギーは、X線光度に依存する場合もそうでない場合もあり、統一的な描像を模索中である。

○ 回転駆動型パルサー

回転駆動パルサー (高速回転する強磁場の中性子星) では、ほぼ (磁場) × (速度) × (系のサイズ) に相当するエネルギー (典型的に $\sim 10^{18}$ eV) まで、粒子が加速されていることが知られている。「すざく」では、かにパルサー (周期 33 msec；図 6.2 c) および PSR 1509 − 58 (周期 150 msec) が観測され、広い帯域でパルスが検出できた。宮脇、榎戸、理研の寺田らはそのデータを用いて、HXD の時刻づけ機能 (時間分解能 61μ sec) が正しく働いていることを検証した。SN1987A では、膨張する衝撃波が周囲を加熱することで生じる熱的X線が強くなりつつある [67]。パルサー探しも行なっている。

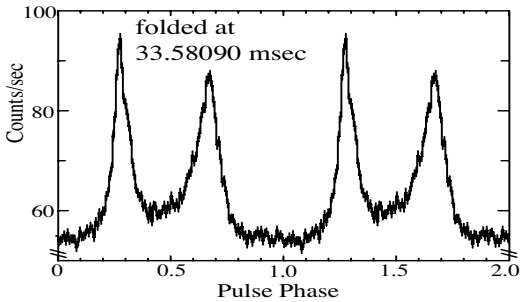


図 6.2 c: Spin-folded light curves of the Crab pulsar, detected in the 20–50 keV band with the *Suzaku* HXD [48]. The signal includes unpulsed nebular emission.

○ 白色わい星での加速現象

強磁場白色わい星は、上記の回転駆動パルサーと似た系で、磁場強度は中性子星のものより 5 桁ほど低いが、速度とサイズの積は、中性子星の場合を 3 桁ほど上回る場合がある。よって TeV 領域までの粒子加速が期待されるが、従来その観測的な証拠は乏しかった。そこで理研の寺田らと協力し、高速 (周期 33 秒) で自転する強磁場白色わい星 AE Aqr を「すざく」により観測したところ、質量降着に伴う熱的なX線に加え、33 秒の周期で変調された非熱的な硬X線を、少なくとも $\sim$ 50 keV まで捉えることに成功し、予想を確認することができた。

○ ブラックホール連星

今年度も、理研、広島大などと共同で、質量降着するブラックホールの研究を進め [6] [12]、いくつかの一般講演も行なった [110] [113] [115]。

「すざく」により、Cyg X-1[69] [79]、GRO J1655-40[68] [78]、GRS 1915+105, 4U 1630-47 などのブラックホール連星が観測され、高橋らはその解析を進めた。いずれもハード状態にあり、CCD カメラと HXD を合わせることにより、図 6.2 d のようにエネルギーにして 3 桁近くにわたり、世界最高の良質なスペクトルが得られた。HXD では数百 keV まで検出できている。ここから、硬X線放射の物理学をどう攻めるかが、今後の課題である。

○ ULX 天体

ULX (Ultra-Luminous compact X-ray) 天体は、恒星質量ブラックホールと活動銀核の巨大ブラックホールとを結ぶ中質量ブラックホールの有力な候補である [11] [28] [40] [53] [54]。宮脇、牧島らは広島大や理研と協力し、NGC 1313 銀河にある 2 つの ULX を選び、「すざく」XIS、*XMM-Newton*、*Chandra* などの統一的なデータ解析を進めた。その結果、これ

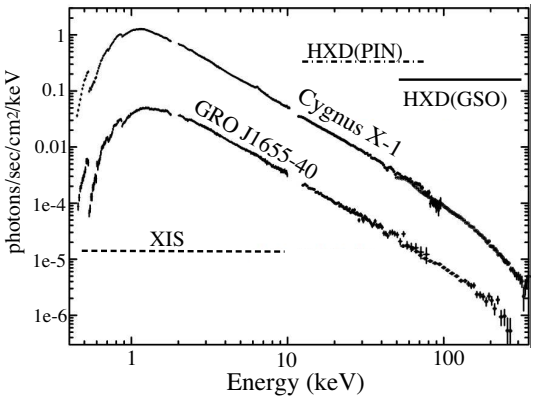


図 6.2 d: Response-removed wide-band spectra of Cyg X-1 and GRO J1655-40 [69].

ら ULX のX線連続成分は、標準降着円盤ではなくスリム円盤からの放射として、より良く解釈できそうである [70]。さらに一方の ULX には、光学的に薄い高温プラズマの放射が伴う可能性がある。

○ 活動銀河核

「すざく」の試験観測期間には、全体で 20 個を越える 1 型セイファート銀河 [73]、2 型セイファート銀河 [72]、狭線 1 型セイファート [71]、ブレーザー、電波銀河などの活動銀河核が観測された。伊藤らは理研の磯部などと協力し、2 型セイファート NGC 4945 の解析を進めている [86]。100 keV を越える領域まで信号が検出できており、熱的カットオフの有無、円盤からの反射成分の有無、変動にともなうスペクトル変化などが調べられている。

6.2.5 星間空間などでの高エネルギー現象

○ 星と星形成領域からのX線

柳田らは *Chandra* 衛星による星形成領域 NGC 2264 などのデータを解析し、いくつかの中質量星からフレアを検出した [25] [37] [42] [59] 。中質量星は一般にコロナ活動も星風も弱いので、フレアは、見えない伴星との間に架橋された磁場が起源かもしれない。

柳田らはまた Cygnus OB2 アソシエーションでは、明るい星に対応しない位置から、硬X線の放射を検出した [26] [38]。これは 2003 年度に江副らが、NGC 6334 や NGC 2024 から検出した現象 [8] と同様に、星風の衝突に起因する現象かもしれない。

○ 銀河系に付随するディフューズX線放射

京大、JAXA、理研などと共同で、「すざく」を用いた銀河系ディフューズX線の研究を進めた。その結果、銀河中心を含む銀経 $\pm 1.^\circ 5$ 銀経 $\pm 0.^\circ 5$ の領域ではどの場所からも、温度 ~ 7 keV に相当する強い熱的放射に加え、光子指数 $2.2 \sim 3.2$ 程度の非熱的な放射が、HXD-PIN により 20–50 keV バンドで検出された [83] [84] [85]。これは 2001 年度に国分らが、「あすか」や *RXTE* を用いて導いた結果をさらに進める結果であり、銀河系の星間空間で、プラズマ加熱や粒子加速が広く起きていることを示す。しかし、その機構やエネルギー源は不明のままである。

○ 電波銀河ローブからの逆コンプトン放射

電波銀河におけるジェット終端ローブからは、相対論的電子による逆コンプトン放射が観測される。理研や埼玉大と協力し、その研究を進めた [7]。2002 年度に磯部らが明らかにしたように、ローブにおける電子のエネルギー密度は、磁場のエネルギー密度を、$1 \sim 2$ 桁も上回る。正電荷がイオンなのか陽電子なのか確定することが、今後の大きな課題であろう。

○ 直流電場による粒子の加速

宇宙での粒子加速プロセスとしては、統計的過程のみでなく、電場による直接的な加速も重要である。昨年度に岡田らが発見した、球状星団が銀河系のハローの中を運動するさいに生じる加熱・加速現象は、その好例である。今年度はさらに考察を進め、ハロープラズマが球状星団に流入すると、球状星団プラズマ中の電子が後方に流されて電荷分離が生じ、それに伴う準定常的な電場が、電子の分布関数に、超熱的成分と逃走テールを作る可能性を検討した。

電場による加速の典型例として、榎戸らは理研などと協力し、雷に伴う加速現象を観測的に研究する準備を開始した。

6.2.6 将来に向けての技術開発

○ 撮像型ガンマ線検出器の開発

我々は宮脇らを中心に、1 次元の検出器を用いたフーリエ合成撮像系を開発しており [15]、それに用いる検出器素子として伊藤らは、無機シンチレータを短冊型に重ねたものを、1 次元の半導体光検出器で読み出す方式を開発している [21] [41] [50]。昨年の CsI 結晶に続き本年度は、厚み 0.3 mm の極薄 GSO 結晶を重ね、その発光をピッチ 0.4 mm をもつ片面シリコンストリップ検出器で読み出すことにより、エネルギー数百 keV の軟ガンマ線に対して、~ 0.4 mm の 1 次元の位置分解能を得た。

平栗らは修士論文で、1.5 mm 角の BGO 結晶 32×32 個を位置有感フォトチューブ (浜松 H9500) に付け、256 本の信号を専用ヘッドアンプ (クリアパルス 80058) で読み出すことで、662 keV で 1.5 mm の 2 次元の位置分解能を得た (図 6.2 e)。高い蛍光収率を誇る $LaBr_3$ 結晶 (4 mm 角) を 10×10 に並べたアレイでは、5.4 % (FWHM) のエネルギー分解能を保ちつつ、4 mm の位置分解能を達成した [35] [52] [101]。

平栗らはまた、コーデッドマスク撮像系でマスク起源のバックグラウンドを減らすため、BGO ピクセルを並べアクティブなマスクを制作した。放医研にて、6×10^9 個の 100 MeV 陽子を照射しマスクを放射化させ、それを $LaBr_3$ アレイと組み合わせたところ、マスクの発光をフォトチューブで受けて禁止信号とすることで、$LaBr_3$ の感じるカウント数を半減させることができた [35]。

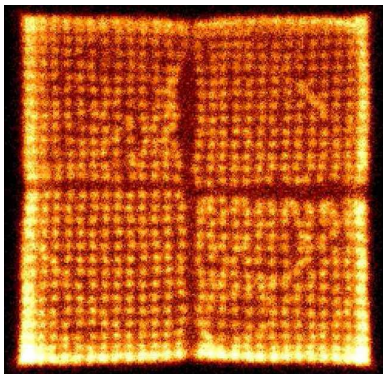


図 6.2 e: Images of uncollimated 662 keV photons, obtained by a gamma-ray imager consisting of 32 × 32 pixels of BGO scintillators each 1.5 mm squared. The signal is read by a position-sensitive phototube [35].

○ 多結晶シンチレータの開発

柳田、高橋らは企業や東北大 (多元物質研) と共同して新しいシンチレータの開発を続けた [100] [106]。Ce をドープした YAG 多結晶シンチレータでは蛍光の減衰時定数などの特性を測定した [14] [22]。Ce と Nd を共ドープしたシンチレータの評価も行なったが、２種類の活性化物質が互いに相手の発光を吸収するようである [23] [104]。ガンマ線に対する阻止能を高めるため、Y を半分 Gd で置換した GYAG 多結晶シンチレータも製作し、放射線に対し確かに発光すること、また予想通り高い阻止能をもつことを確認した [51] [109] 。ただし発光量は YAG の 1/3 程度で、結晶の透光性に改善の余地が残る。

○ 宇宙空間での放射化の研究

「すざく」HXD に用いられているシンチレータ (BGO, GSO) が、陽子照射を受けた時にどう放射化するかは、すでに詳しく実験されている。しかしα粒子による放射化は、実測データが無い。そこで放医研にて 100 MeV/核子のビームを、シンチレータの試験片に照射し、放射化が減衰する様子を測定した [102]。陽子照射と比較して、大きな差はない。

新鋭の無機シンチレータとして注目される、$LaCl_3$ および $LaBr_3$ に対しても、100 MeV 陽子の照射を行なったところ、放射化の程度は BGO や GSO と大差なく、宇宙用に利用できることがわかった [103]。

○ *NeXT* 衛星に向けての準備

日本の多くの機関と協力して、「すざく」の後継機 *NeXT* (NEw X-ray Telescope) ミッションの提案を進めた。これは、∼ 60 keV まで集光できるスーパーミラーに、硬X線の撮像検出器を組み合わせたものを主力装置とし [16]、「すざく」HXD をさらに改良して撮像機能をもたせた軟ガンマ線検出器や、「すざく」で実現できなかったカロリメータを搭載するものである。2011 年頃の打ち上げを目ざしており、JAXA 宇宙理学委員会では、VSOP2 計画に続く科学ミッションとして認定された。

＜【受賞】＞

[1] 牧島一夫：第 10 回林忠四郎賞（日本天文学会），2006 年 3 月 26 日。

＜【新聞記者発表】＞

[2] 「すざく」チーム (含・牧島研)：「『すざく』搭載観測機器（硬X線検出器)、ケンタウルス座の巨大ブラックホールの観測に成功！」、JAXA による新聞記者発表（2005 年 8 月 26 日)

[3] 村島未生、国分紀秀、牧島一夫、古徳純一、村上弘志、松下恭子、林田清、Keith Arnaud、國枝秀世&「すざく」チーム：「『すざく』衛星がとらえた炭素合成の現場～平凡な星の晩年を飾る惑星状星雲は、生命の源～」、日本天文学会・春季年会記者発表（和歌山、2006 年 3 月 26 日)

＜【報文】＞

(原著論文)

[4] Murashima, M., Kokubun, M., Makishima, K., Kotoku, J., Murakami, H., Matsushita, K., *et al.*: "*Suzaku* Reveals He-burning Products in the X-ray Emitting Planetary Nebula BD +30° 3639", *Astrophys. J. Lett.*, in press (2006)

[5] Young, A., Rudnick, L., Katz, D., DeLaney, T., Kassim, N.E., & Makishima, K.: "Canonical Particle Acceleration in FRI Radio Galaxies", *Astrophys. J.* **626**, 748-766 (2005)

[6] Kubota, A., Ebisawa, K., Makishima, K., & Nakazawa, K.: "On the Temperature Profile of Radiatively Efficient Geometrically Thin Disks in Black Hole Binaries with the *ASCA* GIS", *Astrophys. J.* **631**, 1062-1071 (2005)

[7] Isobe, N., Makishima, K., Tashiro, M., & Hong, S.: "The *XMM-Newton* Detection of Diffuse Inverse Compton X-Rays from Lobes of the FR II Radio Galaxy 3C 98", *Astrophys. J.* **632**, 781-787 (2005)

[8] Ezoe, Y., Kokubun, M., Makishima, K., Sekimoto, Y., & Matsuzaki, K.: "Investigation of Diffuse Hard X-Ray Emission from the Massive Star-forming Region NGC 6334", *Astrophys.J.* **638**, 860-877 (2006)

[9] Ueda, Y., Ishisaki, Y., Takahashi, T., Ohashi, T., & Makishima, K.: "The ASCA Medium Sensitivity Survey (The GIS Catalog Project): Source Catalog II", *Astrophys. J. Suppl.* **161**, 185-223 (2005)

[10] Nakajima, M., Mihara, T., Makishima, K., & Niko, H.: "A Further Study of the Luminosity-Dependent Cyclotron Resonance Energies of the Binary X-ray Pulsar 4U 0115+63 with *RXTE*", *Astrophys. J., in press* (2006) [astro-ph/0601491]

[11] Tanaka, T., Sugiho, M., Kubota, A., Makishima, K., & Takahashi, T.: "Spectral Evolution of a Luminous Compact X-Ray Source in NGC 253 with Chandra and XMM-Newton Observatories", *Publ. Astr. Soc. Jp.* **57**, 507-511 (2005)

[12] Abe,Y., Fukazawa,Y., Kubota,A., Kasama,D., & Makishima,K.: "Three Spectral States of the Disk X-Ray Emission of the Black-Hole Candidate 4U 1630- 47", *Publ. Astr. Soc. Jp.* **57**, 629-641 (2005)

[13] Terada Y., Watanabe, S., Ohno, M., Suzuki, M., Itoh, T., Takahashi, I., Sato, G., Murashima, M., Kawano, N., Uchiyama, Y., Kubo, S., Takahashi, T., Tashiro, M., Kokubun, M., Makishima, K. *et al.*: "Development of a Monte Carlo Simulator for the *Astro-E2* Hard X-ray Detector (HXD-II)", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52**, 902-909 (2005)

[14] Yanagida, T., Takahashi, H., Itoh, T., Kasama, D., Enoto, T., Sato, M., Hirakuri, S., Kokubun, M., Makishima, *et al.*: "Evaluation of Properties of YAG (Ce) Ceramic Ccintillators", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52**, 1836-1841 (2005)

[15] Miyawaki, R., Niko, H., Okada, Y., Kokubun, M., Makishima, K., Negoro, H., Kotoku, J., Terada, Y. *al.*: "High Resolution Fourier Synthesis Hard X-Ray Imaging Based on CdTe Strip Detectors", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52**, 2052-2057 (2005)

[16] Tajima, H., Kamae, T., Madejski, G., Mitani, T., Nakazawa, K., Tanaka, T., Takahashi, T., Watanabe, S., Fukazawa, Y., Ikagawa, T., Kataoka, J., Kokubun, M., Makishima, K., Terada *et al.*: "Design and Performance of the Soft Gamma-Ray Detector for the *NeXT* Mission", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52**, 2749-2757 (2005)

[17] Ohno, M., Fukazawa, Y., Yamaoka, K., Kokubun, M., Terada, Y., *et al.*: "Preflight Calibration and Performance of the *Astro-E2*/HXD-II Wide-Band All-Sky Monitor", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52**, 2758-2764 (2005)

[18] Yamaoka,K., Ohno,M., Terada,Y., Hong,S., Kotoku,J., Okada,Y., Tsutsui,A., Endo,Y., Abe, K., Fukazawa, Y., Hirakuri, S., Hiruta, T., Itoh, K., Itoh, T., Kamae, T., Kawaharada, M., Kawano, N., Kawashima, K., Kishishita, T., Kitaguchi, T., Kokubun, M., *et al.*: "Development of the HXD-II Wide-Band All-Sky Monitor onboard *Astro-E2*", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52**, 2765-2772 (2005)

[19] Hong, S., Yamaoka, K., Terada, Y., Ohno, M., Tsutsui, A., Endo, Y., Kotoku, J., Okada, Y., Mori, M., Fukazawa, Y., Kamae, T., Kokubun, M., Makishima, K. *et al.*: "Performance of GRB Monitor with *Astro-E2* Hard X-ray Detector (HXD-II)" *Nuovo Cim.* **28C**, 821-824 (2005)

(会議抄録)

[20] Okada, Y., Niko, H., Kokubun, M., Makishima, K. *et al.*: "A search for Cyclotron Resonance Features with *INTEGRAL*", *Proc. 5th INTEGRAL Workshop:"The INTEGRAL Universe"* (eds. V. Schönfelder, G. Lichti & C. Winkler), p.467 (2005)

[21] Itoh, T., Kokubun, M., Takashima, T., Yanagida, T., Hirakuri, S., Miyawaki, R., Takahashi, H., Makishima, K., *et al.*: "R&D of a New 1-Dimensional Gamma-Ray Position Sensor Using Scintillators Coupled to a Si Strip Detector", *IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Record* **1**, 186-190 (2005)

[22] Takahashi, H., Yanagida, T., Kasama, D., Itoh, T., Kokubun, M., Makishima, K., *et al.*: "The Temperature Dependence of Gamma-Ray Responses of YAG:Ce Ceramic Scintillators", *ibid*, **3**, 1337-1340

[23] Yanagida,T., Takahashi,H., Itoh,T., Kokubun,M., Makishima, K., *et al.*: "Evaluation of Basic Properties of Ce-Nd Codoping YAG (Ce) Ceramic Scintillators", *Proc. Radiation Detectors & Their Uses* (eds. S. Sasaki, T. Shibata, T. Sanami, H. Takahashi, & M. Nakazawa), **19**, 251-260 (2005)

[24] Inoue, H., Kunieda, H., White, N., Kelley, R., Mihara, T., Terada, Y., Takahashi, H., Kokubun, M., Makishima, K., & The Suzaku Team: "Suzaku Detection of Cyclotron Line near 50 keV for A0535+26", *Astronomer' s Telegram*, #613 (2005)

[25] Yanagida, T., Ezoe, Y., Kawaharada, M., Kokubun, M., & Makishima, K.: "Large X-ray Flares from B-type Stars, HD 261902 and HD 47777, in NGC 2264 Observed with *Chandra*", *Proc, Int'l Conf. on Active OB stars* (eds. S. Stefl, S. Owocki, & A. Okazaki), in press (2006)

[26] Yanagida, T., Ezoe, Y., Kawaharada, M., Kokubun, M., & Makishima, K.: "*Chandra* Observations of OB stars in the Cygnus OB2 Association", *ibid.*

[27] Takahashi, H., & Makishima, K.: "X-ray Study of Mass-Accretion Flows onto Weakly-Magnetized Neutron Stars", *Proc. Conference "The X-ray Universe 2005"*, p.304 (2006)

[28] Miyawaki, R., Sugiho, M., Kubota, A., Makishima, K., Namiki, M., Tanaka, T., & Tsunoda, N.: "Spectral Study of Ultra-Luminous Compact X-ray Sources with *XMM-Newton* and *Chandra*", *ibid.*, p.433

(和文解説)

[29] 小山勝二，村上弘志，牧島一夫，村島未生，常深博，勝田哲，高橋忠幸，寺田幸功ほか「すざく」チーム：「X線天文衛星『すざく』による観測速報 (1)」，天文月報，2006 年 3 月号

[30] 竹井洋，藤本龍一，満田和久，久保田あや，高橋弘充，上田佳宏，北本俊二，堂谷忠靖，鈴木素子，寺田幸功，三原建弘，牧島一夫，長瀬文昭，ほか「すざく」チーム：「X線天文衛星『すざく』による観測速報 (2)」，天文月報，2006 年 4 月号

[31] 村島未生、国分紀秀：「『すざく』衛星がとらえた炭素の合成と放出の現場〜星の内部の錬金術が見えた〜」、理学系研究科ニュース 2006 年 5 月号

(学位論文)

[32] Kawaharada, Madoka ："X-ray Study on the Spatial Distribution of Heavy Elements in Hot Plasmas Associated with Clusters of Galaxies", 博士学位論文

[33] Murashima, Mio：“X-ray Study of Planetary Nebulae”, 博士学位論文 (天文学専攻)

[34] 北口貴雄：「『すざく』衛星搭載硬X線検出器の軌道上較正」，修士学位論文

[35] 平栗慎也：「ピクセルシンチレータとアクティブマスクを用いたガンマ線検出器の開発」，修士学位論文

＜【学術講演】＞

(国際会議)

• 招待講演

[36] Makishima, K.: “A New X-ray Window to be Opened with *Astro-E2*”, 台湾天文学会 (台湾中央大学, 2005 June 2)

• 一般講演

[37] Yanagida, T., Ezoe, Y., Kawaharada, M., Kokubun, M., & Makishima, K.: “Large X-ray flares from B-type stars, HD 261902 and HD 47777, in NGC 2264 observed with *Chandra*”, *Int'l Conf. on Active OB stars* (Hokkai-Gakuen Univ., Sapporo; 2005 Aug. 29-Sept. 2)

[38] Yanagida, T., Ezoe, Y., Kawaharada, M., Kokubun, M., & Makishima, K.: “*Chandra* Observations of OB Stars in the Cygnus OB2 association”, *ibid*

[39] Takahashi, H., & Makishima, K.: “X-ray Study of Mass-Accretion Flows onto Weakly-Magnetized Neutron Stars”, *“The X-ray Universe 2005” Conference* (San Lorenzo del Escorial, Spain; 2005 September)

[40] Miyawaki, R., Sugiho, M., Kubota, A., Makishima, K., Namiki, M., Tanaka, T., & Tsunoda, N.: “Spectral Study of Ultra-Luminous Compact X-ray Sources with *XMM-Newton* and *Chandra*”, *ibid.*

[41] Itoh, T., Kokubun, M., Takashima, T., Yanagida, T., Hirakuri, S., Miyawaki, R., Takahashi, H., Makishima, K., Tanaka, T., Nakazawa, K., Takahashi, T., Honda, T.: “R&D of a New 1-Dimensional γ-Ray Position Sensor Using Scintillators Coupled to a Si Strip Detector”, *IEEE Nucl. Sci. Symp.* (Puerto Rico; 2005 Oct. 25)

[42] Yanagida, T., Ezoe, Y., Kawaharada, M., Kokubun, M., & Makishima, K.: “X-ray Flares from Young Intermediate Mass Stars in NGC2264 Observed with *Chandra*”, *Protostars and Planets V)* (Waikoloa Village, Hawaii; 2005 Oct. 24-28)

[43] Makishima, K., Murashima, M., Kokubun, M., Murakami, H., Hayashida, K., Matsushita, K., Kotoku, J., Arnaud, K., & Hamaguchi, K.: “The *Suzaku* PV observation of the Planetary Nebula BD+30°3639”, *Suzaku Science Working Group Meeting* (ISAS/JAXA; 2006 Feb. 20)

[44] Kokubun, M., Ishisaki, Y., Ogasaka, Y., Anabuki, N., Porter, F., & Takahashi, T.: “Suzaku Observation of the Lockman Hole”, *ibid.*

[45] Kokubun, M., Murashima, M., Makishima, K., Matsushita, K., Kotoku, J., Murakami, H., *et al.* “Suzaku Detection of a Highly Carbon Enriched Plasma in BD +30°3639”, *IAU Symposium No.234: Planetary Nebulae in our Galaxy and Beyond* (Waikoloa, Hawaii; 2006 April 3-7)

(国内会議)

• 日本物理学会・秋の分科会（大阪市大/同志社大/ハワイ，2005/9/12〜9/22）

[46] 宮坂浩正，土屋晴文，牧島一夫，寺田幸功，霜田進，山田豊，高橋恵美子，譚有恒：「2005 年 1 月 20 日の太陽フレアにおけるチベット中性子モニターの観測」，12aSC-6

[47] 国分紀秀，釜江常好，高橋忠幸，高橋弘充，田代信，寺田幸功，中澤知洋，能町正治，深沢泰司，牧島一夫 ほか HXD-II チーム：「*Astro-E2* 衛星硬 X 線検出器 (HXD-II) の現状 I」，15aSA-11

[48] 寺田幸功，釜江常好，国分紀秀，高橋忠幸，高橋弘充，田代信，中澤知洋，能町正治，深沢泰司， 牧島一夫，ほか it Astro-E2 衛星 HXD-II チーム：「*Astro-E2* 衛星硬 X 線検出器 (HXD-II) の現状 II：キャリブレーション& ソフトウェア」，15aSA-12

[49] 山岡和貴，釜江常好，国分紀秀，高橋忠幸，高橋弘充，田代信，寺田幸功，中澤知洋，能町正治，深沢泰司，牧島一夫他 *Astro-E2* 衛星 HXD-II チーム：「*Astro-E2* 衛星硬 X 線検出器 (HXD-II) の現状 III：広域全天モニタ (WAM) 部」，15aSA-13

[50] 伊藤健，国分紀秀，宮脇良平，柳田健之，平栗慎也，牧島一夫，高島健，田中孝明，高橋忠幸，本多庸朗：「結晶シンチレータと Si 半導体を用いた宇宙 γ 線位置検出器の基礎開発 (2)」，19aYA-9

[51] 柳田健之，高橋弘充，伊藤健，平栗慎也，国分紀秀，牧島一夫，柳谷高公，八木秀喜，繁田岳志，伊東孝之：「高阻止能を目指した改良型多結晶 YAG:Ce シンチレータの開発」，19aYA-10

[52] Hirakuri, S., Kokubun, M., Itoh, T., Yanagida, T., Miyawaki, R., Makishima, K., Kubo, S., & . Honda, T.: “R&D of a Low Background Cosmic Hard X-ray Imager with a Position Sensitive PMT and an Active Coded Mask”, KD.00011

• 日本天文学会・秋の年会（札幌，2005/10/6〜10/8）

[53] 牧島 一夫：「ULX の観測と問題点」，A01a

[54] 久保田あや，Chris Done，角田奈緒子，牧島一夫：「低温度の ULX は 1000 太陽質量のブラックホールを意味するか？」，A02a

[55] 高橋弘充，牧島一夫 (東大理)：「X線を用いた弱磁場中性子星への質量降着流の研究 (2)」，H09a

[56] 榎戸輝揚， 高橋弘充，国分紀秀，牧島一夫，中島基樹: *RXTE* 衛星を用いた Cep X-4 のサイクロトロン共鳴吸収線の探索」 H10a

[57] 中島基樹，三原建弘，牧島一夫：「質量降着型 X 線パルサーの X 線光度に依存したサイクロトロン共鳴エネルギーの変化」，H11a

[58] 村島未生，国分紀秀，牧島一夫，古徳純一：「*Chandra* 衛星による惑星状星雲からの X 線放射の観測 (3)」N29b

[59] 柳田健之，江副祐一郎，川原田 円，国分紀秀，牧島一夫：「*Chandra* 衛星による大質量星形成領域 NGC2264 の観測」，P17a

[60] 川原田 円，北口貴雄，佐藤光浩，牧島一夫，中澤知洋，深沢泰司，松下恭子：「重元素の空間分布から探る銀河団の進化」，T02a

[61] 北口貴雄，川原田 円，国分紀秀，牧島一夫：「銀河団ガスとメンバー銀河の相対的な空間分布の進化 II」，T11b

[62] 佐藤光浩，北口貴雄，川原田円， 高橋弘充，国分紀秀，牧島一夫：「Abell 1795 での銀河団の重力ポテンシャルの階層構造の検証」，T19a

[63] 中澤知洋，釜江常好，国分紀秀，高橋忠幸，高橋弘充，田代信，寺田幸功，能町正治，深沢泰司ほか：「*Astro-E2* 衛星の現状：硬 X 線検出器 HXD」，W37a

- 第 6 回宇宙科学シンポジウムでのポスター発表（宇宙科学研究所，2006/1/5〜1/6）

[64] 寺田幸功，山岡和貴，田代信，深沢泰司，玉川徹，佐藤悟郎，大野雅功，杉田聡司，遠藤康彦，恩田香織，高橋拓也，榎戸輝明ほか：「『すざく』による HXD-WAM を用いた GRB 観測」，P5-32

[65] 村島未生，国分紀秀，古徳純一，村上弘志，牧島一夫：「『すざく』による惑星状星雲の観測と CNO 組成比の推定」，P5-32

[66] 寺田幸功，三原建弘，榎戸輝明，国分紀秀，高橋弘充，牧島一夫，中島基樹：「『すざく』による X 線パルサーのサイクロトロン線の観測」，P5-36

[67] Hasinger, G., 伊藤真之，馬場彩，寺田幸功，榎戸輝明，森浩二，Bauer, M.，宇野伸一郎：「『すざく』による超新星残骸 SN1987A の観測」，P5-37

[68] 高橋弘充，伊藤健，国分紀秀，久保田あや，山岡和貴，深沢泰司，上田佳宏，大貫宏祐，高橋忠幸ほか：「『すざく』による GRO J1655-40 の観測」，P5-45

[69] 久保田あや，堂谷忠靖，平賀純子，市川喜徳，海老沢研，国分紀秀，伊藤健，高橋弘充，牧島一夫ほか：「『すざく』による Cyg X-1 の観測」，P5-46

[70] 宮脇良平，久保田あや，国分紀秀，高橋弘充，牧島一夫，水野恒史，並木雅章，海老沢研：「『すざく』による渦巻き銀河 NGC1313 と ULX 天体の観測」，P5-47

[71] 穴吹直久，林田清，内田裕之，L. Gallo，寺島雄一，井上裕彦，松本千穂，宮脇良平，伊藤健：「『すざく』による Narrow-Line Seyfert 1 銀河の観測」，P5-48

[72] 粟木久光，小川悠，深沢泰司，大野雅功，伊藤健ほか：「『すざく』による 2 型セイファート銀河の観測」，P5-49

[73] 渡辺伸，勝田隼一郎，寺島雄一，高橋忠幸，岡島崇，深沢泰司，大野雅功，国分紀秀，片岡淳一：「『すざく』による活動銀河核からの硬X線放射の観測」，P5-50

[74] 松下恭子，深沢泰司，戸塚都，太田直美，中澤知洋，山崎典子，大橋隆哉，北口貴雄，佐藤光浩：「『すざく』による Fornax 銀河団の観測」，P5-51

[75] 深沢泰司，松下恭子，太田直美，川埜直美，北口貴雄，国分紀秀，佐藤光浩，中澤知洋，牧島一夫：「『すざく』による 銀河群・銀河団からの硬X線の観測」，P5-52

- 日本天文学会・春の年会（和歌山，2006/3/26〜3/29）

[76] 牧島一夫および「すざく」チーム：「『すざく』衛星 8 ヶ月の成果」，「すざく」特別講演

[77] 牧島一夫：林忠四郎賞受賞記念講演

[78] 高橋弘充，伊藤健，国分紀秀，久保田あや，山岡和貴ほか「すざく」チーム：「『すざく』衛星によるブラックホール連星系 GRO J1655-40 の観測」，J01a

[79] 久保田あや，堂谷忠靖，平賀純子，市川喜徳，海老沢研，Sachindranatha Naik，国分紀秀，伊藤健， 高橋弘充，牧島一夫，水野恒史ほか：「『すざく』衛星による Cygnus X-1 の観測」，J08b

[80] 鈴木素子，寺田幸功，三原建弘，牧島一夫，国分紀秀，高橋弘充，榎戸輝揚，Naik, Sachindra ほか：「すざく衛星による X 線パルサー Her X-1 の観測」，J39a

[81] 須藤敬輔，北本俊二，三原建弘，寺田幸功，高橋弘充，榎戸輝揚，牧島 一夫ほか：「Suzaku 衛星による X 線パルサー A0535+26 の解析」，J43b

[82] 村島未生，国分紀秀，牧島一夫，古徳純一，村上弘志，松下恭子，林田清：「『すざく』による惑星状星雲 BD +30° 3639 の元素組成比の測定」，N23a

[83] 千田篤史，寺田幸功，馬場彩，海老沢研，村上弘志，前田良知，伊藤昭治，大貫宏祐，高橋忠幸，片岡淳，国分紀秀ほか「すざく」チーム：「『すざく』による銀河中心 Sgr A 領域からの硬 X 線放射の観測」，Q24a

[84] 大貫宏祐，中澤知洋，田村健一，渡辺伸，高橋忠幸，村上弘志，寺田幸功，千田篤史，国分紀秀，深沢泰司，小山 勝二：「『すざく』衛星による銀河中心，および銀河面からの硬X線放射の観測」，Q25b

[85] 田村健一，村上弘志，大貫宏祐，国分紀秀，小山勝二：「『すざく』衛星による Sgr B2 領域からの硬 X 線放射の研究」，Q26b

[86] 伊藤健，高橋弘充，国分紀秀，牧島一夫，粟木久光，磯部直樹ほか：「『すざく』衛星による 2 型セイファート銀河 NGC 4945 の観測」，S12a

[87] 松下恭子、大橋隆哉、 鶴剛、深沢泰司、戸塚都、山崎典子、中澤知洋、田村隆幸、太田直美、磯部直樹、浦田裕次、北口貴雄、佐藤光浩、牧島一夫：「すざく衛星による Fornax 座銀河団の観測」、T01a

[88] 川原田円，北口貴雄，牧島一夫：「銀河団プラズマ中の重元素の空間分布」，T07a

[89] 中澤知洋，深沢泰司，牧島一夫，国分紀秀，太田直美，川埜直美，松下恭，北口貴雄，磯部直樹：「『すざく』衛星による銀河団の硬 X 線放射の探査」，T13b

[90] 中澤知洋，釜江常好，久保田あや，国分紀秀，高橋忠幸，高橋弘充，田代信，玉川徹，寺田幸功，能町正治ほか HXD-II チーム：「『すざく』衛星搭載の硬 X 線検出器 HXD 主検出部の現状」，W51a

[91] 岸下徹一，高橋忠幸，中澤知洋，渡辺伸，田中孝明，田村健一，牧島一夫，国分紀秀，宮脇良平，北口貴雄，平栗慎也ほか HXD チーム：「すざく衛星搭載 PIN 型シリコン検出器の軌道上較正及び性能評価」，W52a

[92] 遠藤康彦，洪秀徴，阿部圭一，田代信，山岡和貴，北口貴雄，平栗慎也，国分紀秀，牧島一夫，大野雅功ほか HXD チーム：「すざく衛星搭載硬 X 線検出器 HXD のゲイン変動」，W53a

[93] 田代信，山岡和貴，寺田幸功，玉川 徹，久保田あや，牧島一夫，国分紀秀，高橋弘充，釜江常好ほか HXD チーム：「『すざく』衛星搭載 硬 X 線検出器 広帯域全天モニタ部 (HXD-II/WAM) の現状 (I)」，W54a

[94] 深沢泰司，川埜直美，山崎智紀，牧島一夫，国分紀秀，北口貴雄，高橋忠幸，中澤知洋，渡辺伸，寺田幸功，山岡和貴ほか HXD チーム：「『すざく』硬 X 線検出器 (HXD) のバックグラウンド差引の現状」，W55b

[95] 高橋拓也，大野雅功，深沢泰司，杉田聡司，山岡和貴，遠藤康彦，田代信，榎戸輝揚，宮脇良平，国分紀秀，佐藤悟朗，中澤知洋，高橋忠幸，寺田幸功，玉川徹，牧島一夫ほか HXD チーム：「『すざく』広帯域全天モニタ (WAM) のバックグラウンド解析」，W56b

● 日本物理学会・春の年会（松山，2006/3/27〜3/30）

[96] 国分紀秀，高橋弘充，牧島一夫，寺田幸功，玉川徹ほか「すざく」HXD チーム：「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器（HXD）主検出部の現状」，28aTF-1

[97] 北口貴雄，国分紀秀，平栗慎也，宮脇良平，高橋弘充，牧島一夫，寺田幸功ほか「すざく」HXD チーム：「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器主検出部の軌道上較正」，28aTF-2

[98] 山岡和貴，田代信，寺田幸功，玉川徹，釜江常好，久保田あや，牧島一夫ほか「すざく」HXD チーム：「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器広帯域全天モニタ部（HXD-II/WAM）の現状 (I)」，28aTF-3

[99] 大野雅功，深沢泰司，高橋拓也，山岡和貴，杉田聡司，寺田幸功，玉川徹，田代信ほか「すざく」HXD チーム：「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器広帯域全天モニタ部（HXD-II/WAM）の現状 (II)」，28aTF-4

[100] 柳田健之，平栗慎也，高橋弘充，榎戸輝揚，伊藤健，国分紀秀，牧島一夫，荻野拓，吉川彰，福田承生：「γ線検出用単結晶 LuAG(Pr) シンチレータの基礎特性評価」28pTA-1

[101] 平栗慎也，榎戸輝揚，国分紀秀，伊藤健，柳田健之，高橋弘充，北口貴雄，佐藤光浩，牧島一夫，内堀幸夫：「ピクセルシンチレータとアクティブマスクを用いたガンマ線検出器の開発」28pTF-1

[102] 佐藤光浩，北口貴雄，平栗慎也，国分紀秀，牧島一夫，内堀幸夫：「BGO 結晶および GSO 結晶の 100Mev/核子ヘリウムによる放射化実験」，28pWG-6

[103] 榎戸輝揚，平栗慎也，高橋弘充，柳田健之，伊藤健，北口貴雄，国分紀秀，牧島一夫，内堀幸夫：「陽子照射時における LaBr3 と LaCl3 の放射化バックグラウンド特性」，28pWG-11

● その他

[104] 柳田健之，高橋弘充，伊藤健，平栗慎也，国分紀秀，牧島一夫ほか：「共添加多結晶シンチレータ YAG(Ce,Nd) の特性評価」，日本応用物理学会・秋の講演会，9p-ZH-6 (徳島大学；2005 年 9 月 9 日)

[105] 宮脇良平：「X線衛星『すざく』と硬X線検出器」，第 1 回 21 世紀 COE “QUESTS” 若手交流シンポジウム (小柴ホール，2005 年 11 月 21-22 日)

[106] 柳田健之：「γ線検出器用透光性セラミックシンチレータの開発」，第 1 回 21 世紀 COE “QUESTS” 若手交流シンポジウム (同上)

[107] 川原田 円：“X-ray Study on the Spatial Distribution of Heavy Elements in Hot Plasmas Associated with Clusters of Galaxies”，高宇連・第 4 回博士論文発表会 (立教大学，2006 年 3 月 17 日)

[108] 村島未生：“X-ray Study of Planetary Nebulae”，高宇連・第 4 回博士論文発表会 (同上)

[109] 柳田健之，高橋弘充，伊藤健，平栗慎也，榎戸輝揚，佐藤光浩，国分紀秀，牧島一夫ほか：「$(YGd)_3Al_5O_{12(}Ce)$ セラミックシンチレータの改良および基礎特性評価」日本応用物理学会・春の講演会、24a-M-11 (武蔵工大；2006 年 3 月 24 日)

(セミナー，講演会，談話会)

[110] 牧島一夫：「見えて来たブラックホールの素顔」，名古屋大学公開セミナー (名大；2005 年 8 月 20 日)

[111] 柳田 健之，江副祐一郎，川原田円，国分紀秀，牧島一夫：「チャンドラ衛星による白鳥座 OB2 アソシエーションの観測」，一般公開講演会 「あらぶる星々」でのポスター公開 (北海学園大学；2005 年 9 月 3 日)

[112] 柳田 健之，江副祐一郎，川原田円，国分紀秀，牧島一夫：「NGC2264 の B 型星 HD261902 と HD47777 からの巨大フレアのチャンドラ衛星による観測」，同上

[113] 牧島一夫：「科学衛星で探るブラックホール」，スーパーサイエンスハイスクール講演会 (神奈川県立柏陽高校；2005 年 11 月 6 日)

[114] 牧島一夫：「科学衛星を用いた大気圏外からの天文観測〜日本の現状と展望〜」，宇宙開発の政策的な課題に関する第 6 回懇談会 (文科省；2005 年 11 月 11 日)

[115] 牧島一夫：「科学衛星で探るブラックホール」，市民に向けた第 21 回湯川記念講演会 (阪大中之島センター；2005 年 11 月 20 日)

[116] 牧島一夫：「宇宙での元素合成過程を探る」，理研・原子核月例コロキウム (理研和光；2005 年 12 月 22 日)

[117] 村島未生：「『すざく』による惑星状星雲のX線観測」，北海道大学理学部宇宙物理研究室セミナー (北大；2006 年 2 月 10 日)

[118] 島一夫：「地上からでは見えない宇宙」，理研一般公開講演会 (理研和光；2006 年 4 月 22 日)

6.3 高瀬研究室

6.3.1 TST-2 球状トカマクにおけるプラズマ生成・加熱・維持実験

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_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流を電磁誘導で駆動する。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，トカマク型核融合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）という中心部の空間を最小限にした配位では，特に最重要課題である。ST では更に高ベータ（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る。高 β が実現できれば，低磁場でも高いプラズマ圧力（核融合出力密度はプラズマ圧力の２乗に比例する）を達成でき，高出力密度化が可能となるので，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。当研究室の主力装置である TST-2 球状トカマクは，平成 16 年 3 月に柏キャンパスに移設され（図 6.3 a），電源系・高周波加熱系などの増強の後，平成 17 年度に実験を再開した。



図 6.3 a: TST-2 at Kashiwa Campus.

TST-2 球状トカマクの電源増強

TST-2 の柏キャンパス移設を機にコイル電源系の増強・改造を行った。トロイダル磁場コイル系では，コンデンサー電源を増設し，これまでの単純クローバー電源からパワークローバー電源に改造した。その結果，より定常的な磁場を生成することができるようになった（図 6.3 b）。CS 系では，コンデンサーバンクを増設し，両極性通電（磁束の両振り）を可能とした。その結果，CS の磁束をより有効に利用し，より長時間の放電が可能となった。移設後のこれまでの最大プラズマ電流は約 80 kA である。

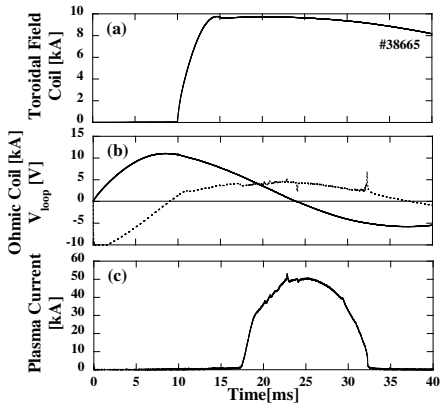


図 6.3 b: (a) Toroidal field coil current, (b) CS current and loop voltage, (c) plasma current.

マイクロ波によるプラズマ立ち上げと維持

トカマクでは通常，CS の磁束を変化させた時の誘導電場で放電開始，電流生成，トカマク配位形成を行が、CS を用いずにこれらを行うため，TST-2 ではこれまで，電子サイクロトロン (EC) 周波数帯のマイクロ波を用いる手法，トーラス外側に位置する平衡制御用コイルによる誘導電場を利用する手法が研究されてきたが，今回はイオンサイクロトロン周波数の高次高調速波（High Harmonic Fast Wave: HHFW）の併用を試みた。図 6.3 c は，マイクロ波（2.45 GHz/4 kW）でプラズマおよびプラズマ電流を生成し，途中で HHFW（21 MHz/約 10 kW）を重畳した時の放電波形を示したものである。図に示されているように，HHFW はプラズマ電流を増加させる有効な手段であることがわかった。これまでの実験で，プラズマ生成条件と電流増加条件は，トロイダル磁場，垂直磁場，垂直磁場の曲率，充填ガス（水素）圧力に依存することがわかった。また，プラズマ生成と電流増加の最適条件は必ずしも一致しないため，図に示した放電ではプラズマ生成時のトロイダル磁場のみを高めにして，両者の条件を同時に満たすことを試みている。このようなプラズマは，物理的には複数の要素が絡み合う自律的な状態であり，今後電流駆動および配位形成機構を解明していくことが重要な課題である。

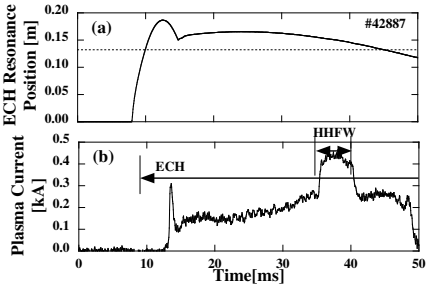


図 6.3 c: (a) Toroidal field, represented by ECH fundamental resonance radius, (b) plasma current.

