

Department of Physics
School of Science
University of Tokyo

Annual Report
2004

平成16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 16 年度 (2004 年 4 月～2005 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致します。この小冊子が物理学教室で行われている活発な研究・教育の現状を知って頂く手がかりとなれば幸いです。

初めに教官の異動についてですが、平成 16 年度には、宮下精二教授が工学部物理工学科から物理教室に着任されました。宮下先生のご専門は、統計物理学で、非平衡統計力学や量子ダイナミックスの問題に取り組んでおられます。当教室でますます研究を発展させられるとともに、学生の教育にも大いに寄与していただけのものと期待しております。

今年度は、残念ながら樽茶先生と櫻井先生が教室を去られ、工学部物理工学科と理化学研究所に移られました。先生方の研究のますますの発展をお祈りいたします。

次に、本年度も受賞のニュースがあります。和達先生と樽茶先生がそれぞれ統計物理学とナノテクノロジーへの重要な貢献で紫綬褒章を受章されました。また、小林先生が超短時間可視光パルスレーザーの開発により時間分解振動分光光学賞を、須藤先生が観測的宇宙論に於ける成果で林忠四郎賞を、長谷川先生が 4 探針型走査トンネル顕微鏡の開発と表面物理への貢献で日本顕微鏡学会賞（瀬藤賞）を受賞されています。さらに、物理専攻博士課程の大栗真宗さん（現、プリンストン大学研究員）が学業成績優秀者に贈られる総長賞を受賞しています。物理教室は昨年度に続く総長賞の受賞になります。

平成 16 年度は物理学教室にとって慌ただしい一年でもありました。4 月から始まった国立大学法人化、10 年ぶりの教室の外部レビュー、そして年度末の二期棟への引越しなどで忙しい時間を過ごしました。

法人化に伴ない平成 16 年度からは「国立大学法人東京大学」として新たな東京大学の歴史が始まっています。大学の組織・運営に大幅な変更が導入されつつありますがこうした改革がどこに向かうのかまだまだ見通しがつきません。私達は優れた研究者を輩出してきた物理学教室の伝統を受け継ぎつつ、21 世紀における更なる躍進を目指して不断の努力を傾けなければならないと考えております。

ご存知のように、現在物理学教室は宇宙線研究所、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的形成することを目指すもので、院生の財政的な支援、海外の研究者による集中講義、学生の海外派遣、院生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 3 年目に入りますがその活動は大変順調で、内容をホームページでご覧になることが出来ます。

今後の物理教室の更なる発展のため、諸先輩方、関係各位の皆様のご支援ならびにご助言を改めてお願い申し上げます。

この年次報告は島野助教授のご尽力によって編集作成されました。この場を借りて同助教授に感謝いたします。

2005 年 5 月 31 日

物理学専攻長・教室主任
江口 徹

目次

I	研究室別 2004 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）	12
1.2.1	弦理論	12
1.2.2	高エネルギー現象論	14
2	原子核・素粒子実験	17
2.1	原子核実験研究室（酒井、早野、櫻井研究室）	17
2.1.1	300 MeV における (p, n) 反応のガモフ・テラー単位断面積の精密測定（酒井研究室）	17
2.1.2	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）	18
2.1.3	オルソポジトロニウムの 3 光子崩壊を用いた GHZ モデルの検証（酒井研究室）	19
2.1.4	陽子-重陽子散乱における超狭幅ダイバリオンの探索（酒井研究室）	19
2.1.5	反陽子ヘリウム原子・イオンのレーザー分光（早野研究室）	20
2.1.6	冷たい反水素研究（早野研究室）	20
2.1.7	FLAIR：低エネルギー反陽子、イオン研究施設へ向けての開発（早野研究室）	21
2.1.8	η 中間子の原子核による深い束縛状態探索実験（早野研究室）	22
2.1.9	反 K 中間子の原子核に於ける深い束縛状態の探索（早野研究室）	22
2.1.10	中性子過剰核の安定性（櫻井研究室）	22
2.1.11	ガンマ線分光による核構造研究（櫻井研究室）	23
2.1.12	ベータ分光を用いた核構造研究（櫻井研究室）	25
2.1.13	RIBF 開発研究（櫻井研究室）	26
2.1.14	位置感応型 Ge 検出器の開発（櫻井研究室）	27
2.1.15	TOF スペクトロメータ開発（櫻井研究室）	27
2.1.16	中性子過剰核の分解反応（櫻井研究室）	27
2.1.17	天体核物理（櫻井研究室）	27
2.2	駒宮研究室	33
2.2.1	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	33
2.2.2	電子・陽電子リニアコライダー ILC 計画	33
2.2.3	BES 実験	35
2.2.4	超冷中性子を用いた量子力学実験	36
2.2.5	大気ニュートリノスペクトルの精密計算	37
2.3	養輪研究室	40
2.3.1	暗黒物質実験	40
2.3.2	アクシオンヘリオスコープ実験	40
2.3.3	共鳴イオン化質量分析によるニュートリノ検出	41
2.4	相原研究室	43
2.4.1	B 中間子系の CP 非保存現象の精密測定	43
2.4.2	中性 B 中間子の $\pi^+\pi^-$ 崩壊における CP 非対称度測定の進展	43
2.4.3	B 中間子の電弱崩壊の精密測定	44
2.4.4	グリッドデータファームの Belle 実験への応用	44
2.4.5	J-PARC 長基線ニュートリノ振動実験 T2K での陽子ビームプロファイルモニターの開発	44
2.4.6	ニュートリノビームラインのシミュレーション	45
2.4.7	次世代水チェレンコフ検出器のためのハイブリッド光検出器開発	45