ワッシャーガンの試作

ST における放電開始・電流生成・配位形成の手段として，ワッシャーガン等によるプラズマ・電流入射が有望視されている。TST-2 における実験の準備としてワッシャーガンを試作し，その特性を調べた。ワッシャーガンは，コンパクトながら大きな電流を引き出せるという特徴があるが，どのような機構でプラズマ生成が行われるのか，どのような条件下で大きな電流が引き出せるかなど，デザインの最適化には未知の要素が多い。これまで他機関で使われてきたガンとは異なり，試作したワッシャーガンではステンレス製電極とセラミック製絶縁リングを用いた。放電開始電圧は，平行平板電極放電におけるパッシェンの法則と同様に，ある圧力で最小値を持つが，この法則に比べより広い圧力領域（0.7-20 Torr）にわたって低い電圧（~470 V）で放電開始が可能であり，これは内部の構造による不均一電場に起因すると推察される。ガンの開口径を変えることで，放電開始に必要なガス入射条件（ガス流量・タイミング）を変え，実機設計の指針を得た。ガンと入射側容器の間に電圧をかけて電流を引き出すことができ，これまで最大 50 A の引き出し電流を得ている。また軸方向磁場を印加することにより，指向性のある電流を引き出すことができる。指向性に必要な磁場強度は，電子のラーモア半径と平均自由行程が同程度であることが確かめられた。

HHFW による電子加熱実験

ST は低磁場で高密度プラズマを閉じ込めることができるためプラズマの誘電率が高く，通常型トカマクのような強磁場を用いた低誘電率プラズマで成功している加熱手法が有効であるとは限らない。HHFW は高誘電率プラズマ中でも良好な伝播特性を持ち，波の位相速度と電子の熱速度が同程度になると，ランダウ減衰および走行時間減衰により電子に強く吸収される一方，イオンによる吸収は弱いので，電子加熱や電流駆動に適している。

図 6.3 d に示す 2 種類のスペクトルを用いて実験を行ったところ，図 6.3 e に見られるような明確な差が観測された。シングルストラップ・ダブルストラップ励起とは，アンテナを構成する 2 本の要素（ストラップと呼ばれる）の 1 本のみあるいは 2 本とも使用した場合をさす。図 6.3 d に見られるように，シングルストラップ励起の場合は吸収されにくい低トロイダルモード数成分が多いのに対し、ダブルストラップ励起の場合は吸収に適した（HHFW の位相速度と電子の熱速度が一致することが条件）トロイダルモード数 10 付近の成分が選択的に励起されることがわかる。図 6.3 e は広帯域軟 X 線放射の空間分布を示している。(a) は HHFW を入射しないケースであり，タイミングは黒が HHFW 入射直前，赤は入射停止直後，青は停止後 0.1 ms である。軟 X 線の発光は電子温度・電子密度・不純物イオン密度に依存するが，この実験では密度の上昇は見られないので，主に電子温度の変化を反映していると考えることができる。入射パワーを (b) 30 kW, (c) 80 kW, (d) 120 kW, (e) 60 kW, (f) 100 kW, (g) 120 kW と増加させると軟 X 線の増加（黒と赤の差）はシングルストラップ励起（左列）よりもダブルストラップ励起（右列）の場合に大きいことがわかる。これよりダブルストラップ励起の方が効率よく吸収されると推論される。電子温度を直接計測することが重要なので，レーザー光のトムソン散乱に基づく電子温度計測を準備中である。

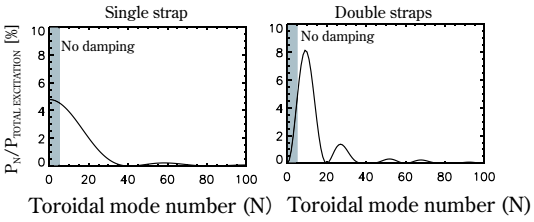


図 6.3 d: Toroidal mode number spectra for single-strap (left) and double-strap (right) excitations.

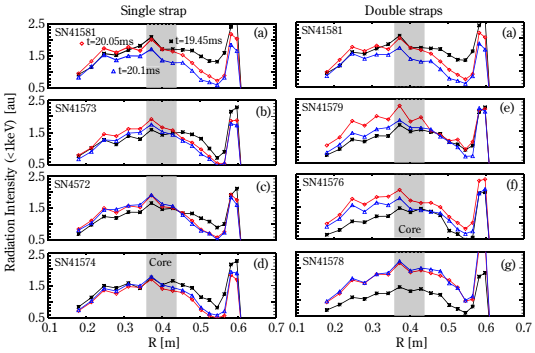


図 6.3 e: Wideband X-ray emission profile for single-strap (left) and double-strap (right) excitations. RF power (a) 0 kW, (b) 30 kW, (c) 80 kW, (d) 120 kW, (e) 60 kW, (f) 100 kW, (g) 120 kW.

1 次元モデル計算により波の伝播および吸収が評価されているが，現実にはプラズマ周辺部に存在する密度揺動による散乱，パラメトリック崩壊などの非線形現象等により，HHFW の伝播および吸収は影響を受ける。これらの物理過程の重要さを評価するため，アンテナは励起される波動の位相速度を変えられる設計とし，トロイダル方向，ポロイダル方向に多数設置されてた高周波（RF）プローブにより，励起された波の空間分布や周波数スペクトルを計測している。この信号を最高 1 GHz で高速サンプリングし、波動振幅の時間変化および周波数スペクトルを得ている。ここでは代表例として，アンテナ付近に設置されたプローブで測定された信号について議論する。図 6.3 f の左側の広帯域スペクトルでは，21 MHz の基本波のほかその 2 倍の周波数の高調波が発生していることがわかる（これよりさらに高次の高調波も発生している）。(b) 高密度プラズマでは，基本波の低周波数側にパラメトリック崩壊による周波数成

分（19.5 MHz）が見られるが (a) 低密度では見られない。この周波数の 21 MHz からの差は，周辺部の磁場のイオンサイクロトロン周波数に対応しており，磁場にほぼ比例して変化する。これから崩壊はプラズマ周辺部で起きており，低周波モードはイオンサイクロトロン擬似モードであることが示唆される。周波数の拡がりは，周辺部の密度揺動に散乱された結果であると推察できる。今後はこれらの結果を理論とも比較し，加熱に対する影響を定量的な評価していく予定である。

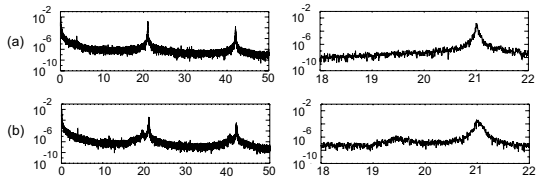


図 6.3 f: Frequency spectra measured by magnetic probe near the antenna: (a) low density, (b) higher density (50% higher).

マイクロ波反射計による密度揺動測定

高電力高周波をプラズマに入射すると，励起された波動の振動電場により密度振動が起こる。HHFW 励起に伴う密度振動を測定するために，マイクロ波反射計による密度揺動測定を開発した。反射計は密度揺動に対して非常に鋭敏なので，反射計によりプラズマ中の電場を計測することができ，波動物理の解明に大きな役割を果たす。また，マイクロ波の周波数を掃引することで，FM 反射計の原理によりプラズマの密度分布を測定することができる。最終的には，密度振動のプラズマ内での強度分布を求めることを目標とする。目的の性能を発揮するためには，揺動による回折効果の評価とその抑制が必要である。反射計の有効性と挙動を調べるために，Kirchhoff 積分による数値計算を用いたシミュレーションを行い，光学系の配置の最適化を行うとともに，さまざまな波数・振幅の揺動に対して位相応答を計算し，有効な揺動測定範囲を調べた。送信アンテナから放射されたマイクロ波は，二つの凹面鏡によって絞られ，プラズマに入射される。プラズマのカットオフ面で反射されたマイクロ波は，凹面鏡によるイメージングによって受信アンテナ面にカットオフ面の揺動構造を再構築する。設計に基づいて製作した反射計の焦点面付近の入射ビーム分布は，Kirchhoff 積分による数値計算結果と一致し，意図した光学系が実現できたことが確認された。実験では，高周波（21 MHz，約 400 kW）の入射時に HHFW によって生じる密度振動が計測された。しかし，高周波ピックアップによるノイズが大部分であり，信号はノイズの数分の一程度であることがわかっており、今後対策が必要である。

MHD 不安定性

TST-2 では再結合現象 (reconnection event: RE) と呼ばれる MHD 緩和現象が観測されている。磁気計測に基づいた平衡解析の信頼性向上のため，外部コイルやプラズマ電流の時間変化により真空容器壁に誘起される渦電流の正しい評価が必要である。TST-2 では渦電流の時定数は最長のモードでは < 5 ms 程度であり，放電時間 (~ 10 ms) に比べて無視できず，その寄与はプラズマの平衡に必要な垂直磁場の $\sim 10\%$ 程度であることがわかった。渦電流の直接測定を行った結果，無限に分解可能な渦電流モードのうち，いくつを平衡解析に取り入れるべきかを評価した。さらに平衡解析の妥当性を検証するために，半磁性ループを用いてプラズマの反磁性効果を測定し，平衡解析結果との比較を行った。またトロイダル方向に配置された磁気コイルアレイを用い，トロイダルモード数の同定を行った。RE が起こる際には磁気計測に 10 kHz 程度の振動が観測され，その振幅の成長が見られた。この振動の振る舞いにより 2 つのタイプ（タイプ 1，タイプ 2）に分類した。タイプ 1 では RE 前後でトロイダルモード数が変化しない。コイル間のコヒーレンスは 10 kHz, 20 kHz, 30 kHz で大きく，10 kHz, 20 kHz 付近ではともに $n = 1$ モードが支配的であった。タイプ 2 では RE 前後でモード数が変化する。コヒーレンスはタイプ 1 と同様，10 kHz, 20 kHz, 30 kHz で大きく，支配的なモードは RE 前には 10 kHz で $n = 1$, 20 kHz, 30 kHz で $n = 1$ もしくは支配的なモードはが存在しなかった。RE 後は 10 kHz で $n = 1$, 20 kHz, 30 kHz で $n = 2$ が支配的であった。平衡解析により求めたプラズマ蓄積エネルギーは，タイプ 1 ではほぼ変化が無いが，タイプ 2 では 30%–60%の減少が見られた。また RE の起きる直前の q 分布はタイプ 1 では $1 < q_0 < 1.5$, $q_a < 4$ であるが，タイプ 2 では $1 < q_0 < 1.5$, $q_a > 4$ で起こるものと $1.5 < q_0 < 2$, $q_a > 4$ で起こるものがあることがわかった。この結果，タイプ 2 の揺動がある場合にはエネルギー損失が大きく，プラズマの性能を著しく低下させると推測される。

3 次元 MHD シミュレーションによると，RE は圧力勾配による低波数の不安定性を起源とし，プラズマ中に局所的変形が発生してプラズマ内部及び外部の磁力線が再結合し，プラズマ内部のエネルギーが磁力線に沿って漏れ出ることが可能となる。RE 前後のプラズマ内部の構造変化を調べるため，20 チャンネルの PIN ダイオードアレイを用いてプラズマから放出される軟 X 線の強度分布を測った。PIN ダイオードアレイの視線をプラズマ中心に向けて測定した場合の放電波形を図 6.3 g に示す。22.5, 24 ms 付近にプラズマ電流の変化が見られる (a)。磁気揺動および PIN ダイオードで計測した放射強度の揺動は，その時刻まで成長を続ける (b)(c)。硬 X 線に感度がある NaI(Tl) シンチレーターは 24 ms よりも 0.2 ms 程度早く反応が見られ (d)，早い段階での高速電子の損失を表す。また磁場の変化と軟 X 線揺動の範囲は広がり，RE 時にそれらの振幅は減少することが複数の PIN ダイオードによる測定からわかった。また，PIN ダイオードで測定した軟 X 線強度のピークからの立下り時間の鉛直方向の空間分布は，中心 ($Z = 0$) から少し外

れた $\rho \simeq 0.1$ 付近で最も短いことがわかり，この領域から RE が起きていることが示唆される。RE が起きる条件を調べるために軟 X 線放射強度分布を軟 X 線強度のピーク値 (p) と channel 間の半値幅 (FWHM) との比で特徴づけると，$F = P/\mathrm{FWHM} > 0.02$ の場合に RE が起きやすく，その時の放射強度は比較的強いことがわかり，RE は圧力勾配により駆動される不安定性であることを裏づける結果を得た。

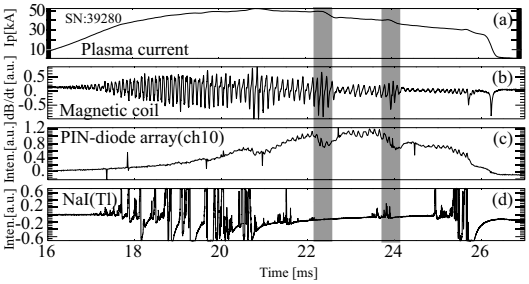


図 6.3 g: (a) Plasma current, (b) magnetic fluctuation measured by a pick-up coil located on the outboard side, (c) soft X-ray intensity measured by a PIN diode viewing the normalized radius $\rho \simeq 0.1$, (d) hard X-ray intensity measured by a NaI(Tl) scintillator.

6.3.2 JT-60U トカマクにおける自発電流によるプラズマ電流駆動実験

日本原子力研究開発機構の JT − 60U トカマクを用いて，様々な手法による電流駆動実験を行っている。平成 17 年度には，特にプラズマが自発的に流すブートストラップ電流 I_{BS} による電流駆動に焦点を絞って実験を行った。プラズマ圧力が高くなると，その圧力勾配によりプラズマが自発的にブートストラップ電流を流すようになる。これが全プラズマ電流を上回ること（$I_{\mathrm{BS}}/I_{\mathrm{p}} > 1$）をブートストラップオーバードライブ（BSOD）という。これが実証されれば電流駆動装置に対する要求を軽減することができるため，核融合炉にとっては大変重要な課題である。平成 16 年度の実験では，NBI（中性粒子ビーム入射）による電流駆動とブートストラップ電流のみで，プラズマ電流を維持し，さらにプラズマ電流を増加させることに成功しており，BSOD の実現を示唆する兆候も得られていた。平成 17 年度の実験では，外部からの電流駆動を用いず，プラズマ自身が流すブートストラップ電流のみによりプラズマをより長時間維持することに成功した。この結果，プラズマ平衡をプラズマが自発的に流すブートストラップ電流のみにより維持することが可能であることをより明確に示すことができた。これは世界初の成果である。図 6.3 h でプラズマ電流が一定でループ電圧が 0 の時間帯では，ほぼ 100%のブートストラップ電流によりプラズマが維持されている。

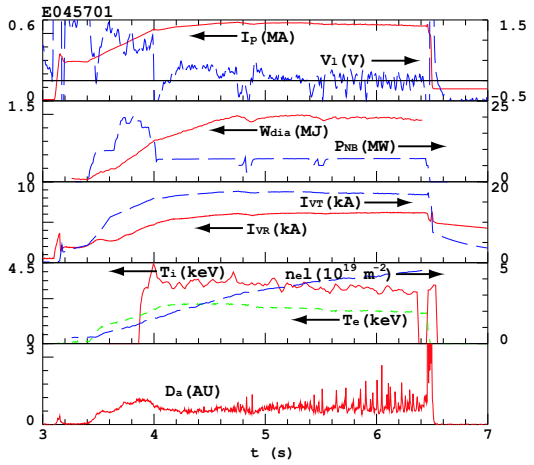


図 6.3 h: Bootstrap overdrive on JT-60U. Plasma current and loop voltage; diamagnetic stored energy and neutral beam power; vertical field and shaping coil currents; ion and electron temperatures and line integrated density; D_α emission.

6.3.3 プラズマ合体を使った超高ベータプラズマ生成・維持の研究

ST の高ベータ・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することができる。ST の特徴である高ベータを更に高めた「超高ベータ ST プラズマ」を生成・維持するための新手法を開発することを目的とした研究を，科研費基盤研究 (S) の支援のもとに開始した。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，真空容器外コイルを用いてプラズマを 2 個生成し，これらの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を利用した超高ベータ ST プラズマ（トロイダルベータが 30–50%）の新生成法（図 6.3 i）の開発，および HHFW などの先進的 RF 手法による高ベータ ST プラズマの維持を目指す。プラズマ合体による超高ベータ ST プラズマの生成は東大で独自に開発された新手法である。磁気リコネクションを利用すれば小型装置でも瞬時に MW から GW クラスのプラズマ加熱パワーが得られ，不安定状態を回避しつつ第二安定領域に到達することが可能であるため，高ベータプラズマ立ち上げには最適である。反面，合体の時間スケールを上回る長時間加熱源が無いため，生成した超高ベータ ST プラズマは，生成後短時間で低ベータ配位に逆戻りしてしまう。合体生成した超高ベータ ST プラズマを RF ないし NBI で長時間（エネルギー閉じ込め時間より長く）維持できれば，世界的にも最も高いベータを有する ST プラズマの生成及び維持が実証されることとなり，極めて重要な意義をもつ。本研究では未だ確立されていない，高効率核融合炉の実現に必要な超高ベータ ST プラズマの生成・維持を

実現する新手法の確立を目指す。本研究の進展により超高ベータ状態の ST プラズマの安定性と輸送に対する理解が進み，超高ベータ ST の立ち上げと維持の基本的シナリオが実証できるものと期待される。平成 17 年度には，この研究を行うための真空容器およびコイルの製作を行った。平成 18 年度から実験を開始する予定である。

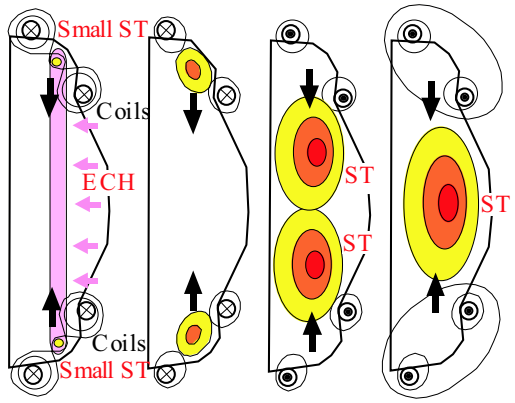


図 6.3 i: Merging start-up scenario for UTST.

＜報文＞

(原著論文)

[1] Y. Nagashima, K. Hoshino, A. Ejiri, K. Shinohara, Y. Takase, *et al.*: Observation of Nonlinear Coupling between Small-PoloidalWave-Number Potential Fluctuations and Turbulent Potential Fluctuations in Ohmically Heated Plasmas in the JFT-2M Tokamak, Phys. Rev. Lett. 95 (9), 095002 (2005).

[2] S. Ide and the JT-60 Team: Overview of JT-60U progress towards steady-state advanced tokamak, Nucl. Fusion 45 (10), S48–S62 (2005).

[3] H. Zushi, K. Nakamura, K. Hanada, ... , Y. Takase, ... : Steady-state tokamak operation, ITB transition and sustainment and ECCD experiments in TRIAM-1M, Nucl. Fusion 45 (10), S142–S156 (2005).

[4] S.M. Kaye, M.G. Bell, R.E. Bell, ... , Y. Takase, ... : Progress towards high performance plasmas in the National Spherical Torus Experiment (NSTX), Nucl. Fusion 45 (10), S168–S180 (2005).

[5] Y.-K.M. Peng, P.J. Fogarty, T.W. Burgess, ... , Y. Takase: A component test facility based on the spherical tokamak, Plasma Phys. Conroll. Fusion 47 (12B), B263–B283 (2005).

[6] H. Tamai, M. Akiba, H. Azechi, ... , Y. Takase, ... : Design study of National Centralized Tokamak facility for the demonstration of steady state high-β plasma operation, Nucl. Fusion 45 (12), 1676–1683 (2005).

[7] M. Ushigome, S. Ide, S. Itoh, E. Jotaki, O. Mitarai, S. Shiraiwa, T. Suzuki, Y. Takase, S. Tanaka, T. Fujita, P. Gohil, Y. Kamada, L. Lao, T. Luce, Y. Miura, O. Naito, T. Ozeki, P.Politzer, Y. Sakamoto and the JT-60 Team: Development of completely solenoidless tokamak operation in JT-60U, Nucl. Fusion 46 (2), 207–213 (2006).

[8] T. Fujita and the JT-60 team: Steady state operation research in JT-60U with extended pulse length, Nucl. Fusion 46 (3), S3–S12 (2006).

[9] R. Kumazawa, T. Mutoh, K. Saito, ... , Y. Takase, ... : Long-pulse plasma discharge on the Large Helical Device, Nucl. Fusion 46 (3), S13–S21 (2006).

[10] D.A. Gates, C. Kessel, J. Menard, ... , Y. Takase, ... : Progress towards steady state on NSTX, Nucl. Fusion 46 (3), S22–S28 (2006).

[11] M. Kikuchi, H. Tamai, M. Matsukawa, T. Fujita, Y. Takase, *et al.*: Overview of the National Centralized Tokamak programme, Nucl. Fusion 46 (3), S29–S38 (2006).

[12] S. Shiraiwa, K. Hanada, M. Hasegawa, H. Idei, H. Kasahara, O. Mitarai, K. Nakamura, N. Nishino, H. Nozato, M. Sakamoto, K. Sasaki, K. Sato, Y. Takase, T. Yamada, H. Zushi, and TST-2@K Group: Heating by an Electron Bernstein Wave in a Spherical Tokamak Plasma via Mode Conversion, Phys. Rev. Lett. 96 (18), 185003 (2006).

[13] A. Ejiri, Y. Takase, H. Kasahara, T. Yamada, K. Hanada, K. N. Sato, H. Zushi, K. Nakamura, M. Sakamoto, H. Idei, M. Hasegawa, A. Iyomasa, N. Imamura, K. Esaki, M. Kitaguchi, K. Sasaki, H. Hoshika, O. Mitarai, and N. Nishino: RF start-up and sustainment experiments on the TST-2@K spherical tokamak, Nucl. Fusion 46 (7), 709–713 (2006).

[14] Y. Takase, A. Ejiri, S. Shiraiwa, Y. Adachi, N. Ishii, H. Kasahara, H. Nuga, Y. Ono, T. Oosako, M. Sasaki, Y. Shimada, N. Sumitomo, I. Taguchi, H. Tojo, J. Tsujimura, M. Ushigome, T. Yamada: Plasma current start-up experiments without the central solenoid in the TST-2 spherical tokamak, accepted for publication in Nucl. Fusion (2006).

(会議抄録)

[15] Y. Takase, A. Ejiri, K. Hanada, S. Ide, O. Mitarai, S. Shiraiwa, M. Ushigome, JT-60 Team, TST-2@K Team, Plasma Current Start-up by Outboard PF Coils in JT-60U and TST-2, in Radio Frequency Power in Plasmas (Proc. 16th Top. Conf., Park City, 2005) pp. 365-368.

(学位論文)

[16] 笠原寛史：“Electron heating experiments using the high-harmonic fast wave in high dielectric constant plasmas” (博士論文).

[17] 山田琢磨：“Density Fluctuation Measurements in TST-2 Spherical Tokamak” (博士論文).

[18] 佐々木真：“The relation between MHD instability and geometry of plasma in TST-2 spherical tokamak”（修士論文）.

[19] 田口勇:「球状トカマクプラズマ立ち上げのための ワッシャーガンの製作と特性評価」（修士論文）.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[20] Y. Takase: “Plasma current start-up by outboard PF coils in JT-60U and TST-2” 16th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas and US-Japan RF Physics Workshop: Physics of Plasmas Produced by Large and Steady State RF Power, Park City, UT, April 11–13, 2005.

[21] Y. Takase: “Plasma Current Start-up Experiments without the Central Solenoid in TST-2 and Future Plans” Joint Meeting of the 3rd IAEA Technical Meeting on Spherical Tori and the 11th International Workshop on Spherical Torus, St. Petersburg, Russia, Oct. 3–6, 2005.

[22] Y. Takase: “Status of the TST-2 Spherical Tokamak and Future Plans” 47th Annual Meeting of American Physical Society Division of Plasma Physics, Denver, Oct. 24–28, 2005.

[23] T. Yamada: “Density Fluctuation Measurements in TST-2 Spherical Tokamak” 7th Australia-Japan Workshop on Plasma Diagnostics, Toki, Dec. 12–14, 2005.

[24] H.Kasahara, N.Takeuchi, K.Saito, T.Oosako, T.Seki, T.Mutoh, R.Kumazawa, Y.Takase and LHD Experimental Group: “Electron heating experiment using the high harmonic fast wave on LHD” 5th Asia Plasma Fusion Association, Jeju, Korea, Aug. 29–31, 2005.

[25] Y. Takase: “Spherical Tokamak Experiments at the University of Tokyo” Deutchland in Japan 2005 Japan-Germany Workshop, Tokyo, Sept. 26, 2005.

(国内会議)

一般講演

[26] 江尻晶：「高周波波動およびマイクロ波反射計を用いた高波数 TAE 計測模擬実験」特定領域「プラズマ燃焼のための先進プラズマ計測」シンポジウム（名古屋）2005 年 5 月 19 日–20 日

[27] 笠原寛史:「TST-2 球状トカマクにおける実験準備状況および実験計画」電気学会プラズマ研究会（東京）2005 年 8 月 4 日–5 日

[28] 山田琢磨：「反射計による球状トカマクの密度揺動測定」日本物理学会秋季大会 2005 年秋季大会（京都）2005 年 9 月 19–22 日

[29] 佐々木真:「TST-2 における平衡解析」日本物理学会秋季大会 2005 年秋季大会（京都）2005 年 9 月 19–22 日

[30] 東條寛:「TST-2 における磁気再結合現象のふるまい」第 22 回プラズマ核融合学会年会（東京）2005 年 11 月 29 日–12 月 2 日

[31] 石井菜穂：「TST-2 球状トカマクにおける電子温度の振る舞い」第 22 回プラズマ核融合学会年会（東京）2005 年 11 月 29 日–12 月 2 日

[32] 江尻晶：「マイクロ波反射計による揺動・波動計測」特定領域「プラズマ燃焼のための先進計測」C班分科会（鎌倉）2005 年 12 月 27 日–28 日

[33] 高瀬雄一：「TST-2 および JT-60U における Ip 立ち上げ・電流駆動実験」電気学会 ST 調査専門委員会兼核融合研共同研究「球状トカマク炉への展望と課題」（核融合研）2006 年 1 月 5–6 日

[34] 江尻晶：「高周波波動およびマイクロ波反射計を用いた高波数 TAE 計測模擬実験」第２回シンポジウム「プラズマ燃焼のための先進プラズマ計測」（福岡）2006 年 2 月 16 日–18 日

[35] 佐々木真，住友信幸：「TST-2 における MHD 不安定性と q 分布の関係」第 9 回若手科学者によるプラズマ研究会（那珂研）2005 年 3 月 15–17 日

[36] 東條寛：「TST-2 球状トカマクにおける磁気再結合現象に伴う構造変化」日本物理学会第 61 回年次大会（松山）2005 年 3 月 27–30 日

[37] 大迫琢也：「TST-2 における HHFW 波動加熱実験」日本物理学会第 61 回年次大会（松山）2005 年 3 月 27–30 日

招待講演

[38] 高瀬雄一：「全日本 ST 研究計画」第 22 回プラズマ核融合学会年会（東京）2005 年 11 月 29 日–12 月 2 日 シンポジウム「全日本 ST 研究計画－日本独自の ST 研究の進め方と将来展望」

[39] 高瀬雄一：「全日本 ST 研究計画」第 20 回トライアム研究会（九大）2005 年 1 月 12–13 日

(その他)

[40] 「球状トカマク TST-2 東大，プラズマ実験開始」週刊エネルギー通信 第 1053 号 平成 17 年 7 月 8 日（エンジニアリングニュース社） pp. 14–15.

[41] 「TST-2 の改造実施 東大，RF 加熱装置等」週刊エネルギー通信 第 1061 号 平成 17 年 11 月 4 日（エンジニアリングニュース社） pp. 5–7.

6.4 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。これを観測することによって、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、人類の新たな知につながる。[56, 57]

2001 年度に発足した科学研究費特定領域研究「重力波研究の新しい展開」(領域代表：坪野公夫) は今年度で終了した。この研究では、三鷹に設置された TAMA300 を用いた近傍銀河からの重力波探査と、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が、本領域研究が順調に成果をあげることができたおかげで、日本の重力波研究を重力波天文学の成立に向けて大きく前進させることができた。また、日本でも最近、宇宙空間を利用したレーザー干渉計によって重力波を検出する研究が活発になってきた。将来は日本独自の DECIGO という衛星重力波検出器を打ち上げて、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検討中である。

6.4.1 レーザー干渉計を用いた重力波の検出

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。このインストール作業が終了すれば、低周波において一層の感度向上が見込まれる。[6, 7, 8, 9, 17, 18, 27, 28, 29, 30, 48, 50, 51]

TAMA300 重力波検出器のデータ解析

TAMA では、超新星爆発などで発生すると考えられているバースト的な重力波を観測対象の 1 つとしており、その信号をターゲットにデータ解析が行なわれている。これらの信号は、数値シミュレーションなどから、10 msec 以下程度の持続時間しか持たない短い波形を持つことが知られている。しかし、その波形は、中性子星のパラメータや爆発のメカニズムに強く依存し、正確には予測しきれない。従って、予想波形を用いたマッチト・フィルタリングの手法を用いて重力波信号を探す事はできない。そこで、バースト重力波解析では、検出器出力に含まれる非定常成分を取り出すという手法が用いられる。

ただ、レーザー干渉計は、非常に高感度であるがゆえに、様々な外乱の影響を受けやすく、その出力には非定常な雑音成分も多く含まれる。その場合、バースト的な重力波は、これらの非定常雑音に埋もれてしまい、検出する事が困難になる。そこで、非定常成分の時間スケールなどの特徴を用いて、重力波信号と雑音成分を区別する手法や、観測時に記録された検出器のモニタ信号を用いて検出器の不安定動作を調べることによって非定常雑音を除去する手法を用いて、バースト重力波探査を行なっている。

TAMA300 で 2003 年末から 2004 年初めにかけて得られた観測データを解析を行なった結果、明らかな重力波イベントの証拠は見つからなかった。そこで、その結果を、銀河系内のイベントシミュレーション結果と比較することで、我々の銀河系内のイベントレートに対して 2×10^3event/sec という上限値を与えた。この値は、理論的な予測値より大きな値であり、検出器の非定常雑音に起因する偽イベントの影響を除去する事が今後の課題として明らかとなった。

また、外国のプロジェクトとの同時観測によって、雑音を除去する解析も進められ、米国の LIGO プロジェクトと共同で進めたバースト重力波解析では、それぞれの検出器単体で得られるものより良い上限値得られている。[2, 5, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 22, 23, 24, 37, 38, 39, 52, 54]

TAMA300 モニター信号の系統的解析

TAMA300 は非常に高い感度をもつために、様々な外乱によって不安定になりやすい。結果として干渉計メイン信号 (この信号に重力波の影響が含まれる) にしばしば干渉計の不安定性に起因する非定常雑音が含まれる。そのために、メイン信号に含まれるバーストイベントが本物の重力波か非定常雑音が作る偽イベントかを区別できない。そこで、このような偽イベント除去のためにメイン信号とモニター信号に異常なカップリングがないかを全てのモニター信号に対して系統的に評価した。モニター信号とはメイン信号と同時に干渉計の状態を調べるために記録されている補助信号である。本物の重力波はモニター信号に影響を与えないために、もし異常なカップリングがあれば、そのバーストイベントを非定常雑音が作った偽イベントだとわかる。我々はこの方

法でバーストイベントに含まれる偽イベントを除去した。[4, 21, 26, 31, 47]

次期大型レーザー干渉計計画 LCGT

現在、TAMA300 を含めて世界各国で稼動中の重力波検出器は、我々の銀河系内で発生した連星中性子星合体からの重力波イベントを検出するのに十分な感度を持っている。ただ、このようなイベントが発生する確率は 10^5 年に 1 回程度という非常に稀なものである。そこで、重力波を用いた本格的な天文学の創生を目指して次世代検出器の建設計画が、世界各国で進められている。

その中で、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 2 台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。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。[1, 34, 40, 53, 55]

6.4.2 宇宙空間レーザー干渉計

宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO

宇宙空間を利用したレーザー干渉計によって重力波を検出する計画を本格的に検討している。NASA/ESA では宇宙干渉計重力波検出器 LISA の開発を行っている。LISA は 500 万 km 離れた 3 つのスペースクラフト間で Michelson 型レーザー干渉計を構成することで、地上では実現不可能な 1mHz〜10mHz の低周波数の重力波を目標としている。日本でも LISA のスペースクラフト間の距離を 100 分の 1 程度として、デシ Hz（0.1Hz）の周波数を観測する DECIGO が検討されている。0.1Hz という周波数は、LISA と LIGO,LCGT などの地上干渉計の観測周波数の間にあり、重力波源としては、MBH 連星などの合体や初期宇宙起源の重力波などが挙げられる。さらに、究極の感度をもったデシ Hz 帯の干渉計を考えると、　1 年に約 10 万個の連星中性子星の合体（z =1 まで）を重力波で観測でき質量を決定できること。　ダークエネルギーを起源とした宇宙の加速膨張を直接測定できること。　インフレーション起源の背景重力波を検出できることが示されている。[10, 32, 42, 43, 45, 46]

小型衛星 DECIGO-PF

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 (DECIGO-PF) 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ことを予定している。また、この小型衛星は、ドラッグフリー技術や宇宙用レーザー光源とその安定化システムなどの技術試験だけでなく、宇宙空間の安定な環境とレーザー干渉計を用いた精密計測技術を組み合わせることで、実際の重力波観測も行うことも目指している。

この重力波検出器は、棒状の試験マスを中心が軸になるように非接触支持し、その回転変動を測ることで試験マスに働く重力波による微小な潮汐力を観測する、というものである。その検出器の地上試験として、試験マスを磁気によって非接触で浮上支持する装置の開発、微小変動を検出するためのフォトセンサーの開発などが進められている。[33, 41, 44]

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。その結果、周波数安定化は最高で $6\times10^{-13}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$、強度安定化は 10Hz 以上の領域で $3\times10^{-7}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ の安定度を実現し、空間光では制御の難しい 10Hz 以下の領域でも強度ノイズを 20dB 低下させることに成功した。[36]

可動機構の開発

本研究室では、可動機構の開発として、リニアアクチュエータの性能評価に関する研究を行っている。アクチュエータに PC 上からさまざまな指令を送り、これに対するアクチュエータの反応がどのようになっているのかについての調査を行った。使用したコマンドは以下の 6 つである。SVOF（非励磁状態）、SVON（励磁状態）、VEL（等速）、ACC（等加速）、STP（位置のステップ）、STV（速度のステップ）。まず SVOF と SVON の違いは、周波数特性として、主に

低周波の領域に現れていることがわかった。また等速コマンドにおいては、設定値のおよそ５分の１のスピードで等速運動しているということが解析によりえられた。等加速コマンドに対しては、反応するまでに数秒の時間がかかり、また設定値から得られる理論値との間に大きな乖離が見受けられた。STP コマンドは設定値が小さすぎたためか解析結果に違いが現れなかった。ただし違いが現れるよう刻み幅を大きくすると、アクチュエータの限界速度に達してしまうため確認は難しい。最後に速度のステップ指令では設定速度の約半分の速度で速度のステップ応答がなされたいることがわかった。

6.4.3 精密計測の研究

懸架点干渉計の開発

レーザー干渉計型重力波検出器の感度を低周波で制限するのは地面振動である。懸架点干渉計とは鏡の懸架点に構成される補助レーザー干渉計をセンサーとして用いた能動防振装置の一種である。この方法には、1) 非常に低雑音である、2) 振子などの受動防振系では難しい低周波で高い防振性能を持つ、といった特徴がある。特に低雑音性は、LCGT のような低温干渉計におけるヒートリンクの防振に応用できると期待されている。

当研究室では基線長 1.5 m のプロトタイプ干渉計を構築し、世界で初めて Fabry-Perot 型の懸架点干渉計を動作させることに成功した。その結果、10Hz 以下において最大で 40 dB のノイズ低減を達成した (図 6.4 a)。また、鏡の残留振動は 1/9 になり、残留速度は 1/7 に低減することができた。この成果によって地面振動のみならず、アクチュエーター雑音など、次世代大型干渉計において深刻になると予想されている雑音の低減が可能であることが示された。[3, 20, 25, 35, 49]

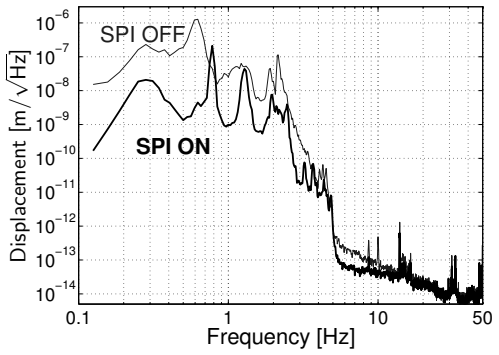


図 6.4 a: 懸架点干渉計 (SPI) の ON/OFF による、主干渉計雑音スペクトルの比較。

磁気浮上を利用した防振システム

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、永久磁石を用いて、被防振体を非接触で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防振装置の開発を行っている。その結果、700g 程度の質量を持つマスを浮上支持することに成功し、その安定性や制御特性の評価を行った。[33]

＜報文＞

(原著論文)

[1] K. Kuroda and LCGT Collaboration, The status of LCGT, Classical Quantum Gravity, **23** (2006) S215-S221.

[2] B Abbott et al. (LIGO Scientific collaboration), T Akutsu at al. (TAMA Collaboration), Joint LIGO and TAMA300 search for gravitational waves from inspiralling neutron star binaries, Phys. Rev. D (2006, in press), gr-qc/0512078

[3] Y. Aso, M. Ando, S. Otsuka and K. Tsubono: Active vibration isolation using a Suspension Point Interferometer, Journal of Physics: Conference Series **32** (2006) 451-456.

[4] K. Ishidoshiro, M. Ando, K. Tsubono, Systematic survey for monitor signals to reduce fake burst events in a gravitational-wave detector, Journal of Physics: Conference Series **32** (2006) 23-28.

[5] T. Akutsu, M. Ando, N. Kanda, D. Tatsumi, S. Telada, S. Miyoki, M. Ohashi and the TAMA Collaboration: Veto analysis for gravitational wave burst signals in TAMA300 data using an ALF filter, Class. Quantum Grav. **23**-8 (2006) S23-S28.

[6] Tatsumi, D., Arai, K. and the TAMA collaboration, Online monitoring of alignment noises in TAMA300, Journal of Physics: Conference Series, **32** (2006) 94-98.

[7] Akutsu, T., Arai, K., Sato, S. and the TAMA Collaboration, Contributions of oscillator noises to the sensitivity of TAMA300, Journal of Physics: Conference Series, **32** (2006) 105-110.

[8] Nakagawa, N., Arai, K., Kuroda, K. and the TAMA Collaboration, Influence of radio frequency harmonics to TAMA300 sensitivity, Journal of Physics: Conference Series, **32** (2006) 99-104.

[9] Sato, S., Arai, K., Akutsu, T. and the TAMA collaboration, Analysis of the laser noise propagation mechanism on the laser interferometer gravitational wave antenna, Journal of Physics: Conference Series, **32** (2006) 74-79.

[10] S. Kawamura, T. Nakamura, M. Ando, N. Seto, K. Tsubono, K. Numata, R. Takahashi, S. Nagano, T. Ishikawa, M. Musha, K. Ueda, T. Sato, M.

Hosokawa, K. Agatsuma, T. Akutsu, K. Aoyanagi, K. Arai, A. Araya, H. Asada, Y. Aso, T. Chiba, T. Ebisuzaki, Y. Eriguchi, M. Fujimoto, M. Fukushima, T. Futamase, K. Ganzu, T. Harada, T. Hashimoto, K. Hayama, W. Hikida, Y. Himemoto, H. Hirabayashi, T. Hiramatsu, K. Ichiki, T. Ikegami, K. T Inoue, K. Ioka, K. Ishidoshiro, Y. Itoh, S. Kamagasako, N. Kanda, N. Kawashima, H. Kirihara, K. Kiuchi, S. Kobayashi, K. Kohri, Y. Kojima, K. Kokeyama, Y. Kozai, H. Kudoh, H. Kunimori, K. Kuroda, K. Maeda, H. Matsuhara, Y. Mino, O. Miyakawa, S. Miyoki, H. Mizusawa, T. Morisawa, S. Mukohyama, I. Naito, N. Nakagawa, K. Nakamura, Hi. Nakano, K. Nakao, A. Nishizawa, Y. Niwa, C. Nozawa, M. Ohashi, N. Ohishi, M. Ohkawa, A. Okutomi, K. Oohara, N. Sago, M. Saijo, M. Sakagami, S. Sakata, M. Sasaki, S. Sato, M. Shibata, H. Shinkai, K. Somiya, H. Sotani, N. Sugiyama, H. Tagoshi, T. Takahashi, H. Takahashi, R. Takahashi, T. Takano, T. Tanaka, K. Taniguchi, A. Taruya, H. Tashiro, M. Tokunari, S. Tsujikawa, Y. Tsunesada, K. Yamamoto, T. Yamazaki, J. Yokoyama, C. Yoo, S. Yoshida and T. Yoshino: The Japanese space gravitational wave antenna.DECIGO, Class. Quantum Grav. **23**-8 (2006) S125-S131.

[11] Tsunesada, Y., Kanda, N., Nakano, H., Tatsumi, D., Ando, M., Sasaki, M., Tagoshi, H. and Takahashi, H., On detection of black hole quasinormal ringdowns: Detection efficiency and waveform parameter determination in matched filtering, Phys. Rev., **D71** (2005) 103005-1-10.

[12] S.Fairfurst for the LIGO Scientific Collaboration and H.Takahashi the TAMA Collaboration, "Status of the joint LIGO-TAMA300 inspiral analysis", Class. Quant. Grav., **22**, S1109 (2005).

[13] Y Tsunesada, N Kanda, H Nakano, D Tatsumi and the TAMA Collaboration, Black hole ringdown search in TAMA300: Matched filtering and event selections, Class. Quantum Grav. 22 No.18 (2005) S1129-S1138

[14] M Ando, et al. the TAMA collaboration, Upper limits on gravitational wave bursts radiated from stellar-core collapses in our Galaxy, Class. Quantum Grav. 22 No.18 (2005) S1283-S1291

[15] T Akutsu, et al. the TAMA collaboration, Burst wave analysis of TAMA300 data with the ALF filter, Class. Quant. Grav. 22 No.18 (2005) S1303-S1309

[16] H Takahashi, et al. LIGO Scientific Collaboration and the TAMA Collaboration, Current status of the joint LIGO-TAMA inspiral analysis, Class. Quant. Grav. 22 No 18 (2005) S1109-S1118

[17] M. Ando and the TAMA Collaboration, Current status of the TAMA300 gravitational-wave detector, Class. Quantum Grav. 22 (2005) S881.

[18] S Telada, D Tatsumi, T Akutsu, M Ando, N Kanda and the TAMA Collaboration, Calibration of TAMA300 in time domain, Class. Quantum Grav. 22 No 18 (2005) S975-S984

[19] B Abbott et al. (LIGO Scientific collaboration), T Akutsu at al. (TAMA Collaboration), Upper limits from the LIGO and TAMA detectors on the rate of gravitational-wave bursts, Phy. Rev. D **72**-12 (2005) 122004.

(学位論文)

[20] 麻生洋一：Active Vibration Isolation for a Laser Interferometric Gravitational Wave Detector using a Suspension Point Interferometer, 博士論文、2006 年.

[21] 石徹白晃治：干渉計モニター信号の系統的解析による偽重力波イベント除去, 修士論文、2006 年.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[22] M. Ando, K. Ishidoshiro, and the TAMA Collaboration Data conditioning and veto for TAMA burst analysis, GWDAW-10 Gravitational Wave Data Analysis Workshop (December 14, 2005, University of Texas at Brownsville, U.S.A.).

[23] M. Ando, T. Akutsu, T. Akutsu, K. Arai, Y. Aso, M. Fukushima, K. Hayama, N. Kanda, K. Kondo, N. Mio, S. Miyoki, S. Moriwaki, S. Nagano, S. Sato, M. Shibata, H. Tagoshi, H. Takahashi, R. Takahashi, D. Tatsumi, Y. Tsunesada, T. Yamazaki, and the TAMA collaboration, Upper limits on gravitational wave bursts radiated from stellar-core collapses in our Galaxy, 6th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (June 20-24, 2005, Okinawa, Japan).

[24] P. Sutton, M. Ando, for the LIGO and TAMA collaborations, Upper Limits from LIGO and TAMA on Gravitational-Wave Bursts, 6th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (June 20-24, 2005, Okinawa, Japan).

[25] Y. Aso, Active vibration isolation using a suspension point interferometer, Systematic survey of monitor signals to reject fake events, 6th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (June 2005, Bankoku-Shinryokan Okinawa, Japan).

[26] K. Iishidoshrio, M. Ando and K. Tsubono: Systematic survey of monitor signals to reject fake events, 6th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (June 2005, Bankoku-Shinryokan Okinawa, Japan).

招待講演

[27] K. Tsubono: Current Status of TAMA300 interferometer, CLEO/QELS Joint Symposium: Gravitational Wave Detection, (May 2005, Baltimore, USA).

(国内会議)

一般講演

[28] 高橋竜太郎，新井宏二，佐藤修一，阿久津智忠，中川憲保，辰巳大輔，常定芳基，福嶋美津広，山崎利孝，高森昭光，飯田幸美，A. Bertolini，R. DeSalvo，三代木伸二，長野重夫，安東正樹，森脇成典，神田展行，武者満，三尾典克，川村静児，藤本眞克，坪野公夫，大橋正健，黒田和明，TAMA Collaboration, 干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 IV（低周波防振装置）, 日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会（2006 年 3 月、愛媛大学・松山大学）.

[29] 新井宏二，佐藤修一，高橋竜太郎，阿久津智忠，中川憲保，辰巳大輔，常定芳基，福嶋美津広，山崎利孝，高森昭光，飯田幸美，A. Bertolini，R. DeSalvo，三代木伸二，長野重夫，安東正樹，森脇成典，神田展行，武者満，三尾典克，川村静児，藤本眞克，坪野公夫，大橋正健，黒田和明，TAMA Collaboration, 干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 V（干渉計開発）, 日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会（2006 年 3 月、愛媛大学・松山大学）.

[30] 佐藤修一，新井宏二，高橋竜太郎，阿久津智忠，中川憲保，辰巳大輔，常定芳基，福嶋美津広，山崎利孝，高森昭光，飯田幸美，A. Bertolini，R. DeSalvo，三代木伸二，長野重夫，安東正樹，森脇成典，神田展行，武者満，三尾典克，川村静児，藤本眞克，坪野公夫，大橋正健，黒田和明，TAMA Collaboration, 干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 VI（要素技術）, 日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会（2006 年 3 月、愛媛大学・松山大学）.

[31] 石徹白晃治，安東正樹，坪野公夫 , 干渉計モニター信号を用いた偽重力波イベントの除去 2, 日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会（2006 年 3 月、愛媛大学・松山大学）.

[32] 川村静児，中村卓史，安東正樹，坪野公夫，沼田健司，瀬戸直樹，高橋龍一，長野重夫，石川毅彦，植田憲一，武者満，細川瑞彦，佐藤孝，佐藤修一，苔山圭以子，我妻一博，青柳巧介，阿久津智忠，浅田秀樹，麻生洋一，新井宏二，新谷昌人，井岡邦仁，池上健，石徹白晃治，市耒淨與，伊藤洋介，井上開輝，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，奥冨聡，鎌ヶ迫将悟，河島信樹，神田展行，雁津克彦，木内建太，桐原裕之，工藤秀明，國森裕生，黒田和明，郡和範，古在由秀，小嶌康史，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，柴田大，真貝寿明，杉山直，宗宮健太郎，祖谷元，高野忠，高橋忠幸，高橋弘毅，高橋竜太郎，田越秀行，田代寛之，田中貴浩，谷口敬介，樽家篤史，千葉剛，辻川信二，常定芳基，徳成正雄，内藤勲夫，中尾憲一，中川憲保，中野寛之，中村康二，西澤篤志，丹羽佳人，野沢超越，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，藤本眞克，二間瀬敏史，前田恵一，松原英雄，水澤広美，蓑泰志，宮川治，三代木伸二，向山信治，森澤理之，森脇成典，柳哲文，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 V , 日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会（2006 年 3 月、愛媛大学・松山大学）.

[33] 安東正樹，池本尚史，小林洸，坪野公夫, 低周波重力波検出器の開発, 日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会（2006 年 3 月、愛媛大学・松山大学）.

[34] 黒田和明，その他 LCGT グループ, 大型低温重力波望遠鏡（LCGT）計画 X, 日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会（2006 年 3 月、愛媛大学・松山大学）.

[35] 麻生洋一，安東正樹，Riccardo DeSalvo，大塚茂巳，南城良勝，坪野公夫, Suspension Point Interfereometer による低周波防振 VII, 日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会（2006 年 3 月、愛媛大学・松山大学）.

[36] 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の強度・周波数安定化, 日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会（2006 年 3 月、愛媛大学・松山大学）.

[37] 阿久津朋美，安東正樹，神田展行，辰巳大輔，寺田聡一，三代木伸二，大橋正健，他 TAMA Collaboration, ALF フィルタを用いた TAMA300 データのバースト重力波解析 IV, 日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会（2006 年 3 月、愛媛大学・松山大学）.

[38] 本多了太，安東正樹，田越秀行，辰巳大輔，粟家律親，徳田充，神田展行, 多変量クラスターを用いた TAMA300 データのバースト重力波解析, 日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会（2006 年 3 月、愛媛大学・松山大学）.

[39] 田越秀行，高橋弘毅，神田展行，辰巳大輔，安東正樹，佐合紀親，常定芳基，他 TAMA Collaboration, TAMA300 による合体するコンパクト連星探査, 日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会（2006 年 3 月、愛媛大学・松山大学）.

[40] 大橋正健，黒田和明，三代木伸二，内山隆，山元一広，徳成正雄，阿久津朋美，鎌ヶ迫将悟，中川憲保，我妻一博，桐原裕之，新冨孝和，山本明，春山富義，鈴木敏一，佐藤伸明，都丸隆行，竹本修三，福田洋一，東敏博，早河秀章，川崎一朗，赤松純平，森井亙，新谷昌人，高森昭光，辰巳大輔，佐藤忠弘，安東正樹，寺田聡一, 低温レーザー干渉計 CLIO(IX), 日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会（2006 年 3 月、愛媛大学・松山大学）.

[41] 安東 正樹, DECIGO-WG, DECIGO パスファインダー 1, 宇宙重力波干渉計検討会 (2006 年 02 月 24 日 国立天文台, 東京).

[42] 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, 平林 久, 高野 忠, 藤本 眞克, 樽家 篤史, 姫本 宣朗, 柳 哲文, 中尾 憲一, 原田 知広, 井岡 邦仁, 佐合 紀親, 疋田 渉, 佐藤 修一, 苔山 圭以子, 福嶋 美津広, 國森 裕生, 山崎 利孝, 大河 正志, 橋本 樹明, 高橋 忠幸, 青柳 巧介, 我妻 一博, 阿久津 智忠, 浅田 秀樹, 麻生 洋一, 新井 宏二, 新谷 昌人, 池上 健, 石徹白 晃治, 市耒 淨與, 伊藤 洋介, 井上 開輝, 戎崎 俊一, 江里口 良治, 大石 奈緒子, 大橋 正健, 大原 謙一, 奥冨 聡, 鎌ヶ迫 将悟, 河島 信樹, 川村 麻里, 神田 展行, 雁津 克彦, 木内 建太, 桐原 裕之, 工藤 秀明, 黒田 和明, 郡 和範, 古在 由秀, 小嶌 康史, 小林 史歩, 西條 統之, 阪上 雅昭, 阪田 紫帆里, 佐々木 節, 柴田 大, 真貝 寿明, 杉山 直, 宗宮 健太郎, 祖谷 元, 高橋 弘毅, 高橋 龍一, 高

橋 竜太郎, 田越 秀行, 田代 寛之, 谷口 敬介, 千葉 剛, 辻川 信二, 常定 芳基, 徳成 正雄, 内藤 勲夫, 中川 憲保, 中野 寛之, 中村 康二, 西澤 篤志, 丹羽 佳人, 野沢 超越, 端山 和大, 平松 尚志, 二間瀬 敏史, 前田 恵一, 松原 英雄, 水澤 広美, 蓑 泰志, 宮川 治, 三代木 伸二, 向山 信治, 森澤 理之, 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, 第 6 回宇宙科学シンポジウム (2006 年 1 月 6 日 宇宙科学研究本部 相模原, 神奈川).

[43] 坪野公夫, 測距技術の開発, スペース重力波アンテナ (DECIGO) WG 第 3 回ミーティング (2005 年 5 月 12 日 国立天文台, 東京).

[44] 安東 正樹, 小型衛星パスファインダーによる総合的試験, スペース重力波アンテナ (DECIGO) WG 第 3 回ミーティング (2005 年 5 月 12 日 国立天文台, 東京).

[45] 安東 正樹, 光共振型 DECIGO の可能性, スペース重力波アンテナ (DECIGO) WG 第 3 回ミーティング (2005 年 5 月 12 日 国立天文台, 東京).

[46] 川村静児，中村卓史，安東正樹，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，沼田健司，平林久，高野忠，藤本眞克，樽家篤史，姫本宣朗，柳哲文，中尾憲一，原田知広，井岡邦仁，佐合紀親，疋田渉，佐藤修一，苔山圭以子，福嶋美津広，國森裕生，山崎利孝，大河正志，橋本樹明，青柳巧介，我妻一博，阿久津智忠，浅田秀樹，麻生洋一，新井宏二，新谷昌人，池上健，石徹白晃治，市耒淨與，伊藤洋介，井上太郎，江里口良治，大石奈緒子，大橋正健，大原謙一，奥冨聡，鎌ヶ迫将悟，河島信樹，川村麻里，神田展行，雁津克彦，木内建太，工藤秀明，黒田和明，郡和範，古在由秀，小鳥康史，小林史歩，西條統之，阪上雅昭，阪田紫帆里，佐々木節，柴田大，真貝寿明，杉山直，祖谷元，高橋弘毅，高橋龍一，高橋竜太郎，田越秀行，田代寛之，谷口敬介，千葉剛，辻川信二，常定芳基，徳成正雄，内藤勲夫，中野寛之，中村康二，西澤篤志，丹羽佳人，野沢超越，端山和大，平松尚志，二間瀬敏史，前田恵一，松原英雄，水澤広美，蓑泰志，宮川治，三代木伸二，向山信治，森澤理之，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 IV , 日本物理学会 2005 年秋季大会（2005 年 9 月、大阪市立大学）.

[47] 石徹白晃治，安東正樹，坪野公夫干渉計モニター信号を用いた偽重力波イベントの除去, 日本物理学会 2005 年秋季大会（2005 年 9 月、大阪市立大学）.

[48] 佐藤修一，新井宏二，高橋竜太郎，阿久津智忠，中川憲保，辰巳大輔，常定芳基，福嶋美津広，山崎利孝，高森昭光，飯田幸美，A. Bertolini，R. DeSalvo，三代木伸二，長野重夫，安東正樹，森脇成典，神田展行，武者満，三尾典克，川村静児，藤本眞克，坪野公夫，大橋正健，黒田和明，TAMA Collaboration 干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 III (変調系雑音), 日本物理学会 2005 年秋季大会（2005 年 9 月、大阪市立大学）.

[49] 麻生洋一，安東正樹，Riccardo DeSalvo，大塚茂巳，南城良勝，坪野公夫, Suspension Point Interfereometer による低周波防振 VI, 日本物理学会 2005 年秋季大会（2005 年 9 月、大阪市立大学）.

[50] 新井宏二，佐藤修一，高橋竜太郎，阿久津智忠，中川憲保，辰巳大輔，常定芳基，福嶋美津広，山崎利孝，高森昭光，飯田幸美，A.Bertolini，R.DeSalvo，三代木伸二，長野重夫，安東正樹，森脇成典，神田展行，武者満，三尾典克，川村静児，藤本眞克，坪野公夫，大橋正健，黒田和明，TAMA Collaboration 干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 II (干渉計開発), 日本物理学会 2005 年秋季大会（2005 年 9 月、大阪市立大学）.

[51] 高橋竜太郎，新井宏二，佐藤修一，阿久津智忠，中川憲保，辰巳大輔，常定芳基，福嶋美津広，山崎利孝，高森昭光，飯田幸美，A. Bertolini，R. DeSalvo，三代木伸二，長野重夫，安東正樹，森脇成典，神田展行，武者満，三尾典克，川村静児，藤本眞克，坪野公夫，大橋正健，黒田和明，TAMA Collaboration 干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 I (低周波防振装置) , 日本物理学会 2005 年秋季大会（2005 年 9 月、大阪市立大学）.

[52] 安東正樹，阿久津朋美，阿久津智忠，新井宏二，麻生洋一，福嶋美津広，端山和大，神田展行，近藤寿浩，三尾典克，三代木伸二，森脇成典，長野重夫，佐藤修一，柴田大，田越秀行，高橋弘毅，辰巳大輔，常定芳基，山崎利孝，他 TAMA Collaboration, TAMA300 データを用いたバースト重力波解析 V, 日本物理学会 2005 年秋季大会（2005 年 9 月、大阪市立大学）.

[53] 内山隆，黒田和明，大橋正健，三代木伸二，山元一広，徳成正雄，阿久津朋美，鎌ヶ迫将悟，中川憲保，新冨孝和，山本明，春山富義，鈴木敏一，佐藤伸明，都丸隆行，竹本修三，早河秀章，新谷昌人，高森昭光，辰巳大輔，安東正樹，寺田聡一, 低温レーザー干渉計 CLIO(VIII), 日本物理学会 2005 年秋季大会（2005 年 9 月、大阪市立大学）.

[54] 田越秀行，高橋弘毅，神田展行，辰巳大輔，安東正樹，佐合紀親，常定芳基，他 TAMA Collaboration, TAMA300 による合体する連星中性子星探査, 日本物理学会 2005 年秋季大会（2005 年 9 月、大阪市立大学）.

[55] 寺田聡一，黒田和明，大橋正健，三代木伸二，内山隆，山元一広，徳成正雄，阿久津朋美，鎌ヶ迫将悟，中川憲保，新冨孝和，山本明，春山富義，鈴木敏一，佐藤伸明，都丸隆行，竹本修三，早河秀章，新谷昌人，高森昭光，辰巳大輔，安東正樹, 低温レーザー干渉計 CLIO(VII), 日本物理学会 2005 年秋季大会（2005 年 9 月、大阪市立大学）.

招待講演

[56] 坪野公夫, 重力波検出実験の最前線, 首都大学東京・物理学教室談話会 (2005 年 7 月 15 日 首都大学東京, 南大沢)

[57] 安東 正樹, the TAMA and LCGT collaboration, 重力波干渉計の技術の進歩, TAMA300 の結果と日本の将来計画 LCGT, 「重力波研究の現状と展望」シンポジウム (日本物理学会 第 61 回年会 2006 年 03 月 28 日 松山大学, 愛媛).

6.5 佐野研究室

佐野研究室では、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。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言った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。

6.5.1 非線形非平衡系の物理学

液晶対流中にみられる欠陥構造の安定化の研究

液晶はその異方性がゆえに温度変化や電圧の印加、磁場の影響によって、静的にも動的にも様々な配向秩序を持ち、非平衡系の秩序形成のモデルとしてよい性質を持っている。

MBBA 液晶に電場を印加すると周期的なロール構造が出来ることが知られている。従来平行配向セルでは、電場の印加に伴いロール構造中に点欠陥ができ動的に生成消滅を繰り返すことが知られていた。しかし本研究においてねじれ配向セルを使用することで、形成される欠陥が点では無く線上であり、電場の印加に伴いさらに高次構造を形成することを発見した (図 6.5 a)。 [4, 22]

粉体ガスの統計力学

粉体は熱ゆらぎの効かないマクロな物質でありながら、外力による駆動で固相、液相、気相的な振舞いを示すことが知られている。本研究では粉体系の統計力学の構築を目的とし、外部振動及びランダム

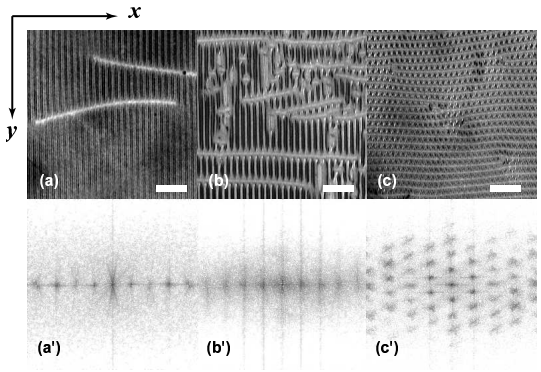


図 6.5 a: ロール構造中に出来た欠陥と高次構造形成。下段は対応する 2 次元フーリエ画像。(a) 13.93 V ($\epsilon = 0.47$)、(b) 15.91 V ($\epsilon = 0.91$)、(c) 19.23 V ($\epsilon = 1.79$)。白線は 200 μm。

表面を用いて理想的な粉体ガス系を構築し、高速度カメラを用いた粒子追跡法により速度分布関数の決定を行った。境界との摩擦が無視できる微小重力下での実験（放物フライトによる航空機実験）及び地上実験の結果から、ある程度強い外力のもとでは定常状態の速度分布関数が $f(v) \propto \exp(-\alpha |v|^{1.5})$ に従うことが分かった。この結果は粉体ガス状態が非弾性衝突によって励起されているとする T. P. C. van Noije、M. H. Ernst らの提唱した理論と良く合致する。一方、外部駆動停止後の自由冷却粉体ガス状態では、速度分布の指数が定常状態の “1.5” から “1” に変化するという理論予測と異なり、定常状態の分布が維持される実験結果が得られた。自由冷却状態を精密に測定した実験は世界でも例が無く、これらの結果は冷却状態を記述する新たな理論の必要性を示唆する非常に重要な結果である。[27, 41, 50, 55]

せん断流の下でのパターン形成

化学反応によるパターン形成の基本的なモデルである 2 次元 Brusselator モデルにせん断流を加えたときの系の応答について調べた。流れの大きさがある閾値以下では hexagnoal パターンは安定であることが分かった。また hexagonal 格子の歪みの角度に対する運動方程式を Brusselator 方程式から導き、有限の角度で安定な解が存在することを示した。さらに流れの強い極限では流れに平行な stripe パターンのみ安定であることを示した。 [8, 28]

時空カオス相転移の研究

相転移は非平衡系においても重要な状態であり、非平衡にしか存在しないユニバーサリティクラスが数多く発見されるなど、目を引く報告が相次いでいる。しかし、それにもかかわらず非平衡相転移は定義にすら統一的な見解はない。そこで本研究では、

ある時空カオス力学系を対象にして、系に埋め込まれた不安定周期軌道の分布に着目し、その分布の主要項が特異的な場合に相転移が起こることを示した。そしてこの分布の特異性から相転移とその次数を定義する方法を提示し、さらに転移点近傍で局所的な制御変数を温度のように扱える場合があることが分かった。以上の関係は広い範囲の時空カオス力学系において成り立つものと期待される。

非平衡相転移の現象面に関しては、大きな未解決問題として、何がユニバーサリティクラスを分ける決定因子なのかがわかっていないことが挙げられる。Ising 的な時空カオス系ではアップデートの同期性が影響するという報告が近年なされたが、本研究ではセルオートマトンは同期の有無によらず Ising クラスになることを数値的に示した。これにより同期の有無だけがクラスを分ける要素ではないことが明らかになった。 [13, 29, 42, 51, 56]

垂直加振によるシェアシニング物質のパターン形成

非平衡状態では様々なパターンが自発的に形成される。本研究では、ずり応力により流動化する shear-thinning 物質を垂直加振することによって、図 6.5 b に示すような新奇なパターンを発見した。このパターンの特徴はある加速度をこえた際に上壁と側壁が無い状態で対流現象が見られることにあり、自由境界で出現する新奇な対流現象である。周波数と体積で対流の直径が自発的に定まり、対流開始の振動加速度 (Γ_c) は周波数に比例する。さらに、対流の開始は降伏応力で無次元化した量で特徴付けられ、回転速度 (v) と振動加速度 (Γ) には、$v \sim (\Gamma - \Gamma_c)^{1.5}$ の関係が成立することが明らかになった。また側壁の存在する場合でも類似した現象が生じ、対流の回転方向が側壁に対し垂直方向であるなどの特徴を見出した。 [23, 43]

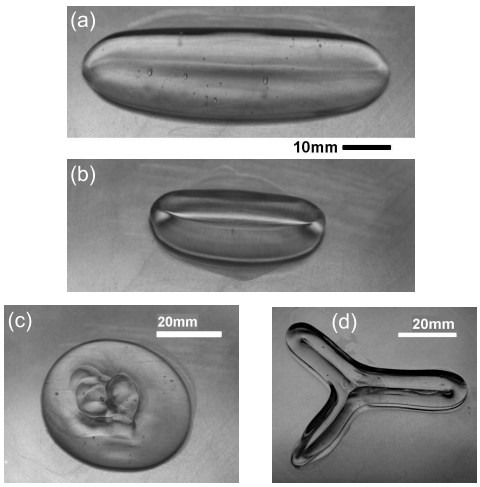


図 6.5 b: 垂直加振下で現れるシェアシニング物質のパターン

非平衡定常状態におけるエネルギー散逸の測定

非平衡状態において、エネルギー散逸は重要な意味を持っていると考えられるが、これを実験的に測定することは一般的に困難である。最近、原田氏と佐々氏によって、非平衡定常状態におけるエネルギー散逸に関する等式が提出された。この原田-佐々等式を用いることで、速度の時間相関関数および応答関数といった実験的に比較的容易に得られる量から、エネルギー散逸を計算可能である。また、揺動散逸定理からのずれとエネルギー散逸を直接結びつけるという点で、この等式は重要な意味を持っていると我々は考えている。そこで、レーザーピンセットを用いてマイクロメートルサイズの微小粒子をトラップし、この粒子の挙動を観察することで原田-佐々等式の検証を行った。 [52, 57]

6.5.2 非平衡ソフトマターの物理学

AFM を用いたタンパク質の一分子伸張実験

タンパク質は固有の三次元構造を変化させることで機能を発現しており、その自発的構造形成（フォールディング）のメカニズムは、現在盛んに研究が行われている。我々は原子間力顕微鏡（AFM) を用いてタンパク質の力学的伸張を行うことにより、一分子レベルでのフォールディング過程のダイナミクスを明らかにすることを目指した。これまでの伸張実験では反復構造をもつ分子量の大きなタンパク質が主に用いられていたが、本研究では比較的低分子量で単純な構造をもつ Staphylococcul Nuclease (SNase) を用いて伸張を行い、より詳細なフォールディング過程に関する情報を得ることを目的としている。本研究においては負荷および速度をパラメータとする 2 つの異なる方法で SNase を伸張し、力学的構造変化の途中過程を調べた。その結果、アンフォールドする部位が負荷に依存すること、またアンフォールド経路が伸張速度によって多様に変化し得ることが示された（図 6.5 c)。さらに緩和過程においてはリフォールディングが観測された。今後はこれらの測定をより定量的に行うことにより、タンパク質のフォールディング過程の統計力学的性質を明らかにしたい。 [20]

分子内凝縮した 1 分子ＤＮＡの可視化

イオン環境の変化によるＤＮＡの凝縮転移は、静電相互作用が引き起こすユニークな現象の一つであるが、その力学的安定性の解明は今日の重要な研究課題である。これまでに我々は凝縮転移下における 1 分子ＤＮＡの張力測定を行い、スペルミジン 3+ (SPD) により凝縮したＤＮＡは、SPD 濃度に依存して 2 つの特徴的な力学応答（プラトー応答と周期的スティックリリース応答）を示すことを明らかにしてきた。本年度は伸張による脱凝縮と力学応答の関係を明らかにするため、蛍光色素（YOYO）を用いて

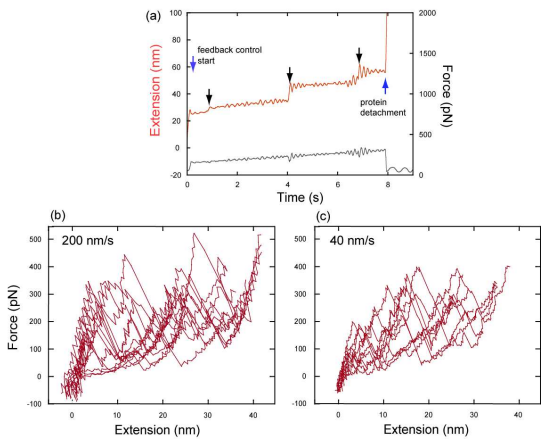


図 6.5 c: (a) 負荷を一定の割合で上昇させて伸張したときのアンフォールド過程。(b),(c) 伸張速度 200 nm/s, 40 nm/s でのアンフォールド過程。

ＤＮＡを可視化し、脱凝縮過程の直接観測を行った。その結果、分子内凝縮したＤＮＡでは凝縮部位を示すと考えられる輝点が観測され、伸張に伴い輝点の蛍光強度は減少するがその位置は保たれることが分かった（図 6.5 d)。この結果は脱凝縮が凝縮部位を維持したまま進行していることを示しており、凝縮ＤＮＡの力学的安定性を議論する上で重要な意味を持つ。 [12, 24, 26, 30, 34, 40, 53]

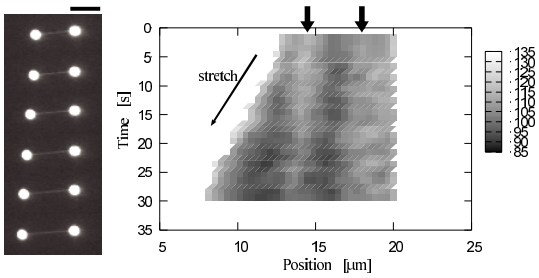


図 6.5 d: 左：凝縮ＤＮＡ伸張時の蛍光像（20 mM SPD, 0.1 μM YOYO, scale bar = 10 μm. 両端はレーザーでトラップされたビーズ)。右：伸張時の蛍光強度の時間変化。

柔らかい機械の機能性

生体の活動は様々な分子機械が支えている。これらの “機械” は一般に柔らかく、大きく揺らぐ場に存在している。よって頑丈でよく制御されたマクロな機械に馴染んだ我々にとって、分子機械の持つ高い機能性は即座に理解し難い。

ではこのような柔らかい機械の動作原理は、硬く頑丈な機械のそれと比べどこが異なり、何が可能（不可能）になるのか。そこでやや抽象的であるが、結合した歯車を機械のモデルとして考え、以下の例題を通し上記の問を議論した。“３つの歯車を各々が他の二つと接触するように正三角形状に置き、何れか一つにトルクをかける。すると残り２つの歯車には相反する方向のトルクがかかる (フラストレーション)。この場合、もしこれらの歯車が硬く頑丈なものならば、これらの歯車は歯を壊さない限り回転できない。では個々の歯車が柔らかく、幾らか変形可能ならばどうであろうか？ [9]” このような例題から、柔らかい機械がむしろフラストレーションを利用して機能し得る事を見出した。また、環境が揺らぐ事によって現れる機能 [2] 等についても議論した。

6.5.3 生命現象の物理学

遺伝子ネットワークのダイナミクス, 揺らぎ

生命は分子によって構成された「システム」であり、その本質はシステムの構造と振る舞いにある。発生・分化は一方向的に進み、生命に不可逆性を与える。更に分化が「いつ」「どこで」行われるかは非常に正確に規定されている。しかしながら、分子数揺らぎを内包しつつ正確に細胞運命を決定し、細胞状態を頑強に保持するシステムは生物学的にも物理的にも未解明である。本研究ではこの未解決問題の解明を目指し、λファージの分化に関わる遺伝子ネットワークを用いて実験的・理論的解析を行った。溶原化に関わる *cI* 遺伝子から成る遺伝子ネットワークを大腸菌内で再構成し、*in vivo* で遺伝子発現ダイナミクスを測定した。その結果、(1) λファージの溶原化状態は *cI* 遺伝子に備わる正の制御が生み出す多重安定性によって強固に保たれること, (2) 正の制御が生み出す遺伝子発現の時間遅れが正確な細胞運命決定に寄与しうることを見出した。 [7, 18, 31, 46, 66]

今後は細胞運命の決定時期を正確に規定するシステムを解明するため、一細胞レベルでの遺伝子発現ダイナミクス測定を行う。この研究により、分子数揺らぎを打破しつつ正確に細胞運命を決定づけるシステムの解明が期待される。 [25, 47, 63, 66]

画像解析による粘菌細胞の運動パターン分析

細胞運動とは、細胞の移動、仮足の伸張および細胞膜における波の伝播といった現象を示し、生細胞が行う基本的現象である。細胞運動がどのようにして内部のタンパク質系から生成されているのか、また細胞運動がどのような法則に従うものかは未だ理解されておらず、活発な研究が続けられている。今回我々は特に細胞性粘菌のアメーバ細胞を対象とし、このアメーバ細胞の運動の様子を画像分析することによって、その運動パターンがどのような性質を持つものかを詳細に検討した。

粘菌細胞は特に富栄養状態と飢餓状態それぞれの状態について分析が行われた。分析量にはアメーバ細胞の形態および重心の速度が運動解析の焦点におかれ、それぞれ一次元の場として記述されるものとした。この形態場と速度場の実測データから、それ

らの時間相関関数を計算することにより、富栄養状態と飢餓状態の各々の状態について時間相関関数の対象性が異なることが見出された (図 6.5 e)。このような運動分析により、細胞性粘菌の運動の様式の時間的変化が明示的にとらえられ、運動がどのように生成されているかを理解する上で重要な知見を見出すことができた。 [21, 32, 67]

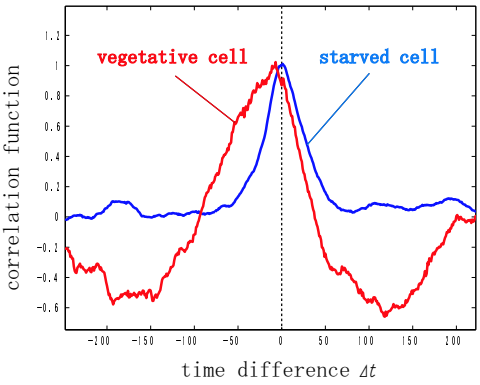


図 6.5 e: 栄養状態の細胞と飢餓状態の細胞について、運動速度と運動方向への変形度との時間相関関数。

細胞内局所カルシウムダイナミクスの観測と解析

Ca^{2+} シグナルは、生体内で働く 2 次メッセンジャーの中でも非常に普遍的に見られるもので、神経系における可塑性や発生分化など、生命にとって重要な多くの過程に深く関わっていることが知られている。細胞内 Ca^{2+} プールからの放出は、多くの細胞においてイノシトール 1,4,5 三リン酸受容体 (IP3R) による。IP3R は、細胞内 Ca^{2+} プール（通常は小胞体）の膜状に ～ 25 程度のクラスターを形成して存在していると考えられており、これらのクラスター同士が協同的に開口して Ca^{2+} を放出することにより、細胞質全体の Ca^{2+} 濃度が上昇するとされる。

今回、我々は全反射型蛍光顕微鏡（TIRFM）及び独自に開発した自動検出アルゴリズムを用いて、HeLa 細胞の細胞質基底部における局所的な Ca^{2+} シグナル （Ca^{2+} パフ）の検出に成功した。また、多くの従来の研究で用いられていた共焦点顕微鏡のラインスキャンモードに替わって TIRFM を用いた結果、ひとつの細胞全体の 2 次元データを十分に速いレート（～ 50 Hz）で観察できるようになった。細胞内における Ca^{2+} パフの頻度および空間分布は、細胞質全体の Ca^{2+} 濃度上昇に先立ってそれぞれ大きく広くなり、局所的な Ca^{2+} パフがグローバルな Ca^{2+} シグナルの building block であるという従来からの見解を支持する結果が得られた。また、Ca^{2+} パフの持続時間（～ 100 msec）と空間的広がりから、Ca^{2+} パフが Ca^{2+} イオンの拡散に規定された現象であり、IP3R クラスターひとつの活性化に対応することを示唆することを示した（図 6.5 f)。 [19]

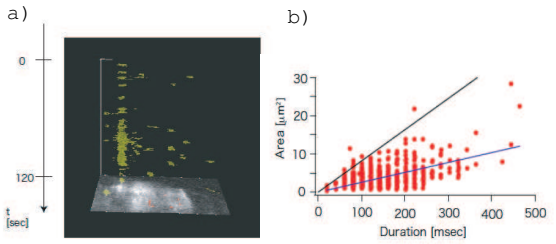


図 6.5 f: a) Ca^{2+} パフの時空間分布。上下方向が時間軸を示す。 b) Ca^{2+} パフの持続時間（Duration）と空間的広がり（Area）の散布図。図中黒実線は報告された Ca^{2+} イオンの拡散係数を用いて計算した面積。

バクテリアコロニーのパターン形成機構

大腸菌のような細菌は、寒天培地上で巨視的なコロニーを形成する。細菌は寒天ゲルの中に入り込まず、準二次元的なパターン形成と見なすことが出来、培地条件を変えることで多様なコロニーパターンが見られる（図 6.5 g)。本研究ではパターン形成メカニズムの解明を目指し、形成過程における成長先端のダイナミクス解析を行なった。その結果、パターンにより界面速度が異なっており、成長先端速度の相違がパターンに影響していることが示された。また、巨視的には準二次元だと思われていたコロニーだが、レーザー変位計を用いることで微視的には高さの相違が確認された。高さは細胞密度を表しており、細胞密度の違いがパターンに影響している事が分かった。さらに、周期成長パターンにおいて輝度が高い所は、細胞密度が高い所であり、進行・停止という規則的な周期運動をしながら成長していることが明らかになった。今後は、パターン形成過程における微視的な細胞運動を追うことにより、巨視的なコロニーパターンを解明していく。 [60]

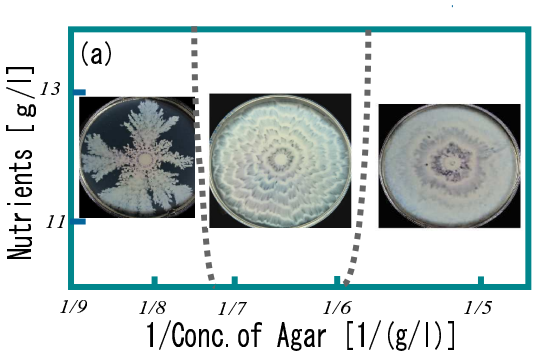


図 6.5 g: 大腸菌の *morphological* diagram:横軸は寒天濃度，縦軸は栄養濃度を示す。

＜報文＞

(原著論文)

[1] M. Matsuo: Violation of a Fluctuation-Dissipation Relation in Fragile Glasses, J. Phys. Soc. Jpn. Vol.74, 2128 (2005).

[2] A. Awazu ：Forword and Backword Drift Motions and Inversion of Drift Directions in a Partially Driven Lattice Gases. J. Phys. Soc. Jnp. 74, 3127 (2005).

[3] H. Wada, Y. Murayama and M. Sano: Nonlinear elasticity of single collapsed polyelectrolytes, Phys. Rev. E 72 041803 (2005).

[4] S. Tatsumi, M. Sano, A. G. Rossberg: Observation of stable phase jump lines in convection of a twisted nematic liquid crysta, Phys. Rev. E, 73 (1), 011704 (2006).

[5] Y. Kobayashi and M. Sano: Aggregated spots and waving loops in a reaction-advection-diffusion system with a global coupling, Phys. Rev. E 73, 015104(R) (2006).

[6] T. Mashiko, T. Segawa, M. Sano and Y. Tsuji: Simultaneous measurements of velocity fields in thermal turbulence by USV and PIV , Flow Measurement and Instrumentation 17, 107-112 (2006).

[7] Y. T. Maeda and M. Sano: Regulatory Dynamics of Synthetic Gene Networks with Positive Feedback, J. Mol. Biol, in press (available online) (2006).

(会議抄録)

[8] Y. Kobayashi and M. Sano: Formation of a loop structure in a reaction-advection-diffusion model, Prog. Theor. Phys. Suppl. 161, 236 (2006).

[9] A. Awazu：Transmission of Rotational Motion by Coupled Deformable Gears, Prog. Theor. Phys. Suppl. 161, 161 (2006).

[10] M. Matsuo, K. Fujimoto and T. Shibata: Relation between Adaptation and Irreversible Circulation in Bacteria Chemotaxis, Prog. Theor. Phys. Suppl. 161, 251 (2006).

[11] T. Ishii, M. Matsuo and M. Sano: A Mechanical Model of Molecular Motors with Load Dependent Transitions, Prog. Theor. Phys. Suppl. 161, 212 (2006).

[12] R. Ishida, Y. Murayama, and M. Sano: Visualization during stick-release and plateau responses of collapsed DNA, Prog. Theor. Phys. Suppl. 161, 282 (2006).

[13] 竹内一将、佐野雅己：「ベルヌーイ結合写像格子系におけるイジング相転移とカオス不変集合の異常な構造との関連 〜不変集合に隠されたイジング相転移の「種」〜」、電子情報通信学会技術研究報告 NLP 非線形問題 Vol. 105 (No. 416), 31-36 (2005).

[14] 松尾美希、戸石七生: 幕末期南関東村落における村外婚姻行動と村内構造、信学技報 IEICE Thechnical Report NLP2005-14(2005).

[15] 粟津暁紀：ランダム触媒反応ネットワーク系の分子数不足による構造化 (渋滞？) 第 11 回交通流のシミュレーションシンポジウム 講演概要集 Proceedings of Symposium on Simulation of Traffic Flow, 53 (2005).

[16] 粟津暁紀：Complex rheology in a Simple Lattice Gas system 数理解析研究所講究録 1472 「複雑流体の数理とその応用」,160 (2006).

[17] 戸石七生、松尾美希: 幕末南関東山村の通婚圏と村落構造、東北アジア文化学会第 10 次国際学術大会紀要 (2005/06).

(国内雑誌)

[18] 前多裕介: 遺伝子ネットワーク再構成による遺伝子発現ダイナミクスの定量的解析，物性研究．85(5) 685-721 (2006).

(学位論文)

[19] 中村秀樹：Detection and Analysis of Subcellular Calcium Dynamics（博士論文）.

[20] 石井孝明：AFM による一分子の伸張過程とミクロ非平衡現象（修士論文）.

[21] 猪瀬淳也:走化性を示す細胞のゆらぎ解析（修士論文）.

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[22] S. Tatsumi and A. G. Rossberg, M. Sano: Experimental Study of stable phase jump lines in twisted nematic, YITP Workshop “Soft Matter as Structured Materials”, Aug. 1-3, 2005, Kyoto, Japan.

[23] H. Shiba, Y. Murayama, and M. Sano: Elastic Convection in Vibrated Shear Thinning Fluids, YITP Workshop “Soft Matter as Structured Materials”, Aug. 1-3, 2005, Kyoto, Japan.

[24] Y. Murayama, R. Ishida, and M. Sano: Mechanical unfolding process of single collapsed DNA, YITP Workshop “Soft Matter as Structured Materials”, Aug. 1-3, 2005, Kyoto, Japan.

[25] Y. T. Maeda: Violation of bacterial pattern formation by gene expression, YITP Workshop “Soft Matter as Structured Materials”, Aug. 1-3, 2005, Kyoto, Japan.

[26] Y. Murayama, R. Ishida, and M. Sano: Mechanical unfolding process of single collapsed DNA, “Screening, charge inversion and condensation of macroions”, Sep. 5-8, 2005, Lorentz center, Leiden, Netherlands.

[27] S. Tatsumi and M. Sano: The Kinetics of Granular Gas, International Symposium on Physics of Non-Equilibrium Systems, Oct. 5-7, 2005, Kyoto, Japan.

[28] Y. Kobayashi, Transition from hexagonal patterns to stripes in reaction-diffusion systems under shear, International Symposium on Physics of Non-Equilibrium Systems, Oct. 5-7, 2005, Kyoto, Japan.

[29] K. Takeuchi and M. Sano: Ising Phase Transition Related to an Anomalous Structure of the Invariant Set in a Bernoulli Coupled Map Lattice, International Symposium on Physics of Non-Equilibrium Systems, Oct. 5-7, 2005, Kyoto, Japan.

[30] Y. Murayama, R. Ishida, and M. Sano: Visualization of single collapsed DNA in stretching, International Symposium on Physics of Non-Equilibrium Systems, Oct. 5-7, 2005, Kyoto, Japan.

[31] Y. T. Maeda and M. Sano: Regulatory Dynamics of Synthetic Gene Networks with Positive Feedback, International Symposium on Physics of Non-Equilibrium Systems, Oct. 5-7, 2005, Kyoto, Japan.

[32] J. Inose, M. Matsuo and M. Sano: Cell Locomotion as a Spatiotemporal Dynamics in Amoeba Cells of Dictyostelium discoideum, International Symposium on Physics of Non-Equilibrium Systems, Oct. 5-7, 2005, Kyoto, Japan.

[33] A. Awazu: Forward and Backward Drift Motions and Inversion of Drift Directions in a Small Lattice Gas System. International Symposium on Physics of Non-Equilibrium Systems (Nishinomiya and Kyoto) 2005 10/3 〜 10/7

招待講演

[34] M. Sano, Y. Murayama, H. Wada: Elastic Response Measurements and Visualizations of Single DNA Molecules during Collapsing Transition, “Screening, charge inversion and condensation of macroions”, Sep. 5-8, 2005, Lorentz center, Leiden, Netherlands.

[35] M. Sano: Optical Manipulations for Testing Macromolecular Interactions and New Ideas in Statistical Mechanics, The 3rd COE Workshop, Frontiers of Laser and Optical Sciences, Oct. 2, 2005, Tokyo, Japan.

[36] M. Sano: Rheology of Biological Materials at a Single Molecular Level, The 20th Nishinomiya-Yukawa Memorial Symposium, Self-Organized Structures and Dynamics far from Equilibrium, Oct. 4, 2005, Nishinomiya, Japan.

[37] M. Sano, T. Ishii and M. Matsuo: Collective Motions of Molecular Machines under Non-equilibrium Condition with Chemo-mechanical Coupling, 2005 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2005), Oct. 20, 2005, Bruges, Belguim.

[38] M. Sano: Fluctuations and responses in some bio-soft matter systems, Regional Bio-Soft Matter Days 2005, Dec. 20, 2005, Academia Sinica, Taipei, Taiwan.

(国内会議)

一般講演

[39] 佐野雅己, 益子岳史, 辻義之: 速度場の測定による発達熱乱流の研究, 非線形問題研究会, 山形大学工学部, 2005 年 5 月 17 日.

[40] 佐野雅己, 村山能宏, 石田良: Visualization during stretching processes of collapsed DNA, 特定領域研究「水と生体分子」, 合同班会議, 長野県白馬, 2005 年 8 月 10 日.

[41] 辰己創一，高橋大介，佐野雅己: 定常粉体ガスの統計的性質，日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学）2005 年 9 月 19-22 日.

[42] 竹内一将、佐野雅己：時空カオス統計力学の可能性、日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学） 2005 年 9 月 19-22 日.

[43] 芝隼人，村山能宏，Qi Ouyang，佐野雅己：鉛直加振された粘弾性物質における弾性対流の形成, 日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学）2005 年 9 月 19-22 日.

[44] 粟津暁紀：小さい格子ガス系の運動と回転ブラウニアンモーター, 日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学）2005 年 9 月 19-22 日.

[45] 粟津暁紀：効率のいいブラウニアンマシンの小さい格子ガスによる玩具モデル, 日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学）2005 年 9 月 19-22 日.

[46] 前多裕介, 佐野雅己: 発生の不可逆性と多重安定性, 日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学）2005 年 9 月 19-22 日.

[47] 前多裕介, 佐野雅己: 適応現象の設計原理 I, 日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学）2005 年 9 月 19-22 日.

[48] 松尾美希、戸石七生: 家族類型の時系列分析, 日本物理学会 2005 年秋季大会（同志社大学）2005 年 9 月 19-22 日.

[49] 粟津暁紀：Complex rheology in a Simple Lattice Gas, 複雑流体の数理とその応用 (京都大学数理解析研究所) 2005 年 11 月 16-18 日.

[50] 辰己創一，佐野雅己: 鉛直加振下における粉体ガスの分類，複雑流体の数理とその応用 (京都大学数理解析研究所) 2005 年 11 月 16-18 日.

[51] 竹内一将、佐野雅己：ベルヌーイ結合写像格子系におけるイジング相転移とカオス不変集合の異常な構造との関連 〜不変集合に隠されたイジング相転移の「種」〜、非線形問題研究会（九州工業大学） 2005 年 11 月 18-19 日.

[52] 鳥谷部祥一 ：非平衡定常下でのエネルギー散逸測定, 21 世紀 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム（東京大学）2005 年 11 月 22 日.

[53] 村山能宏，石田良，佐野雅己: Elastic responses and visualization of a single collapsed DNA in stretching, 日本生物物理学会第４３回年会（札幌コンベンションセンター）2005 年 11 月 23-25 日.

[54] 粟津暁紀：ランダム触媒反応ネットワーク系の分子数不足による構造化 (渋滞？), 第 11 回交通流のシミュレーションシンポジウム 2005 年 12 月 2-3 日.

[55] 辰己創一，佐野雅己: 粉体ガスにおける協同的な運動ー地上と微小重力下の比較ー，日本物理学会第 61 回年次大会（愛媛大学･松山大学）2006 年 3 月 27-30 日.

[56] 竹内一将：Coupled Map Lattice における Ising 的相転移ユニバーサリティの決定因子、日本物理学会第 61 回年次大会（愛媛大学・松山大学） 2006 年 3 月 27-30 日.

[57] 鳥谷部祥一、江宏仁、中村壮伸、村山能宏、佐野雅己：非平衡定常下でのエネルギー散逸測定, 日本物理学会第 61 回年次大会（愛媛大学・松山大学） 2006 年 3 月 27-30 日.

[58] 粟津暁紀：Shear Thickening and Thinning-like behaviors in a Simple Lattice Gas System, 日本物理学会第 61 回年次大会（愛媛大学・松山大学） 2006 年 3 月 27-30 日.

[59] 村山能宏，和田浩史，佐野雅己: 凝縮ＤＮＡ伸張過程における不可逆仕事，日本物理学会第 61 回年次大会（愛媛大学・松山大学） 2006 年 3 月 27-30 日.

[60] 加藤高基，前多裕介，松下貢，佐野雅己：バクテリア *E.coli* の同心円状パターン, 日本物理学会第 61 回年次大会（愛媛大学･松山大学）2006 年 3 月 27-30 日.

招待講演

[61] 佐野雅己, 益子岳史, 辻義之: 乱流の統計則と構造, 日本物理学会 2005 年秋季大会シンポジウム（同志社大学）, 乱流研究の過去･現在･未来, 2005 年 9 月 20 日.

[62] 佐野雅己: 破壊現象の線形性と非線形性, ガラス討論会, 滋賀県立大学, 2005 年 11 月 11 日.

(セミナー)

[63] 前多裕介：熱適応現象の設計原理, 東京大学駒場キャンパス, 2005 年 5 月 30 日.

[64] 佐野 雅己: DNA の凝縮転移と 1 分子操作の実験, 東京大学理学部物理学科物性セミナー, 2005 年 11 月 28 日.

[65] 佐野雅己: 対流・破壊・摩擦における非線形現象, 東京大学地震研究所金曜セミナー, 2005 年 12 月 9 日.

[66] 前多裕介：遺伝子ネットワークのダイナミクスー多重安定性, 揺らぎー, 広島大学数理科学研究科, 2006 年 3 月 24 日.

[67] 松尾美希: 画像解析による細胞性粘菌アメーバの運動解析、広島大学数理科学研究科, 2006 年 3 月 24 日.

[68] 佐野雅己, 村山能宏, 辰己創一, 早川尚男: 微小重力下における粉体の非平衡ダイナミクス, JAXA 化学物理ワーキンググループ会合, 日本宇宙フォーラム, 2006 年 3 月 25 日.

(その他)

[69] 佐野雅己: 集中講義, 千葉大学大学院自然科学研究科数理物性科学専攻, 2005 年 8 月 3 － 4 日.

[70] 佐野雅己: 集中講義, 非線形系における不安定現象とゆらぎ, 首都大学東京都市教養学部, 2006 年 1 月 12 － 13 日.

6.6 山本 研究室

星と星との間にはガスと塵からなる希薄な雲（星間雲）が存在している。星間雲の中でも密度が比較的高いものが星間分子雲で、恒星が形成される場所として銀河系における物質循環の主要経路にあたっている。本研究室では、星間分子雲に存在する原子・分子に着目して、電波望遠鏡による観測的研究を行っている。これらを通して、星間分子雲の構造、形成、進化、および星形成を物質的視点から研究している。

サブミリ波、テラヘルツ領域（波長 1 mm から 0.1 mm）は天文学においてまだ十分に開拓されていない波長域である。本研究室では、わが国ではじめてサブミリ波望遠鏡（口径 1.2 m）を富士山頂に設置して観測を行ってきた。とくに、中性炭素原子が放つ微細構造スペクトル線（$^3P_1 - ^3P_0$ 492 GHz, $^3P_2 - ^3P_1$ 809 GHz）の広域観測を行い、星間分子雲の形成、進化を研究している。また、このような研究を銀河系スケールに発展させる目的で、口径 18 cm 可搬型サブミリ波望遠鏡を開発し、チリ・アタカマ砂漠の高地（標高 4800 m）で運用している。さらに、天文学教育研究センターと国立天文台が中心となって推進している ASTE (Atacama Submillimeter Telescope Experiment) プロジェクトにも参加するとともに、わが国の電波天文学コミュニティーが北米、ヨーロッパのコミュニティーとともに建設している ALMA(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) 計画にも協力している。

これらの研究とともに、国立天文台野辺山観測所の 45 m 電波望遠鏡、ミリ波干渉計などを用いて、星形成領域の観測研究を行っている。とくに、星形成にともなう化学進化に着目し、種々の分子スペクトル線による観測を展開している。

一方、テラヘルツ帯での天文観測は技術的な困難のために未開拓の状況にある。とくにヘテロダイン検出による高周波数分解能観測についてはほとんど手がついていない。本研究室では、テラヘルツ帯での観測を開拓するために、超伝導ホットエレクトロン・ボロメータ（HEB）ミクサ素子の開発を行っている。研究室内に専用の素子製造装置を導入し、ミクサ素子の開発研究を進めている。この素子を用いて、1.47 THz にある窒素イオンの微細構造スペクトル線 ($^3P_1 - ^3P_0$) の広域観測を実現することで、銀河系における星間プラズマの分布と運動を明らかにし、プラズマ相が星間分子雲の形成と進化に与える役割を解明する。この研究を通してテラヘルツ天文学を創生したいと考えている。

6.6.1 富士山頂サブミリ波望遠鏡

富士山頂サブミリ波望遠鏡（口径 1.2 m）はわが国ではじめてのサブミリ波望遠鏡であり、東京大学大学院理学系研究科ビッグバン宇宙国際研究センターのプロジェクトとして国立天文台、分子科学研究所、JAXA などの研究者と共同で推進してきた。この望遠鏡は無人遠隔運用をはじめて実現した電波望遠鏡でもある。1998 年に富士山頂に設置してから 7 シーズンにわたる運用で、かつてない規模で中性炭素原子サブミリ波スペクトル線（$^3P_1 - ^3P_0$, 492 GHz; $^3P_2 - ^3P_1$ 809 GHz）の観測を展開してきた。その結果を一酸化炭素分子の分布などと比較することにより、星間分子雲の形成、進化について炭素の主要な存在形態の変化という視点から切り込むことができた。

しかし、2004 年 10 月以降、気象庁富士山測候所が非常駐化し、望遠鏡への電力供給ができなくなった。2005 年にかけて、富士山測候所の送電設備を利用して商用 6600 V 電力の自前での供給を試みたが、度重なる雷災に見舞われ, そのシーズンの望遠鏡の運用を行うことができなかった。このような状況にあって、望遠鏡の無人遠隔運用を継続することは困難であると判断し、富士山頂サブミリ波望遠鏡を 2005 年 8 月をもって閉鎖するに至った。2005 年 8 月には、重要な観測装置群の撤去を行った上で、レドームとアンテナの解体を行った。今後、２年にわたり、望遠鏡下部機器室、および、鉄筋コンクリート基礎の撤去を行う予定である。

富士山頂サブミリ波望遠鏡はわが国のサブミリ波天文学を本格的に創生し、星間分子雲形成という新しい問題を提起したのみならず、わが国がサブミリ波における能力向上を掲げて ALMA に参加する上でも少なからぬ貢献をした。今後は、これまでに取得した 50 平方度に上る中性炭素原子のサーベイデータをもとに、内外のミリ波・サブミリ波望遠鏡でのフォローアップ観測を進め、星間分子雲の形成進化について研究を展開していく計画である。

おうし座暗黒星雲における中性炭素原子の分布

おうし座暗黒星雲は距離が 140 pc にある低質量星形成領域であり、これまで星形成に関して活発な研究が行われている領域である。近傍に大質量星や超新星残骸などが付随しておらず、自発的な分子雲形成・進化を研究する上で格好の対称である。そこで、富士山頂サブミリ波望遠鏡では 1998 年の設置当初からこの領域で中性炭素原子輝線（$^3P_1 - ^3P_0$）の広域サーベイ観測を推進してきた。暗黒星雲では一般に輝線強度が弱い（〜1 K）ので、広域サーベイには時間を要する。しかし、専用望遠鏡の強みを生かして、おうし座暗黒星雲の約 70 % の領域のサーベイを実現した。このデータを名古屋大学の 4 m 電波望遠鏡による ^{13}CO($J = 1 - 0$)、C^{18}O($J = 1 - 0$) のデータと比較することにより、以下のことが明らかになった。

(1) A_V が 2 等以下の希薄な星間雲 (diffuse cloud) では CI/^{13}CO 輝線強度比が顕著に高く現れる。このことを用いると分子雲に付随する希薄なエンベロープの分布を描き出せる。

(2) CI/C^{18}O 輝線強度比は、おうし座暗黒星雲内の領域ごとに異なる。すなわち、分子雲内部で中性炭素原子の存在比が領域ごとに異なる。

(3) HCL2, L1495 領域では CI/C^{18}O 比が高い領域が存在し、そこに希薄なエンベロープが付随している。一方、B18 領域ではそのような領域は存在し

ない。

YSO に占める T-Tauri 型星の割合を見ると、HCL2, L1495, B18 の順に高くなっており、この順に分子雲の物理進化が進んでいると判断できる。中性炭素原子は炭素がまだ一酸化炭素分子として固定される前の化学進化の初期で豊富に存在することを考えられるが、上記の結果は主にその効果として理解できる。

M17 領域の高速度成分

活発な大質量星形成領域である M17 において、$\Delta V \simeq 40$ km s^{-1} もの線幅を持つ [CI] 輝線の高速度成分を、可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡によって 2002 年度に検出した。この高速度成分について、富士山頂サブミリ波望遠鏡による [CI] および CO J=3-2 輝線、さらになんてん望遠鏡グループの提供による CO J=1-0 輝線のデータから、C^0/CO 比が 3-4 と高いガス雲であることを明らかにしていた。本年度は野辺山 45m 鏡を用い、CO J=1-0、^{13}CO J=1-0、HCO^+ J=1-0 の輝線で高空間分解能、高感度の観測を行なった。ここで高速度成分内に 1 pc スケールの構造が見つかり、これらが重力束縛されておらず大規模な乱流によるものであることがわかった。この乱流は M17 巨大分子雲を含むスーパーシェルの形成時に活性化された可能性がある。

6.6.2 テラヘルツ帯ヘテロダイン検出素子の開発

テラヘルツ帯は天文学において未開拓の波長帯である。そこには原子や基本的な分子のスペクトル線が存在し、それらの観測は銀河系における星間物質の全体像を理解する上で、非常に重要である。中でも、窒素イオン（NII）の放つ 1.46 THz のスペクトル線（$^3P_1 - ^3P_0$）は、プラズマ領域から選択的に放射されるので、高い周波数分解能で観測することで、プラズマ相の分布と運動を詳しく調べることができる。その結果を、中性炭素原子、一酸化炭素分子、水素原子などの分布と比較することにより、銀河系星間雲の 3 つの主要な形態、プラズマ相、原子相、分子相の間の相互作用と相変化を総合的に捉えることが可能になる。

サブミリ波帯では、ヘテロダイン検出素子として SIS (superconductor − insulator − superconductor) ミクサ素子が広く用いられている。しかし、SIS ミクサでは周波数が超伝導ギャップのエネルギーを超えると、ギャップ間の吸収のために損失が大きくなる。たとえば Nb を超伝導物質に用いたものでは 700 GHz がよい性能が出る限界の周波数となる。従って、テラヘルツ帯の観測のためには SIS ミクサ以外の原理に基くミクサ素子の開発が求められる。

本研究室では、この目的のために、超伝導ホットエレクトロン・ボロメータ (HEB) ミクサ素子の開発を進めている。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、素子内に生じた熱電子を中間周波信号の周期よりも速く冷却し、超伝導状態を回復させる必要がある。熱電子の冷却方法として、(1) 拡散によって電極へ逃がす方法（拡散冷却）と、(2) フォノンとの相互作用を介して基板にエネルギーを逃がす方法（格子冷却）の 2 つの方法がある。これらのどちらが主要なメカニズムとなるかは、用いる超伝導物質の物性と素子の構造に依存する。我々は Nb を用いた拡散冷却型の HEB ミクサ素子と、NbTiN を用いた格子冷却型の HEB ミクサ素子の開発を行っている。

HEB ミクサ素子の製作においては、100 nm スケールのマイクロブリッジ構造の形成が必要である。その目的のために研究室内にクリーンブースを設置して、2003 年度から専用装置群の導入を進めてきた。2005 年度には武田先端知ビルの VDEC クリーンルーム内にドライエッチング装置、ビッグバン宇宙国際研究センターのクリーンルーム内にマスクアライナーをそれぞれ導入し、素子製作のすべてのプロセスを行うことができるようになった。

Nb を用いた拡散冷却型 HEB 素子の開発

前年度に引き続き、Nb を用いた拡散冷却型 HEB ミクサ素子の開発を進めた。ミクサ素子製作に用いる Nb 薄膜について、スパッタによる成膜条件が抵抗率や T_c 等の物理特性に与える影響について詳細な確認実験を行った。常温抵抗率は、バルクでの値 160 Ωnm に対して、膜厚 40 nm 以上の薄膜でほぼ一様に 200 Ωnm 程度を示すことがわかった。これは薄膜とバルクの形状差を考えると妥当な値である。一方、膜厚 30 nm 以下では膜面の不均一性によると考えられる抵抗率上昇の傾向が見られた。これにより、HEB ミクサ設計の際に重要な膜厚と抵抗率の相関が把握できた。また、超伝導転移温度を測定するために GM2 段冷凍機を用いた測定システムを立ち上げた。このシステムで測定した超伝導転移温度 T_c は、100 nm 厚で 9 K 台、50 nm 厚で 8 K 台となり、過去の文献（Wolf et al. 1976）の結果と合致した。以上から、成膜された Nb 薄膜は良好は品質であることが確認できた。

これらの実験結果を踏まえて HEB ミクサ素子の設計を微調整しつつ素子製作実験を行った。その結果、サブミクロンの寸法を持つ図形の薄膜においては接触抵抗の影響が無視できず、HEB ミクサのインピーダンスを規定する寸法が従来想定していた電極間距離ではなく Nb 細線自体の長さで規定されることが判明した。このことから、HEB ミクサを天文観測などの実用に供する際に重要な性能となる IF 帯域幅や変換損失も Nb 細線自体の長さで決定される可能性も示唆される。さらに細線部のみならず、Nb と金電極の接触している部分全体の形状が素子のインピーダンスに関わってくることがわかり、以上を踏まえて HEB ミクサ素子の設計の改訂を行った。

この設計変更に伴い、電子ビーム描画装置を用いた重ね描画の位置精度を 100 nm スケールまで向上

させる必要が生じた。重ね描画の位置調整を手動で行う場合、目印となるマーク画像の目視に頼ることや手の操作のぶれなどの原因で十分な位置精度を確保できない可能性が高いことから、マーク画像の自動認識によるオート描画の実現に取り組んだ。その過程で、従来手動で行っていた際には問題とならなかった石英ウェハー表面のコンディションに改善が必要となったため、デバイス製作プロセスにおけるウェハーの洗浄、レジスト材の塗布、プリベーク等の全工程を対象として再検討、追試を行った。その結果これまでに自動描画に十分なコンディションを再現性良く実現、HEB ミクサ素子製作プロセスに適用することが可能となった。現在、これらの技術を総合して、HEB ミクサ素子の製作を進めている。

HEB ミクサ素子の試験環境の整備

製作した HEB ミクサ素子は導波管ミクサマウントに装着し、可搬型 18 cm 望遠鏡の THz 帯受信機デュワーを用いて冷却試験を行った。冷却時に HEB ミクサに特徴的な I-V 曲線が得られ、またその状況で 800 GHz の局部発振信号を入射させたところ I-V 曲線がなまる挙動が明瞭に確認された。これは、製作したミクサ素子が 800 GHz で DC ボロメータとして動作していることを示している。また、これによりこのデュワーの光学系および局部発振器が正しく動作していることも確認され、ミクサの性能評価の一連の実験をこのシステムで行う目処を立てることができた。

エッチング法を用いた HEB の製作法の開拓

従来の Nb 拡散冷却型 HEB ミクサの開発では、冷却時の素子のインピーダンスが理想値の 27 Ω を大きく上回ってしまい、ミクサとしての性能が得られない問題が発生していた。その原因としては、Nb と Au の界面における Nb の表面酸化膜が妨げとなって接触抵抗率が増加し、拡散冷却型の特徴である熱電子の拡散が抑制されていることが考えられる。Nb 酸化膜は、製作工程上 Nb の成膜後に大気圧に暴露してしまうことで生成する。今年度はその対策として、真空装置から取り出すことなく Nb の上から Au を成膜し、Nb 表面の酸化を防ぐ方法を試みた。この工程は、本郷キャンパス内に設置された複合成膜装置の特徴を最大限に生かしたものである。この方法では Nb 細線部の上にも Au の層を作ることになり、後の工程で Au を削るエッチングが必要となる。そのため、まずは Nb 薄膜の上に一度 Au を成膜し、エッチングで Au を除去した後での膜の性質を調べ、適した超伝導特性が保持されることを確認した。また実際のミクサ製作において Au を削る工程では、Au の深い谷底を削るような格好になるため、等方性エッチングでは幾何的に削りにくい場所がある。細線上に Au が残ってしまうと、設計した細線の長さを実現することが難しく、ミクサの特性を制御できない。しかしながら、このエッチング法により HEB ミクサ素子を製作し、性能評価したところ、理想値に近いインピーダンスが得られ、酸化膜の形成を抑制できていることが確認できた。これで、細線長を制御できるようになれば十分に実用的なミクサ素子を製作できることが示唆された。

NbTiN を用いた格子冷却型 HEB ミクサ素子の開発

Nb を用いた拡散冷却型の HEB ミクサ素子の開発と並行して、NbTiN を超伝導物質に用いた格子冷却型の HEB ミクサ素子の開発を名古屋大学 STE 研究所の前澤裕之氏と共同で進めている。NbTiN は超伝導転移温度が高く（薄膜で 15 K 程度）、石英基板とのマッチングもよいので、新しいタイプの格子冷却型 HEB ミクサとして注目されている。NbTiN を用いた HEB ミクサ素子の製作のためには、高品質の NbTiN 薄膜を作成することが必要である。本年度は、NbTi ターゲットを用いた反応性スパッタにより NbTiN 薄膜を作成し、そのキャラクタリゼーションを行った。

HEB ミキサの性能は、いかに細線の幅を小さく、膜厚を薄くし冷却効率をあげるかにかかっている。冷却効率が高ければ高いほど、変換効率がよくなり中間周波数帯域幅も広がる。このため、素子として扱う上で剥がれにくく、小さな幅の細線を正確に切り出すことができる膜質が要求される。このような薄膜形成を可能にするために、複合成膜装置を用いて NbTiN 薄膜を様々な厚みで作成し、成膜レートやストレスの測定を行った。その結果、膜厚が 150 nm 程度までは、安定して-0.5 GPa 程度のストレスの値が得られるようになった。Nb では 100 nm 程度までは安定していることを考えると、NbTiN の方が膜の不均一性がより高いことが示唆される。

また、HEB ミキサの IF 信号の強さは、LO 信号と RF 信号の強さの相乗平均に比例する。このため、ミキサとして高性能にするためにはできるだけ LO 信号のパワーを大きくすることが望ましい。このためには、高い超伝導転移温度 T_c をもつ薄膜でミクサを作ることが求められる。NbTiN 薄膜は Nb と比べて高い T_c を持つので、有望な材料と言える。NbTiN 薄膜では、スパッタ時に導入する窒素ガスの流量を微量に変えるだけで膜の物性が大きく変わり、T_c が変化する。そこで、窒素流量を微調整して T_c が最大となるような最適な値 (1.00 sccm) を求めた。さらに、実際の素子では数 nm 程度の膜厚が求められるので、膜厚を薄くした場合の T_c の変化を調べた。図 1 のように、膜厚が薄くなるにつれ T_c が下がり、44 nm では 11.5 K となった。それでも Nb の T_c に比べれば依然として高い値を示しており、NbTiN 薄膜の有用性を明らかにできたと言える。また、今回の実験で用いた薄膜はすべて空気中にむき出しの状態であったため、表面が酸化して変質してしまっていた可能性も考えられる。 実際の素子では成膜後にそのまま真空中でマスクをかけることで酸化を防げるので、この T_c の値よりは高い値を達成できる可能性がある。

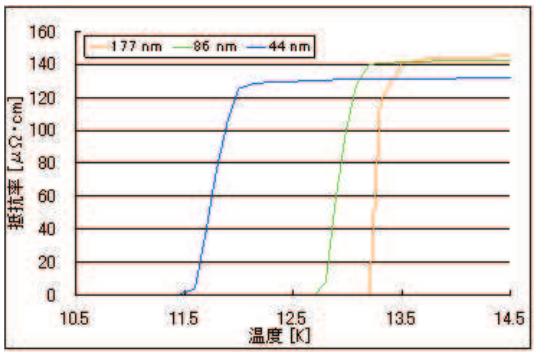


図 6.6 a: 作成した NbTiN 薄膜の超伝導転移温度の膜厚変化

マスクアライナーの導入と最適化

HEB ミクサ素子のアンテナパターンの作成は光露光によって行う。これはアンテナパターン自体が 1 μm 程度の構造しかもたないので、光露光で十分パターンを描くことができるからである。ウエハにフォトマスクを正確に合わせて露光するために UV マスクアライナーをビッグバン宇宙国際研究センターのクリーンルームに導入した。導入後、ガラスウエハを用いてテスト露光を繰り返し、レジストの塗布方法（前処理を含む）、露光時間の最適化を行った。その結果、目的とするアンテナパターンを精度よく作成することができるようになった。なお、使用したフォトマスクは武田先端知ビルの VDEC の電子ビーム描画装置で作成した。

二層フィルムの電気抵抗の計算

製作した HEB 素子の直流抵抗値が高い問題の原因を追究するために、一定の接触抵抗率（$\zeta/\Omega\mathrm{nm}^2$）で張り合わされた 2 層フィルムの直流抵抗を計算する方法を定式化した。その結果、作成している HEB 素子の形状について、直流抵抗を計算することができるようになった。接触抵抗率が大きい場合には、直流抵抗は HEB 素子の金電極間間隔に依存しないことが確かめられた。実験で求められた抵抗値との比較から、接触抵抗率は 10^7 $\Omega\mathrm{nm}^2$ 程度であることが明らかになった。この値は μ m スケールでの素子では問題にならないが、HEB 素子のような 100 nm スケールのサイズでは直流抵抗に大きな寄与をする。一方、直流抵抗は熱抵抗と関連しており、接触抵抗率が大きいことは熱伝導が悪いことを意味する。拡散冷却型の HEB 素子では Nb から Au 電極への冷却過程が重要なので、接触抵抗率の低減はミクサ性能に直結する。従って、この点での改善が必要であることがわかった。

6.6.3 星形成領域の観測研究

星形成領域における複雑な有機分子

近年、小質量原始星 IRAS16293-2422 (Cazaux et al. 2003), NGC1333IRAS4A (Bottinelli et al. 2004), NGC1333IRAS4B (N. Sakai et al. 2006) からギ酸メチル ($HCOOCH_3$) やシアン化エチル (C_2H_5CN) などの複雑な有機分子が検出された。これらの複雑な有機分子は、星間塵表面で生成された NH_3, H_2CO, CH_3OH などの比較的単純な分子が、星形成に伴って気相へ一気に蒸発することで作られると考えられている。これまで、このような分子は大質量星形成領域のホットコア ($T \geq$100 K、$n \geq 10^6$ cm^{-3}) を特徴づけるものとして知られてきた。しかし、これらの検出によって中小質量星形成領域においても高温で高密度な領域が形成され、複雑な有機分子が生成され得ることがわかった。特に、昨年度我々が $HCOOCH_3$ 分子を検出した NGC1333 IRAS4B は他の 2 天体と同じ Class 0 天体であるが、分子流の力学的年齢から数 100 yr と非常に若い段階にあると言われている (Choi, 2001)。このことは、複雑な有機分子が原始星進化のごく初期段階から存在していることを示している。原始星が形成される以前には星間塵からの蒸発はおこらないので、複雑な有機分子は一般に存在しない。このことを考えると、複雑な有機分子は原始星形成の初期段階をトレースする手段として利用できる可能性がある。

しかし、これまで中小質量星形成領域における複雑な有機分子の検出例は上記の 3 天体のみである。そこで我々は、国立天文台野辺山 45 m 鏡を用いて、おうし座領域の小質量原始星 L1527 において複雑な有機分子の検出を試みた。on 点で 18 時間を超える観測を行ったが、$HCOOCH_3$ などの分子は検出されなかった (図２)。rms 雑音から導かれる上限値を吟味したところ、検出できなかった原因が中心星の規模によるものでないことがわかった。L1527 も Class 0 天体であるが、双極分子流の力学的年齢が 15000 yr と若干進化の進んだ天体である。事実、Class 0 から Class I への過渡段階にあるとも言われている。$HCOOCH_3$ のような複雑な有機分子が原始星進化のごく初期に生成されることから、進化の進んだ天体で存在量が少なくなっている可能性が考えられる。あるいは、おうし座領域では複雑な有機分子が何らかの理由で生成されにくいことも考えられる。この問題を解決するためには、今後、ミリ波・サブミリ波帯の大口径望遠鏡により、様々な分子雲に属する様々な原始星で、高感度な観測を系統的に行うことが非常に重要である。

大質量星形成領域 NGC2264 における $HCOOCH_3$ の分布

NGC2264 は距離が約 800 pc にある大質量星形成領域である。昨年度、大質量星形成領域に対する複雑な有機分子のサーベイ観測でこの天体を取り上げた。K バンドで最も明るい IRS1 方向で複雑な有機分

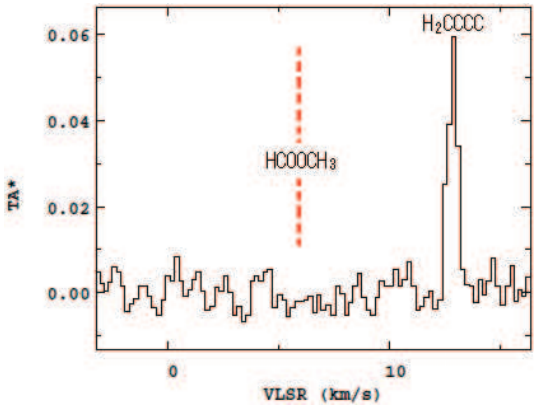


図 6.6 b: L1527 における $HCOOCH_3$ と H_2CCCC

子が検出されなかったのに対して、IRS1 よりも若く class 0 相当の大質量原始星を含むと言われる MMS3 方向で $HCOOCH_3$ のスペクトルが検出された。このことは、原始星進化の初期段階で複雑な有機分子が存在するという小質量星形成領域の結果からの予想と一致する。そこで、本年度、野辺山ミリ波干渉計を用いて $HCOOCH_3$ の空間分布を高分解能で調べた。IRAS1 と MMS3 をともに含む視野を設定して観測した結果、$HCOOCH_3$ は MMS3 方向に存在し、IRAS1 方向では検出されないことが確かめられた。詳しい解析は現在進行中である。

星形成領域における H_2CCCC

Class 0 原始星 L1527 での複雑な有機分子の観測の過程において、我々は偶然、炭素鎖分子 H_2CCCC の高励起輝線を検出した (図 2)。これまでこの分子は、TMC-1 など星形成を伴わない分子雲で検出されていたが、星形成領域でこの分子が検出されたのは初めてである。しかも、検出された輝線は TMC-1 で予想される値に比べて遥かに強かった。一般に CCS や CCH などの炭素鎖分子は、炭素がまだ CO に固定される前の非常に若いフェーズでのみ豊富に存在し、星形成が始まる段階では急速に存在量が減少する。したがって、この検出は、L1527 において炭素鎖分子が何らかの理由で生き残り、星形成の結果として中心部分で温められているという可能性を示唆する。その原因の解明は、L1527 における星形成のタイムスケールに関連する重要な情報を与えることが期待される。

CCS と CCH の ^{13}C 同位体種の観測

炭素鎖分子 CCS のスペクトル線は星形成を伴わない分子雲コアの進化を探る上で重要な道具として広く用いられている。しかし、星間分子雲における CCS の生成過程については未だによく理解されていない。それを解明するために、以前、国立天文台野辺山の 45 m 望遠鏡を用いて CCS の ^{13}C 同位体種の観測を行った（池田ら 2002 年)。その結果、$C^{13}CS$ のスペクトル線は正常な比で観測されたが、^{13}CCS はまったく検出できなかった。この結果は、CCS が生成する過程で、２つの炭素が透過でないことを意味しているとともに、^{13}CCS で ^{13}C の割合が原子の場合よりも少ない（すなわち希釈されている）こと示している。これは、CCS の生成メカニズムを大きく絞り込む結果である。しかし、それだけにその結果を独立な観測で再確認することは非常に重要である。その目的で、本年度、CCS の ^{13}C 同位体種の観測を国立天文台野辺山の 45 m 望遠鏡を用いて行った。その結果、^{13}CCS のスペクトルが弱いことを確認できる結果を得た。

上記の結果、CCS の主要な生成メカニズムは CCH を経由するルートと CH を経由するルートに絞り込まれることになった。もし前者の場合、CCS と同様に片方の ^{13}C 同位体種が少ないはずである。そこで、CCH の ^{13}C 同位体種の観測を行った。まだ、雑音が大きいが、強度の大きい 4 本の超微細構造成分を足し合わせた結果、2 種の ^{13}C 同位体種がともに検出されている可能性が高いことがわかった。もしそうであるとすると、CCS は CH を経由して生成していると結論することができる。その場合、CH の ^{13}C が希釈していることになるが、その原因追求は今後の課題である。

＜報文＞

(原著論文)

[1] T. Oka, K. Kamegai, M. Hayashida, M. Nagai, M. Ikeda, N. Kuboi, K. Tanaka, L. Bronfman, and S. Yamamoto: Atomic Carbon in the Southern Milky Way, Astrophys. J., **623**, 889-896 (2005).

[2] E. Kim and S. Yamamoto: Rotational Spectra of the Deuterated Carbon Chain Molecules: C_3D, C_4D, C_3HD, and C_4HD, J. Mol. Spectrosc., **233**, 93-97 (2005).

[3] N. Sakai, T. Sakai, and S. Yamamoto: Detection of $HCOOCH_3$ toward a Low-Mass Protostar NGC1333, Pub. Astron. Soc. Japan, **58**, L15-L18 (2006).

[4] T. Sakai, T. Oka, and S. Yamamoto: Atomic Carbon in the AFGL 333 Cloud, Astrophys. J. in press.

[5] T. Hirota and S. Yamamoto: Molecular Line Observations of a Carbon-Chain-Rich Core L492, Astrophys. J. in press.

(国内雑誌)

[6] 山本　智：サブミリ波・テラヘルツ帯における天文観測、分光研究、**54**, 356-368 (2005).

(学位論文)

[7] 坂井南美：複雑な有機分子をプローブとした原始星進化初期過程の探求（修士論文）

(著書)

[8] 山本 智:「原子分子」、物理学大辞典、朝倉書店 (2006)

[9] 山本 智:「検出感度と雑音」、「星間分子の観測」、実験化学講座 9、物質の構造 I、日本化学会編、丸善 (2005)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[10] S. Yamamoto and N. Kuboi: CI Line Survey of Molecular Clouds, Submillimeter Astronomy in the Era of SMA (Boston, June 2005).

[11] M. Nagai, T. Oka, Y. Moriguchi, Y. Fukui, Y. Sekimoto, and S.Yamamoto: Observational Results on Broad Spectral Line Features of CI and CO Found in the M17 Region, Workshop on Submillimeter Astronomy and Receiver Technologies (Purple Mountain Observatory、Dec. 2005).

[12] N. Sakai, T. Sakai, and S. Yamamoto: Exploring an Early Stage of Protostellar Evolution with Complex Organic Molecules, Inaugural Japan-Taiwan ALMA Science Workshop (Taipei, Dec. 2005).

[13] S. Yamamoto: CI Survey of Molecular Clouds, East-Asian Workshop on Molecular Clouds, (Tokyo, Feb. 2006).

招待講演

[14] Oka, T., Nagai, M., Kamegai, K., & Tanaka, K. : A CO J=3-2 Survey of the Galactic Center, Perspective of Submillimeter Astronomy with ASTE (Tokyo, March, 2006)

[15] S. Yamamoto: Observational Approach to Chemical Evolution of Molecular Clouds, New Horizon of Astrochemistry and Laboratory Spectroscopy (Mito, March 2006).

(国内会議)

一般講演

[16] 坂井南美、酒井 剛、山本 智: 大型有機分子をプローブとした原始星進化の初期過程の探求、ALMA 星間化学ワーキンググループ研究会 (国立天文台、2005 年 6 月)

[17] 坂井南美、酒井 剛、山本 智: 大型有機分子をプローブとした原始星進化の初期過程の探求、第 2 回 ALMA サイエンスワーキンググループ全体会合 (国立天文台、2005 年 7 月)

[18] 永井 誠、岡 朋治、森口 義明、福井 康雄、関本 裕太郎、山本 智: M17 領域高速度成分の起源を探る、NRO ユーザーズミーティング (野辺山宇宙電波観測所、2005 年 9 月)

[19] 坂井南美、酒井 剛、山本 智: 星形成領域における複雑な有機分子の探査、NRO ユーザーズミーティング (野辺山宇宙電波観測所、2005 年 9 月)

[20] 坂井南美、酒井 剛、山本 智: Detection of $HCOOCH_3$ toward a Low-Mass Protostar NGC1333IRAS4B、NRO ユーザーズミーティング (野辺山宇宙電波観測所、2005 年 9 月)

[21] 岡 朋治、永井 誠、久保井信行、山本 智、酒井 剛、嶋作一大、望月賢治: 遠方原始銀河候補天体の CI 禁制スペクトル線探査、NRO ユーザーズミーティング (野辺山宇宙電波観測所、2005 年 9 月)

[22] 永井 誠、岡 朋治、森口 義明、福井 康雄、関本 裕太郎、山本 智: M17 領域における [CI] 輝線高速度成分、日本天文学会秋季年会 (札幌コンベンションセンター、2005 年 10 月)

[23] 坂井南美、酒井 剛、山本 智:小質量原始星 NGC1333IRAS4B における $HCOOCH_3$ の検出、日本天文学会秋季年会 (札幌コンベンションセンター、2005 年 10 月)

[24] 岡 朋治、永井 誠、久保井信行、山本 智、酒井 剛、嶋作一大、望月賢治: 遠方原始銀河候補天体の CI 禁制スペクトル線探査、日本天文学会秋季年会 (札幌コンベンションセンター、2005 年 10 月)

[25] 永井 誠: 中性炭素原子輝線で探る星間物質の相変化、第 1 回 21 世紀 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム (東京大学、2005 年 11 月)

[26] 坂井南美、酒井 剛、山本 智:大質量星形成領域のホットコアにおける大型有機分子、日本天文学会春季年会 (和歌山大学、2006 年 3 月)

[27] 新保 謙、坂井南美、芝 祥一、山本 智、前澤裕之、P.G. Ananthasubramanian:超伝導 HEB ミクサ素子に用いる Nb 薄膜のキャラクタリゼーション、日本天文学会春季年会 (和歌山大学、2006 年 3 月)

[28] 岡 朋治、永井 誠、久保井信行、亀谷和久、田中邦彦: ASTE による銀河系中心 CO J=3-2 広域観測 (I)、日本天文学会春季年会 (和歌山大学、2006 年 3 月)

[29] 永井 誠、岡 朋治、亀谷 和久、田中 邦彦: ASTE による銀河系中心領域 CO J=3-2 広域観測 (II) — LVG 解析による物理状態の評価、日本天文学会春季年会 (和歌山大学、2006 年 3 月)

招待講演

[30] 岡 朋治: ASTE による銀河系中心 CO J=3-2 広域観測、先端研究事業ワークショップ「銀河系中心部–分子雲から高エネルギー現象まで–」(名古屋大学、2005 年 12 月)

6.7 酒井広文研究室

本研究室では、(1) 高強度レーザー電場と分子内の非共鳴誘起双極子との相互作用に基づく中性分子のマニピュレーションとその応用、(2) 整形された超短光パルスによる原子分子中の量子過程制御、(3) 高次非線形過程 (多光子イオン化や高次高調波発生など) に代表される高強度レーザー物理や原子分子中の超高速現象、(4) 高次高調波を用いたアト秒パルス発生とその測定、(5) レーザー誘起クーロン爆裂を用いた分子の構造とダイナミクスに関する研究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。本年度の主要な研究内容は以下のとおりである。

6.7.1 分子の配向度の増大と断熱領域から非断熱領域への拡張

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。分子の向きの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する。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、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。しかし、配向した試料分子を応用実験に利用するためには、配向の度合いを増大させることが重要である。

昨年度までに、比較的高い静電場強度でも安定に動作する装置を新たに設計・開発し、装置がほぼ設計どおりに動作することを確認した。今年度は、クラスターが形成されにくい He 中に 5%に希釈された OCS 分子を試料とし、背圧 10 気圧、静電場 4.4 kV/cm、レーザー光のピーク強度 4.1×10^{12} W/cm^2 の条件で、原理実証実験で得られたよりも高い配向度 (従来より指標として用いている $\langle\cos^2\theta\rangle$ 値で 0.57 程度) を実現することに成功した。

上記の実験は、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。配列に関しては、超短パルスレーザー光を照射して回転波束を励起することにより、いわゆる field free な状況で分子配列を実現できることが知られている。非断熱領域での分子配向についても静電場の存在下で超短パルスレーザー光を照射する手法が理論的に提案されているが、双極子モーメントが 1 D 程度以下の多くの分子に対しては極めて大きな静電場 (50 kV/cm 程度以上) を必要とし、あまり効果的な手法でないことを量子力学的数値計算により明らかにした。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、回転周期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に遮断されるように整形できれば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) field free の状況で実現できる可能性があることを数値計算により明らかにした。

6.7.2 非断熱的に配列した分子中からの高次高調波発生における楕円率依存性

高強度フェムト秒レーザー光を原子・分子に照射することにより発生する高次高調波は典型的な非摂動論的現象の一つであり、極端紫外軟 X 線領域の超短パルスコヒーレント光源としての有用性から、実験的・理論的研究が 1990 年前後から精力的に進められている。ランダムに配向した分子中からの高次高調波発生についても、既に 10 年以上前に酒井らによって、イオン化ポテンシャルのほぼ等しい姉妹原子 (N_2 分子の場合は Ar) とほぼ同様の高次高調波発生特性を示すことなどが明らかとなっていた。

しかしながら、分子軌道の対称性などに関連する物理過程の詳細に関する研究については、配列した分子試料を用いることが必要であり、最近の分子操作技術の進展を待たねばならなかった。高次高調波の発生実験では、高い分子密度を得るために、分子線バルブの直下にレーザー光を集光する必要がある。このような条件では、分子の回転温度は数 10 K 程度と比較的高く、分子を断熱的に配列させることは極めて困難であるが、超短パルス高強度レーザー光で回転波束を励起し、非断熱的に配列させる手法が有効である。

本研究グループでは、非断熱的に配列した分子を試料として用い、分子中からの高次高調波発生の物理過程の詳細を明らかにすべく研究を進めている。昨年度は、高次高調波の信号だけでなく、同じ実験条件下で不可避的に発生するイオンの信号も観測する独自の実験手法を採用することにより、高次高調波発生過程におけるトンネルイオン化過程と再結合過程の寄与を識別することを可能にした。その結果、理論的にその発現が予想されていた再結合過程における量子干渉効果を CO_2 分子中での destructive interference として観測することに初めて成功した。この研究 (Nature (London) **435**, 470-474 (2005)) は、超高速科学分野

の注目すべき成果として、Nature の News & Views 欄で絶賛された (Jonathan P. Marangos, "Molecular structure in an instant," Nature (London) **435**, 435 (2005))。

今年度は、非断熱的に配列した分子 (N_2, O_2, および CO_2) を試料とし、高次高調波発生の楕円率依存性を測定した。分子軸と楕円の長軸が平行のときと垂直のときとで楕円率依存性が異なり、平行なときの方が垂直なときよりも楕円率の増大とともに高調波強度が早く減少することを明らかにした。このことは分子軌道の形状から直感的に予想される結果と一致するが、新たに開発した理論モデルで説明することにも成功した。また、上記の destructive interference の効果を楕円率依存性で観測することにも初めて成功した。具体的には、N_2 分子の 31 次高調波について分子軸と楕円の長軸が平行なときの楕円率依存性において、直線偏光 (楕円率 $\varepsilon \sim 0$) のときに明瞭なディップが現れることを観測した。

6.7.3 非断熱的に配列した分子中からの高次高調波発生に対する偏光ゲート法の適用

物質中の超高速現象を探究するため、レーザーが 1960 年に発明されて以来、そのパルス幅を短くする努力が続けられている。現在では、フェムト秒 (fs = 10^{-15} 秒) パルスの利用によって、例えば分子内の原子核のダイナミクスや励起状態の緩和過程が観測されている。一方、原子分子内の電子のダイナミクスを観測するためには、典型的に 100 アト秒 (as = 10^{-18} 秒) 程度の分解能が必要である。そのような、アト秒領域の超短パルス光源として周波数帯域の拡大が可能な高次高調波が注目されている。

媒質として原子を用いた場合、高次高調波は基本波が直線偏光の時に発生効率が最大となり、楕円率を大きくするに従い、急激に効率が落ちる。パルス中で楕円率が変化し、ピーク強度付近で一瞬だけ直線偏光となる時間依存偏光パルスを用いれば、高調波のパルス幅を短くすることができると期待される。この原理に基づいて、アト秒パルスの発生を目指す手法を偏光ゲート法とよぶ。配列した分子に偏光ゲート法を適用することにより、上述した高次高調波発生における分子に特有な楕円率依存性に基づいて、アト秒パルスのパルス幅や偏光特性を制御するための全く新しいアプローチとなるばかりでなく、分子内の電子波束のダイナミクスをアト秒精度で制御する技術につながると期待される。

今年度は、まず、非断熱的に配列した分子試料に対して偏光ゲート法を適用するための技術開発を行った。すなわち、配列した分子試料の分子軸の方向とピーク強度付近の直線偏光の方向を一定に保つため、時間依存偏光パルスを発生するための干渉計にフィードバックシステムを組み込んだ。開発した技術を用い、分子ジェットに対する相対的な集光位置を変化させ、再衝突する電子の主要なトラジェクトリーを選択しつつ、分子軸と直線偏光の向きが平行のときと垂直のときの高調波のスペクトルを観測した。将来 (絶対位相の制御された) 数サイクルパルスを基本波としてアト秒パルスを発生させるために必要な重要な知見を得ることができた。

6.7.4 分子内量子過程のフィードバック型最適制御技術の高度化と非断熱的分子配列への適用

気相分子を試料とする従来の最適制御実験では、多くの場合飛行時間型 (Time-Of-Flight: TOF) 質量分析装置を用いたいわゆる TOF スペクトルの信号をフィードバック用の信号として用いている。一方、超短パルス高強度レーザー光の照射によって生成される多価の分子イオンからクーロン爆裂 (Coulomb explosion) によって生成されるフラグメントイオンを観測する場合、2 次元イオン画像化法を用いれば、分子がクーロン爆裂する直前の構造を反映したフラグメントイオンの運動量の角度分布の情報が得られ、ポンプ-プローブ法と併用すれば超高速分子ダイナミクスに関する豊富な情報が得られる。この 2 次元イオン画像をフィードバック用の信号として用いることができれば最適制御実験を従来と質的に異なる高度なものとすることができる。

今年度は、実際に 2 次元イオン画像をフィードバック用の信号として用いる技術を開発し、非断熱領域の分子配列の最適制御に適用した。N_2 分子を試料とし、ポンプ光のエネルギーが一定の条件で half revival 付近の配列度を最大化するようにフィードバックをかけた。その結果、最適パルスとして単一の超短パルスが得られるときと、強度のほぼ等しいダブルパルス (個々のピーク強度は単一パルスの半分以下) が得られるときがあることが分かった。ダブルパルスの効果について時間に依存する Schrödinger 方程式を数値積分して調べたところ、half revival 付近よりもむしろポンプ光入射直後 (量子力学的に full revival と同等) の配列度の増大に有効であることを示唆する結果が得られた。このため、干渉計を組んで発生させたダブルパルスの時間間隔を変化させて配列度を調べたところ、特定の時間間隔で配列度が極大値を取ることが分かった。この結果は、数値計算の結果と定性的に一致するものであった。本研究の進め方自体が、実験と理論が互いに他をフィードバックする関係にあることが特長であり、一連の研究により、回転波束の形成メカニズムについて重要な知見が得られた。

6.7.5 円偏光したポンプ光を用いた非断熱的分子配列の制御

非断熱的分子配列は、通常直線偏光したポンプ光により回転波束を励起することにより実現される。円偏光したポンプ光を用いると、相互作用ポテンシャルの形状と符号から、ポンプ光の波動ベクトルと平

行な方向に配列が実現すると期待される。この理論的予想を、2 次元イオン画像化法を用いて確認した。今後、ポンプ光 (およびプローブ光) の波動ベクトルと平行な方向に配列した分子試料を用い、高次高調波発生や多光子イオン化過程における、その特異な配置に付随する多彩な効果を解明する予定である。

6.7.6 4 年生特別実験

夏学期

複雑な非線形光学現象の一例として、楕円偏光したフェムト秒レーザーパルスが、希ガスの充填された中空ファイバーを通過した後に、偏光状態がどのように変化するかを実験的に調べるとともに、シミュレーションコードを開発して実験結果との比較検討を行った。

冬学期

フェムト秒パルスの圧縮手法として、希ガスを充填した中空ファイバーとプリズム対 (さらにはチャープミラー) を用いる方法が知られているが、この手法は中空ファイバーの端面のダメージや希ガスのイオン化によりさらなる高出力化が困難である。一方、ガラス板での自己位相変調とピンホールによる spatial filter 効果を併用する手法は、ビーム径の拡大による高出力化の自由度が高い。実際に 2 つの手法で実験を行うとともに、シミュレーションコードを開発して実験結果との比較検討も行った。中空ファイバーを用いる方法の方がより短パルスを得ることができたが、ガラス板を用いる方法でもパルス圧縮が可能であることを確認した。実験条件の最適化により、さらなる短パルス化が期待できる。

その他

本年度は大学院生 2 名が加入する一方、博士 2 名と修士 1 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海永壮一郎君、宮川裕君 (以上夏学期)、堀口直也君、吉元拓郎君 (以上冬学期) の活躍によるものである。

なお、本年度の研究活動は、以下の補助金によって行われた。ここに記して謝意を表する。

1. 科学研究費補助金、基盤研究 (S)、「未到時間領域の超短パルス光発生とその計測」(研究代表者：酒井広文)。
2. 科学研究費補助金、特定領域研究、計画研究、「強光子場とパルス整形技術による分子操作と量子過程制御」(研究代表者：酒井広文)。

＜受賞＞

[1] 峰本紳一郎、「非断熱的に配向した 3 原子分子を用いた構造変形の観測」(共同研究者：金井恒人、酒井広文)、第 10 回レーザー学会優秀論文発表賞、2005 年 5 月.

[2] 金井恒人、「非断熱的に配向した分子からの高次高調波発生における再結合過程の役割」(共同研究者：峰本紳一郎、酒井広文)、第 10 回レーザー学会優秀論文発表賞、2005 年 5 月.

[3] Tsuneto Kanai, “Ellipticity dependence of high-order harmonic generation from aligned molecules,” (Coauthors: Shinichirou Minemoto and Hirofumi Sakai) The Student Award Paper, International Conference on Quantum Electronics 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005 (IQEC/CLEO-PR 2005), Tokyo, Japan, July 2005.

[4] 金井恒人、「配列分子中における高次高調波発生の実験的・理論的研究」、平成 17 年度第 2 回学生表彰「東京大学総長賞」.

＜報文＞

(原著論文)

[5] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Quantum interference during high-order harmonic generation from aligned molecules,” Nature (London) **435**, 470–474 (2005).

[6] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Shaping femtosecond pulses with targeted time-dependent polarization (in Japanese),” The Review of Laser Engineering **33**, 322–328 (2005).

[7] Haruka Tanji, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Three-dimensional molecular orientation with combined electrostatic and elliptically polarized laser fields,” Phys. Rev. A **72**, 063401 (2005).

(会議抄録)

[8] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, Tsuneto Kanai, and Hirofumi Sakai, “Control of multiphoton ionization processes in aligned I_2 molecules by optimizing time-dependent polarization of femtosecond pulses,” Ultrafast Phenomena XIV, Springer, T. Kobayashi, T. Okada, T. Kobayashi, K. A. Nelson, and S. De Silvestri (Eds.), pp. 161–163 (2005).

[9] Yutaka Nomura, Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Efficient generation of high-order sum and difference frequencies in the XUV region by mixing a weak, longer-wavelength field,” Ultrafast Phenomena XIV, Springer, T. Kobayashi, T. Okada, T. Kobayashi, K. A. Nelson, and S. De Silvestri (Eds.), pp. 198–200 (2005).

[10] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Control of tunnel ionization in molecules by intense femtosecond laser pulses with time-dependent polarization,” Ultrafast Phenomena XIV, Springer, T. Kobayashi, T. Okada, T. Kobayashi, K. A. Nelson, and S. De Silvestri (Eds.), pp. 310–312 (2005).

(国内雑誌)

[11] 酒井広文、「レーザー光による分子操作と分子物理学の新展開」日本物理学会誌、**61**、263–267 (2006).

[12] 酒井広文、「静電場と楕円偏光したレーザ電場の併用による 3 次元分子配向」、レーザ加工学会誌、**13**、33–35 (2006).

(学位論文)

[13] Tsuneto Kanai, “Ultrafast tomography of molecular orbitals with high-order harmons generation,” Doctor’s thesis, March 2006.

[14] 鈴木隆行、「イオン画像のフィードバックを用いた分子の回転状態の最適化」、博士論文、2006 年 3 月.

[15] 深澤正裕、「断熱および非断熱領域における 1 次元分子配向」、修士論文、2006 年 3 月.

＜学術講演＞

(国際会議)

招待講演

[16] Hirofumi Sakai, “Manipulation of molecules and its applications,” International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO) 2005, St. Petersburg, Russia, May 2005.

[17] Hirofumi Sakai, “New types of molecular control experiment with a sample of aligned molecules,” The fourteenth International laser Physics Workshop (LPHYS ’05), Kyoto, Japan, July 2005.

[18] Hirofumi Sakai, “Frontiers of molecular science based on molecular manipulation techniques,” The University of Tokyo COE21 Program, “Quantum Extreme Systems and Their Symmetries,” International Workshop 2005, Tokyo, Japan, October 2005.

[19] Hirofumi Sakai, “Quantum interference in the recombination process of high-order harmonic generation from aligned molecules,” The International Conference on Multiphoton Processes (ICOMP) X, Quebec, Canada, October 2005.

[20] Hirofumi Sakai, “Molecular control experiments with a sample of aligned molecules,” 2005 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, Hawaii, U.S.A., December 2005.

[21] Hirofumi Sakai, “Quantum interference in the recombination process of high-order harmonic generation from aligned molecules,” Ultra-Fast Dynamic Imaging Workshop, London, U.K., April 2006.

[22] Hirofumi Sakai, “Molecular manipulation techniques and their applications,” International conference on many particle spectroscopy of atoms, molecules, clusters, and surfaces, Rome, Italy, June 2006.

[23] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Ellipticity dependence of high-order harmonic generation from aligned molecules,” International Conference on Quantum Electronics 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005 (IQEC/CLEO-PR 2005), Tokyo, Japan, July 2005.

一般講演

[24] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Quantum Interference of Electron de Broglie Waves within a Single Molecule,” The Conference on Lasers and Electro-Optics 2005/The Quantum Electronics and Laser Science Conference 2005 (CLEO/QELS 2005), Maryland, U.S.A., May 2005.

[25] Shinichirou Minemoto, Tsuneto Kanai, and Hirofumi Sakai, “Structural Deformation of Aligned Triatomic Molecules Under an Intense Laser Field,” International Conference on Quantum Electronics 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005 (IQEC/CLEO-PR 2005), Tokyo, Japan, July 2005.

[26] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Ellipticity dependence of high-order harmonics generated in aligned molecules,” Joint Conference on Ultrafast Optics V and Applications of High Field and Short Wavelength Sources XI, Nara, Japan, September 2005.

[27] Shinichirou Minemoto, Tsuneto Kanai, and Hirofumi Sakai, “Structural Deformation of Aligned Triatomic Molecules Under an Intense Laser Field,” The 3rd COE21 Workshop “Frontiers of Laser and Optical Sciences,” Tokyo, Japan, October 2005.

[28] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Ellipticity dependence of high-order harmonics generated in aligned molecules,” The 3rd COE21 Workshop “Frontiers of Laser and Optical Sciences,” Tokyo, Japan, October 2005.

[29] Takayuki Suzuki, Yu Sugawara, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Dynamic alignment of linear molecules with circularly polarized laser pulses,” The 3rd COE21 Workshop “Frontiers of Laser and Optical Sciences,” Tokyo, Japan, October 2005.

[30] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Basis for Ultrafast Imaging of Molecular Orbitals with High-Order Harmonic Generation,” 15th International Conference on Ultrafast Phenomena, Pacific Grove, USA, July 2006.

[31] Takayuki Suzuki, Yu Sugawara, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Optimal Control of Molecular Alignment with the Feedback of Ion Images,” 15th International Conference on Ultrafast Phenomena, Pacific Grove, USA, July 2006.

(国内会議)

招待講演

[32] 酒井広文、「レーザー光による分子操作とその応用」、科学研究費補助金基盤研究 (C) 企画調査「粒子相関と配向・偏極で探る有限量子系のダイナミクス」第 1 回研究会、つくば市、2005 年 6 月.

[33] 酒井広文、「レーザー光による分子操作を基盤とする極限計測と制御」、科学研究費補助金基盤研究 (C) 企画調査「粒子相関と配向・偏極で探る有限量子系のダイナミクス」第 2 回研究会、京都市、2005 年 9 月.

[34] 酒井広文、「気相分子の配列・配向技術に基づく分子物理学の新展開」、第 16 回光物性研究会、大阪市、2005 年 12 月.

[35] 酒井広文、「回転制御で探る分子ダイナミクス」、科学研究費補助金基盤研究 (C) 企画調査「粒子相関と配向・偏極で探る有限量子系のダイナミクス」第 3 回研究会、つくば市、2006 年 1 月.

[36] 酒井広文、「レーザー光による分子操作とその応用」、日本物理学会第 61 回年次大会、松山市、2006 年 3 月.

[37] 酒井広文、「気相分子の配列・配向制御で切り開く分子科学の新展開」、理研シンポジウム「共鳴・配向による分子反応の量子デザイン」、和光市、2006 年 5 月.

[38] 金井恒人、峰本紳一郎、酒井広文「配列分子からの高次高調波発生における量子干渉効果」、レーザー学会学術講演会第 26 回年次大会、さいたま市、2006 年 2 月.

一般講演

[39] 金井恒人、峰本紳一郎、酒井広文「配列した分子からの高次高調波強度の楕円率依存性とその物理過程」、日本物理学会 2005 年秋季大会、京田辺市、2005 年 9 月.

[40] 峰本紳一郎、金井恒人、酒井広文「非断熱的に配列した 3 原子分子の構造変形の観測」、2005 年分子構造総合討論会、東京、2005 年 9 月.

[41] 鈴木隆行、菅原悠、峰本紳一郎、酒井広文、「円偏光したフェムト秒パルスによる窒素分子の非断熱的配列制御」、2005 年分子構造総合討論会、東京、2005 年 9 月.

[42] 菅原悠、鈴木隆行、峰本紳一郎、金井恒人、酒井広文、「フェムト秒パルスの波形整形による非断熱領域での分子配列の最適制御」、レーザー学会学術講演会第 26 回年次大会、さいたま市、2006 年 2 月.

[43] 峰本紳一郎、櫃本研太郎、金井恒人、酒井広文「フェムト秒時間依存偏光パルスによる配列分子からの高次高調波発生」、2006 年春季応用物理学関係連合講演会、東京、2006 年 3 月.

[44] 菅原悠、鈴木隆行、峰本紳一郎、酒井広文、「イオン画像のフィードバックを用いた非断熱的分子配列の最適制御」、2006 年春季応用物理学関係連合講演会、東京、2006 年 3 月

＜その他＞

[45] 酒井広文、「強光子場とパルス整形技術による分子操作と量子過程制御 (Molecular manipulation with an intense laser field and quantum control with pulse shaping techniques)」、科学研究費補助金特定領域研究「強レーザー光子場における分子制御」平成 17 年度報告書.

[46] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Quantum interference during high-order harmonic generation from aligned molecules,” Virtual Journal of Ultrafast Science, **4**, No. 11 (2005).

[47] Haruka Tanji, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Three-dimensional molecular orientation with combined electrostatic and elliptically polarized laser fields,” Virtual Journal of Ultrafast Science, **5**, No. 1 (2006).

7 生物物理

7.1 桑島研究室

桑島研究室では、球状蛋白質の天然立体構造構築（フォールディング）の物理原理に関する研究を行なっている。研究内容は、(1) 蛋白質工学を用いた蛋白質のフォールディング研究、(2) 細胞内での蛋白質フォールディングに関与する分子シャペロンの作用機構、(3) 新しい測定技術と計算機シミュレーションを利用した蛋白質のフォールディング研究の三つに大別される。

7.1.1 蛋白質工学を用いた蛋白質のフォールディング研究

球状蛋白質の構造形成機構を明らかとするには、天然状態の熱力学的安定性に関する研究とともに、巻き戻り過程の速度論的な研究が必要である。多くの蛋白質で、巻き戻り反応初期に二次構造を持った過渡的な中間状態の蓄積されることが知られている。この中間体は、平衡条件下で観測されるモルテン・グロビュール（MG）状態と同一であり、蛋白質構造形成にとって必須であると考えられている。このような中間体の構造や巻き戻り反応の遷移状態の構造を明らかにすることが蛋白質のフォールディング研究にとって重要である。そのためには、蛋白質工学の手法を用いて、対象とする蛋白質に部位指向的な変異を導入し、導入されたアミノ酸変異がその蛋白質の構造安定性や巻き戻り速度過程にどのような影響を及ぼすかを調べることが有効なアプローチとなる。われわれは、このような観点から、いくつかの代表的な球状蛋白質を対象に、天然構造の熱力学的安定性、巻き戻りとアンフォールディングの速度過程を調べている。

カルシウム非存在下におけるヤギ α ラクトアルブミンのフォールディング反応

(友寄、中村、槙、桑島)

カルシウム結合蛋白質 α ラクトアルブミンは、MG 状態をフォールディング中間体として示す代表的な球状蛋白質であり、フォールディング研究のモデル蛋白質でもある。われわれのこれまでの研究より、1 mM の Ca^{2+} 存在下では、ヤギ α ラクトアルブミンの遷移状態の構造形成開始部位は α ドメインの広範囲にわたって分布するのではなく、Ca^{2+} 結合部位と C ヘリックス、β ドメイン間のインターフェースを含む領域に局在化していることが示されている。

本研究では、Ca^{2+} 非存在下では、この蛋白質のフォールディング遷移状態の構造がどのようになるかを明らかにする。そのため、Ca^{2+} 結合部位近傍および α ドメイン、β ドメインの各部位に変異を導入した変異体について、Ca^{2+} 非存在下の ϕ 値解析を試みた。しかし、大腸菌中に発現した組換えヤギ α ラクトアルブミン（N 末 Met 付）は、Ca^{2+} 非存在下では天然状態が著しく不安定化するため、野生型と変異体の熱力学的安定性に有意な差が見られなかった。

そこで、組換え体ウシ α ラクトアルブミンの N 末端から 2 番目の残基 Glu を取り除くと蛋白質が安定化することが知られているので、同様の手法をヤギ α ラクトアルブミンに適用し変異体 (ΔE1) を作成した。この擬野生型を用いて Ca^{2+} 非存在下において円偏光二色性 (CD) を用いてアンフォールディング転移曲線を測定したところ、野生型組換え体に比べて天然状態と MG 中間体の安定性が大きく向上していることがわかった。

ヒト α ラクトアルブミンの安定性とフォールディング反応

(中村、佐伯、槙、桑島)

ヒトとヤギの α ラクトアルブミンの天然立体構造はほとんど同一であるにも関わらず、フォールディング中間体の安定構造領域が異なっている。本研究はヒト α ラクトアルブミンの遷移状態の構造を調べ、既に知られているヤギ α ラクトアルブミンの遷移状態の構造と比較することを目的とする。そのため、現在まで、ヒト α ラクトアルブミンの様々な変異体の作製を試みたが、それのうち数種類の変異体は精製過程で巻き戻らなかった。また巻き戻った変異体についても収量が少なかった。そこで、先のヤギ α ラクトアルブミンの例にならい、組換え体の N 末端 2 番目に存在する Lys 残基を削除した変異体 (ΔK1 変異体) を作製し、その安定性を調べた。その結果 ΔK1 変異体は真性体と同程度の安定性を有していることがわかった。ΔK1 変異体は野生型組換え体に比べて収量も多いため、ΔK1 変異体を擬野生型としたヒト α ラクトアルブミン変異体の作製を予定している。

NMR 法によるヤギ α ラクトアルブミンのフォールディング機構の解析

(中村、湯川 (4 年生特別実験)、槙、桑島)

いろいろな哺乳類動物種の α ラクトアルブミンの中で遷移状態についての知見が得られているのは、ヤギ α ラクトアルブミンだけであり、この遷移状態の知見を核磁気共鳴（NMR）法による得られた中間体の構造情報と比較・検討することは興味深い。そこで本研究では、ヤギ α ラクトアルブミンの天然状態及び MG 中間体の重水素/水素（H/D）交換反応

を NMR により観測し、この蛋白質のフォールディング機構解明に寄与することを目的とする。^{15}N 標識したヤギ α ラクトアルブミンの ^{15}N-NOESY 及び ^{15}N-TOCSY スペクトルを測定し、主鎖アミドプロトンの帰属を行った。次に D_2O 溶媒に溶解したヤギ α ラクトアルブミンの HSQC スペクトルの時間変化を追跡する H/D 交換実験から、C-ヘリックス付近に存在するアミドプロトンが強く保護されていることがわかった。

イヌ・ミルク・リゾチームの巻き戻りとアンフォールディングの速度論的解析

（仲谷、槙、桑島：佐伯博士（東大）、相沢博士（北大）、出村教授（北大）、河野教授（北大）との共同研究）

Ca^{2+} 結合型リゾチームであるイヌ・ミルク・リゾチームのフォールディング機構を明らかにするために、ストップトフロー蛍光法とストップトフロー CD 法を用いて、Ca^{2+} 存在下・非存在下での巻き戻りとアンフォールディング反応の測定を行った。トリプトファン蛍光による測定では、Ca^{2+} 濃度に関わらず、巻き戻りとアンフォールディング反応のいずれも複数の指数関数で表すことができた。Ca^{2+} 存在下・非存在下で得られた反応速度定数を比較すると、巻き戻り反応は Ca^{2+} 依存しないがアンフォールディング反応は Ca^{2+} により著しく遅くなることがわかった。また、Ca^{2+} 非存在下で遠紫外領域 CD により観測したアンフォールディング反応は、装置の不感時間内の変化に引き続き単一指数関数的なシグナル変化を示した。後者の速度定数は蛍光測定で得られた遅い相の速度定数とほぼ一致した。これらの結果は、アンフォールディング中間体の蓄積を示している。今後は引き続き、ストップトフロー CD 法を用いて Ca^{2+} 存在下・非存在下の巻き戻りとアンフォールディングを測定する予定である。

NMR 法を用いたスタフィロコッカル・ヌクレアーゼ変異体の中間体の特徴付け

(槙、桑島)

スタフィロコッカル・ヌクレアーゼ (SNase; 149 残基) は、フォールディングの研究における代表的なモデル蛋白質である。SNase のプロリン残基を全て他のアミノ酸残基に置換した変異体である無プロリン SNase (P11A/P31A/P42A/P47T/P56A/P117G) はそのフォールディング研究にとって重要な役割を果たしている。われわれは、この無プロリン SNase のフォールディング中間体の性質を残基レベルで詳細に明らかにするために、NMR 法を用いて研究している。

昨年度は、主鎖の NMR シグナルの帰属及び天然条件下での H/D 交換反応を用いた安定性の解析を行い、β ストランド II, III と V が他の領域よりも安定であることが示された。今年度は、無プロリン SNase の尿素による平衡論的アンフォールディングを HSQC スペクトルを用いて調べた。およそ 30 アミノ酸残基について、25°C において天然状態の NMR シグナル強度を尿素濃度 0 M から 6.5 M まで測定し、それぞれのアミノ酸残基についてシグナル強度を尿素濃度の関数としてプロットした。その結果、アンフォールディング転移は、観測しているアミノ酸残基によらず、蛍光や CD で観測した場合と同じ尿素濃度付近で協同的に起こっていることが分かった。この結果は、天然条件下での H/D 交換実験で示される中間体の化学シフトは、天然状態の化学シフトとは異なることを意味している。

スタフィロコッカル・ヌクレアーゼのフォールディング開始部位の研究

(高橋 (龍)、槙、桑島)

われわれのこれまでの研究から、1. SNase のフォールディングが複数の開始部位から始まり、2. 巻き戻り反応の遷移状態で β サブドメインほぼ全体にわたって天然構造が出来ていることがわかっている。今年度は、擬野生型（無プロリン SNase）の変異体 A90S について、蛋白質の発現・精製を行い、そのフォールディング・アンフォールディング過程を蛍光ストップトフロー法を用いて詳細に調べた。フォールディングは、擬野生型と同様複数の相からなる反応であったが、アンフォールディングは、擬野生型とは異なり二相からなる反応であった。しかし、それぞれの相の蛍光強度比は大きく異なり、片方の相の寄与は非常に小さいものであった。今後はダブルジャンプ法による実験を行い、他の変異体で得られた結果と併せて、SNase のフォールディング機構を調べる予定である。

緑色蛍光蛋白質変異体の酸変性中間体の特徴付け

(榎、槙、伊野部、桑島)

発光オワンクラゲ由来の緑色蛍光蛋白質 (GFP) は、β バレル型の構造の内側に、天然状態で緑色の蛍光を発する発色団を持ち、その特有の蛍光は細胞内などの複雑な環境下でも天然状態形成の良い指標となる。GFP（Cycle3 変異体）の酸変性を、X 線小角散乱、トリプトファンの蛍光及び緑色発色団の蛍光をプローブとして測定し、pH 4 において平衡論的中間体が蓄積することを明らかにした。詳細な解析の結果、pH 4 で蓄積する中間体は、片側を中心にゆるく構造のできた MG 状態の性質を持つことが明らかになった。さらに、pH 4 で蓄積する平衡論的な中間状態とわれわれがこれまで明らかにしてきた速度論的中間体の関係を調べるため、pH ジャンプによる巻き戻りを GFP の発色団とトリプトファンからの蛍光をプローブとして調べた。その結果、速度論的フォールディング中間体が pH 4 で観測された平衡論的な中間状態と同一であることが示された。この結果は、GFP が MG 状態の性質を持った生産的な中間体を経て階層的に巻き戻ることを示している。

7.1.2 細胞内での蛋白質フォールディングに関与する分子シャペロンの作用機構

細胞内での蛋白質の構造形成はさまざまの分子シャペロンにより介助されている。分子シャペロンは、細胞内での蛋白質の構造形成とアセンブリーに関係するのみならず、蛋白質の細胞内輸送、DNA の複製、ストレス応答など、細胞内でのさまざまな現象に関与しており、分子シャペロンの概念は、生物物理学、生化学、分子生物学、細胞生物学、医学、バイオテクノロジーなどの広い分野を包括する新しい研究分野を提供しつつある。われわれは、このような *in vivo* の現象を理解することを目的として、分子シャペロンの一つ、大腸菌のシャペロニン（GroEL/ES）に関する研究を行っている。特に、蛋白質の巻き戻りの速度過程に及ぼすシャペロニンの影響やシャペロニンの機能発現にとって必要な ATP によるアロステリックな構造転移を *in vitro* のモデル系を用いて調べている。

GroEL の単一リング変異体（SR1）のヌクレオチドによる構造転移の速度論的解析

（高橋（一）、槙、桑島: 木下助教授 (東大・医科研) との共同研究）

GroEL はヌクレオチドによるアロステリック転移を起こすことによって標的蛋白質を効率的に巻き戻す。われわれはその詳細な分子機構を明らかにすることを目的として研究を行っているが、GroEL の二重リング構造のためそのアロステリック転移は複雑である。そこで、単一リングだけからなる GroEL の変異体（SR1）を作成し、その構造転移をスットプトフロー蛍光スペクトルを用いて調べた。

SR1 のアロステリック転移に相当する相の見かけの速度定数の ATP 濃度依存性を詳細に解析した結果、単純な一つのシグモイドでは表されないことが明らかとなった。この結果は GroEL には既に確認されている ATP 結合部位の他に ATP と弱く結合する部位が存在することを示唆している。そこで、表面物性の形状と静電ポテンシャルの類似性検索とフレキシブルドッキングの手法を利用して第二の ATP 結合部位を推定し、そこへの ATP の結合を阻害するような変異を SR1 に導入した (A251L/A258L/A275L または A251L/A258L/A275I)。この SR1 の変異体を用いてアロステリック転移の見かけの速度定数の ATP 濃度依存性を解析したところ、推定された部位が第 2 の ATP 結合部位であることを示唆する結果が得られた。また、第二の ATP 結合部位への阻害剤である ADP が過剰に存在すると SR1 のアロステリック転移の ATP 濃度依存性の振る舞いが変化することが明らかになった。現在、さまざまな濃度の ADP 存在下における SR1 の構造転移の解析を進めている。

シャペロニン GroEL/ES がスタフィロコッカル・ヌクレアーゼ の巻き戻りに及ぼす影響

(鈴木、槙、桑島)

以前のわれわれの研究では GroEL が SNase の巻き戻りに与える影響が調べられたが、プロリン異性化のため GroEL 存在下での SNase の巻き戻りは複雑であった。そこで今回、プロリンを全て他のアミノ酸に置換した無プロリン SNase に A69T という変異を導入した変異体を標的蛋白質として用いた。蛍光ストップトフロー法を用いて、この変異体の巻き戻り過程を GroEL 存在下・非存在下で測定した。シングルジャンプ法により GroEL 存在下・非存在下での A69T の巻き戻りの速度過程を観測し、ダブルジャンプ法により天然状態の蓄積過程を観測した。今後は GroEL,GroES,ATP 存在下で同様の測定を行う予定である。

7.1.3 新しい測定技術と計算機シミュレーションを利用した蛋白質のフォールディング研究

蛋白質のフォールディング機構を実験的に研究するには、ストップトフロー法などの高速反応測定法を用いて、巻き戻りの速度過程を、光吸収、CD、蛍光スペクトル、X 線溶液散乱などの分光学的な測定手段を用いて調べる。しかし、現在まで用いられているストップトフロー法の時間分解能はミリ秒が限界であり、サブミリ秒以下の速い反応過程を追跡することはできない。この時間分解能の限界は、多くの場合、検出器にあるのではなく、フォールディング反応を誘起するためのストップトフロー混合装置の混合時間によってもたらされる。現在、ミリ秒内に素早く巻き戻ってしまう蛋白質の例がいくつも明らかとなっており、サブミリ秒からマイクロ秒の時間域におけるフォールディング反応を実験的に研究することが重要となっている。さらに、現在では，分子動力学（MD）などの計算機シミュレーションによる蛋白質のアンフォールディング過程の解析もフォールディング研究には有効なアプローチである。われわれは、このような観点から新しい測定技術と計算機シミュレーションを利用した蛋白質のフォールディング研究を行っている。

高圧下温度ジャンプ装置による蛋白質のフォールディング反応の観測

（鎌形、桑島）

以前に開発した高圧下温度ジャンプ装置には、1. 他の温度ジャンプ装置と比較して不感時間が長い、2. S/N 比が低い、3. 大量の試料が必要、などの問題点があった。今年度は、高圧下温度ジャンプ装置を大幅に改良し、これらの問題点を改善した。さらに、本年度改良した高圧下温度ジャンプ装置を用いて、モ

デル蛋白質のフォールディング反応を測定できるかどうかを確かめるために、以下の実験を行った。従来の温度ジャンプ装置で詳細に特徴付けられている、α ラクトアルブミンの変性反応を常圧で測定し、過去のデータと一致することを確かめた。次に、高圧条件下で、低温変性した α ラクトアルブミンの巻き戻り反応を測定した結果、今までに観測されていなかった素早い反応（中間体形成反応に対応していると考えられる）を測定することに成功した。これらの結果は、新しく開発した高圧下温度ジャンプ装置が蛋白質のフォールディング反応を測定するのに有用であることを示している。

高温分子動力学シミュレーションによる、α ラクトアルブミンのアンフォールディング経路の原子レベルでの解明

(茎口、桑島**:** 池口助教授（横市大)、木寺教授（横市大）との共同研究)

以前行われた、α ラクトアルブミンの真正体と組換え体の高温（398 K と 498 K）MD シミュレーションの結果に関して以下の解析を行った。

498 K における計算では、遷移状態を超えてアンフォールディングしたトラジェクトリーを得ることができた。蛋白質アンフォールディングの様な多自由度系の確率過程を明らかにするためには、構造変化の特徴を明確に記述できる新しい反応座標系を開発しなければいけない。そのために、まず α ラクトアルブミンの構造を特徴的な部分構造に分け、それら部分構造の形成度で張られた座標空間上で主成分解析を行った。主成分解析から得られた主軸を反応座標として採用し、シミュレーションから得られた構造群をクラスタリングした。クラスタリングから得られた遷移状態は、当研究室において実験により得られた ϕ 値解析の結果と一致した (相関係数＝ 0.8)。さらに反応座標系への投影情報に基づいて、各トラジェクトリーのアンフォールディング経路を分類する手法であるマルチプル・アライメントを開発した。これにより組み換え体と真正体とでアンフォールディング経路が違うことを示し、各トラジェクトリーの反応座標に沿った構造変化を詳細に記述することができた。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Y. Yamada, T. Yajima, K. Fujiwara, M. Arai, K. Ito, A. Shimizu, H. Kihara, K. Kuwajima, Y. Amemiya & M. Ikeguchi: Helical and expanded conformation of equine beta-lactoglobulin in the cold-denatured state. *J. Mol. Biol.* (2005) **350** 338-348.

[2] R. Iizuka, T. Yoshida, N. Ishii, T. Zako, K. Takahashi, K. Maki, T. Inobe, K. Kuwajima & M. Yohda: Characterization of archaeal group II chaperonin-ADP-metal fluoride complexes: implications that group II chaperonins operate as a "two-stroke engine". *J. Biol. Chem.* (2005) **280** 40375-40383.

[3] T. Oroguchi, M. Ikeguchi, K. Saeki, K. Kamagata, Y. Sawano, M. Tanokura, A. Kidera & K. Kuwajima: Atomically detailed description of the unfolding of α-lactalbumin by the combined use of experiments and simulations. *J. Mol. Biol.* (2005) **354** 164-172.

[4] K. Kamagata & K. Kuwajima: Surprisingly high correlation between early and late stages in non-two-state protein folding. *J. Mol. Biol.* (2006) **357** 1647-1654.

[5] S. Enoki, K. Maki, T. Inobe, K. Kamagata, T. Oroguchi, H. Nakatani, K. Tomoyori, K. Takahashi & K. Kuwajima: The equilibrium unfolding intermediate observed at pH 4 and its relationship with the kinetic folding intermediates in green fluorescent protein. *J. Mol. Biol.* (2006) in press.

(会議抄録)

[6] K. Kuwajima, T. Inobe & M. Arai: The allosteric transition of the chaperonin GroEL from *Escherichia coli* studied by solution X-ray scattering. *Macromolecular Res.* (2006) in press.

(国内雑誌)

[7] 鎌形清人、桑島邦博**:** タンパク質フォールディング速度と構造パラメータとの相関解析、生物物理 (2006) **46**(3) 印刷中.

(学位論文)

[8] 榎佐和子**:** Folding mechanism of green fluorescent protein.（博士論文）

[9] 高橋一暢**:** Mechanisms of functional expression of *Escherichia coli* chaperonin studied by small angle X-ray scattering and fluorescence spectroscopy.（修士論文）

(著書)

[10] 桑島邦博：フォールディング反応ー速度論ー、「タンパク質科学　構造・物性・機能」（後藤祐児・桑島邦博・谷澤克行 編）分担執筆、（化学同人、2005）pp. 245-259.

[11] A.R. Fersht 著、桑島邦博、有坂文雄、熊谷泉、倉光成紀 訳：タンパク質の構造と機構（A.R. Fersht: Structure and Mechanism in Protein Science, W.H. Freeman, 1999; 翻訳）（医学出版、2005）

[12] 桑島邦博：「バイオインフォマティクス事典」（宮野悟・江口至洋・金久實・高木利久・中井謙太 編）分担執筆、（共立出版)、印刷中

[13] 桑島邦博**:** タンパク質のアンフォールディングとフォールディング、「生物物理学ハンドブック」（石渡信一・桂勲・ 桐野豊・ 美宅成樹 編）分担執筆、（朝倉書店)、印刷中

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[14] K. Maki, T. Endo & K. Kuwajima: Backbone ^{1}H, ^{13}C and ^{15}N resonance assignments and native-state hydrogen exchange of a proline-free variant of staphylococcal nuclease. *US-Japan Symposium on Folding, Design and Dynamics* (University of Pennsylvania Museum, Pennsylvania, USA, May 2-5, 2005) (Poster)

[15] S. Enoki, K. Maki, T. Inobe, & K. Kuwajima: Acid denaturation of green fluorescent protein characterized by small-angle X-ray scattering and fluorescence spectroscopy. *19th Symposium of the Protein Society* (Boston, USA, July 30-August 3, 2005) (Poster).

[16] K. Takahashi, T. Inobe, K. Maki, K. Kamagata & K. Kuwajima: GroEL-GroES heterooligomer studied by small-angle X-ray scattering. *19th Symposium of the Protein Society* (Boston, USA, July 30-August 3, 2005) (Poster).

[17] K. Kamagata, M. Arai & K. Kuwajima: What determines the folding rates of non-two-state and two-state proteins? *19th Symposium of the Protein Society* (Boston, USA, July 30-August 3, 2005) (Poster).

[18] T. Oroguchi, M. Ikeguchi, K. Saeki, K. Kamagata, Y. Sawano, M. Tanokura, A. Kidera & K. Kuwajima: Atomically detailed description of the unfolding behavior of α-lactalbumin by a combined use of kinetic experiments and molecular dynamics simulation. *19th Symposium of the Protein Society* (Boston, USA, July 30-August 3, 2005) (Poster).

[19] K. Maki, T. Endo & K. Kuwajima: Backbone ^{1}H, ^{13}C and ^{15}N resonance assignments and native-state hydrogen exchange of a proline-free variant of staphylococcal nuclease. *The 3rd COE Workshop "Frontiers of Laser and Optical Sciences"* (University of Tokyo, Tokyo, Japan, October 1-2, 2005) (Poster).

[20] K. Tomoyori, K. Saeki, K. Maki & K. Kuwajima: Folding of goat α-lactalbumin in the absence of calcium ions. *Pacifichem 2005* (Honolulu, Hawaii, USA, December 15-20, 2005) (Poster).

[21] H. Nakatani, M. Nakao, K. Maki, K. Saeki, T. Aizawa, M. Demura, K. Kawano & K. Kuwajima: Effect of Ca^{2+} ion on the folding mechanism of canine milk lysozyme. *Pacifichem 2005* (Honolulu, Hawaii, USA, December 15-20, 2005) (Poster).

[22] T. Oroguchi, M. Ikeguchi, A. Kidera, and K. Kuwajima: Transition-state structure of goat α-lactalbumin by molecular dynamics simulations. *The Biophysical Society 50th Annual Meeting* (Salt Lake City, USA, February 18-22, 2006) (Poster).

招待講演

[23] K. Kuwajima: Unification of the folding mechanism between two-state and non-two-state globular proteins. *US-Japan Symposium on Folding, Design and Dynamics* (University of Pennsylvania, Philadelphia, USA, May 2-5, 2005).

[24] K. Kuwajima: Studies on the chaperonin from *Escherichia coli* by solution X-Ray scattering. *3rd International Symposium of X-ray and Neutron Scattering on Integrated Molecular Systems* (Pohang, Korea, June 27-29, 2005).

[25] K. Kuwajima: Folding of α-lactalbumin and calcium-binding lysozyme studied by stopped-flow circular dichroism. *10th International Conference on Circular Dichroism* (Sandestin, Florida, USA, August 21-25, 2005).

[26] K. Kuwajima: The allosteric transition of the chaperonin GroEL studied by solution X-ray scattering and fluorescence spectroscopy. *The 3rd COE Workshop "Frontiers of Laser and Optical Sciences"* (University of Tokyo, Tokyo, October 1-2, 2005).

[27] K. Kuwajima: Folding mechanism of green fluorescent protein. *The 5th KIAS Conference on Protein Structure and Function* (Korea Institute for Advanced Study, Seoul, Korea, November 7-9, 2005).

[28] K. Kuwajima: Molecular mechanisms of globular-protein folding. *Pacifichem 2005 Symposium "Structures, Dynamics, and Functions of Biomolecules and Water"* (Honolulu, Hawaii, USA, December 15-20, 2005).

(国内会議)

一般講演

[29] 槙亙介、遠藤峻彦、桑島邦博：プロリン残基を含まないスタフィロコッカル・ヌクレアーゼ変異体の主鎖 NMR シグナルの帰属と天然条件下での水素・重水素交換法、第 5 回日本蛋白質科学会年会（福岡国際会議場、2005 年 6 月 30 日-7 月 2 日）

[30] 鎌形清人、桑島邦博:蛋白質のサブ構造の配置とフォールディング速度の関係、第 5 回日本蛋白質科学会年会（福岡国際会議場、2005 年 6 月 30 日-7 月 2 日）

[31] 榎佐和子、槙亙介、伊野部智由、桑島邦博：緑色蛍光蛋白質 GFP の平衡論的中間体の性質、第 5 回日本蛋白質科学会年会（福岡国際会議場、2005 年 6 月 30 日-7 月 2 日）

[32] 芝口友隆、池口満徳、佐伯喜美子、鎌形清人、木寺詔紀、桑島邦博：速度論的実験と MD シミュレーションを用いた、α ラクトアルブミンのアンフォールディングの原子詳細にわたる記述、第 5 回日本蛋白質科学会年会（福岡国際会議場、2005 年 6 月 30 日-7 月 2 日）

[33] 友寄克亮、佐伯喜美子、槙亙介、桑島邦博：カルシウムイオン非存在下におけるヤギ α ラクトアルブミンの折り畳み反応、第 5 回日本蛋白質科学会年会（福岡国際会議場、2005 年 6 月 30 日-7 月 2 日）

[34] 高橋一暢、木下賢吾、槙亙介、桑島邦博：X 線小角散乱による GroEL-ES 複合体の研究、第 5 回日本蛋白質科学会年会（福岡国際会議場、2005 年 6 月 30 日-7 月 2 日）

[35] 飯塚怜、石井則行、槙亙介、桑島邦博、吉田尊雄、座古保、養王田正文：リン酸アナログを用いた古細菌由来グループ II 型シャペロニンの ATPase サイクル解析、第 5 回日本蛋白質科学会年会（福岡国際会議場、2005 年 6 月 30 日-7 月 2 日）

[36] 中尾正治、槙亙介、桑島邦博：ストップト・フロー CD 法で観測したイヌ・ミルク・リゾチームのフォールディング中間体の特徴、第 5 回日本蛋白質科学会年会（福岡国際会議場、2005 年 6 月 30 日-7 月 2 日）

[37] 槙亙介、遠藤峻彦、桑島邦博：プロリン残基を含まないスタフィロコッカル・ヌクレアーゼ変異体の NMR シグナルの帰属と天然条件下での水素･重水素交換法、日本生物物理学会第 43 回年会（札幌コンベンションセンター、2005 年 11 月 23-25 日）

[38] 鎌形清人、岡本基土、永澤眞、松本雅光、中川達央、桑島邦博：高圧下温度ジャンプ装置による蛋白質のフォールディング過程の研究、日本生物物理学会第 43 回年会（札幌コンベンションセンター、2005 年 11 月 23-25 日）

[39] 中村敬、佐伯喜美子、鎌形清人、T. K. Chaudhuri、新井宗仁、桑島邦博：ヒト α-LA の遷移状態の構造、日本生物物理学会第 43 回年会（札幌コンベンションセンター、2005 年 11 月 23-25 日）

[40] 芝口友隆、池口満徳、佐伯喜美子、木寺詔紀、桑島邦博：MD シミュレーションとクラスター解析を用いた α ラクトアルブミンのアンフォールディング過程の観察、日本生物物理学会第 43 回年会（札幌コンベンションセンター、2005 年 11 月 23-25 日）

[41] 仲谷博安、中尾正治、槙亙介、佐伯喜美子、相沢智康、出村誠、河野敬一、桑島邦博：イヌ・ミルク・リゾチームの安定性およびフォールディングにおけるカルシウムイオン濃度の効果、日本生物物理学会第 43 回年会（札幌コンベンションセンター、2005 年 11 月 23-25 日）

[42] 友寄克亮、佐伯喜美子、槙亙介、桑島邦博：カルシウムイオン非存在下におけるヤギ α ラクトアルブミンの ϕ 値解析、日本生物物理学会第 43 回年会（札幌コンベンションセンター、2005 年 11 月 23-25 日）

[43] 高橋一暢、木下賢吾、桑島邦博：シャペロニン GroEL の第 2 の ATP 結合部位の探索、日本生物物理学会第 43 回年会（札幌コンベンションセンター、2005 年 11 月 23-25 日）

[44] 槙亙介、遠藤峻彦、桑島邦博：Backbone ^{1}H, ^{13}C, and ^{15}N Resonance Assignments and Native-state Hydrogen Exchange of a Proline-free Variant of Staphylococcal Nuclease. 特定領域研究「水と生体分子」第 3 回公開ワークショップ（自然科学研究機構･岡崎コンファレンスセンター、2006 年 1 月 6-7 日）

[45] K. Kamagata, K. Okamoto, M. Nagasawa, M. Matsumoto, T. Nakagawa & K. Kuwajima: Protein folding studied by a high-pressure temperature-jump apparatus. 特定領域研究「水と生体分子」第 3 回公開ワークショップ（自然科学研究機構・岡崎コンファレンスセンター、2006 年 1 月 6-7 日）

[46] T. Oroguchi, M. Ikeguchi, M. Ota, A. Kidera & K. Kuwajima: The unfolding simulation of goat α-lactalbumin. 特定領域研究「水と生体分子」第 3 回公開ワークショップ（自然科学研究機構・岡崎コンファレンスセンター、2006 年 1 月 6-7 日）

[47] K. Tomoyori, K. Saeki, K. Maki & K. Kuwajima: Transition-state structure of goat α-lactalbumin folding in the absence of Ca^{2+} ions. 特定領域研究「水と生体分子」第 3 回公開ワークショップ（自然科学研究機構・岡崎コンファレンスセンター、2006 年 1 月 6-7 日）

[48] 仲谷博安、中尾正治、槙亙介、佐伯喜美子、相沢智康、出村誠、河野敬一、桑島邦博：Effect of Ca^{2+} ion on the folding and unfolding rate constants of canine milk lysozyme. 特定領域研究「水と生体分子」第 3 回公開ワークショップ（自然科学研究機構・岡崎コンファレンスセンター、2006 年 1 月 6-7 日）

[49] 仲谷博安、中尾正治、槙亙介、佐伯喜美子、相沢智康、出村誠、河野敬一、友田修司、桑島邦博：イヌ・ミルク・リゾチームのフォールディング・アンフォールディング速度におけるカルシウムイオンの効果日本化学会第 86 回年会（日本大学理工学部船橋キャンパス、2006 年 3 月 27-30 日）

招待講演

[50] 槙亙介：蛋白質フォールディング中間体の探索、大阪大学蛋白質研究所セミナー「蛋白質の昼と夜-フォールディングとミスフォールディング」（大阪府吹田市大阪大学蛋白質研究所、2005 年 5 月 26-27 日）

[51] 桑島邦博：蛋白質のフォールディング問題ー物質科学と生命科学との接点、第 22 回理学系研究科技術シンポジウム（主催：東京大学大学院理学系研究科技術部、東京、2005 年 9 月 9 日）.

[52] 桑島邦博：緑色蛍光蛋白質（GFP）のフォールディング、スペクトル化学研究センターシンポジウム「生命とスペクトル」（主催：東京大学大学院理学系研究科附属スペクトル化学研究センター、東京、2005 年 12 月 3 日）

[53] M. Ikeguchi, T. Oroguchi, M. Ota, A. Kidera & K. Kuwajima: Molecular dynamics simulations of protein folding/unfolding. 特定領域研究「水と生体分子」第 3 回公開ワークショップ（自然科学研究機構･岡崎コンファレンスセンター、2006 年 1 月 6-7 日）

[54] 桑島邦博：蛋白質のフォールディング問題 ーその統一的理解を目指して、岡崎統合バイオサイエンスセンター 5 周年シンポジウム（自然科学研究機構・岡崎コンファレンスセンター、2006 年 2 月 6-8 日）

(セミナー)

[55] 榎佐和子：緑色蛍光蛋白質 GFP の巻き戻りメカニズム（大阪大学産業科学研究所、野地研究室、2005 年 12 月 12 日）

[56] T. Oroguchi: Molecular dynamics studies of unfolding of goat α-lactalbumin. Research Seminer (Brooks Research Group, The Scripps Research Institute, USA, February 24, 2006).

[57] T. Oroguchi: Atomically detailed description of the unfolding behavior of α-lactalbumin by a combined use of kinetic experiments and molecular dynamics simulation. Research Seminer (Laboratory of Chemical Physics, The National Institute of Health, USA, February 27, 2006).

7.2 能瀬研究室

脳・神経系はいかにして形成され機能するのか。この問いは現代科学に残された最大の謎の一つである。ヒトの脳には１００００億もの神経細胞が存在し、それぞれが平均１００００個のシナプスを介して他の神経細胞と連絡している。このような膨大な数の神経配線を確実に実現するために如何なる原理が働いているのだろうか？当研究室では、動物の発生過程において神経細胞がどのようにして自分の結合相手を見つけ出し、シナプスを形成するのかを研究している。特に、シナプスが形成される際、細胞間でどのようなコミュニケーションが取られているのかを分子レベルで理解することをめざしている。また、シナプスは「記憶の場」としても注目を集めており、その基礎となるシナプスの性質を明らかにする、という観点からも研究を進めている。

7.2.1 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、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。ショウジョウバエの神経筋結合系では、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。以前の研究において、特定の筋肉において発現し、シナプス特異性を決定する標識として働く分子としてカプリシャス、コネクチンを発見した。今年度は以下のような研究を行った。

単一細胞遺伝子発現解析による神経標的認識分子の網羅的同定　（稲木美紀子、能瀬聡直）

ショウジョウバエの神経筋結合系における神経の標的認識には、カプリシャス分子などの解析結果から、機能的に重複した分子が複数働いていると考えられている。このようなリダンダントな系において神経の標的認識の分子機構を解明するため、少数の標的細胞に的を絞り、そこで働く神経標的認識分子を網羅的に同定することを試みた。本研究ではショウジョウバエの全遺伝子を解析できる DNA マイクロアレイを用い、単一細胞レベルでの遺伝子発現解析を行った。これまでに、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 で 2 倍以上他方より高く発現する遺伝子を、それぞれについて約 100 個ずつ同定している。これらの候補分子のうち、標的認識過程に直接関与する可能性のある膜局在型または分泌型タンパク質に焦点をあて、機能解析を行った。まず Gal4-UAS 系を用いた異所発現実験を行った。24B-Gal4 を用いて筋肉全体で強制発現させると、6 つの遺伝子（Wnt4, beat-IIIc, Glt, Lsp2, Sulf1, CG6867）について標的認識異常の表現型がみられた。野生型では筋肉 12 の縁に広がる神経末端が、異所発現個体では筋肉 12 の縁で停滞し、小さな末端をつくるのがみられた。他の神経終末には顕著な異常はみられなかった。これらの分子は通常、筋肉 13 で多く発現しており、筋肉 12 に投射する神経に反発的に働くことが示唆された。そのうちの一つ、Wnt4 についてさらに詳細な機能解析を行った。Wnt4 は哺乳動物まで保存された Wnt ファミリーに属する分泌タンパク質をコードしている遺伝子である。Wnt4 を 5053A-Gal4 を用いて筋肉 12 のみで異所発現させると、24B-Gal4 でみられたように筋肉 12 における神経終末が小さくなるのに加えて、筋肉 13 における神経終末が大きくなるという表現型がみられた。このことは、Wnt4 の発現量の多い、筋肉 12 を避けて筋肉 13 に投射したことを示唆している。次に機能欠失変異体の解析を行った。Wnt4 の変異体では、筋肉 12 の神経終末が小さくなり、筋肉 13 の神経終末が大きくなるという表現型がみられた。Wnt4 が存在しないと、筋肉 12 への神経が筋肉 13 に留まり、筋肉 12 への投射が減少すると考えられる。以上の結果から、Wnt4 は特定の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（筋肉１３ではなく筋肉１２）と結合する過程を制御していると考えられる。本研究は阻害的な効果が標的の特異性を決定することを示した最初の例である。

脳内の層特異的神経結合の形成におけるカプリシャスの役割（新座（亀田）麻記子、高須悦子、能瀬聡直）

脳には多数の神経細胞などが何層も積み重なったような「層構造」が多く見られる。それらの層構造の中で、１つの神経細胞がどこで、つまりどの層で神経結合を行うのかを決めるメカニズムは、未だ明らかにされていなかった。今年度、ショウジョウバエの視覚系をモデル系として用いた実験で、Capricious（以降 Caps）がまさに層特異的結合を調節する分子であることを結論付けた。Caps は、ショウジョウバエの運動神経が筋肉に特異的に結合する際に機能する分子として以前報告されていた膜タンパク質であるが、ショウジョウバエ視覚系を調べてみると、Caps は 8 種の光受容細胞のうちただ 1 種、R8 と、その結合相手であるメダラの M3 層に存在していることが分かった。R7 とその結合相手のメダラ層には Caps は存在していなかった。遺伝学的手法を用いて Caps の機能を失わせると、光受容細胞 R8 は M3 層に結合しなくなる等、層特異的結合がうまく行われなくなることが観察された。逆に、本来 Caps を持たない R7 に強制的に Caps を持たせると、R7 は本来の結合相手とは結合せず、Caps の存在している M3 層に結合するようになり、R7 の層特異的結合が変化することが分かった。また、Caps 分子を持つ細胞同士は接着する性質があることが明らかになった。これにより、Caps を持つ光受容細胞は同じく Caps が存在しているメダラ層と結合する、という Caps 分子による層特異的結合のメカニズムが示された。生体内でこのような脳の神経回路形成メカニズムが確認されたのは初めてのことである。

標的認識からシナプス形成へ ——両過程をつなぐ分子機構の解析（新座（亀田）麻記子、高須悦子、高坂洋史、能瀬聡直）

神経シナプスが形成されるには、神経細胞が正しい標的細胞を識別し、その細胞同士で結合（シナプス結合）が生じることが必要である。これまでに、神経細胞が標的細胞を認識する際には「標的認識分子」が、シナプス形成過程では「接着分子」が重要な役割を果たしていることが分かっていた。標的認識を行った後シナプス形成過程へと移行するのだが、この移行の際にどのような機構が働いているのかは明らかにされていない。今年度我々は、一連のシナプス形成時には、２つの過程でそれぞれ重要な役割を果たす認識分子と接着分子の間でなんらかの情報が授受されるのではないかと推測し、このような相互作用の解析を新たに開始した。方法として、シナプス接着分子ファシクリン２と HA-tag の融合分子を設計し、この分子と相互作用している分子を tag に対する抗体を用いた免疫沈降法により検出することを検討している。今までに認識分子カプリシャスとこの tag 付きファシクリン２を培養細胞に共発現させることに成功した。現在、培養細胞からタンパク質を抽出し、免疫沈降法により２つのタンパク質間の相互作用について解析を行っている。

7.2.2 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、という問いかけに答える研究はまだ始まったばかりである。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。

シナプス形成過程における細胞接着分子ファシクリン２の局在制御と役割（高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直）

シナプスは、神経細胞（プレ）とその標的細胞（ポスト）との間の接着構造である。シナプス構造形成には、細胞接着分子が重要であると考えられているが、生体内（in vivo）での接着分子の局在や役割は明らかになっていない。そこで我々は、ショウジョウバエ神経筋接合部でシナプス形成期に発現している細胞接着分子ファシクリン２（Fas2）に着目し、その可視化プローブを作成し、シナプス形成における局在を解析した。Fas2 と蛍光タンパク質 YFP との融合タンパク質（Fas2-YFP）を筋肉細胞（ポスト）に発現させたところ、神経細胞の成長円錐と筋肉細胞との接触がおこる時期と場所に強い集積を示した。神経細胞の Fas2 を欠失した個体では、ポストの Fas2-YFP の集積が大きく減少した。このことからプレとポストとの間での Fas2 のホモフィリックな接着がシナプス部への集積に重要であると考えられる。さらに詳しく調べるために、Fas2 の部分欠失変異タンパク質をデザインし、その局在を調べた。プレの Fas2 とポストの Fas2 との細胞外での接着がシナプス部への集積の主要な要因であるならば、一回膜貫通タンパク質である Fas2 の細胞外領域のみでシナプス部へ集積するはずである。そこで、Fas2 の細胞外領域と YFP（Fas2-extra-YFP）、及び細胞内領域のみと YFP（Fas2-intra-YFP）の融合タンパク質をデザインしポストに発現させその局在を調べた。すると、Fas2-intra-YFP はシナプス部に局在しなかったが、Fas2-extra-YFP は局在した。このことは、Fas2 の細胞外での接着を介した相互作用が、シナプス部への分子局在に重要であることを示唆する。シナプス部には、神経伝達物質受容体や裏打ちタンパク質が局在し機能している。Fas2 がシナプス形成の初期に強く集積することから、他のタンパク質のシナプス部局在への Fas2 の関与が考えられる。そこで、グルタミン酸受容体 GluR2 と、Fas2 と結合することが報告されている裏打ちタンパク質 Dlg の後シナプス部局在を調べた。fas2 欠失変異体において、GluR2 と Dlg の後シナプス部集積量は共に減少していた。以上のことから、プレの Fas2 がポストの Fas2 を集積させ、ポストの Fas2 が更に裏打ちタンパク質 Dlg を集積させることでシナプス構造が作られていくという描像が得られた。

蛍光タンパク質を用いた多色ライブイメージング（高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直）

蛍光タンパク質を用いると、生命現象を生きたままの状態（in vivo）で観察することができる。1992 年の緑色蛍光タンパク質 GFP のクローニング以降、様々な光特性をもつ蛍光タンパク質が開発され、多色のライブイメージングが可能になりつつある。シナプス形成は、プレとポストという二つの細胞間での現象なので、多色のイメージングによって詳細な解析が期待できる。そこで我々は、異なる蛍光特性を持つタンパク質を発現するショウジョウバエ系統を作成し、その可視化を行なった。まず GFP の変異導入体である黄色蛍光タンパク質 YFP とシアン蛍光タンパク質 CFP をそれぞれ運動神経細胞、及び筋肉細胞に発現する個体を作成した。この個体と共焦点レーザー顕微鏡を用いることで、シナプス形成過程をプレとポストとを異なる色で可視化することに成功した。今後この可視化技術はシナプス形成の詳細な解析に有用になると考えられる。一方、従来用いられてきた GFP を多色のイメージングに用いるために、より長波長の蛍光特性を持つタンパク質を発現する系統の作成を試みた。イソギンチャクモドキ（サンゴの一種）のタンパク質から作られた tdTomato、および mOrange を発現する系統を作成し、可視化を行なった。どちらもショウジョウバエ個体中で蛍光を発したことから、イメージングに利

用可能であることが分かった。今後は、これらの蛍光タンパク質系統を、細胞レベルでの in vivo イメージングに用いる予定である。

シナプス形成初期過程における CaMKII の役割（風間北斗、谷藤（森本）高子、能瀬聡直）

シナプスの形成には、神経細胞（プレ）とその標的細胞（ポスト）間の綿密な相互作用が重要であると示唆されているが、その内、ポストがプレに働きかける機構に関しては未知な部分が多い。そこで我々は、シナプス形成過程における、ポストの積極的な機能を分子レベルで理解することを目的にし、研究を行った。具体的には、ポスト内のシグナル伝達系を変化させた際、シナプスの機能と形態にどのような影響が見られるかを解析した。種々のシグナル伝達機構に関与する分子のうち、カルシウム/カルモジュリン依存性キナーゼ II (CaMKII) に着目した。CaMKII はシナプス構造の後細胞側に豊富に含まれ、シナプス可塑性や、学習・記憶において中心的な働きをするものの、発生期における役割は未知の部分が多いからである。ポスト内の CaMKII の機能を探るために、GAL4-UAS システムを用いて少数の筋肉細胞に活性化型 CaMKII を発現させ、シナプスの伝達効率と形態に与える影響を検討した。これまでに、ポストの CaMKII は、前シナプスの逆行的な調節、及び前シナプスと後シナプスの協調的成熟の促進という二つの機能を持つことを明らかにした。この逆行的調節には、哺乳類 PSD-95 ホモログで PDZ ドメインを持つ Discs Large(DLG)、及び接着分子ファシクリン２（Fas2）が必要な因子であることも示してきた。本年度は、逆行性シグナルの伝達には、Fas2 の細胞内ドメインが重要であることを示した。細胞内ドメインは逆行性シグナルを伝える為、もしくは Fas2 分子を適切に制御する為に必要なタンパク質群を、シナプス部につなぎ止める役割をしている可能性がある。また、本過程では、ショウジョウバエ神経ー筋結合系において逆行的調節に関わっていることが知られている BMP シグナリングとは異なる機構が用いられていることが示唆された。当研究は、ポストからプレへと情報を伝える際には、シナプスの基本的な構成因子を調節する必要があるという新しい概念を提唱するものである。

CaMKII 活性によるサブユニット特異的なグルタミン酸受容体局在の調節機構の解明（谷藤（森本）高子、風間北斗、能瀬聡直）

我々は、これまでに筋肉細胞内の CaMKII 活性化によるシナプス形成に対する影響が発生段階によって異なることを明らかにしてきた。さらに、３齢幼虫において、CaMKII の活性を筋肉細胞内で変化させたときに、神経伝達物質受容体（GluR）の局在が変化することが明らかになった。具体的には、筋肉細胞内に活性化型 CaMKII を発現させると、GluR のサブユニットのひとつ GluRIIA のシナプス部における含有量が減少し、逆に、CaMKII 活性を阻害するペプチド Ala を発現させると、GluRIIA のシナプス部における含有量が増大した。このことは、CaMKII の活性化レベルによって、GluRIIA のシナプスへの局在が制御されていることを示している。今年度は、機能的な変化を調べるため、電気生理学的解析を行い、神経刺激に対するシナプス後細胞の応答について検討した。その結果、GluRIIA のシナプス部における局在の増大に伴い、シナプス後細胞の応答の増大が見られた。したがって、機能面でも変化が見られることが明らかとなった。なお、本研究は東京女子医大、小松明講師との共同研究により行った。

標的細胞内におけるカルシウム・神経依存性自家蛍光シグナルの解析（風間北斗、谷藤（森本）高子、能瀬聡直）

シナプス形成期における標的細胞の挙動を調べるアプローチのひとつとして、筋肉細胞内で自発的に発生する自家蛍光のイメージングを行った。青色励起光照射の下で筋肉細胞を観察すると、一過的に緑色蛍光が上昇する現象が検出された。一部の蛍光信号は鋭いピークとして出現したが、残りの信号は、立ち上がると数十秒の間安定した水準を保ち続け、その後鋭く減衰するというキネティクスを示した。自家蛍光シグナルは、細胞外のカルシウムイオン依存的に発生し、細胞内のカルシウムストアには依存しなかった。薬理学的実験により、自家蛍光はミトコンドリア内に存在するフラビンタンパク質に起因することが分かった。蛍光強度は、筋肉細胞の中でも特にシナプス部で大きく上昇する。また、蛍光シグナルは自発的に出現するものの、その発生頻度が神経の投射と活動に大きく依存した。蛍光シグナルは、同一神経に支配される筋肉間でのみ同期することがあり、神経の投射が遅れる機能欠失体では同期しなかった。さらに、シグナルの頻度は、神経と接触する時期に大きく上昇した。これらの結果より、適切な神経と接触したという情報が自家蛍光シグナルの頻度としてコードされている可能性が提起された。本研究は、シナプス形成期に、標的細胞内で自発的に発生する自家蛍光シグナルを、生体において報告した最初の例である。自家蛍光イメージングは、シナプス形成の理解に大いに貢献する可能性がある。また、自家蛍光強度とカルシウムイオン濃度との間に相関があるという予備的実験結果より、自家蛍光イメージングは、ミトコンドリアの活性化状態を調べる手法としてだけでなく、新しい非侵襲的なカルシウムイメージング法としても適用できる可能性がある。

FRET 法を用いた生体内シグナル変動測定法の検討（谷藤（森本）高子、4 年生特別実験（鄭）、風間北斗、能瀬聡直）

細胞内カルシウム濃度を測定するためにはカルシウム指示薬が用いられるが、何らかの方法で細胞内に導入する必要がある。顕微注入や、細胞膜を透過する AM 体などを用いた方法がとられるが、それらは、容易ではないこともあり、また、細胞を傷つけてしまうこともある。もし、遺伝子としてカルシウム濃度を測定できるプローブを導入することができれば、細胞を傷つけることなく生体内のカルシウム濃度変動を観察することが可能になる。そこで、GFP の変異体 CFP と YFP による蛍光エネルギー移動（FRET）を利用したカルシウム濃度を測定できるプローブ、カメレオンをショウジョウバエの神経筋シナプス系に利用できないかと考え、検討を始めた。カメレオンはカルシウム濃度が上昇すると FRET 効率が増加するようにデザインされた分子である。今年度は予備的実験として、ショウジョウバエの株化細胞 S2 にカメレオンを発現させ、カルシウムイオノフォアを添加したときに FRET 効率の変化が見られるかを調べた。その結果、カルシウムイオノフォアの添加により、細胞外液にカルシウムが存在するときのみ、FRET 効率の増加が見られ、カメレオンを用いカルシウム濃度変動が測定できることが明らかになった。さらに、ショウジョウバエ幼虫の生体内で適用できるかについて、カメレオンをショウジョウバエ生体内で発現可能にさせるためのトランスジェニックハエを作成し、その発現を確認し、高 KCl 刺激による FRET 効率の変化について検討した。 また、FRET 法を用いて CaMKII の活性レベルを検出するプローブの検討も始めた（MIT の林研究室との共同研究）。

単一細胞ジーンチップ法を用いたシナプス形成過程における神経依存的な遺伝子発現の解析（吉見愛、能瀬聡直）

情報伝達の場であるシナプスの形成は、神経ネットワークが形成されるための大変重要なプロセスである。このシナプス形成には、神経細胞とその標的細胞との相互作用が重要であることがこれまでの研究で分かってきているが、その結果、遺伝子発現のレベルでどのような変化が生じるのかについては、ほとんど明らかになっていない。そこで我々は、ショウジョウバエの神経筋結合系を用いて、神経細胞依存的に標的細胞（筋肉）で発現し、シナプス形成過程の制御に直接関わるような遺伝子の同定を試みた。本研究では、ショウジョウバエの全遺伝子が解析できる DNA チップを用いて、異なる発生段階、つまりシナプス形成が起こる前の段階にある筋肉と、シナプス形成が起こった後の段階にある筋肉の、遺伝子発現の差を網羅的に調べた。その結果、両者で発現に差がある遺伝子を多数同定することに成功した。これら発現量に差が見られた遺伝子の中には、細胞分化に関わる遺伝子も含まれていると思われる。そこで、神経の伸長が起こらない突然変異体を用いた比較解析をさらに行うことで、シナプス形成に関わる遺伝子のみを絞り込むことを現在検討している。また、それらの遺伝子について、今後機能解析を行う予定である。

7.2.3 シナプス成長・可塑性の分子機構

シナプスは形成された後も、学習や記憶といった過程で、また、環境の変化などに対応して適切に情報を伝えるために、その伝達能力を可塑的に変化させる。ショウジョウバエ神経筋シナプスでは、孵化後の活発な運動や筋肉の成長に対応してシナプスが成長し、一定の伝達能力を保つように調節されている。当研究室ではこの性質を利用し、シナプス可塑性の原理を探っている。

シナプス形成過程からシナプス成熟機構へのスイッチング：神経活動依存的な過程の解明（谷藤（森本）高子、能瀬聡直）

ショウジョウバエの幼虫は孵化後も著しい体の成長を続け、幼虫期には筋肉細胞の大きさは 100 倍以上にもなり、それに対応して筋肉上のシナプスの数も増大する。筋肉細胞の大きさに合わせてシナプスを成長させる機構には筋肉細胞からの何らかの働き（因子）が関与していることが推測されているが、その分子機構については不明な点が多い。我々はこれまでにこの機構は孵化後の神経活動によりスイッチオンされるという仮説を立て、検証してきた。今年度は運動神経細胞の活動を抑制すると、この機構が阻害されることを明らかにした。

ショウジョウバエ神経筋結合シナプス成長のライブイメージング (柒谷武紀（4 年生特別実験）、石橋和也、高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直）

神経活動に応じたシナプスの形態変化は、神経系の生後発達、学習、記憶といった過程において重要な役割を果たすと考えられている。本研究は、ショウジョウバエの神経筋シナプスが、幼虫の体の成長や神経活動に伴ってシナプスの大きさを変化させる過程をモデル系として、シナプス形態変化の基本的なメカニズムを探ることを目的とした。ショウジョウバエの神経筋シナプスは、一令幼虫が三令幼虫へと成長する過程で十倍以上も大きくなることが知られている。私たちは、膜結合型 YFP を運動神経細胞において、ポストシナプスマーカーである CD8::CFP::Shaker を筋肉細胞で発現させることにより、プレシナプス部とポストシナプス部を識別しながら同時可視化することに成功した。これまでに、この系を用いた観察により得られた知見のひとつとして、シナプスが付加される（Addition）際に、ポストシナプスマー

カーよりもプレシナプスマーカーの方が先んじて変化を起こしている箇所があることを見いだしていた。このことは、一部のプレシナプス部はポストシナプスの分化を伴わないで成長、退縮することを示唆している。今年度はこのプレのみの Addition がどれくらいの頻度で起こるのか、またこのような部位において、細胞接着分子ファシクリン２ (Fas2) の発現に変化があるかを調べた。その結果、プレのみの Addition が起こっている幼弱なシナプス部において Fas2 の発現が低下している傾向があることを見いだした。この観察は他の生物種でも示唆されている、シナプスの可塑的変化時に細胞接着分子の発現が down-regulate されるという仮説を支持するものである。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Makiko Shinza-Kameda, Etsuko Takasu, E., Kayoko Sakurai, Shigeo Hayashi and Akinao Nose: Regulation of layer-specific targeting by reciprocal expression of a cell adhesion molecule, Capricious. Neuron 49, 205-213 (2006)

[2] Hiroaki Nakayama, Hokto Kazama, Akinao Nose, and Takako Morimoto-Tanifuji: Activity-Dependent Regulation of Synaptic Size in Drosophila Neuromuscular Junctions. J. Neurobiol. in press

(学位論文)

[3] 風間北斗：Molecular mechanisms of interaction between a neuron and its target cell during synaptogenesis. (博士論文)

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[4] Hiroshi Kohsaka, Etsuko Takasu, and Akinao Nose: Live imaging of the cell adhesion molecule fasciclinII during an early phase of synaptogenesis: analysis using Drosophila neuromuscular junction 2005 meeting on “Imaging neurons and neural activity: new methods, new results” (Cold Spring Harbor, U.S.A., March, 2005)

[5] Hiroshi Kohsaka, Etsuko Takasu, and Akinao Nose: Recognition by postsynaptic filopodia and dynamics of molecular assembly during early phase of synaptogenesis. 2005 meeting on “Neurobiology of Drosophila” (Cold Spring Harbor, U.S.A., October, 2005)

(国内会議)

一般講演

[6] Inaki, M., Suzuki, Y., Aburatani, H. and Nose, A.: Genome-wide search for the neuromuscular target recognition molecules in Drosophila using single cell expression analysis. ショウジョウバエ研究会第７回研究集会（淡路島、2005 年 7 月）

[7] 高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直：Imaging contacts between growth cones and postsynaptic protrusion in target recognition of Drosophila neuromuscular junction. ショウジョウバエ研究会第７回研究集会（淡路島、2005 年 7 月）

[8] Hokto Kazama, Takako Morimoto-Tanifuji and Akinao Nose: Identification of the molecular components necessary for retrograde signaling triggered by postsynaptic activation of CaMKII. ショウジョウバエ研究会第７回研究集会（淡路島、2005 年 7 月）

[9] 森本-谷藤高子、風間北斗、吉見愛、能瀬聡直： ショウジョウバエ神経・筋シナプス系における CaMKII によるサブユニット特異的なグルタミン酸受容体局在調節 第２８回日本神経科学大会 （横浜、２００５年７月）

[10] 高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直：ショウジョウバエ神経筋シナプス形成過程における、細胞接着分子ファシクリン II の可視化、第 28 回日本神経科学大会（横浜、2005 年 7 月）

[11] 風間北斗、森本－谷藤高子、能瀬聡直： シナプス後細胞内 CaMKII 活性化による逆行的シナプス調節に必要なシナプス構成因子 第２８回日本神経科学大会 （横浜、２００５年７月）

[12] 稲木美紀子、鈴木芳枝、油谷浩幸、能瀬聡直：単一細胞遺伝子発現解析による神経標的認識分子の網羅的同定、第 28 回日本分子生物学会年会（福岡、2005 年 12 月）

招待講演

[13] 能瀬聡直、高坂洋史：シナプス構築の生体内観察と制御機構、第７９回日本薬理学会年会 （横浜、２００６年３月）

(セミナー)

[14] Hokto Kazama: The active side of target cells: Retrograde signaling triggered by postsynaptic activation of CaMKII. (City of Hope National Medical Center, California, May, 2005)

8　技術部門

8.1　技術部門

2005 年 4 月に新規採用の技術職員 2 名を迎え、共通系の技術業務をおこなう技術職員室が発足した。従来から行われていた実験装置試作室業務の他に、新たに安全衛生・薬品管理業務、IT 関連業務、学生実験、学生実習の業務を行うようになった。当教室の技術部門担当の教員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。

8.1.1　実験装置試作室（大塚、＊南城）

＊技術補佐員



図 8.1 a: 1 号館地下 1 階にある試作室の全景

利用状況

2005 年 4 月から 2006 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.

- 内部製作件数（31 件）
- 設計及び部品等の問い合わせ（20 件）
- 外注発注（16 件）
- 他教室等からの作業依頼及び問い合わせ（3 件）(化学、鉱物、五月祭)



図 8.1 b: 6 月に開かれた学生のための金工実習の実施風景

工作実習

当教室所属の大学院修士 1 年生を対象として、5 月 30 日から 6 月 16 日まで下記の内容で工作講習会を行なつた.

- 参加人員：29 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

8.1.2　安全衛生・薬品管理（佐伯、山本）

安全管理

- 安全衛生および薬品の管理（佐伯、山本）
- 産業医 の巡視の同行（8 回）（佐伯）
- 理学系研究科・理学部環境安全管理室会議へのオブザーバー参加（6 回）（佐伯）

薬品管理（山本）

- 薬品の適正な使用方法の問い合わせ（5 件）

- 不明試薬・不明廃液の簡易分析と廃棄処理（92 件）
- 実験系廃棄物の廃液処理方法の問い合わせ（29 件）

高圧ガス管理（山本）

- 高圧ガス量の調査と削減対策の調整（高圧ガスワーキンググループ会議　2 月）
- 高圧ガスボンベ等の廃棄またその問い合わせ（12 件）

その他の管理（山本）

- 放射線源等の廃棄処理（2 件）
- X 線回折装置の保全管理（1 月）
- ドラフトの保全管理（1 月）

8.1.3 IT 関連業務（藤代）

- 専攻内各サーバ運用
- 専攻内ネットワークシステムの運用（各研究室及び理学部ネットワーク室）
- 学務システム運用
- ソフトウェアのライセンス管理
- テレビ会議システムの運用と管理

8.1.4 学生実験（樫村、佐伯、藤代）

- 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。
- 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）

8.1.5 学生実習（佐伯）

2005 年度物理学教室生物物理学実習

当教室の大学院生を対象として、4 月 17 日から 9 月 20 日まで下記の内容で生物物理学実習を行った。

- 参加人員：8 名
- 実習内容
  1. 基本操作（ピペットマンの使い方、試薬の調製等）
  2. 蛋白質（蛋白質の定量、蛋白質の電気泳動）
  3. 遺伝子（実験の準備、コンピテントセルの作製、形質転換、プラスミドの調製、プラスミドの濃度測定と制限酵素による切断、電気泳動）
  4. 応用（変異体の作製、蛋白質の発現と精製）

II

Summary of group activities in 2005

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

Member: Takaharu Otsuka, Tetsuo Hatsuda, Naoyuki Itagaki, Sinji Ejiri and Shoichi Sasaki

In the nuclear theory group, a wide variety of subjects are studied. The subjects are divided into two major categories. One is Nuclear Structure Physics and the other Hadron PhysicsB

Nuclear Structure Physics

In Nuclear Structure group (T. Otsuka, N. Shimizu and N. Itagaki), 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, cluster model and quantum chaos. @ The structure of unstable nuclei is the major focus of our interests, and the disappearance of N=20 magic gap was examined for Na and Mg isotopes by using the Monte Carlo Shell Model [1, 3, 4, 5, 6]. In particular, the tensor force effects have been studied extensively from the viewpoints of the shell model and the mean-filed calculation, indicating robust and charateristic effects on the shell evolution [4]. The chaos has been investigated as a possible origin of regularity, and the relativistic approach was studied [2]. The clustering has been studied including its competition with the shell structure[7, 8]. The collective motion has been studied from various microscopic angles based on Monte Carlo and pair-truncated shell model calculations [9].

Hadron Physics

In Hadron Physics group (T. Hatsuda, S. Ejiri and S. Sasaki), many-body problems of quarks and gluons are studied theoretically on the basis of the quantum choromodynamics (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, and color superconductivity.

Highlights in research activities of this year are listed below.

1. Physics of high density and/or high temperature matter
   - 1.1 QCD thermodynamics from lattice gauge simulations [10, 11, 12, 13, 14]
   - 1.2 Color superconductivity in quark matter [15, 16]
   - 1.3 Hadrons in quark-gluon plasma [17]
2. QCD structure of hadrons
   - 2.1 Lattice QCD study of the excited hadrons [18, 19, 20]
   - 2.2 Phenomenology of strange tribaryons [21]

References

[1] G. Neyens, M. Kowalska, D. Yordanov, K. Blaum, P. Himpe, P. Lievens, S. Mallion, R. Neugart, N. Vermeulen, Y. Utsuno, and T. Otsuka : "Measurement of the Spin and Magnetic Moment of 31Mg: Evidence for a Strongly Deformed Intruder Ground State", Phys. Rev. Lett., **94**, 022501 (2005).

[2] M. Serra, T. Otsuka, Y. Akaishi, P. Ring and S. Hirose : "Relativistic Mean Field Models and Nucleon-Nucleon Interactions", Prog. Theor. Phys. **113**, 1009-1046, (2005).

[3] Vandana Tripathi, S. L. Tabor, P. F. Mantica, C. R. Hoffman, M. Wiedeking, A. D. Davies, S. N. Liddick, W. F. Mueller, T. Otsuka, A. Stolz, B. E. Tomlin, Y. Utsuno, and A. Volya : "^{29}Na: Defining the edge of the island of inversion for Z=11", Phys. Rev. Lett., **94**, 162501 (2005).

[4] T. Otsuka, T. Suzuki, R. Fujimoto, H. Grawe and Y. Akaishi : "Evolution of Nuclear Shells due to the Tensor Force", Phys. Rev. Lett., **95**, 232502 (2005).

[5] B. Fornal, S. Zhu, R.V.F. Janssens, M. Honma, R. Broda, *et al.* : "Yrast structure of neutron-rich Ti-53", Phys. Rev. **C72**, 044315, (2005).

[6] M. Belleguic, F. Azaiez, Z. Dombradi, *et al.* : "Search for neutron excitation across the N=20 shell gap in 25-29Ne", Phys. Rev. **C72**, 054316, (2005).

[7] N. Itagaki, H. Masui, M. Ito, and S. Aoyama : "Simplified modeling of cluster-shell competition", Phys. Rev. C **71**, 064397 (2005).

[8] Tz. Kokalova, N. Itagaki, W. von Oertzen, and C. Wheldon : "Signatures for multi-alpha-condensed states", Phys. Rev. Lett. in press.

[9] K.Higashiyama,N.Yoshinaga,andK.Tanabe: "New band mechanism of doubly-odd nuclei around mass 130", Phys. Rev. C**72**, 024315 (2005).

[10] K. Yagi, T. Hatsuda and Y. Miake : "Quark-gluon plasma: From big bang to little bang", (Cambridge monographs on particle physics, nuclear physics and cosmology, vol.23) Cambridge Univ. Press (2005) 446 pp.

[11] S. Ejiri, F. Karsch, E. Laermann and C. Schmidt : "The isentropic equation of state of 2-flavor QCD" , Phys. Rev. **D73**, 054506 (2006).

[12] M. Döring, S. Ejiri, O. Kaczmarek, F. Karsch and E. Laermann : "Screening of heavy quark free energies at finite temperature and non-zero baryon chemical potential" , Euro. Phys. J. **C46**, 179 (2006).

[13] S. Ejiri, F. Karsch and K. Redlich : "Hadronic fluctuations at the QCD phase transition" , Phys. Lett. **B633**, 275 (2006).

[14] Shinji Ejiri : "Lee-Yang zero analysis for the study of QCD phase structure" , Phys. Rev. **D73**, 054502 (2006).

[15] Mei Huang : "Spontaneous current generation in g2SC phase" , Phys.Rev.D73, 045007(2006).

[16] A. P. Balachandran, S. Digal and T. Matsuura : "Semi-superfluid strings in high density QCD", Phys. Rev. D **73**, 074009 (2006)

[17] T. Hatsuda : "In-medium spectral functions from lattice QCD", Eur. Phys.J. **C43** (2005) 45-49.

[18] K. Sasaki and S. Sasaki : "Excited baryon spectroscopy from lattice QCD: finite size effect and hyperfine mass splitting" , Phys. Rev. **D72** (2005) 034502.

[19] K. Sasaki, S. Sasaki and T. Hatsuda : "Spectral analysis of excited nucleons in lattice QCD with maximum entropy method" , Phys. Lett. **B623** (2005) 208-217.

[20] N. Ishii, T. Doi, Y. Nemoto, M. Oka, H. Suganuma : "Spin 3/2 penta-quarks in anisotropic lattice QCD", Phys. Rev. D**72**, 074503 (2005).

[21] Y. Maezawa, T. Hatsuda and S. Sasaki : "Strange tribaryons as nona-quark states", Prog. Theor. Phys. **114**, 317 (2005).

2 Theoretical Particle and High Energy Physics Group

Research Subjects: The Unification of Elementary Particles & Fundamental Interactions

Member: Tohru Eguchi, Tsutomu Yanagida, Yutaka Matsuo,
Ken-Ichi Izawa, Yuji Sugawara, Yosuke Imamura, Teruhiko Kawano

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 Flux compactification [8]
   - 1.2 2-dimensional conformal field theories [13]
   - 1.3 Strings in curved background and D-branes [3, 9, 14]
   - 1.4 AdS/CFT correspondence [4, 17, 10, 18]
2. Field Theory.
   - 2.1 Supersymmetric Field Theories [5, 7, 12, 15]
3. High Energy Phenomenology.
   - 3.1 Phenomenology of supersymmetric models [2, 6, 11, 19]
   - 3.2 Particle cosmology [1, 16]

References

[1] M. Kawasaki and T. Yanagida, "511-keV gamma ray from moduli decay in the galactic bulge," Phys. Lett. **B624** (2005) 162.

[2] M. Ibe, K. I. Izawa, Y. Nakayama, Y. Shinbara and T. Yanagida, "Conformally sequestered SUSY breaking in vector-like gauge theories," Phys. Rev. D **73**, 015004 (2006)

[3] Y. Nakayama, S. J. Rey and Y. Sugawara, "D-brane propagation in two-dimensional black hole geometries," JHEP **0509**, 020 (2005).

[4] Y. Tachikawa, "Five-dimensional supergravity dual of a-maximization," Nucl. Phys. B **733** (2006) 188.

[5] T. Okuda and Y. Ookouchi, "Higgsing and superpotential deformations of ADE superconformal theories," Nucl. Phys. B **733** (2006) 59.

[6] M. Ibe, K. I. Izawa, Y. Nakayama, Y. Shinbara and T. Yanagida, "More on conformally sequestered SUSY breaking," Phys. Rev. D **73**, 035012 (2006).

[7] T. Kawano, Y. Ookouchi, Y. Tachikawa and F. Yagi, "Pouliot Type Duality via a-Maximization," Nucl. Phys. B **735** 1 (2006).

[8] T. Eguchi and Y. Tachikawa, "Distribution of flux vacua around singular points in Calabi-Yau moduli space," JHEP **0601** (2006) 100.

[9] Y. Hikida. and T.-S. Tai, "D-instantons and Closed String Tachyons in Misner Space," JHEP **0601**, 054 (2006).

[10] K. Okamura, Y. Takayama and K. Yoshida, "Open spinning strings and AdS/dCFT duality," JHEP **0601**, 112 (2006).

[11] M. Tanimoto and T. Yanagida, "A Higher-dimensional origin of the inverted mass hierarchy for neutrino," Phys. Lett. **B633** (2006) 567.

[12] R. Suzuki and Y. Tachikawa, "More anomaly-free models of six-dimensional gauged supergravity," J. Math. Phys. (in press)

[13] Y. Imamura, H. Isono and Y. Matsuo, "Boundary states in the open string channel and CFT near a corner," Prog. Theor. Phys. **115** (2006) (in press).

[14] Y. Imamura, "Large N vector quantum mechanics and bubbling supertube solutions," Prog. Theor. Phys. **115** (2006) 797-813.

[15] Y. Nakayama, "Index for orbifold quiver gauge theories," Phys. Lett. B **636**, 132 (2006).

[16] F. Takahashi and T. Yanagida, "Unification of dark energy and dark matter," Phys. Lett. **B635** (2006) 57.

[17] Y. Imamura, "Baryon vertices in AdS black hole backgrounds," Prog.Theor.Phys. **115** (2006) 815-826.

[18] H.-Y. Chen and K. Okamura, "The anatomy of gauge/string duality in Lunin-Maldacena background," JHEP **0602**, 054 (2006).

[19] M. Ibe, K. I. Izawa, Y. Shinbara and T. T. Yanagida, "Minimal supergravity, inflation, and all that,"

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, namely in the time-like region. We are aiming to identify new spin excitation modes by constructing a high energy resolution spectrometer SHARAQ dedicated to the exothermic reactions by unstable beams.

—Intermediate states involved in nuclear double beta decay

The double β decay with two neutrinos in the final state ($2\nu\beta\beta$ decay) is an allowed second-order weak process which has been observed for a number of nuclei, while that with no neutrinos in the final state ($0\nu\beta\beta$ decay) is a lepton number violating process forbidden in the standard model. $0\nu\beta\beta$ decay is of particular interest because the rate of the decay is related to a neutrino mass through nuclear matrix element. Since the nuclear matrix element is available only by theoretical calculations, the validity of calculations is tested by comparing the predicted $2\nu\beta\beta$ matrix elements with those obtained by decay measurement. The calculated $2\nu\beta\beta$ nuclear matrix element depends on the Gamow-Teller (GT) matrix elements from the mother nucleus to the intermediate states of daughter nucleus, and those from the granddaughter nucleus to the intermediate states. Our aim is to obtain the GT strength distribution experimentally up to 50 MeV exciation energy by using the most reliable reaction probe, i.e., the (p,n) and (n,p) reactions (See Fig. 2.1 a). The (p,n) measurements at 300 MeV on ^{48}Ca, ^{76}Ge, ^{100}Mo, and ^{116}Cd nuclei have been performed using the neutron time of flight facility at Research Center for Nuclear Physics.

Experimental test of Bell's inequality in proton-neutron system

In 1935, Einstein, Podolsky and Rosen presented a paradox to quantum correlations and concluded that the quantum mechanical description of nature is incomplete. So-called hidden variables are introduced in the classical approach to describe the correlation. The Bell's inequality, discovered in 1964, shows that correlation produced by the hidden variables is weaker than that predicted by quantum mechanics. Since then many experimental tests on the Bell's inequality have been performed by using entangled photon pairs, while there are almost no severe tests in hadronic systems. This year, we tested the Bell's inequality in the proton-neutron system by measuring the spin correlation between the proton-neutron pair in $[^1\mathrm{S}_0]$ produced by the $^1\mathrm{H}(d,pn)$ reaction. The measurement was performed at the RIKEN accelerator research facility. The polarization of the proton was analyzed by EPOL located at the focal plane of magnetic spectrograph SMART. The neutron polarization was analyzed by a newly constructed neutron polarimeter SMART-NPOL. Data analysis is in progress.

Three-body force observed in the deuteron-proton scattering

How the effect of three neucleon force (3NF) appears in nuclear reactions is one of the interesting subjects in nuclear physics. We are studying the effect of 3NF by compareing high precision data of deuteron-proton scattering with predictions of recent Faddeev calculations using modern nucleon nucleon forces. We performed measurements of the analyzing powers and the polarization transfer coefficients for the $d + p \rightarrow p + p + n$ reaction at $E_d = 270$ MeV.

4 Hayano Group

Research Subjects: Study of fundamental symmetries using exotic nuclei and exotic atoms.

Member: Ryugo S. Hayano and Takashi Ishikawa

'Exotic nuclei' and 'Exotic atoms' are the keywords of Hayano group. We use antihydrogen atoms (antiproton + positron), antiprotonic helium atoms (helium nucleus + antiproton + electron), antiprotonic helium ions (helium nucleus + antiproton) to study matter–antimatter symmetry (CPT), the most fundamental symmetry of nature. We also study deeply bound states of mesons (π^-, K^-, and η) and nuclei to investigate the origin of proton mass, through the partial restoration of chiral symmetry in the nuclear medium.

Antihydrogen and antiprotonic helium atoms – precision study of the CPT symmetry at CERN's antiproton decelerator (AD)

- Antiprotonic helium:
  We used a new pulse-amplified CW laser with an integrated absolute frequency calibration utilizing an optical frequency comb to precisely measure transition frequencies of antiprotonic helium 3 and helium 4 atoms. We then compared the results with the state-of-the-art three-body QED theory calculations, and determined the antiproton-to-electron mass ratio. The $\bar{p}$ mass precision is now close to that of the proton-to-electron mass ratio, and p and $\bar{p}$ masses agree within a relative precision of 2×10^{-9}. This is the highest-precision test of CPT in baryonic systems.
- Antihydrogen:
  Microwave (ground-state hyperfine splitting) and laser ($1s - 2s$) spectroscopic studies of antihydrogen are promising tools to test the CPT symmetry to the highest-possible precision. For the ground-state hyperfine splitting spectroscopy, a new antihydrogen source using a superconducting two-frequency radio-frequency trap, is being developed. For the $1s - 2s$ laser spectroscopy, a neutral-atom trap based on superconducting octupole coils is under construction.

Exotic-atom spectroscopy – the origin of the proton mass

- η-nucleus bound state:
  In 2004, we established that the $1s$ binding energy of pionic atoms, produced by the Sn(d,^{3}He) reaction, can be used to quantitatively determine the degree of partial chiral symmetry restoration in nuclear media. In 2005, we extended this method to study η-nucleus bound states. Data taking was completed, and the data are being analyzed.
- Deeply-bound kaon-nucleus system:
  In 2004, we found an evidence for the production of a 'strange-tribaryon' state, in the ^{4}He(stopped K^-, p) reaction at KEK (E471). This is a candidate of the "deeply-bound kaonic nuclei" predicted by Akaishi and Yamazaki. In 2005, we upgraded the E471 detector, by adding time-of-flight detectors optimized for protons, and collected high-statistics data (E549). The data are being analyzed.
- Precision spectroscopy of kaonic-helium $3d \rightarrow 2p$ X-rays:
  If the kaon-nucleus potential is as deep as predicted by Akaishi and Yamazaki, a large strong-interaction shift of some 10 eV is expected for the $3d \rightarrow 2p$ X-rays of kaonic helium atoms. Theories which do not accommodate the deeply-bound states predict very small shift of < 0.1 eV. We therefore carried out an experiment at KEK (E570) to measure the kaonic-helium Balmer X-rays (6.4 keV) using silicon-drift X-ray detectors. The goal is to achieve a precision of 2 eV. Data taking was completed at the end of 2005, and the data are being analyzed.

5 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; (6) Research on astroparticle physics with balloon-borne high resolution spectrometer (BESS experiment);

Member: Sachio Komamiya, Tomoyuki Sanuki

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 be that uses superconducting accelerator structures, and hence the project has been accelerated as an international big-science project. We are working on ILC accelerator simulations and hardware development, especially on the beam delivery system. We have been studying possible physics scenario and the large detector concept (GLD) 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 are starting research and development for TOF detector for the BES-III experiment together with IHEP, USTC and KEK. We successfully performed a test of over 500 photomultipliers in 1[T] magnetic field. We have studied the data analysis of a search for CP violation using $J\psi \to \Lambda\bar{\Lambda}$ using BES-II data. In course of this analysis we are developing an efficient pattern recognition program for the charged particles in the BES-II drift chamber.

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 Ti/Li layers to convert neutron to charged nuclear fragments. The simulation of the quantum effects of UCN in a narrow slit with 100 [μ] height is under way.

4) ATLAS experiment at LHC: Some of our students started to work on the preparation for physics analysis at LHC. Search for supersymmetric particles and search for the effects of hidden extra-dimensions are being studied.

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 114-250 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).

6) BESS experiment: The spectrum of cosmic muon, proton and Helium were measured at various hight. These information is important for the calculation of the neutrino flux at Superkamiokande, hence it is valuable for the atmospheric neutrino oscillation analyses. The data was taken at the heights starting from 37 km (4.5 g/cm^2) to 27 km (30 g/cm^2) for the duration of about 11 hours in the 2001 BESS flight. The kinetic energy spectrum was measured from 0.5 GeV to 10 GeV with an accuracy of 8% for proton, 10% for Helium, and 20% for muon. This information is used for optimizing the simulation program for atmospheric muons and neutrinos. In order to measure momentum of primary cosmic ray particles in the range of 100 GeV to 1 TeV, the tracking detector system was upgraded by installing a new Jet-chamber and a outer precision tracking detector. In the October 2002 flight in Canada, the primary high momentum cosmic ray flux was measured up to about 1 TeV range.

6 Minowa-Group

Research Subjects: Experimental Particle Physics without Accelerators

Member: MINOWA, Makoto and INOUE, Yoshizumi

Various kinds of non-accelerator particle physics experiments have been performed and are newly being planned in our research group. They include the direct experimental search for supersymmetric neutralino dark matter running in an underground cell in the Kamioka Observatory.

We employed a CaF_2(Eu) scintillator for the search experiment. The choice of the detector material is based on the fact that the fluorine is one of the best nuclides for the detection of spin-dependently interacting neutralinos. With carefully selected raw material for the scintillator and low radioactivity photomultipliers as well as high purity copper shielding, we put stringent limits in the parameter plane of the neutralino-proton spin-dependent coupling($a_{\rm p}$) and neutralino-neutron spin-dependent coupling($a_{\rm n}$). The sensitivity region of fluorine for the dark matter search is more or less orthogonal to the region of the widely used sodium(of NaI) when they are represented in $a_{\rm p}$ – $a_{\rm n}$ plane. Our result excluded a considerable part of DAMA's region in the $a_{\rm p}$ – $a_{\rm n}$ plane allowed by their annual modulation observation.

It is essential to reduce the background of the measurements in order to get still higher sensitivity for the possible feeble neutralino signals. We found one of the leading background sources is Eu, the dopant of the scintillator. One may need to enrich the Eu to get rid of the production of radioactive impurities by ambient thermal neutrons.

We are also 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 AXION HELIOSCOPE. The axion helioscope consists of a cryogen-free 4 T superconducting magnet with an effective length of 2300 mm and PIN photodiodes as x-ray detectors. Previously, we put upper limts of $g_{a\gamma\gamma} < (6.8 - 10.9) \times 10^{-10}{\rm GeV}^{-1}$ to axion - photon coupling constant for the axion mass less than 0.27 eV.

The axion helioscope is presently under modification to implement the buffer-gas handling system to make it sensitive to axions with a mass as high as the hadronic axion window at around 1 eV.

Another project is an R and D of a neutrino detector with a resonance ionization spectroscopy. In a low-energy charged current interaction of an electron neutrino or an anti-electron neutrino on a target nucleus, the atomic number Z of the nucleus is changed by ± 1. The neutrino detection, in this sense, is accomplished by a trace analysis of an exotic atomic element in the target material. The resonance ionization spectroscopy with a LASER is effective to the trace analysis. To start with, we introduced a quadrapole mass spectrometer and tried to detect a trace of helium atoms produced by an α-emitting radioactive souce ^{241}Am. Even with the conventional elctron-impact ionization, it was possible to detect the helium atoms quantitatively.

7 Aihara Group

Research Subjects: Precision Measurements of CP Violation in the B Meson System, Search for Physics Beyond the Standard Model using Rare B Decays, J-PARC Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment (T2K), R&D for Linear Collider Silicon Detector (SiD) and Dark Energy Survey at Subaru Telescope

Members: H. Aihara, M. Iwasaki, H. Kakuno

Precision Measurements of CP Violation in the B Meson System We have performed improved measurements of CP-violation parameters $\sin 2\phi_1^{\rm eff}$ and $\mathcal{A}_f$ for $B^0 \to \phi K^0$, $\eta' K^0$, $K^0_S K^0_S K^0_S$, $K^0_S \pi^0$, $f_0 K^0_S$, ωK^0_S and $K^+ K^- K^0_S$ decays. These charmless decays are dominated by $b \to s$ flavor-changing neutral currents and are sensitive to possible new CP-violating phases. We do not see any significant deviation between the results for each $b \to s$ mode and those for $B^0 \to J\psi K^0$. Since some models of new physics predict such effects, our results can be used to constrain these models. However, many models predict smaller deviations which we cannot rule out with the current experimental uncertainty. Therefore, further measurements with larger data samples are required in order to search for new, beyond the SM, CP-violating phases in the $b \to s$ transition.

Search for Physics Beyond the Standard Model using Rare B Decays We have updated the measurement of the inclusive $b \to s\ell^+\ell^-$ branching fraction using a sample of 152 million $B\overline{B}$ pairs. The measurement is based on a semi-inclusive technique to reconstruct $B \to X_S \ell^+ \ell^-$, where X_S is a hadronic system containing an s quark and ℓ is an electron or a muon. The X_S hadronic system consists of one $K^\pm$ or K^0_S and up to four pions (at most one pion can be neutral). The weighted average of the branching fractions for the electron and muon channels, assuming the individual branching fraction to be equal for $M_{\ell^+\ell^-} > 0.2$ GeV/c^2, yields $\mathcal{B}(B \to X_S \ell^+ \ell^-) = (4.11 \pm 0.83^{+0.85}_{-0.81}) \times 10^{-6}$. This result is in good agreement with the Standard Model prediction of $(4.18 \pm 0.70) \times 10^{-6}$.

T2K We have been involved in the next generation long-baseline neutrino oscillation experiment, T2K, which shoots off-axis neutrino beam from Tokai 50 GeV proton synchrotron to Super Kamiokande detector. We have developed profile and position monitors for the primary proton beam.

SiD 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. Our R&D program includes development of a silicon tracker and a 5Tesla superconducting solenoid.

Dark Energy Survey at Subaru Telescope We are proposing to construct a large CCD camera as a prime focus instrumentation of Subaru telescope to conduct a wide-field weak lensing survey. With this survey, we can determine characteristic of Dark Energy which is believed to be responsible for acceleration of the preset-day expansion of the universe.

- K. Abe *et al.* (Belle Collaboration), Time-Dependent CP Asymmetries in $b \to sq\bar{q}$ Transitions and $\sin 2\phi_1$ in $B^0 \to J/\psi K^0$ Decays with 386 Million $B\bar{B}$ Pairs, arXiv:hep-ex/0507037].
- H. Aihara, "Rare Decays of B and D Mesons and Flavor Physics," Italian Physical Society, International School of Physics "Enrico Fermi" CP Violation from quarks and leptons, 19-29 July 2005, Varenna, Italy
- M. Iwasaki *et al.* [Belle Collaboration], "Improved Measurement of Electroweak Penguin Process $B \to X_s \ell^+ \ell^-$," Phys. Rev. D**72** 092005 (2005).
- H. Aihara, "The Silicon Detector Concept," 2005 International Linear Collider Physics and Detector Workshop, Snowmass, Colorado, August 14-27, 2005.

8 Wadati Group

Research Subjects: Statistical Mechanics, Nonlinear Physics, Condensed Matter Physics

Member: Miki WADATI & Kazuhiro HIKAMI

We investigate fundamental problems in statistical mechanics and condensed matter physics. We aim to find and clarify novel phenomena, and to develop new non-perturbative analytical methods. Research themes of publications in 2001 are listed in the followings.

1. Bose–Einstein Condensation (BEC)
   (1) Ground State Properties of a Toroidally Trapped BEC
   (2) Free Expansion of a Bose-Einstein Condensate
   (3) Dynamics of a Wavefunction for the Attractive Nonlinear Schrödinger Equation under Isotropic Harmonic Confinement Potential
   (4) Statistical Mechanics of Bose–Einstein Condensation in Trap Potentials
2. Nonlinear Waves
   (1) Noncommutative Soliton
   (2) Cellular Automaton and Crystal Base
   (3) Lattice W Algebra and Integrable Systems
   (4) Quantum Soliton Equation and Baxter Equation
3. Non-Equilibrium Statistical Physics
   (1) Asymmetric Simple Exclusion Process
   (2) Stability of the Non-Equilibrium Steady States
   (3) Minority Game
4. Strongly Correlated Electron System
   (1) Thermodynamics in the Hubbard Model, t-J Model
   (2) Integrable Boundary Condition
5. Knot Theory and Low-Dimensional Topology
   (1) Hyperbolic Volume of Knot Complement
   (2) Quantum Gravity
6. Quantum Many-Body Problem
   (1) δ-function Bose gas
   (2) Calogero–Sutherland Model
   (3) Exclusion Statistics and Chiral Partition Function
7. Quantum Computing and Quantum Information
   (1) Geometric Aspects of Quantum Search
   (2) Multipartite entanglement and embeddings in algebraic geometry
8. Random Matrix
   (1) Polynuclear Growth Model
   (2) Random Walk

9 Aoki Group

Subject: Theoretical condensed-matter physics

Members: Hideo Aoki, Takashi Oka

Our main interests are many-body effects in electron systems, i.e., **superconductivity, magnetism and fractional quantum Hall effect**, for which we envisage a "materials design for correlated electron systems" should be possible. Specifically we study:

- Superconductivity in repulsively interacting electron systems
  - — How to optimize T_C through the "fermiology" [1]
  - — Superconductivity in Ru and Co compounds [2]
  - — Effect of charge fluctuations [3]
  - — Superconductivity in multi-orbital systems
  - — Coexistence of electron-phonon and electron-electron interactions [4]
- Magnetism in repulsively interacting electron systems
  - — Flat-band ferromagnetism in a designed organic polymer
- Nonempirical methods for strongly correlated systems
  - — Projector Monte Carlo method[5]
  - — Materials design for correlated systems and estimation of interaction parameters
- Non-equilibrium and nonlinear phenomena in correlated electron systems
  - — Landau-Zener tunnelling in the breakdown of Mott's insulator [6]
- Quantum Hall systems
  - — Interaction and dimensionality in the quantum Hall system
  - — Electron-molecule picture for quantum dots in magnetic fields[7]
- Electronic structure and correlation effects in hetero-interfaces
  - — Metal-induced gap states at metal/organic interfaces [8]
  - — Metal-insulator transition on polar surfaces
- Electrons on periodic curved surfaces [9]

[1] Hideo Aoki: Triplet superconductivity, *Physica B* **374-375**, 229 (2006).

[2] K. Kuroki, Y. Tanaka and R. Arita: Competition between singlet and triplet pairing in $Na_xCoO_2{\cdot}yH_2O$, *Phys. Rev. B* **71**, 024506 (2005).

[3] S. Onari, R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: Triplet superconductivity induced by charge fluctuation in the extended Hubbard model, *J. Phys. Soc. Jpn* **74**, 2579 (2005); S. Onari, R. Arita, K. Kuroki, H. Aoki: Superconductivity from long-range interaction, *Phys. Rev. B* **73**, 014526 (2006).

[4] M. Tezuka, R. Arita and H. Aoki: Density-matrix renormalization group study of pairing when electron-electron and electron-phonon interactions coexist *Phys. Rev. Lett.* **95**, 226401 (2005).

[5] R. Arita and K. Held: Orbital-selective Mott-Hubbard transition in the two-band Hubbard model, *Phys. Rev. B* **72**, 201102(R) (2005); Crossover from d-wave to p-wave pairing in the t-t' Hubbard model at zero temperature, *Phys. Rev. B* **73**, 064515 (2006).

[6] T. Oka, N. Konno, R. Arita and H. Aoki: Breakdown of an electric-field driven system: a mapping to a quantum walk, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 100602 (2005); Takashi Oka and Hideo Aoki: Ground-state decay rate for the Zener breakdown in band and Mott insulators, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 137601 (2005).

[7] Y. Nishi, P.A. Maksym, D.G. Austing, T. Hatano, L.P. Kouwenhoven, H. Aoki and S. Tarucha: Intermediate low spin states in a few-electron quantum dot in the $\nu \leq 1$ regime, *Phys. Rev. B* (in press).

[8] M. Kiguchi, R. Arita, G. Yoshikawa, Y. Tanida, S. Ikeda, S. Entani, I. Nakai, H. Kondoh, T. Ohta, K. Saiki and H. Aoki: Metal-induced gap states in epitaxial organic-insulator/metal interfaces, *Phys. Rev. B* **72**, 075446 (2005).

[9] M. Koshino and H. Aoki: Electronic structure of an electron on the gyroid surface, a helical labyrinth, *Phys. Rev. B* **71**, 73405 (2005).

10 Miyashita Group

Research Subjects: Statistical Mechanics, Phase Transitions, Quantum Spin systems, Nonequilibrium Phenomena

Member: Seiji Miyashita and Keiji Saito

1. Novel phases originated in the quantum interactions

We studied various new types of quantum phases in spin systems. We are interested in phases which have nonzero magnetization. Although familiar type of ferrimagnetism is the Lieb-Mattis type in the antiferromagnetic model on bipartite lattices with different number of sublattice sites or different sizes of spin, there exists another type whose ground state spin configuration is non-collinear in the case of frustrated lattices. We have found a model which contains the two types of ferrimagnetism as a function of the parameter. We found that the nature of spin order is different from ordinary ferrimagnets. We also propose a structure of molecular magnets with the latter type of ferrimagnetism which show new types of spin dynamics in the ground state. We also found a model in which quantum fluctuation enhances the magnetic order. A ground state phase transition between the gapfull and gapless phases in the so-called spin tube is also found.

2. Quantum magnetic processes

The magnetization processes of a system composed by ferromagnetic dimers and antiferromagnetic dimers are studied. This model shows a metamagnetic property which can be explained the so-called Tachiki-Yamada model using renormalized parameters in the magnetic field. We studied the dependence of effective parameters using a kind of local decimation process in quantum systems, and explained the over all dependence of the magnetization process on the field and temperature.

We studied dynamical magnetization process of the transverse Ising model in the ordered ground state under the sweeping of magnetic field. We found a kind of collective motion which does not depend on the size of the system. We also studied the dependence of the critical transverse field on the size of spin S.

3. Quantum dynamics

We have studied properties of quantum dynamics and manipulation in nanoscale molecular magnets and related materials, where the Landau-Zener mechanism plays important role. In order to study further on the quantum dynamics, we have started a crest project in JST on "Quantum-mechanical cooperative phenomena and their applications".

For quantum information processes, the manipulation of qubits which is a local unit of the system is important. We derived analytic formula of the probability of non-adiabatic tunneling in a system where qubits interact with boson systems.

4. Thermal conductivity of quantum magnets

The mechanism of thermal conductivity due to the spin interaction is one of the hot topics in strongly interacting spin systems. Using a non-equilibrium green function method, we found non-symmetric thermal flow in a system where a gapfull system and a gapless system are contacted.

6. Phase transitions in spin-crossover complexes

As a new frontier of studies of the phase transition, phase transition of structure of materials due to the spin-crossover and/or charge transfer have been attracted interests. The properties of photo-excited state at low temperatures have been also studied extensively. Furthermore the composite phase transitions of the spin structure and magnetic structure is a hot topic. We have found a metastable branch of the high spin state at low temperatures which is much below the thermal hysteresis. The related experiment has also been done and gave a strong support of the existence of the branch. We also develop a theory to study the both phase transitions in a unified way and studied the static and dynamical properties of this type of materials. We also developed analysis on the spin transition and magnetic transition of the Prussian-blue

analogue by taking into account the sublattice structure of the material. Effects of lattice vibration have been also studied.

7. Slow relaxation in frustrated systems

In frustrated system, the dynamics of ordering process is often very slow. In most cases it is due to a kind of energetically trap at metastable state. However, we found that there is a another type of slow down. That is, a kind of entropy-induced slow down occurs in a frustrated system which shows a reentrant phase transition. We have analyzed the mechanism. We found the so-called thermal annealing method does not help to find the low temperature stable state, but the quantum annealing does. We are studying the underlying mechanism of this process. As another example, we have studied the slow relaxation in the Kagome lattice with Ising-like Heisenberg antiferromagnets, where the macroscopically degenerate ferromagnetic ordered state appears. In the ordered state, we found slow relaxation mechanism due to the macroscopically degenerate states which are characterized by so-called weather-vane loop.

8. Gas-liquid phase transition and hydrodynamics

In order to study the generation bubble of gas in the gas-liquid phase transition we developed a theoretical scheme combining the fluid dynamics equations (Navier-Stokes equation) and the equation of state of material (van der Waals equation) and demonstrated the bubble generation by point heating and various properties during the generation.

9. Random matrix and quantum chaos

We also studied the random matrix theorem to study the relation between the obits in the classical mechanics and quantum chaos. We also studied distribution of separation of repulsive energy crossings in the random matrices.

11 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
  Superconductivity correlation length in the strongly correlated electron system.[1]
  Mott metal-insulator transition and superconductivity.
  Energy analysis of high-T_c superconductors.[2]
  Randomness and superconductivity fluctuation in high-T_c superconductors.
- Anisotropic superconductivity in $Na_xCoO_2{\cdot}yH_2O$
  Spin triplet superconductivity in a multi-orbital model.[3]
  D-vector and multiple phase in a magnetic field.[4]
  Superconductivity due to charge fluctuation.[5]
- Organic conductors
  Quantum melting due to geometrical frustration.[6,7]
  New type charge ordering in quasi-two-dimensional organic conductors.[8,9]
  Charge ordering and spin degrees of freedom.[10]
  One-dimensional organic systems with localized spins.[11]
- Theories of anisotropic superconductivity
  Quasi-classical theory on the angle dependence of specific heat in a magnetic field.[12]
  New state of Sr_2RuO_4 in high magnetic fields.[13]
  Proximity effects of superconductivity and magnetism in heterostructures.
- Electronic and spin states in frustrated systems
  Superconductivity correlation in a triangular lattice.[14]
  Numerical simulation in classical XY spin systems with frustration.
- Novel quantities in electronic systems
  Disorder operator in two-dimensional insulators.
  Artificial electric field in Fermi liquids.[15]
- Kondo effect in quantum dots

[1] T. Koretsune and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 1390-1393 (2005).
[2] Y. Yanase and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 1534-1543 (2005).
[3] M. Mochizuki, Y. Yanase and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 1670-1673 (2005).
[4] Y. Yanase, M. Mochizuki and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 2568-2578, 3351-3364 (2005).
[5] H. Watanabe and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 2901-2904 (2005).
[6] J. Merino, H. Seo, and M. Ogata: Phys. Rev. B **71**, 125111-1-125111-5 (2005).
[7] H. Seo, J. Merino, H. Yoshioka and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 051009 (2006).
[8] M. Kaneko and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 014710 (2006).
[9] H. Watanabe and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, No. 6 (2006).
[10] Y. Tanaka and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 3283-3287 (2005).
[11] C. Hotta, M. Ogata and H. Fukuyama: Phys. Rev. Lett. **95**, 216402-1 - 216402-5 (2005).
[12] M. Udagawa, Y. Yanase and M. Ogata: Phys. Rev. B **71**, 024511-1-024511-11 (2005).
[13] M. Udagawa, Y. Yanase and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 2905-2908 (2005).
[14] T. Koretsune and M. Ogata: Phys. Rev. B **72**, 134513-1-134513-6 (2005).
[15] R. Shindou and K-i. Imura: Nucl. Phys. B **720**, 399 (2005).

12 Tsuneyuki Group

Research Subjects: Theoretical Condensed-matter physics

Member: Shinji Tsuneyuki and Kazuto Akagi

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 FY2005 were as follows:

- Electronic structures and chemical reactions at surfaces
  - Effect of strong electric field on organic molecules chemisorbed on Si(100)
  - Organic chemistry on Si surfaces
- Impurity effect in ferroelectrics
  - Impurity state of Mn-doped perovskite
  - Role of impurity hydrogen in $BaTiO_3$
- Structura/electronic transition of materials under ultra-high pressure
  - Insulator-metal transition of YH_3under high pressure
  - 3D C60 polymer synthesized under high pressure
- New methods of electronic structure calculation
  - First-principles wavefunction theory for solids based on the transcorrelated method
  - First-principles calculation of Hubbard parameter by constrained DFT with Maximally localized Wannier function

13 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 and complex materials 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 [2], giant magnetoresistance, carrier-induced ferromagentism and spin/charge/orbital ordering [3] in strongly correalted systems such as transition-metal oxides, magnetic semiconductors, and their nano-structures.

[1] O. Rösch, O. Gunnarsson, X. J. Zhou, T. Yoshida, T. Sasagawa, A. Fujimori, Z. Hussain, Z.-X. Shen and S. Uchida: Polaronic Behavior of Undoped high-T_c Cuprates, Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 227002–1-4.

[2] T. Yoshida, K. Tanka, H. Yagi, A. Ino, H. Eisaki, A. Fujimori and Z.-X Shen: Direct Observation of the Mass Renormalization in $SrVO_3$ by Angle-Resolved Photemission Spectroscopy, Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 146404–1-4.

[3] M. Kobayashi, Y. Ishida, J. l. Hwang, T. Mizokawa, A. Fujimori, J. Okamoto, K. Mamiya, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Tanaka, H. Saeki, H. Tabata and T. Kawai: Characterization of Magnetic Components in the Diluted Magnetic Semiconductor $Zn_{1-x}Co_xO$ by X-ray Magnetic Circular Dichroism, Phys. Rev. B **72** (2005) 201201(R)–1-4.

14 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 gpseudogaph 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.

15 Hasegawa Group

Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics

Members: Shuji HASEGAWA and Iwao MATSUDA

Topics in our research group are (1) electronic/mass transports, (2) atomic/electronic structures, (3) phase transitions, (4) electronic excitations, and (5) 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 diffractions, scanning electron microscopy, scanning tunneling micro/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy, and *in-situ* 4-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-4-point probes. Main results in this year are as follows.

(1) Surface electronic transport: Metal-insulator transitions, hopping conduction, and Hall effect in surface states. Quantitative evaluation of surface-state conductivity from Fermi surface mapping. Conductance of individual Cobalt silicide nanowires and metal-coated carbon nanotube tips.

(2) Surface phases, ultra-thin films, and phase transitions: Order-disorder phase transition and charge-density-wave transition on various metal-induced surface superstructures of Si and Ge. Quantum-well state in ultra-thin Pb, Bi, and Ag films. Ge nanodots layer.

(3) Construction of new apparatuses: Green's-function STM (low-temperature four-tip STM). Metal-coated carbon nanotube STM tips.

[1] C. Liu, I. Matsuda, R. Hobara, and S. Hasegawa: *Interaction between adatom-induced localized states and a quasi-two-dimensional electron gas*, Physical Review Letters **96**, 036803 (Jan 2006).

[2] A. Konchenko, I. Matsuda, S. Hasegawa, Y. Nakamura, and M. Ichikawa: *Observation of Quantum Confinement in Ge nanodots on an oxidized Si surface*, Physical Review B **73**, 113311(Mar 2006).

[3] I. Matsuda, T. Hirahara, M. Konishi, C. Liu, H. Morikawa, M. D'angelo, S. Hasegawa, T. Okuda, and T. Kinoshita: *Evolution of Fermi surface by electron doping into a free-electron-like surface state*, Physical Review B **71**, 235315 (Jun 2005).

[4] T. Hirahara, I. Matsuda, C. Liu, R. Hobara, S. Yoshimoto, and ShujiHasegawa: *Direct measurement of the Hall effect in a free-electron-like surface state*, Physical Review B, in press (2006).

[5] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobara, Y. Hosomura, S. Hasegawa, and P. A. Bennett: *In situ resistance measurements of epitaxial cobalt silicide nanowires on Si(110)*, Applied Physics Letters, **86**, 233108 (Jun 2005).

[6] I. Matsuda, T. Hirahara, M. Ueno, R. Hobaram and S. Hasegawa: *Electrical Conduction through a Monatomic Step*, Journal de Physique IV **132**, 57 (Apr 2006).

[7] M. Dfangelo, M. Konishi, I. Matsuda, C. Liu and S. Hasegawa: *Alkali metal-induced Si(111)-*$\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ *structure: the Na case*, Surface Science **590**, 162-172 (Oct 2005).

[8] T. Nagao, S. Yaginuma, M. Saito, T. Kogure, T. Ohno, S. Hasegawa, and T. Sakurai: *Strong Lateral Growth and Crystallization via Two-dimensional Allotropic Transformation of Semi-metal Bi Film*, Surface Science **590**, L247-252 (Sep 2005).

[9] H. Konishi, S. Honda, M. Kishida, Y. Murata, T. Yasuda, D. Maeda, K. Tomita, K. Motoyoshi, S. Yoshimoto, R. Hobara, I. Matsuda, J.-G. Lee, H. Mori, K. Oura, S. Hasegawa, and M. Katayama: *Synthesis of Metal-Alloy Nanowires toward Functional Scanning Probe Microscope*, Japanese Journal of Applied Physics **45**, 3690-3692 (Apr 2006).

[10] Y. Murata, S. Yoshimoto, M. Kishida, D. Maeda, T. Yasuda, T. Ikuno, S. Honda, H. Okado, R. Hobara, I. Matsuda, S. Hasegawa, K. Oura, and M. Katayama: *Exploiting Metal Coating of Carbon Nanotubes for Scanning Tunneling Microscopy Probes*, Japanese Journal of Applied Physics **44**, 5336-5338 (Jul 2005).

[11] S. Yoshimoto, Y. Murata, R. Hobara, I. Matsuda, M. Kishida, H. Konishi, T. Ikuno, D. Maeda, T. Yasuda, S. Honda, H. Okado, K. Oura, M. Katayama, and S. Hasegawa: *Electrical Characterization of Metal-Coated Carbon-Nanotube Tips*, Japanese Journal of Applied Physics **44**, L1563-L1566 (Dec 2005).

[12] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa and S. Hasegawa: *Electrical Conduction on Various Au/Si(111) Surface Superstructures*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3**, 497 (Dec 2005)

16 Fukuyama Group

Research Subjects: Low Temperature Physics (Experiment):
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, Hiroshi Kambara

Our current interests are (i) new quantum phases with strong correlations and frustration in 2D ^{3}He. (ii) 2DES in high magnetic fields and unconventional superconductors. We are investigating these materials at very low temperatures down to 50 μK, using various experimental techniques such as NMR, calorimetry, STM/STS, *etc.*

1. **Novel quantum phases in 2D ^{3}He:**

   Monolayer ^{3}He adsorbed on a graphite surface is an ideal system for studying strongly correlated 2D Fermion systems. The magnetic ground state of the second-layer registered phase of ^{3}He is believed to be the gapless quantum spin-liquid. We are studying the rich quantum phase diagram in this system from heat-capacity and NMR measurements in a wide temperature and density region.

   A Fermi fluid existing at a low density region gradually transforms to the Mott localized phase with increasing density to the 4/7 registered phase ($\rho_{4/7}$). Unusual density dependences of measured magnetization and demagnetization field coefficient imply importance of ferromagnetic short range spin correlations. In the region just above $\rho_{4/7}$, an excess magnetization decreases towards zero below 500 μK. This is indicative of a possible phase transition to the spin-singlet ordered phase.

2. **STM/STS studies of 2DES:**

   (a) **Real-space imaging of the quantum Hall states at graphite surface:**
   We succeeded to observe spatial distributions of the local density of states (LDOS) of a quasi 2DES near point defects at graphite surface with STM/STS. A clear contrast between localized and extended states which correspond to the valley and peak energies of the Landau levels indicates the existence of quantum Hall state at graphite surface. The experimental localized LDOS is in good agreement with a spatial distribution of a calculated wave function for a single electron in 2D in a Coulomb potential under magnetic fields.

   (b) **STM/STS studies of Landau quantization in 2DES in semiconductors:**
   The Landau quantization of 2DES confined in a InAs thin film on a GaAs or InAs substrate was observed with STS. We also observed a curious DOS oscillation with periodicity of 60 meV in the positive energy range, which could be due to electron confinement with a Schottky barrier at the InAs-GaAs interface.

   (c) **Graphite edge state:**
   The graphite "edge state", which was theoretically predicted, was confirmed experimentally by LDOS measurements of graphite surfaces near monoatomic step edges with STM/STS. A clear peak in LDOS was observed at energies below E_F by $20-100$ meV only near the zigzag edges, while such a peak was not observed near the armchair edges.

3. **STM/STS studies of unconventional superconductors:**

   (a) **Surface electronic states of Sr_2RuO_4:**
   We studied surface electronic properties of the spin-triplet superconductor Sr_2RuO_4 with STM/STS. A large gap structure ($\Delta \sim 5$ meV) in the LDOS is always observed on an SrO plane cleaved at low temperatures. This structure would originate from the surface reconstruction with rotation of the RuO_2 plane underneath the SrO plane. On the other hand, surface cleaved at room temperature shows a DOS proportional to the square root of energy ($\sqrt{V}$) which is characteristic of the disordered electronic state in Anderson localization.

4. **Construction of the second generation very-low temperature STM:**

   We have started to design and construct a new very-low temperature STM. An entirely home-made STM head designed as extremely compact (ϕ=26 mm) worked quite well at 77 K in the test measurement.

17 Okamoto Group

Research Subjects: Experimental Condensed Matter Physics,

Low temperature electronic properties of two-dimensional systems.

Member: Tohru Okamoto and Yukio Kawano

We study low temperature electronic properties of semiconductor two-dimensional systems.
The current topics are following:

1. Two dimensional electrons at cleaved semiconductor surfaces:
   At the surfaces of InAs, conduction electrons can be induced by submonolayer deposition of other materials. Research on electrons at semiconductor surfaces has great future potential because of the variety of adsorbates and the application of scanning probe microscopy techniques. Recently, we have successfully performed the first low-temperature (T = 1.5 K) magnetotransport measurements on Ag-induced electron systems (ESs) formed at in situ cleaved surfaces of p-type InAs. In this year, we extended the study to various adsorbates. (a) For Fe-induced 2DESs, strong positive magnetoresistance was observed in the in-plane magnetic field configuration. The resistivity increases by a factor of 2 when B reaches 9 T. We consider that exchange interactions between localized moments of adsorbed Fe atoms and 2D electrons play an essential role. (b) The quantum Hall effect is observed for Ge-induced 2DESs. (c) The positive magnetoresistance due to the suppression of weak antilocalization is observed in the weak perpendicular magnetic field region. The magnetoresistance curve for an Au-induced 2DES is different from that for a Ge-induced 2DES. This is associated with the spin-orbit scattering of an Au atom.

2. Strongly correlated two dimensional systems:
   (i) We have performed cyclotron resonance measurements for a Si/SiGe quantum well. The ratio of the obtained scattering time τ to τ_0 deduced from zero-field mobility increases with decreasing electron concentration and approaches unity in the metal-insulator transition region. (ii) The resistivity change due to electron spin resonance (ESR) absorption is investigated in the high-mobility two-dimensional electron system formed in the Si/SiGe heterostructure. Results for a specific Landau level configuration demonstrate that the primary cause of the ESR signal is a reduction of the spin polarization, not the effect of electron heating. The longitudinal spin relaxation time T_1 is obtained to be of the order of 1 ms in an in-plane magnetic field of 3.55 T. The suppression of the effect of the Rashba fields due to high-frequency spin precession explains the very long T_1.

3. Exploration of novel properties of two-dimensional semiconductors and their application to new devices:
   Our studies aim at revealing local transport and optical properties of quantum Hall conductors by means of scanning probe microscopes, Terahertz irradiations, etc.

18 Shimano Group

Research Subjects: Optical and Terahertz Spectroscopy of Condensed Matter

Member: Ryo Shimano and Shinichi Watanabe

We study light-matter interactions and many body quantum correlations in optically excited high density electron-hole systems in semiconductors, low dimensional systems involving carbon nanotubes, quasi-1D organic conductors. Currently, we are focusing on the low energy($\sim$ meV) electromagnetic responses, i.e., in terahertz(THz) frequency range where the responses are dominated by free carriers, quasi-particle excitations, and/or various collective excitations.

The research summary in this year is as follows.

1. **Instrumental Developments**

   THz time domain spectrscopy at low temperature and in high magnetic field
   In order to perform THz time domain spectroscopy(TDS) at low temperature and in high magnetic field, we have improved the dynamic range of THz spectroscopy. By using a p-type InAs for THz generation, THz radiation with the electric field amplitude of 10kV/m is generated. A shot-noise level balanced detector is developed for electo-optic sampling of THz pulse. These improvements on THz generation and detection allow us to obtain the dynamic range of THz-TDS as 5×10^4 in amplitude, which could compensate the transmission loss due to the multiple windows of the superconducting magnet.

   THz ellipsometry
   Magneto-optical effect such as Faraday effect or magneto-optical Kerr effect enables us to investigate the ultrafast spin dynamics and transport properties under magnetic field, by optical means, i.e., without using electrodes. We have developed the magneto-optical measurements scheme in THz frequency range, by highly sensitve THz ellipsometry. Polarization rotation as low as 0.1mrad can be deteced in the frequency range between 0.5THz to 2.5THz.

   THz spectroscopy in subwavelength space region
   We have examined an aperture type THz microscopy in order to apply the technique to small samples in subwavelength size. An aperture which diameter is smaller than the wavelength, is attached on a sample. Transmissivity is obatined by comparing the sample with an aperture and a blank aperture. We have applied the technique to determine the dielectric function of doped semiconductors, in the frequency range between 0.5THz to 2.5THz. FDTD simulation analysis of the transmitted THz spectrum is performed and compared with the experimental results.

2. **THz spectroscopy of one-dimensional system**

   Carbon Nanotube
   Carbon nanotubes are considered as one of the promissing materials for one dimensional electron systems. Various exotic behaviors in optical and transport phenomena reflecting 1D nature have been observed. The dynamical aspects of transport properties, and photo-excited dynamics are also important issues to understand the many body effects in such 1D electron system. In this context, we are studying the low energy ($\sim$ meV) electromagnetic responses of ground state and photo-excited state of nanotubes. By using THz-TDS, the dielectric response of nanotubes in the relevant frequency range has been investigated.

   Quasi-1D Organic Conductor
   $(TMTSF)_2PF_6$ is a quasi-1D organic conductor which exibits metal-insulator transition at 12K accompanied with spin density wave(SDW) formation. For the study of the photo-excited dynamics of SDW phase, and photo-induced phase transition in such low temperature exotic phases, we have developed a reflection type THz-TDS.

19 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, & Shinji Mukohyama

Astrophysics is a very broad field of research, and it is hard to cover various important astrophysical research subjects in our group only. Therefore we are currently working on the three specific areas of research interest; "Physics of the Early Universe", "Observational Cosmology", and "Nuclear Astrophysics", all of which are definitely interrelated very closely. Let us describe more specifically the current interests and activities of our group in the above areas.

The understanding of the very early universe has made rapid progress in 1980's by applying the ideas of particle physics around the epoch close to the Planck time, one notable example of which 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 in a language of physics. Our group activities in this area include inflationary universe models, cosmological phase-transition and topological defects, big-bang nucleosynthesis, 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.

"Nuclear Astrophysics" is exploring the interface between nuclear physics and astrophysics, in particular the physics of supernovae. It 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 25 years. It is, therefore, quite 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.

Let us summarize this report by presenting recent titles of the doctor and master theses in our group;
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

2002

- Nuclear "pasta" in dense stars and its properties
- Supernova Neutrinos: Their Relic Background and Resonant Spin-Flavor Conversion
- Arrival Distribution of Ultra-High Energy Cosmic Rays and Implications for Their Source Candidates
- Non-linear evolution of the cosmological large scale structure from the local collapse model

2001

- The Universe with Extra Dimensions — From Kaluza-Klein Perspective to Brane World
- Gravitational Collapse of Rotating Massive Stars
- Effects of Neutrino Oscillation on Supernova Neutrino
- Resolving the Central Density Profile of Dark Matter Halos with Gravitational Lensing Statistics
- The Stability of Higher Dimensional Spacetime

2000

- Double inflation in supergravity and its observational implications
- Propagation of UHECRs in the inhomogeneous source model
- Effects of neutrino oscillation on the supernova neutrino spectrum
- A Biasing Model for Cosmological Two-Point Statistics and the Probability Distribution Function of Nonlinear Mass Fluctuations
- Genus Statistics for Large-Scale Structure as a probe of Primordial Random-Gaussianity and Non-linear Stochastic Biasing
- Velocity Distribution Functions for Nonlinear Gravitationg Many-body Systems

20 Murao Group

Research Subjects: Quantum Information Theory

Member: Mio Murao and Damian Markham

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 10 years. Entanglement is nonlocal correlation that appears in certain types of quantum states (non-separable states) and has become considered as the fundamental resource for quantum information processing. In our group, we are investigating 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:

- *Entanglement distances and local access of information:* We investigate the relationship between distance-like entanglement measures and the ability to access information locally when it is spread to many separate parties. We give an explicit bound on how well we can discriminate a set of states, given only local access to them, in terms of the entanglement. This is then translated to a bound on how well we can use these states to encode and decode information in the local setting. The overall result is an explicit statement of how information access is limited by the presence of entanglement. This work should allow the development of protocols to make use of this fact, for example in quantum secret sharing. Further this work offers an operational interpretation to these distance-like entanglement measures, which are defined and understood only as abstract mathematical properties of states. [1]

- *Local copying and local discrimination as a study of non-locality of a set of states:* We focus on the non-locality concerning local copying and local discrimination, especially for a set of orthogonal maximally entangled states in prime dimensional systems, as a study of non-locality of a set of states. As a result, for such a set, we completely characterize deterministic local copiability and show that local copying is more difficult than local discrimination. From these results, we can conclude that lack algebraic symmetry causes extra non-locality of a set of states. [2]

- *Local discrimination – one-way classical communication vs. two-way classical communication:* The power of quantum information processing often depends on weather two-way classical communication channel is available, or only one-way classical communication channel is available. For example, distillable entanglement and quantum channel capacity depend on weather we are allowed one-way classical communication and two-way classical communication in addition to local operations. However, such an example had not been known on local discrimination problems. We investigated local discrimination of an entangled state from a completely mixed state, and showed that local distinguishability also depends on whether one-way classical communication, or two-way communication is available.

- *Robustness of entanglement in low-rank noises:* The robustness of entanglement describes how strong a given state‘s entanglement is against noises. The effects of noises to a quantum state can be modeled by mixing an additional density matrix with the original density matrix of the state. The rank of the additional density matrix describes the number of different possible unitary operations introduced by the noises. We investigated the effects of low rank noises for multipartite entangled states. We have proven that the noises represented by a rank smaller than the Schmidt number of the multipartite entangled states minus one cannot destroy entanglement completely.

- *Control of Quantum Information Flow and One-way Quantum Computation:* We investigate how quantum information can be maintained, manipulated and controlled in multiparty settings. In particular we look at one-way quantum computation, where initially the information is spread by entanglement across the whole system, then controlled and manipulated through a series of measurements and feed-forward steps. We investigate conditions on the entanglement of these systems, and the measurements allowed, and what feed forward is necessary to not loose the quantum information.

- *Entanglement in many-body systems:* In the last few years a lot of effort has been made in understanding the presence and role of entanglement in various areas of physics. For example, it has been associated to critical phenomena in condensed matter physics, symmetry breaking in high energy

physics and hawking radiation. We consider a thermal system with a highly entangled ground state, intuitively it makes sense that if the temperature is low enough, the population of the ground state is high enough to keep the mixed state entangled. This intuition is made exact and we derive critical temperatures, below which, we are guaranteed entanglement. We investigate this effect for a range of Hamiltonians. We then relate this to other critical phenomena in solid state physics.

- *Mixed state asymmetric quantum information sharing:* We show a way to asymmetrically share qubit information in a mixed bipartite state such that it can be fully extracted with unit probability at one of the qubits but not at the other as long as using LOCC (local operations and classical communications). As an application of this scheme, we present a remote quantum communication switch protocol, which allows conditional transmission of quantum information. Entanglement properties behind this protocol are investigated.

- *A quantum lock protocol:* We proposed a quantum lock protocol for authentication, which is composed of a quantum key state, a verification key state, and a quantum lock state created by a authenticator. The states of two keys are connected by a Pauli unitary operation, which is encoded in the quantum lock, represented by a maximally entangled state. The authenticator distributes the quantum key to a user and a verification key to the verifier and the quantum lock to the user and the verifier. The verifier customizes the quantum lock such that the authenticators information about the quantum key and the unitary operation is not enough to prove the authentication of the quantum key. Our protocol fully deals with quantum information, since all the states of the keys and the lock are kept unknown throughout the protocol.

- *Blind quantum computation:* Blind quantum computation is a computation which a user performs a unitary operation given by a supplier without knowing the identity of the operation by using measurement based quantum computation. Since the anonymous unitary operation can be only "undone" by the supplier, blind quantum computation can be useful for cryptographic applications. We have shown that universal blind quantum computation is impossible and also any blind computation is impossible in the teleportation model of quantum computation.

- *High Precision measurements using quantum optical states:* We study energy efficiency of high precision measurements using quantum optical systems. We use higher order annihilation-creation operators to describe the measurements. We found that the energy division method using entanglement, which enhances accuracy of the measurement in low order operator cases, makes the precision worse with the higher order operators. We also found that a special cat state which works better in higher order operator cases.

[1] M. Hayashi, D. Markham, M. Murao, M. Owari and S. Virmani, Phys. Rev. Lett. **96** (2006), 040501
[2] Masaki Owari, Masahito Hayashi, quant-ph/0509062

21 Kobayashi Group

Research Subjects: Ultrafast and Nonlinear optical processes, Quantum Optics

Member: Takayoshi Kobayashi, Atsushi Yabushita, Akikatsu Ueki

Ultrashort pulse lasers are being developed to study ultrafast processes in condensed-phase materials including polymers, aggregates, and biological molecules. Quantum information and quantum optics are also studied.

1. Development of ultrashort pulse lasers
   - Control of the carrier-envelope phase and measurement
   - Generation of ultra-broadband light
2. Ultrafast spectroscopy
   - Oligothiophene
   - PIC J-aggregate
   - Porphyrin
   - Pump-probe anharmonic signal in a harmonic system induced by deformed wavepacket generated by an ultrashort pulse
   - Determination of Huang-Rhys factor associated with transition from excited state
3. Electric field modulation spectroscopy
   - Porphyrin J-aggregate, molecular crystal, and photosynthetic protein
   - Nonlinear absorptive spectroscopy of a single quantum dot
4. Quantum information
   - Generation of many-body entanglement and its application
   - Quantum key distribution using spontaneous emission parametric down conversion
   - Phase measurement beyond Heisenberg limit
   - Quantum high-pass and low-pass filters composed only of passive linear optical components

22 Makishima Group

Research Subjects: High Energy Astrophysics using Scientific Satellites, X-Ray Probing of the Universe, Development of Cosmic X-Ray/γ-Ray Instruments

Member: Kazuo Makishima, Motohide Kokubun

We study cosmic and solar high-energy phenomena in the X-ray and γ-ray frequencies, using scientific satellites launched by the Japan Aerospace Exploration Agency, as well as foreign missions.

The *Suzaku* satellite: In collaboration with several domestic and US groups, we have developed the Hard X-ray Detector (HXD) [2] which has an unprecedented sensitivity to cosmic hard X-rays in the 10–600 keV range. The *Suzaku* satellite, carrying onboard the HXD and CCD cameras (coupled to X-ray telescopes), has been launched successfully by an M-5 rocket on 2005 July 10. Performance-verification observations with *Suzaku* were completed in the first 9 months.

Cosmic Nucleosysnthesis: X-ray observations provide powerful diagnostics to cosmic nucleosynthesis, from individual stars to clusters of galaxies. Our observation of a planetary nebula with the *Suzaku* CCD camera revealed an extreme carbon overabundance relative to oxygen. This is a rare occasion where the carbon-rich material produced deep inside an evolved star is being witnessed [1]. Using *XMM-Newton* and near-infrared data, we discovered that the stellar masses in a dozen clusters of galaxies are much more centrally concentrated than their nuclear products, namely ion in the X-ray emitting plasma. This suggests that galaxies have fallen to the cluster center over the Hubble time, presumably due to magneto-hydrodynamic interactions with the plasma.

Physics of Compact Objects: Mass accretion onto compact objects is our favorite research subject [3], and extensive *Suzaku* studies have started. From two binary X-ray pulsars, the HXD successfully detected spectral features due to electron cyclotron resonance. Rotation-powered pulsars, including the Crab pulsar in particular, provided accurate calibration to the HXD timing function. Combining the HXD and the CCD camera data, several black-hole binaries (including the prototypical Cygnus X-1) were detected over an extremely wide energy band, from ~ 0.3 keV to ~ 300 keV. We keep our quest for the nature of enigmatic Ultra-Luminous X-ray sources (ULXs) in nearby galaxies, candidates for intermediate-mass black holes. A dozen active galactic nuclei also enabled the *Suzaku* detection at least up to 100 keV.

Plasma Heating and Particle Acceleration: Using *Suzaku* and other missions, we are revealing that vast inter-stellar and inter-galactic space is a site of ubiquitous plasma heating and particle acceleration. Examples include; giant flares around young stars; colliding stellar winds; and globular clusters moving through the Galactic halo gas. *Suzaku* observations have demonstrated that the Galactic plane near the Galactic center is filled with hot thermal X-ray emission (detected with the CCD camera), and non-thermal hard X-ray signals (detected with the HXD). The origin of these "Galactic diffuse X-ray emissions" is still unclear. Using *Suzaku*, we are searching clusters and groups of galaxies for non-thermal emission from the anticipated relativistic particles.

Future Instrumentation: We are making various attempts toward future instrumentation. These include Fourier-sysnthesis gamma-ray imagers [4], coded-mask imagers employing small-pixel inorganic scintillators, and new single- and poly-crystalline and inorganic scintillators. Some of them are meant for the future mission called *NeXT* (New X-ray Telescope), which is being planned as a successor to *Suzaku*.

1. Murashima, M., Kokubun, M., Makishima, K., Kotoku, J., Murakami, H., Matsushita, K., *et al.*: "*Suzaku* Reveals He-burning Products in the X-ray Emitting Planetary Nebula BD +30° 3639", *Astrophys. J. Lett.*, in press (2006)

2. Kokubun, M., Abe, K., Ezoe, Y., Fukazawa, Y., Hong, S., Inoue, H., Itoh, T., Kamae, T., Kasama, D., Kawaharada, M. *et al.*: "Improvements of the *Astro-E2* Hard X-ray Detector (HXD-II)", *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **51**, 1991-1996 (2005)

3. Kubota, A., Ebisawa, K., Makishima, K., & Nakazawa, K.: "On the Temperature Profile of Radiatively Efficient Geometrically Thin Disks in Black Hole Binaries with the *ASCA* GIS ", *Astrophys. J.* **631**, 1062-1071 (2005)

4. Miyawaki, R., Niko, H., Okada, Y., Kokubun, M., Makishima, K., Negoro, H., Kotoku, J., Terada, Y. *et al.*: "High Resolution Fourier Synthesis Hard X-Ray Imaging Based on CdTe Strip Detectors", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52**, 2052-2057 (2005)

23 Takase Group

Research Subjects: High Temperature Plasma Physics Experiments, Spherical Tokamak, Nonlinear Physics, Collective Phenomena, Fluctuations and Transport, Advanced Plasma Diagnostics Development

Members: Yuichi Takase, Akira Ejiri

Thermonuclear fusion, the process that powers the sun and stars, is a promising candidate for generating abundant, safe, and clean power. In order to produce sufficient fusion reactions, isotopes of hydrogen, in the form of 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) would be 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. Numerous improvements to power supplies and RF heating systems have been implemented, and experimental activities have resumed with upgraded capabilities in 2005.

Formation, heating and maintenance of the TST-2 spherical tokamak plasma

It is crucially important for ST to develop a scenario of plasma formation, heating and maintenance without the use of the central solenoid (CS). Several approaches are being investigated on TST-2. Noninductive plasma initiation was achieved by injection of RF power at 2.45 GHz in the presence of a vertical magnetic field with positive decay index. A doubling of plasma current was observed by additional injection of RF power at 21 MHz. Plasma heating by the high harmonic fast wave (HHFW) was also investigated. A clear evidence of electron heating was observed when HHFW with an appropriate wavenumber (toroidal mode number of 10) was excited, consistent with absorption of HHFW power by electron Landau damping and transit time damping. The excited HHFW can be measured by magnetic probes located outside the plasma, and by a reflectometer which measures modulation of the reflected microwave from the wave induced density oscillation inside the plasma. Heavy scattering of HHFW and nonlinear decay of HHFW were indicated by the measured frequency spectra.

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 reconnection of magnetic field lines, and is called the reconnection event (RE). A large increase in ion temperature is observed, confirming ion acceleration and thermalization predicted by theory. The deformation and the loss of electron thermal energy were studied by measuring the spatial profile of soft X-ray emission. It was found that the RE process starts around a normalized radius of 0.1, and tends to occur when the pressure gradient exceeds a critical value, suggesting that the instability is driven by the pressure gradient. Magnetic fluctuation measurements reveal oscillations at 10 kHz and harmonics, with toroidal mode numbers of 1 and 2, consistent with predictions of 3-dimensional MHD simulation.

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 under construction. Two ST plasmas will be 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%). Access to the second stability regime becomes much easier using this unique method. It is a 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) or neutral beam injection. Fabrication of the vacuum vessel and the coils have completed. and experiments will start in 2006.

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. Compared to previous results, the duration of constant current with zero loop voltage was much longer, and therefore, a much clearer evidence of fully bootstrap driven discharge was obtained.

24 Tsubono Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Gravitational Wave Physics, 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 accumlated over 3,000 hours data. We are now analyzing the obtained data searching for the gravitational waves from coalescing binaries, supernovae and pulsars.

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.

- Laser interferometric gravitational wave detectors
  - Current status of TAMA project
  - Data analysis of the TAMA data
  - Systematic analysis of TAMA monitoring signal
  - Study of the next-generation laser interferometer, LCGT
- Space laser interferometer
  - Space laser interferometer DECIGO
  - FP-DECIGO
  - Laser stabilization using optical fiber
  - Study of the movable devices
- Study of the precise measurement
  - Suspension point interferometer for vibration isolation
  - New vibration isolation system using magnetic levitation

references

[1] B Abbott et al. (LIGO Scientific collaboration), T Akutsu at al. (TAMA Collaboration), Joint LIGO and TAMA300 search for gravitational waves from inspiralling neutron star binaries, Phys. Rev. D (2006, in press), gr-qc/0512078

[2] Y. Aso, M. Ando, S. Otsuka and K. Tsubono: Active vibration isolation using a Suspension Point Interferometer, Journal of Physics: Conference Series **32** (2006) 451-456.

[3] S. Kawamura, et al., The Japanese space gravitational wave antenna.DECIGO, Class. Quantum Grav. **23**-8 (2006) S125-S131.

[4] B Abbott et al. (LIGO Scientific collaboration), T Akutsu at al. (TAMA Collaboration), Upper limits from the LIGO and TAMA detectors on the rate of gravitational-wave bursts, Phy. Rev. D **72**-12 (2005) 122004.

25 Sano Group

Research Subjects: Nonlinear Dynamics and Fluid Mechanics

Member: Masaki Sano and Yoshihiro Murayama

Our research group studies nonlinear dynamics and pattern forming phenomena in dissipative nonlinear systems. Oscillation, chaos, and turbulent behavior of fluid, solid, granular systems, chemical reactions and biological systems are investigated based on dynamical system's theory and laboratory experiments. Through these efforts we search for novel phenomena, and to develop new methods in understanding complex phenomena arising in the systems far from equilibrium. The followings are main subjects of our study.

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

(2) Spatio-temporal dynamics in spatially extended dissipative systems

3. Dynamical aspects of biological systems

(1) Single molecule level measurement of DNA collapsing, DNA-protein interaction, and gene expression

(2) Collective behavior of the activities in biological neural assemblies

References

1. M. Matsuo: Violation of a Fluctuation-Dissipation Relation in Fragile Glasses, J. Phys. Soc. Jpn. Vol.74, 2128 (2005).
2. A. Awazu FForword and Backword Drift Motions and Inversion of Drift Directions in a Partially Driven Lattice Gases. J. Phys. Soc. Jnp. 74, 3127 (2005).
3. H. Wada, Y. Murayama and M. Sano: Nonlinear elasticity of single collapsed polyelectrolytes, Phys. Rev. E 72 041803 (2005).
4. S. Tatsumi, M. Sano, A. G. Rossberg: Observation of stable phase jump lines in convection of a twisted nematic liquid crysta, Phys. Rev. E, 73 (1), 011704 (2006).
5. Y. Kobayashi and M. Sano: Aggregated spots and waving loops in a reaction-advection-diffusion system with a global coupling, Phys. Rev. E 73, 015104(R) (2006).
6. T. Mashiko, T. Segawa, M. Sano and Y. Tsuji: Simultaneous measurements of velocity fields in thermal turbulence by USV and PIV , Flow Measurement and Instrumentation 17, 107-112 (2006).
7. Y. T. Maeda and M. Sano: Regulatory Dynamics of Synthetic Gene Networks with Positive Feedback, J. Mol. Biol, in press (available online) (2006).

26 Yamamoto Group

Research Subjects: Submillimeter-wave and Terahertz Astronomy, Chemical Evolution of Interstellar Molecular Clouds, Star Formation, Development of Terahertz Detector

Member: Satoshi Yamamoto and Tomoharu Oka

Molecular clouds are birthplaces of new stars, and understanding their physical and chemical properties provides us with fundamental bases for detailed studies on star formation, which is an elementary process in evolution of the Galaxy. Toward this goal, we are conducting observational studies in the millimeter- and submillimeter-wave region.

Our group operated the Mount Fuji Submillimeter-wave Telescope on the top of Mount Fuji (alt. 3770 m) from 1998 to 2005. With this telescope, we explored formation processes, detailed structure, and chemical evolution of interstellar molecular clouds by observing the fine structure lines of the atomic carbon ($^3P_1-^3P_0$ 492 GHz; $^3P_2-^3P_1$ 809 GHz). Owing to the high sensitivity of our superconductor receiver, the fully remote controlled operation, and the excellent observing condition from Mount Fuji, we were able to observe more than 50 square degrees of the sky with the 492 GHz line. This is the largest survey of the atomic carbon line so far made. Furthermore, a few representative clouds such as Orion A, Orion B, and NGC1333 were mapped with the 809 GHz line. By comparing the distribution of the atomic carbon lines with the CO distribution, we have been studying formation and evolution of molecular clouds in detail. The Mount Fuji Submillimeter-wave Telescope is a research project of Research Center for the Early Universe (RESCEU) in collaboration with researchers of National Astronomy Observatory and other Japanese institutes.

In addition, our group has developed a transportable 18 cm submillimeter-wave telescope in order to conduct a survey of the 492 GHz line of the atomic carbon over the Milky Way. In 2003, we successfully operated the telescope at Pampa la Bola (alt. 4800 m) in Chile, and observed the southern Milky Way in the atomic carbon line. From the result, we are studying molecular cloud formation in the galaxy scale [1].

We are also studying chemical evolution of star forming regions with the Nobeyama 45 m telescope and Nobeyama Millimeter Array. Particularly we are interested in behaviors of complex organic molecules ($HCOOCH_3$, $(CH_3)_2O$, etc.) in hot cores around low mass protostars. These molecules can be used as potential tracers to study the early stage of protostellar evolution. In fact, we have detected the $HCOOCH_3$ line from an extremely young low-mass protostar, NGC1333 IRAS4B [2].

Along with the above observational studies, we are developing a hot electron bolometer (HEB) mixer that can be used at 1.5 THz for a survey of the fine structure line of N^+. Fur this purpose, we have introduced an electron beam lithography system and a mixer fabrication system in our laboratory, and have started fabrication of a diffusion-cooled type HEB mixer using Nb as a superconductor and a phonon-cooled type HEB mixer using NbTiN.

[1] T. Oka, K. Kamegai, M. Hayashida, M. Nagai, M. Ikeda, N. Kuboi, K. Tanaka, L. Bronfman, and S. Yamamoto: Atomic Carbon in the Southern Milky Way, Astrophys. J., **623**, 889-896 (2005).

[2] N. Sakai, T. Sakai, and S. Yamamoto: Detection of $HCOOCH_3$ toward a Low-Mass Protostar NGC1333, Pub. Astron. Soc. Japan, **58**, L15-L18 (2006).

27 Sakai (Hirofumi) Group

Research Subjects: Experimental study 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 pulses. (3) High-intensity laser physics typified by high-order nonlinear processes (ex. multiphoton ionization and high-order harmonic generation) and ultrafast phenomena in atoms and molecules. (4) Attosecond pulses generated with high-order harmonics and their reliable measurements. (5) Structures and dynamics of molecules studied by the laser induced Coulomb explosion. Some of our research activities in the academic year of 2005 are as follows:

(1) Enhancement of molecular orientation in the adiabatic regime and its extension to the nonadiabatic regime

In the last fiscal year, we developed a new apparatus, in which a higher electrostatic field can be applied, and confirmed that it worked as expected. In this fiscal year, with a sample of OCS molecules diluted (5%) with He gas to avoid cluster formation, a backing pressure of 10 atm., an electrostatic field of 4.4 kV/cm, and a laser peak intensity of 4.1×10^{12} W/cm^2, we succeeded in achieving higher degree of orientation than that achieved in the proof-of-principle experiments.

In precise spectroscopic measurements and experiments including the observation of photoelectrons, it is desirable to prepare a sample of oriented molecules in the field-free condition. Noting that molecules can be oriented with combined electrostatic and intense, nonresonant laser fields in the adiabatic regime, we propose that we use a shaped pulse which has a relatively long rising edge compared to the rotational period of the molecule and is suddenly switched off at the peak of the pulse. Thereby, in the laser-field-free condition after the shaped pulse, we can expect the same degree of orientation as that could be adiabatically achieved at the peak of the pulse. The feasibility of this approach was recently confirmed by our numerical studies.

(2) Controlling high-order harmonic generation from nonadiabatically aligned molecules

In the last fiscal year, we succeeded in the demonstration of quantum interference of electron de Broglie waves during high-order harmonic generation (HHG) from aligned CO_2 molecules. In this fiscal year, we have investigated ellipticity dependence of HHG from nonadiabatically aligned N_2, O_2, and CO_2 molecules. For experimental observations, we employ parallel and perpendicular configurations for which the molecular axis is parallel and perpendicular to the major axis of the elliptical polarization, respectively. We have found that the harmonic intensity decreases more rapidly in the parallel configuration than in the perpendicular configuration as the ellipticity is increased. These observations are consistent with intuitive expectations based on the shapes of the valence orbitals and successfully reproduced by our theoretical model. The quantum interference in the recombination process was also observed in the ellipticity dependence of HHG. Specifically, the ellipticity dependence of the 31st harmonic intensity from aligned N_2 molecules measured in the parallel configuration shows a clear dip at linear polarization (ellipticity $\varepsilon \sim 0$). The dip is due to the destructive interference and explained by our theoretical calculations. The ellipticity dependence provides us with rich information about underlying physics of HHG and can serve as a probe for ultrafast dynamic imaging of molecular structures.

(3) Utilizing ion images for the learning-loop optimal control of quantum processes in molecules and its application to the nonadiabatic molecular alignment

We developed a technique with which two-dimensional ion images can be used as feedback signals and applied it to the optimal control of nonadiabatic alignment of N_2 molecules. We maximized the degree of alignment around the half revival. As optimized pulses, we obtained a single ultrashort (almost transform-limited) pulse in some cases, and a doubly-peaked pulse in other cases. We investigated the effect of doubly-peaked pulses by integrating the time-dependent Schrödinger equation numerically and found that the doubly-peaked pulses are more effective for the molecular alignment just after the pump pulse, which is equivalent to that around the full revival, than for that around the half revival. Therefore, we measured the degree of alignment just after the pump pulse as a function of the interval between the two pulses produced by an interferometer equipped with an optical delay. We found that there is an optimum interval between the two pulses, which is consistent with our numerical simulations. In this study, experiments and theoretical calculations worked mutually complementarily and we obtained important information about the formation mechanism of rotational wave packets.

[1] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, Nature (London) **435**, 470–474 (2005).

[2] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, The Review of Laser Engineering **33**, 322–328 (2005).

[3] Haruka Tanji, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, Phys. Rev. A **72**, 063401 (2005).

28 Kuwajima Group

Research Subjects: Protein Folding, Molecular Chaperones, Protein Stability, Physicochemical Studies of Biological Macromolecules

Member: Kunihiro Kuwajima & Kosuke Maki

We are studying mechanisms of *in vitro* protein folding and mechanisms of molecular chaperone function. Our goals are to elucidate the physical principles by which a protein organizes its specific native structure from the amino acid sequence and to elucidate how these principles are utilized or qualified by the molecular chaperones in the biogical cell. To this end, we are using various physicochemical, protein engineering, and computational techniques, including rapid reaction techniques, mutational analysis, and molecular dynamics simulations.

The recombinant form of goat α-lactalbumin has a significantly faster unfolding rate compared to the authentic form, although the two molecules differ only in an extra methionine at the N-terminus of the recombinant. The mechanism of the destabilization caused by this residue was investigated through the combined use of kinetic experiments and molecular dynamics simulations. Unfolding simulations for the authentic and recombinant forms at 398 K (10 trajectories of 5 ns for each form, 100 ns total) precisely reproduced the experimentally observed differences in unfolding behavior. In addition, experiments reproduced the destabilization of a mutant protein, T38A, faithfully as predicted by the simulations. This bidirectional verification between experiments and simulations enabled the atomically detailed description of the role of the extra methionine residue in the unfolding process.

We collected quantitative kinetic data on early and late stages of folding in non-two-state proteins from the literature, and studied the relationship between the kinetics of the two stages. There was a surprisingly high correlation between the rate constants of these stages. The correlation coefficient of the logarithmic rate constants was as high as 0.97, which could not be caused by chance. We also studied relationships of the logarithmic rate constants of the two stages with native three-dimensional structures represented by the residue-residue contact map. There were again surprisingly high correlations between the logarithmic rate constants and the number of non-local contact clusters obtained from the contact maps. Because the number of non-local contact clusters represents overall arrangement of substructures in a native protein, the results strongly suggested the importance of the arrangement of the substructures for the kinetics of both early and late stages of protein folding.

[1] T. Oroguchi, M. Ikeguchi, K. Saeki, K. Kamagata, Y. Sawano, M. Tanokura, A. Kidera & K. Kuwajima: Atomically detailed description of the unfolding of α-lactalbumin by the combined use of experiments and simulations. *J. Mol. Biol.* (2005) **354** 164-172.

[2] K. Kamagata & K. Kuwajima: Surprisingly high correlation between early and late stages in non-two-state protein folding. *J. Mol. Biol.* (2006) **357** 1647-1654.

29 Nose Group

Research Subjects:Molecular Mechanism of Neural Network Formation

Member:Akinao Nose, Takako Morimoto-Tanifuji 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

1.1. Genome-wide search for target recognition molecules by microarray

To systematically identify novel genes involved in neuromuscular target recognition, we performed microarray analysis. We compared the expression of genes in two neighboring muscles, 12 and 13, which are innervated by distinct motor neurons, and identified 200 genes that are differentially expressed. We conducted functional analyses of genes encoding transmembrane or secreted proteins and showed that Wnt4, a secreted protein of WNT family plays a major role in target specificity.

1.2. Live imaging of neuromuscular target recognition

We investigated the dynamics of the membrane protein Capricious (Caps), which we previously identified as a target recognition molecule in this system. We found that CAPS-GFP concentrates at the tips of myopodia, protrusions extended by muscles, just before and during the period when motoneurons initiate contact with muscles. Presentation of a target recognition molecule at the tips of cellular protrusions such as myopodia may be an efficient way to ensure correct interaction between pre- and postsynaptic cells and suggest for an active role played by the postsynaptic muscles in target recognition.

2. Molecular Mechanisms of Synaptogenesis

2.1. Role of postsynaptic CaMKII on synaptogenesis

During synaptogenesis, synaptic proteins are rapidly assembled into both pre- and postsynaptic sites that are capable of high fidelity transmission. Interaction between the presynaptic neuron and its postsynaptic target cell(s) is essential for the development of synapses. To elucidate the role of postsynaptic cells in synaptogenesis, activity of calcium/calmodulin-dependent protein kinase II (CaMKII) was manipulated specifically in the postsynaptic cell using GAL4-UAS expression system and its effect on the synapse formation at developing Drosophila neuromuscular junction was examined. Together with the investigation into localization of synaptic proteins, we found that increased postsynaptic CaMKII activity enhances not only postsynaptic but also presynaptic maturation in function and morphology. We propose two significant functions of postsynaptic CaMKII during synaptogenesis - retrograde modulation of presynaptic properties and coordinated regulation of pre- and postsynaptic maturation.@ Currently, we are further examining the molecular mechanisms of retrograde signaling. We also found the development-stage dependent effect of postsynaptic CaMKII modification on the synapse maturation.

III

2005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 ： 駒宮幸男

1. 講義の概要

1.1 物理学の体系における電磁気学の位置

2. 特殊相対性理論

2.1 相対性原理

2.2 ローレンツ変換

2.3 ミンコウスキー時空

2.4 速度の変換則

2.5 時間のパラドクス

2.6 スカラー、ベクトル、テンソル

2.7 質点の相対論的運動方程式

2.8 重心系（CMS) 座標

2.9 相対論的運動

3. 電場

3.1 動いている電荷

3.2 異なる座標系での電場

3.3 動いている電荷に働く力

3.4 動いている電荷どうしに働く力

4. 磁場

4.1 磁場の性質

4.2 ベクトルポテンシャル

4.3 電磁場の変換則

4.4 ローレンツ力とローレンツ変換

5. 電磁誘導とマックスウエルの方程式

5.1 電磁誘導

5.2 静電磁気学の適応限界

5.3 電磁場に蓄えられたエネルギー

5.4 変位電流

5.5 マックスウエルの方程式

6. 準静的過程

6.1 静電場・静磁場の適用限界

6.2 交流回路

7. 電磁場内の電荷の運動

7.1 電磁場中での荷電粒子の運動方程式

7.2 静電場中での運動

7.3 静磁場中での運動

7.4 一様な電磁場中での運動

1.1.2　解析力学・量子力学Ｉ ： 藤森　淳

1. 講義の目的

2. ラグランジュ方程式

ダランベールの原理，変分原理

3. 一般化座標

一般化運動量，一般化された力，循環座標

4. ハミルトンの正準方程式

5. 正準変換

母関数，ポアソンの括弧式，リウビルの定理

ハミルトン･ヤコビの偏微分方程式，断熱不変量

6. 前期量子論

古典力学の限界，ボーアの対応原理

7. シュレディンガー方程式

物質波，１次元ポテンシャル問題，

波動関数の物理的意味，位置と運動量の観測

8. 演算子とヒルベルト空間　　シュレディンガー表示とハイゼンベルグ表示
　状態と演算子の表示，保存量，時間発展
9. ハイゼンベルグ方程式　　ハイゼンベルグの運動方程式，調和振動子

1.1.3 物理数学Ⅰ： 常行 真司

1. 複素関数の性質
1.1 物理学における複素数の使い方
1.2 複素平面
1.3 複素関数
1.4 リーマン面
1.5 初等関数と収束半径
1.6 対数関数と一般のべき乗関数
1.7 無限乗積
2. 複素関数の微分と正則性
2.1 微分可能性
2.2 コーシー-リーマンの関係式
2.3 調和関数
3. 複素積分
3.1 定義といくつかの性質
3.2 コーシーの積分定理
4. コーシーの積分公式とその応用
4.1 コーシーの積分公式
4.2 テーラー展開
4.3 ローラン展開
4.4 特異点と留数
4.5 解析接続
4.6 部分分数展開と無限乗積
4.7 δ関数と主値積分
5. 等角写像
5.1 写像としての正則関数
5.2 等角写像の例
6. ガンマ関数
6.1 ガンマ関数
6.2 ガンマ関数の無限乗積表示
6.3 ハンケル表示
6.4 スターリングの公式と漸近展開
6.5 鞍点法
7. フーリエ級数とフーリエ変換
7.1 固有関数展開
7.2 フーリエ級数
7.3 フーリエ変換
7.4 δ関数
7.5 ラプラス変換

1.1.4 物理実験学 ： 福山　寛、島野　亮

1. 序論（物理実験の魅力）
1.1 ノーベル賞に輝いた歴史的実験
2. 単位系と基本物理定数
2.1 SI 単位系
2.2 電磁気学の単位系
2.3 基礎物理定数
3. 光の計測
3.1 光速度の測定
3.2 波長の計測
3.3 周波数の計測
4. 標準
4.1 時間、周波数標準
　レーザー、光周波数コム
4.2 抵抗標準
　抵抗測定の基礎、ホール効果、量子ホール効果
4.3 電圧標準
　ジョセフソン効果

5. 実験環境の実現とその計測

5.1 真空
気体分子運動論、種々の真空ポンプ、真空度の測定法

5.2 極低温
熱力学温度、極低温の生成法、各種の温度計

5.3 強磁場
強磁場の発生法、強磁場の応用

6. 誤差論

6.1 実験誤差

6.2 種々の確率統計
確率分布関数、平均と分散、正規分布、二項分布、ポアソン分布

6.3 実験データからの推測
大数の法則、中央極限の定理、最小二乗法

1.2 3年生 夏学期

1.2.1 光学 : 山本 智

1. イントロダクション

1.1 光の研究の歴史

1.2 幾何光学、波動光学、電磁光学

2. 光の伝播

2.1 平面波とは

2.2 金属面での反射

2.3 誘電体面での反射と透過

2.4 全反射とエバネッセント波

2.5 限られた空間での電磁波 (導波管と薄膜導波路)

2.6 幾何光学と波動光学の近似

2.7 光ビーム

3. 偏光

3.1 単色光の偏光状態 (直線偏光、円偏光、楕円偏光)

3.2 準単色光の偏光状態

3.3 可干渉行列

3.4 偏光度

3.5 偏光の発生と検出

4. 干渉

4.1 Young の干渉実験の意味するところ

4.2 鮮鋭度 (Visibility)

4.3 準単色光の干渉

4.4 van Cittert − Zernike の定理

4.5 開口合成

5. 干渉

5.1 Huygens の原理

5.2 Fresnel-Kirchhoff の回折理論

5.3 Fraunhofer 回折と Fresnel 回折

1.2.2 量子力学 II : 村尾 美緒

1. Quantum mechanics in the bra-ket notation

1.1 Quantum mechanics of a single system

1.1.1 The bra and ket notation

1.1.2 The matrix form representations

1.1.3 Spin 1/2 – The Bloch vectors

1.2 Operators in quantum mechanics

1.2.1 Unitary, Hermitian and density operators

1.2.2 Eigenvalues and eigenvectors of operators

1.2.3 The measurement postulate

1.2.4 Pauli matrices

1.2.5 General measurements

1.3 Quantum mechanics of a mixed states

1.3.1 Two interpretations of density matrices

1.3.2 Coherent superposition and a mixed state

1.3.3 Density matrices of spin 1/2 systems

1.3.4 Postulates of quantum mechanics

1.4 Composite quantum systems

1.4.1 Tensor product space and state vectors

1.4.2 The tensor product of operators

1.4.3 Separable and entangled states

1.4.4 Properties of entanglement

1.4.5 A part of composite systems

1.4.6 Quantum teleportation

2. Angular momentum

2.1 Angular momentum operators

2.1.1 Rotation symmetry

2.1.2 Infinitesimal symmetry operations

2.1.3 Rotations in three dimensional real space

2.1.4 The fundamental commutation relations

2.1.5 Eigenvalues and eigenstates

2.1.6 Addition of angular momenta

2.2 Orbital angular momentum

2.2.1 Orbital angular momentum operators

2.2.2 Properties of spherical harmonics

2.2.3 A particle in a central potential

2.2.4 The hydrogen atom

3. Perturbation Theory

3.1 Time independent perturbation theory

3.1.1 Non-degenerate cases

3.1.2 Example: Van der Waals ' force

3.1.3 Degenerate cases

3.2 Time dependent perturbation theory

3.2.1 Interaction Picture

3.2.2 Dyson series

3.2.3 Transition probability

1.2.3 物理数学 II : 江口 徹

1. 球関数

   1.0 デルタ関数（復習）
   1.1 ルジャンドルの多項式
   1.2 ルジャンドルの陪多項式、 球関数
   1.3 エルミート多項式
   1.4 ラゲールの多項式
   1.5 直交多項式

2. ベッセル関数

   2.1 ベッセル関数
   2.2 球ベッセル関数

3. 超幾何関数

   3.1 確定特異点を持つ 2 階の常微分方程式
   3.2 フロベニウスの方法
   3.3 ガウスの超幾何関数

4. 波動 · 熱方程式

   4.1 1,2,3 次元の波動方程式の基本解
   4.2 熱方程式の基本解

5. 回転群の理論

   5.1 $SO(3)$ と $SU(2)$
   5.2 Lie 群と Lie 環
   5.3 スピノルの理論

1.2.4 現代実験物理学 I ： 岡本 徹、桑島 邦博

1. 物性物理実験学（岡本）

1.1 歴史的な物性実験

1.2 実験の基本的事項

1.3 物質作製と製法

1.4 実験環境の実現

1.5 多様な測定手法

2. 生物物理実験学（桑島）

2.1 生物物理学概論

2.2 蛋白質・核酸の構造解析法

2.3 生体分子反応の解析法

2.4 遺伝子解析法

1.2.5 電磁気学 II ： 佐野 雅己

1. 電磁場の基本法則

1.1 Maxwell 方程式

1.2 電磁ポテンシャルとゲージ不変性

1.3 エネルギーと運動量の保存

2. 静電場

2.1 静電場の方程式

2.2 境界値問題とグリーン関数の方法

2.3 極座標と円柱座標における境界値問題

3. 静磁場と定常電流

3.1 静磁場の方程式とアンペールの法則

3.2 電流とベクトルポテンシャル

3.3 境界値問題

3.4 磁性体

4. 準静的問題

4.1 準定常電流

4.2 回路理論との関係

5. 電磁波

5.1 真空中と物質中の電磁波

5.2 屈折と反射

5.3 群速度と分散

5.4 電磁場と変分原理

1.2.6 統計力学 I ： 和達

2 熱力学

1.1 序論

1.2 熱力学の基本概念

1.3 熱力学第一法則

1.4 熱力学第二法則

1.5 熱力学第三法則

1.6 熱力学関数

2. 統計力学の手法

2.1 序論

2.2 小正準集団

2.3 正準集団

2.4 大正準集団

3. 量子統計力学

3.1 量子論

3.2 量子統計力学

3.3 黒体輻射

3.4 固体の比熱

3.5 理想フェルミ気体

3.6 理想ボース気体

4. 統計力学の応用

4.1 強電解質の理論

4.2 高分子

4.3 磁性

4.4 相転移

1.3 3 年生 冬学期

1.3.1 物理数学 III: 松尾 泰

1. 有限群論

1.1 対称性と群：物理学に現れる対称性と群構造

1.2 群論の基礎：有限群の例、同型、剰余類、類演算子

1.3 表現論：Schur の定理、指標とその直交性

1.4 有限群の表現：置換群の表現、Young の対称子

1.5 表現論の量子力学への応用

2. 連続群

2.1 リー環と連続群：連続群の例、連結性、単連結性、リーの定理

2.2 リー環の表現論：ウェイト、ルート、ディンキン図

2.3 SU(n) の表現の具体的な構築：Weyl の定理

3. 微分形式

3.1 外積代数：外積、Hodge 双対

3.2 微分形式：外微分、閉形式と完全形式、引き戻し

3.3 微分形式の応用：ベクトル解析の公式の再導出、Maxwell 方程式

3.3 多様体：ホモロジーとコホモロジー、ド・ラームの定理

1.3.2 物質科学基礎 ： 溝川貴司

量子力学の基礎的な事項から出発して、原子・分子および固体に関する以下のような項目を概説する。

1. 原子・分子

1.1 原子の電子状態（Hund 則、多重項）

1.2 分子の電子状態（Huckel 法、Heitler-London 法）

1.3 分子の変形と電子状態（Jahn-Teller 効果）

2. 固体

2.1 周期ポテンシャル中の電子（バンド構造）

2.2 金属と絶縁体 (Huckel 法、tight-binding 法）

2.3 フォノン（格子振動の量子化）

2.4 格子歪みとバンド構造

3. 固体表面など

3.1 固体表面、表面準位

3.2 固体中の不純物、不純物準位

3.3 量子細線、量子ドットの電子状態

1.3.3 電気力学 ： 蓑輪 眞

1. 電磁波
   (a) Maxwell の方程式
   (b) 電磁波の伝播
   (c) 電磁波の性質
   (d) 電磁波のエネルギーと運動量
2. 電磁波の放射
   (a) 電磁ポテンシャル
   (b) 遅延ポテンシャル
   (c) 多重極放射
3. 荷電粒子の出す電磁波
   (a) 運動する荷電粒子のつくる電磁場
   (b) 運動する荷電粒子の出す電磁波
   (c) Cerenkov 放射
4. 電磁波と特殊相対論

1.3.4 流体力学 ： 江尻 晶

1. 流体の基礎方程式

1.1 流体を特徴づける量

1.2 連続の式
1.3 力と運動方程式
1.4 粒子の方程式から流体の方程式へ
1.5 渦度と渦度方程式
2. 関数による流れの表現
2.1 ポテンシャル流
2.2 複素速度ポテンシャル
2.3 揚力
3. 粘性流
3.1 Reynolds 数
3.2 ストークス近似
3.3 一様等方乱流と Kolmogorov 則
3.4 フラクタルによる乱流の表現
4. 水波
4.1 長い波
4.2 表面波
4. 不安定性
4.1 安定・不安定
4.2 ケルビン・ヘルムホルツ不安定性

1.3.5 現代実験物理学 II：坪野公夫、早野龍五

1. 線型応答系
1.1 フーリエ変換、ラプラス変換
1.2 出力の積分表示
1.3 インパルス応答、ステップ応答
1.4 伝達関数、インピーダンス
1.5 線型系と因果律
2. データ処理
2.1 エルゴードプロセス
2.2 パワースペクトル
2.3 自己相関関数
2.4 最適フィルター
2.5 積算平均効果
3. MATLAB 入門
3.1 コマンド入力の基本
3.2 行列の作り方
3.3 演算
3.4 グラフィックス
3.5 応用例：線型応答
3.6 応用例：データ処理
4. デジタル信号処理
4.1 有限時間データであるための効果
4.2 離散時間データである効果
4.3 FFT
4.4 デジタル信号のパワースペクトル
4.5 線型デジタルシステム
4.6 z 変換
4.7 デジタルフィルター
5. 重要な実験
5.1 ノーベル賞に見る重要な実験の例
5.2 Serendipity
5.3 重要な課題
5.4 精密測定
5.5 新たな測定原理
6. 実験の企画から終了まで
6.1 文献検索
6.2 実験プロポーザル
6.3 実験方法の検討
6.4 実験精度の事前予測
6.5 断面積
6.6 不変質量
6.7 バックグラウンド
6.8 稀事象、稀崩壊
6.9 データ収集・解析
6.10 論文執筆
7. 放射線測定器
7.1 放射線と物質の相互作用概論

7.2 荷電粒子の物質通過

7.3 光子と物質の相互作用

7.4 電磁シャワー

7.5 チェレンコフ放射

7.6 霧箱・泡箱・写真乾板

7.7 MWPC、ドリフトチェンバー、TPC

7.8 シンチレーションカウンター

7.9 半導体検出器

8. 加速器

8.1 静電加速器

8.2 サイクロトロン

8.3 シンクロトロン

8.4 ビーム衝突型加速器

1.3.6 量子力学 III ： 大塚孝治

1. 電磁場中の粒子の運動

1.1 古典論

1.2 量子論への移行

1.3 一様な磁場中の荷電粒子

1.4 量子論におけるゲージ変換

2. 散乱問題

2.1 散乱断面積

2.2 ポテンシャルによる散乱

2.3 ボルン近似

2.4 散乱での流れと光学定理

2.5 ボルン近似の成り立つ場合

2.6 拡がりのあるポテンシャル源による散乱

2.7 部分波展開と位相のずれ

2.8 低いエネルギーでの散乱

2.9 共鳴散乱

2.10 クーロン散乱

3. 同種粒子系

3.1 同種粒子

3.2 多数の同種粒子から成る系

3.3 スレーター行列式とパウリの排他律

3.4 ボゾンから成る系

3.5 フェルミオンの第２量子化

3.6 第２量子化による物理量の表現

3.7 ２体演算子の第２量子化による表現

3.8 ハートリーフォック法

3.9 原子の中の電子系の構造

3.10 ボゾンの多体系

1.3.7 生物物理学：桑島邦博、能瀬聡直

1. 序

1.1 生物物理学とは何か、細胞の組成と構造、蛋白質や核酸などの生体分子

1.2 分子レベルの生命現象

2. 熱力学的取り扱い

2.1 熱力学の第一法則とエネルギー保存則、第二法則とエントロピー

2.2 自由エネルギー（自発性の指標)、化学ポテンシャルと化学平衡

3. 生体系の物理的相互作用

3.1 静電相互作用・van der Waals 相互作用・水素結合、水の性質と疎水性相互作用

3.2 電解質溶液中での静電相互作用

4. 蛋白質の構造

4.1 アミノ酸の特性と化学構造、蛋白質の立体構造

5. 蛋白質の物性

5.1 蛋白質の熱力学的安定性、可逆変性の熱力学的解析、二状態モデル

5.2 蛋白質の構造形成（フォールディング）

6. 脳神経系の生物物理

6.1 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

7. 脳高次機能：視覚系を例として

7.1 網膜・1次視覚野における情報抽出、大脳視覚野における高次処理

8. 記憶システム

8.1 記憶とは何か、記憶の起こる仕組み、記憶のモデル

9. 記憶の分子機構

9.1 シナプス可塑性、長期増強現象、分子イメージングによる可塑的変化の観察

10. 神経活動のイメージングと操作

10.1 種々のイメージングによる脳機能測定、光と遺伝子を用いた神経活動の操作

11. 神経ネットワーク形成機構

11.1 脳と遺伝子、神経配線の仕組み、神経活動依存的過程

1.3.8 統計力学ＩＩ： 宮下精二

1. 相互作用がある系での相転移

1.1 相互作用のある系での統計力学の方法

1.2 相転移（気相・液相相転移, 強磁性相転移）

1.3 分子場近似

1.4 転送行列

1.5 スケーリング則と繰り込み群の考え方

2. 非平衡統計力学

2.1 オンサーガーの相反定理

2.2 線形応答理論

2.3 ブラウン運動

2.4 ランジェバン方程式とフォッカープランク方程式

2.5 マスター方程式

1.4 4年生 夏学期

1.4.1 プラズマ物理学： 高瀬 雄一

0. プラズマとは?

1. 単一荷電粒子の運動

1.1 一様電磁場中の粒子ドリフト

1.2 非一様磁場中の粒子ドリフト

1.3 時間変化する電磁場中の粒子ドリフト

1.4 マッピング

2. 流体としてのプラズマ

2.1 プラズマの流体方程式

2.2 流体方程式と粒子ドリフトの関係

2.3 一流体電磁流体力学

2.4 電磁流体力学的平衡

3. プラズマ中の衝突過程

3.1 完全電離と非完全電離プラズマ

3.2 完全電離プラズマ中の衝突

3.3 プラズマの拡散

4. 流体プラズマ中の波動と不安定性

4.1 非等方分散媒体中の小振幅波動

4.2 磁場のないプラズマ中の波動

4.3 磁場のあるプラズマ中の波動

4.4 流体プラズマの不安定性

5. プラズマの運動論

5.1 ヴラソフ方程式

5.2 プラズマ波動の運動論的効果

5.3 速度空間不安定性と非線形理論

1.4.2 原子核物理学 : 初田 哲男・酒井 英行

1. 物質の階層構造と宇宙の進化

1.1 物質の基本構成要素（クォーク、レプトンと４つの基本相互作用）

1.2 宇宙進化の概略

2. ハドロンの構造と核力

2.1 ハドロンのクォーク・グルオン複合模型

2.2 中間子交換による核力

2.3 湯川ポテンシャルの導出

3. 原子核の安定性

3.1 原子核の半径と密度の飽和性

3.2 原子核の質量公式と結合エネルギーの飽和性

4. 原子核の崩壊

4.1 原子核のベータ崩壊とハイゼンベルグの谷

4.2 原子核のアルファ崩壊とガモフの理論

4.3 原子核崩壊を利用した地球の年齢測定

5. 原子核の構造

5.1 原子核の魔法数と殻模型

5.2 エキゾチック原子核と魔法数の喪失

5.3 原子核の集団運動

5.4 巨大共鳴、スピン・アイソスピン応答

6. 核分裂と核融合

6.1 自然核分裂と誘導核分裂

6.2 核融合反応と超重元素生成

6.3 核子捕獲反応

7. 宇宙における元素合成

7.1 ビッグバンでの元素合成

7.2 恒星内での軽元素合成

7.3 重元素の起源と超新星爆発

8. 最近のトピックス

1.4.3 統計力学特論： 小形正男

1. 相転移と臨界現象

1.1 相とは

1.2 Landau の２次相転移理論

1.3 スケーリング仮説

1.4 相関関数

1.5 Ginzburg-Landau の理論

1.6 Ginzburg criterion

1.7 Mermin-Wagner の定理

1.8 スケーリング仮説2

1.9 くりこみ群のアイデア

1.10 GL 理論のくりこみ群

2. 経路積分による統計力学

2.1 量子力学と統計力学

2.2 自由粒子の場合

2.3 古典統計力学との関係

2.4 変分法

2.5 instanton

3. 非平衡の統計力学

3.1 Brawn 運動

3.2 拡散方程式

3.3 Langevin 方程式

3.4 Gauss 過程

3.5 周波数のランダムな変調

3.6 Master 方程式、Focker-Planck 方程式

3.7 Mori Formula

4. エルゴード問題

4.1 エルゴード仮説

4.2 Birkhoff の定理

4.3 パイこね変換

1.4.4 生物物理学特論：能瀬聡直

1. 脳・神経系概論-視覚系を例にとり

1.1 視覚・色覚のしくみ、網膜における情報処理、トポグラフィー

2. 脳高次機能

2.1 1次視覚野・高次視覚野における情報処理、脳内イメージング

3. 神経系における信号の分析法

3.1 電気生理学的手法、種々のイメージング法による神経活動の分析、光による神経刺激

4. 記憶の分子機構

4.1 記憶とは何か、記憶の種類、記憶の理論的モデル

5. シナプス伝達と可塑性

5.1 シナプス伝達の仕組みと計測、シナプス可塑性の分子機構、長期増強現象（ＬＴＰ）

6. 神経回路網形成機構

6.1 脳と遺伝子、神経配線機構、シナプス形成過程、神経活動依存的な回路形成

1.4.5 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

1.4.6 一般相対論： 須藤 靖

1. 物理学的方法について

2. 特殊相対論とミンコフスキー時空

2.1 ニュートン力学とガリレイの相対性原理

2.2 ガリレイ変換からローレンツ変換へ

2.3 エーテル仮説と光速度不変の原理

2.4 ミンコフスキー時空

2.5 ミンコフスキー時空におけるスカラー，ベクトル，テンソル

3. 数学的準備

3.1 特殊相対論の限界: 慣性系とは? 重力は “力” か?

3.2 一般共変性とテンソル

3.3 物理量はテンソルである:物理学の幾何学化

3.4 平行移動と共変微分

3.5 一般のテンソルの (共変) 微分

3.6 リーマン接続とクリストッフェル記号

3.7 平行移動とリーマンの曲率テンソル

4. 測地線方程式

4.1 重力場のもとでの粒子の運動方程式

4.2 Newton 理論との対応

4.3 接続係数とゲージ相互作用: $\Gamma^{\mu}_{\alpha\beta}$ と A^{μ}

5. 重力場の方程式

5.1 マッハの原理

5.2 エネルギー運動量テンソル

5.3 アインシュタイン方程式への道

5.4 ニュートン理論との対応

5.5 宇宙定数

5.6 変分原理による定式化

6. シュワルツシルド時空

6.1 球対称重力場の計量

6.2 シュワルツシルド解導出の概略

6.3 シュワルツシルドブラックホール

6.4 一般相対論の検証

7. 相対論的宇宙モデル

7.1 宇宙原理と宇宙の一様等方性

7.2 ロバートソン-ウォーカー計量の幾何学的性質

7.3 アインシュタイン方程式からフリードマン方程式へ

7.4 宇宙の状態方程式と宇宙定数

7.5 アインシュタイン-ドジッター宇宙モデル

7.6 フリードマン宇宙モデル

7.7 宇宙論パラメータ

8. 重力波

8.1 アインシュタイン方程式の弱場近似

8.2 重力波の平面波解

8.3 測地線偏差の方程式と重力波検出原理

8.4 大局的保存則と重力場のエネルギー運動量擬テンソル

8.5 重力波輻射の四重極公式

1.4.7 固体物理学 I : 青木 秀夫

1. 固体の凝縮メカニズム

1.1 序：何故固体物理か

1.2 結合形態と凝集力

2. 結晶構造

3. 電子のバンド構造とフェルミ面

3.1 Bloch の定理

3.2 バンド・ギャップとフェルミ面

3.3 殆ど自由な電子 vs 強結合模型

4. 半導体

4.1 バンド構造と電子物性

4.2 電子と正孔

5. 金属と絶縁体

5.1 Wilson の理論

5.2 Mott の金属・絶縁体転移

1.5 4 年生 冬学期

1.5.1 宇宙物理学： 牧島一夫

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 星の内部の熱核融合

3.4 宇宙と重元素：元素合成の３つの現場

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 宇宙の最初の３分間

5.4 創成直後の宇宙と素粒子

5.5 軽元素の合成

5.6 宇宙の「晴れ上がり」

5.7 宇宙マイクロ波背景放射と標準宇宙像

1.5.2 素粒子物理学 ： 相原 博昭

1. フェルミオンフレーバーとゲージボゾン

1.1 レプトンとクォーク

1.2 電荷と電磁相互作用

1.3 ウィークアイソスピンと弱い相互作用

1.4 カラーと強い相互作用

1.5 世代

2. ゲージ理論と電弱統一理論

2.1 ラグランジアン

2.2 U(1) ゲージ理論

2.3 フォトンの質量

2.4 SU(2) ゲージ理論

2.5 ワインバーグ・サラムのラグランジアン

2.6 ゲージボゾン同士の相互作用

2.7 強い相互作用のゲージ理論

3. 質量の起源とヒッグス粒子

3.1 自発的対称性の破れ

3.2 ローカルゲージ対称性の自発的な破れ

3.3 ヒッグスメカニズム

3.4 フェルミオンの質量とヒッグス粒子

3.5 標準理論の１８個のパラメータ

4. フェルミオンの質量と小林益川理論

4.1 2 世代のフェルミオンとカッビボ角

4.2 3 世代（６つのクォーク）

4.3 小林益川行列の意味とその値

4.4 弱い相互作用がＣＰ対称性を破る訳

5. ニュートリノ

5.1 ニュートリノの質量

5.2 ニュートリノのフレーバー振動

1.5.3 固体物理 II ： 長谷川修司

1. 格子振動と熱的性質

1.1 格子振動；単一原子 1 次元格子の波動、二種原子の 1 次元格子、

1.2 格子振動の量子化

1.3 フォノン分光

1.4 比熱；実験事実、Dulong-Petit の法則、格子比熱、電子比熱、

2. 電子輸送現象

2.1 Ohm 則と電気伝導度

2.2 結晶内での電子の運動 (I)-電子波の波束-

2.3 結晶内での電子の運動 (II)-バンド内での電子の運動-

2.4 電子と正孔

2.5 Boltzmann 方程式

2.6 電気伝導度 - Boltzmann 描像 -

2.7 不純物散乱とフォノン散乱

2.8 熱電効果

3. 半導体

3.1 半導体とは

3.2 真性半導体中のキャリア濃度

3.3 半導体のドーピング

3.4 ドープされた半導体中のキャリア濃度

3.5 半導体中の伝導度

3.6 pn 接合とトランジスタ；熱平衡における pn 接合、バイアスされた pn 接合、

3.7 ヘテロ接合と２次元電子ガス、量子井戸

4. 超伝導

4.1 超伝導の歴史

4.2 完全導体と完全反磁性（マイスナー効果）

4.3 London 方程式

4.4 その他の実験事実;エネルギー・ギャップ、比熱、同位体効果、

4.5 超伝導の機構 - Fröhlich の理論 -

4.6 Cooper 対の形成

4.7 ＢＣＳ理論

4.8 超伝導電流と臨界電流

4.9 ＢＣＳ基底状態とマイスナー効果

4.10 磁束の量子化

5. 磁性

5.1 原子・イオンの常磁性・反磁性（気体の磁性）

5.2 自由電子ガスの磁性

5.3 自由電子間の交換相互作用

5.4 強磁性体のバンドモデル

5.5 バンド強磁性体の自発磁化の温度依存性

5.6 局在電子間の強磁性結合

1.5.4 物性物理学特論 ： 常行真司、小森文夫、長谷川修司

1. 概論ー「表面」であることの意味ー

2. 表面電子状態

3. 密度汎関数理論

4. 第一原理分子動力学法と表面構造研究への応用

5. 走査プローブ顕微鏡

5.1 走査トンネル顕微鏡の原理

5.2 表面原子構造観察

5.3 局所電子状態測定

5.4 表面バンドの観測

5.5 表面電子定在波

6. 表面超構造と原子配列の解析

6.1 表面超構造と相転移

6.2 回折法

6.3 顕微鏡法

6.4 動的過程

7. 表面電子状態の解析

7.1 表面電子状態

7.2 （逆）光電子分光法

7.3 トンネル分光法

7.4 光電子分光によるバンド分散・原子結合状態測定

7.5 時間分解測定

8. 表面電子輸送

8.1 表面空間電荷層の２次元電子系

8.2 表面電子バンドの２、１次元電子系

8.3 原子マニピュレーション

9. 表面超薄膜磁性

9.1 磁気モーメントと相転移

9.2 強磁性超薄膜

9.3 表面ナノ強磁性体

1.5.5 量子光学：酒井広文

1. 原子と放射の相互作用

1.1 時間に依存する Schrödinger 方程式

1.2 相互作用ハミルトニアン

1.3 遷移速度

1.4 B 係数の表式

1.5 光学 Bloch 方程式

1.6 Rabi 振動

1.7 放射広がり

1.8 飽和広がり

1.9 放射減衰を伴う Rabi 振動

1.10 衝突広がり

1.11 Doppler 広がり

1.12 合成吸収線の形状

2. 電磁場の量子化

2.1 古典電磁場のポテンシャル論
2.2 Coulomb ゲージ
2.3 自由古典場
2.4 量子力学的調和振動子
2.5 場の量子化
2.6 場の交換の性質
2.7 零点エネルギー
2.8 モード位相演算子
2.9 単一モード個数状態の物理的性質
2.10 コヒーレント光子状態
2.11 単一モードコヒーレント状態の物理的性質
2.12 放射密度演算子
2.13 純粋状態に対する密度演算子
2.14 放射場の統計的混合状態

3. 量子化した場と原子との相互作用
3.1 原子の多極モーメント
3.2 多極相互作用ハミルトニアン
3.3 電気双極子近似
3.4 原子ハミルトニアンの第２量子化
3.5 光子の吸収速度と放出速度
3.6 光電効果による電子の放出速度
3.7 光子強度演算子

4. レーザーの基礎
4.1 光共振器のモード
4.2 光共振器の安定性
4.3 発振条件
4.4 各種のレーザー
4.5 3 準位レーザーと 4 準位レーザー
4.6 固体レーザー
4.7 気体レーザー
4.8 色素レーザー
4.9 半導体レーザー

1.5.6 化学物理学 ： 内田 慎一

1. 化学物理学とは何か？
凝縮系の物理
対称性の破れ
創発

2. 水素分子、ベンゼン環、結晶
原子、分子間結合

3. 周期表の理解
金属と絶縁体
Si は何故半導体なのか？

4. 液相－固相転移
対称性の破れ
秩序パラメーター

5. 対称性の破れ
剛性
集団励起モード
トポロジカル欠陥

2　各賞受賞者紹介

2.1　小林孝嘉教授　：　平成17年度松尾学術賞

小林教授が、平成17年度の松尾学術賞を受賞された。小林教授は、長年にわたり世界超短パルスレーザーの開発を行ってきた。1997年に非同軸配置パラメトリック増幅により、初めて可視域サブ20 fsパルスを得た。さらに2000cm^{-1}に及ぶ広帯域光を発生し、10 fs以下の波長可変可視光パルスを、また6.1 fs可視光パルスを発生した。さらに、1999年に4.7 fs、2001年に4 fsと次々と世界最短パルス幅の可視〜近赤外光パルスの発生に成功し、記録を塗り替え続けた。さらに、１光子吸収と２光子吸収の遷移経路が量子力学的に干渉することを利用して搬送波包絡位相を測定することを提案し、実験的にも示した。これら一連の業績が高く評価され今回の受賞となった。

2.2　小林孝嘉教授　：　2005年国際振動分光学会賞

小林孝嘉教が、分子振動の実時間分光法及び遷移状態分光法を開発したことが評価され、2005年国際振動分光学会賞を受賞された。新しい形のパラメトリック増幅器を開発し、世界最短パルス幅の可視〜近赤外光パルスの発生に成功し、実用に際しても安定で信頼性の高い超短パルスレーザーと超広帯域超高感度検出系を開発し、その両者を結びつけて、超高時間分解・超広帯域分光装置の開発に成功した。その超短パルスレーザー光を視覚に関わる蛋白質に適用し、その機構を明らかにするとともに、初めて遷移状態の分子構造を測定することにも成功した。これら一連の業績が高く評価され今回の受賞となった。

2.3　牧島一夫教授　：　第10回日本天文学会林忠四郎賞

昨年の須藤助教授に続き、本年は牧島一夫教授が、林忠四郎賞を受賞された。牧島氏は1979年の「はくちょう」から、2005年７月に誕生した「すざく」まで、７機の科学衛星に関わり、Ｘ線の観測装置を開発して搭載するとともに、それらを用いて宇宙の観測を行なってきた。ブラックホール連星の観測では、氏はX線スペクトルからブラックホール質量を導く方法を開発し、未知だった中質量ブラックホールが存在する有力な証拠も得た。氏はまた、宇宙の既知バリオンの大部分を担う、銀河団の高温プラズマを精力的に観測し、そこに未知の加熱機構が働いていることを突き止めた。以上のことから、「ブラックホール天体および銀河団のＸ線観測研究」が受賞対象の業績として評価されたものである。

2.4　小形正男助教授　：　第１９回日本IBM賞

小形正男氏が２００５年度第１９回日本IBM賞の物理部門を受賞された。受賞のタイトルは「新奇超伝導体における強相関領域での超伝導機構の理論的研究」ということである。

小形氏は高温超伝導の初期のころから、斯波弘行氏、T. M. Rice氏、P. W. Anderson氏、福山秀敏氏、横山寿敏氏などとともに強相関電子系という立場から超伝導発現のメカニズムについて研究されてきた。金属ー絶縁体転移、磁性と超伝導の関連など、強相関電子系ならではの特異な物性は、非常に豊かな新しい物理を含んでおり、今後もますます研究が盛んであると思われる。とくに、最近でもMgB_2、$Na_xCoO_2{\cdot}yH_2O$、有

機超伝導体、ダイアモンド超伝導体を含め新奇な超伝導物質が次々と発見されており、強相関と超伝導の関係も理論的には大変興味あるものである。

強相関電子系の理論的取扱いには本質的な難しさがあるが、小形氏は 1 次元の厳密解、数値計算、2 次元での変分モンテカルロなどの数値計算によって、とくに基底状態の性質を明らかにしてきた。氏の研究によって、1 次元ハバードモデル、1 次元 t-J モデルについてはほぼ基底状態の全容がわかったといえる。

また 2 次元ハバードモデルや t-J モデルにおいて超伝導が実現するかどうかについては、未だ疑問に思っている研究者もいるかもしれないが、小形氏らの研究や他の数多くの研究によって、d 波超伝導が相図中の広範囲な部分で実現することがコンセンサスを得られている。さらに小形氏は Sr_2RuO_4、$Na_xCoO_2{\cdot}yH_2O$、有機超伝導体などの新奇超伝導物質に関しても、さまざまな理論を研究してきている。高温超伝導体は d 波のスピン 1 重項超伝導であったが、スピン 3 重項超伝導体も実験的に詳しく調べられるようになり、興味深い。とくに Sr_2RuO_4 での d ベクトルの向きの問題、新しい超伝導体である $Na_xCoO_2{\cdot}yH_2O$ がスピン 3 重項超伝導であるかどうかの問題、ダイアモンド超伝導体の問題など実験、理論的に興味ある話題が数多く存在する。

一般に超伝導発現のメカニズムを確定することは、まだまだ難しいと思われるが、強相関による新しいタイプの超伝導を追及していくことは非常に興味ある分野である。小形氏の研究は、この分野での非常に重要なものと認識されて受賞に至ったのであると考えられる。

2.5 守川春雲博士・松田巌助手・長谷川修司助教授 : 日本表面科学会論文賞

最近 2 年間に日本表面科学会誌に発表された論文のうち、特に注目すべき論文に贈られる日本表面科学会第 17 回論文賞 (2005 年度) は、守川春雲、松田巌、長谷川修司 :「シリコン表面上での電荷密度波の格子整合効果とソリトンダイナミクス」、表面科学 Vol. 25, pp. 407–415 (2004). に授与された。長谷川研究室で発見された擬 1 次元金属的な結晶表面での電荷密度波転移を低温型走査トンネル顕微鏡で丹念に観察し、その動的振る舞いを明らかにした研究成果であり、この表面系に関する一連の研究が高く評価された。この論文は、守川春雲博士の博士論文の一部である。

2.6 有田亮太郎助手 (青木研究室) : ベルリン日独センター科学賞

青木研の有田亮太郎助手（Alexander von Humboldt Fellow として Stuttgart の Max-Planck-Institut に 2004-2005 年度の一年半滞在）が、ベルリン日独センター科学賞を受賞されました。ベルリン日独センター (Japanisch-Deutsches Zentrum Berlin; http://www.jdzb.de/) は、日独の学問・文化交流のために 1985 年に日独政府間で設立されたもので、この科学賞は、若い (postdoc レベルの）科学者で、ドイツにいる日本人あるいは日本にいるドイツ人の中で顕著な業績の者に毎年贈られ、受賞者はベルリンで記念講演の機会が与えられます。有田助手も帰国直前の 2006 年 3 月にこれを行いました。有田氏は、Max-Planck-Institut 固体物理学研究所内の、Emmy Noether 研究グループのヘッドである Karlsten Held 博士と、超伝導や磁性の舞台となる強相関物質を第一原理的に扱う方法論を開発し、これを様々な物質に適用し始めた業績が評価されました。なお、有田さんは、現在は理化学研究所に転出されています。

2.7 金井恒人博士 (酒井広文研究室) : 東京大学総長賞

金井恒人氏が、平成 17 年度第 2 回学生表彰「東京大学総長賞」を受賞した。金井氏は、博士課程において「配列分子中における高次高調波発生の実験的・理論的研究」に関し、顕著な成果を挙げ、配列分子中からの高次高調波発生の物理過程の解明に大きく貢献した。実験的には、配列した二酸化炭素分子を試料とし、高調波とイオンを同一条件下で観測する独自の実験手法の導入により、高調波発生の再結合過程において電子

の波の量子干渉効果 (ここでは強く打ち消しあう効果) が起こっていることを示す異論の余地のない結果を得ることに初めて成功した。この現象は、世界の複数の研究機関がその観測に鎬を削っていた効果であった。さらに、高調波発生の楕円率依存性が分子軸と楕円偏光の長軸の配置によって異なることや楕円率依存性にも量子干渉効果が現れることを初めて観測した。理論的には、原子に対して提案されていたモデルと分子軌道法を組み合わせた新たなモデルを構築し、実験結果を説明することに見事に成功した。

3　人事異動

[物理教室に来られた方々]

清水　則孝	助手	2005 年 8 月 1 日	採用
岡　隆史	助手	2006 年 2 月 1 日	採用
小野澤　さわ子	物理図書室	2005 年 4 月 1 日	配置換 (史料編さん所)
藤代　知子	技術室	2005 年 4 月 1 日	採用
山本　智史	技術室	2005 年 4 月 1 日	採用
山崎　重男	物理事務室	2005 年 8 月 1 日	採用
南　文	物理図書室	2005 年 8 月 1 日	採用
森村　希	物理図書室	2005 年 8 月 1 日	採用
藤原　可南子	第三事務分室	2005 年 11 月 1 日	採用

[物理教室から移られた方々]

小林　孝嘉	教授	2006 年 3 月 31 日	定年退職
谷藤　高子	助手	2005 年 12 月 31 日	辞職 (東京薬科大学)
井沢　健一	助手	2006 年 2 月 28 日	辞職 (京都大学)
有田　亮太郎	助手	2006 年 3 月 31 日	辞職 ((独) 理化学研究所)
河野　行雄	助手	2006 年 3 月 31 日	辞職 ((独) 理化学研究所)
森　玲子	物理図書室	2005 年 8 月 31 日	辞職
安藤　千恵子	第一事務分室	2006 年 3 月 21 日	辞職
石山　伯子	第二事務分室	2006 年 3 月 31 日	辞職
中川　裕美子	第三事務分室	2006 年 3 月 31 日	辞職
山口　智之	物理事務分室	2006 年 4 月 1 日	再配置 (理学系研究科事務部)
荒木　克也	物理事務分室	2006 年 4 月 1 日	再配置 (理学系研究科事務部)
荻荘　美穂	物理事務分室	2006 年 4 月 1 日	再配置 (人事部)

4　役務分担

役務	担当教官	技官・事務官・事務補佐員
専攻長・学科長	江口	山口（智）、川崎、佐々木
幹事	大塚、内田	山口（智）、川崎、佐々木
専攻主任	山本	佐々木、河島、高山
理系委員（専攻副主任）	駒宮	
常置委員	酒井 (英)、須藤	
教務係	蓑輪（理学部教務委員)、宮下、酒井 (広)、常行（大学院）	佐々木、河島、高山
学生実験	福山、佐野、桑島	樫村
就職係	長谷川、(大学院他部局：榊原)	横山
奨学金	佐野	佐々木
会計係	小形、岡本	山口（智）、川崎
号館関係	１号館運営委員：佐藤、山本、旧１号館運営委員：坪野	山口（智）
部屋割	岡本	山口（智）
技術部門 (統括)	坪野	
試作室	坪野	大塚（茂）
薬品管理	内田	山本
研究材料・回路	酒井（広）	樫村
IT 関連	早野	藤代
衛星安全	早野	佐伯
低温	岡本	
電顕	長谷川	
図書係	初田（理図書委員)、長谷川、松尾、能瀬	小野澤、森、唐牛
複写係	酒井 (広)	川崎
談話会	柳田、初田、須藤、常行	田中
年次報告	島野	横山
記録係	島野、酒井（広）	（サーキュラー印刷・原稿：山口）
物品供用官	酒井 (英)	山口（智）
環境安全	駒宮	川崎
放射線管理	蓑輪	山口（智）
事務分室	第１：酒井 (英)、第２：須藤、第３：福山	山口（智）
理交会	未定	山口（智）
教職員親睦会	小形	
建物	牧島、福山	山口（智）
進学指導担当	宮下	佐々木
ホームページ	松尾	川崎

5　教室談話会

＜2005 年＞

4 月 8 日（金）　Paul Kienle 氏（ミュンヘン工科大学）
「Pions in Nuclei — Probes of Chiral Restoration」

5 月 13 日（金）　豊島近氏（東京大学分子細胞生物学研究所）
「原子構造が明らかにするカルシウムポンプのメカニズム」

5 月 27 日（金）　Witold Nazarewicz 氏 （テネシー大学及びオークリッジ国立研究所）
「 PHYSICS OF EXOTIC NUCLEI 」

＜2006 年＞

3 月 3 日（金）　小林　孝嘉氏 （最終講義）
「超短パルスレーザーを用いた研究：これまでとこれから」

6　物理学教室コロキウム

＜2005 年度 前期＞

6 月 24 日（金）　Rocky Kolb 氏 （フェルミ研究所およびシカゴ大学）
「Dark Matter, Dark Energy, and Inflation」

7 月 15 日（金）　十倉好紀氏（東京大学）
「強相関電子のつくる交差相関」

＜2005 年度 後期＞

10 月 7 日（金）　上田正仁 氏 （東京工業大学）
「ボース・アインシュタイン凝縮の世界」

11 月 18 日（金）　野本憲一氏（東京大学）
「超新星爆発と宇宙の進化」

12 月 9 日（金）　酒井邦嘉氏（東京大学）
「脳の高次機能を物理で見る」