2.4.8	国際リニアコライダー加速器用汎用測定器 SiD の開発	45
3	物性理論	50
3.1	和達研究室	50
3.1.1	ボース・アインシュタイン凝縮	50
3.1.2	ソリトン方程式	50
3.1.3	高分子物理学	51
3.1.4	非平衡統計物理	51
3.1.5	ランダム行列理論とその応用	51
3.1.6	多粒子系	52
3.1.7	量子情報と量子計算	53
3.1.8	結び目理論・低次元トポロジー	53
3.2	青木研究室	56
3.2.1	超伝導	56
3.2.2	非磁性元素系における電子相関からの遍歴強磁性	57
3.2.3	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
3.2.4	分数量子ホール効果	58
3.2.5	ヘテロ界面の電子物性	59
3.2.6	周期的極小曲面上の電子	59
3.2.7	その他	59
3.3	宮下研究室	62
3.3.1	微小分子磁性体のダイナミックス	62
3.3.2	新規な量子状態	62
3.3.3	電子スピン共鳴	63
3.3.4	揺動する媒体のもとでの相転移	63
3.3.5	揺動する媒体のもとでの相転移	64
3.3.6	競合する相互作用のもとでの相転移	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	68
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	69
3.4.6	金属絶縁体転移の理論	70
3.5	常行研究室	74
3.5.1	固体表面構造と化学反応	74
3.5.2	超原子価カルコゲナイド As_2Te_3 の巨大有効電荷	75
3.5.3	シミュレーション手法の開発	75
4	物性実験	79
4.1	藤森研究室	79
4.1.1	高温超伝導	79
4.1.2	強相関遷移金属酸化物	79
4.1.3	磁性半導体	80
4.1.4	界面, ナノ構造	80
4.2	内田研究室	88
4.2.1	梯子型 Cu 酸化物の電荷秩序と超伝導	88
4.2.2	c 軸光学スペクトルで探る超伝導ギャップと擬ギャップ	88
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	89
4.3	長谷川研究室	93
4.3.1	表面電子輸送	93
4.3.2	表面構造と相転移	95
4.3.3	新しい装置の立ち上げ	96
4.4	福山研究室	101
4.4.1	超低温における量子流体/固体	101

4.4.2	走査トンネル顕微/分光法による低温量子物性	102
4.4.3	低次元導体における量子輸送現象	103
4.4.4	低温実験技術	104
4.5	岡本 研究室	107
4.5.1	強相関 2 次元電子系	107
4.5.2	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	108
4.5.3	量子ホール系におけるエネルギー流	109
4.5.4	劈開表面に形成された 2 次元電子系	109
4.6	島野研究室	112
4.6.1	テラヘルツ分光法の開拓	112
4.6.2	低次元電子系のテラヘルツ分光	112
5	一般物理理論	114
5.1	宇宙理論研究室 (佐藤・須藤)	114
5.1.1	初期宇宙・相対論	115
5.1.2	観測的宇宙論	116
5.1.3	天体核・素粒子物理	119
5.1.4	その他	121
5.2	村尾研究室	131
5.2.1	無限準位系のエンタングルメント	131
5.2.2	LOCC の下での量子系の解析	132
5.2.3	量子情報処理への応用研究	133
6	一般物理実験	135
6.1	小林研究室	135
6.1.1	超短パルスレーザーの開発	135
6.1.2	超広帯域光の発生	135
6.1.3	超高速分光	135
6.1.4	電場変調分光	136
6.1.5	量子情報	137
6.2	牧島研究室	144
6.2.1	太陽と星のフレアの研究	144
6.2.2	コンパクト天体の観測的研究	144
6.2.3	星間・銀河間での高エネルギー現象	145
6.2.4	<i>Astro-E2</i> 衛星 硬 X 線検出器 (HXD-II) の開発製作	146
6.2.5	将来に向けての技術開発	147
6.3	高瀬研究室	153
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	153
6.3.2	JT-60U トカマクにおけるプラズマ電流立ち上げ・維持実験	154
6.3.3	JFT-2M トカマク周辺部の乱流-帯状流システムの非線形過程の研究	155
6.3.4	LHD ヘリカルプラズマにおける電子加熱実験	155
6.3.5	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	156
6.4	坪野研究室	159
6.4.1	レーザー干渉計を用いた重力波の検出	159
6.4.2	宇宙空間レーザー干渉計	160
6.4.3	熱雑音の研究	160
6.4.4	精密計測の研究	161
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	はじめに	173
6.6.2	富士山頂サブミリ波望遠鏡	173
6.6.3	可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡	175

6.6.4	テラヘルツ帯における観測技術の開拓	175
6.6.5	星間物質の観測的研究	176
6.7	酒井広文 研究室	179
6.7.1	静電場とレーザー電場の併用による分子の配向制御	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の制御	179
6.7.3	配列した分子から発生する高調波強度の楕円率依存性	180
6.7.4	時間依存偏光パルスの発生と制御技術の高度化	180
6.7.5	2次元イオン画像観測の最適制御実験への適応化	181
6.7.6	非断熱的に配列した3原子分子の構造変形の観測	181
6.7.7	4年生特別実験	182
7	生物物理	185
7.1	桑島研究室	185
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	185
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	187
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	188
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の機能解析	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	193
7.2.4	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(石原孝容、ラム・チャーヤン、浜地慎一郎)、風間北斗、能瀬聡直)	194
8	技術部門	196
8.1	技術部門	196
8.1.1	実験装置試作室	196
II	Summary of group activities in 2004	197
1	Theoretical Nuclear Physics Group	199
2	Theoretical Particle and High Energy Physics Group	201
3	Sakai Group	203
4	Hayano Group	204
5	Sakurai Group	205
6	Komamiya Group	206
7	Minowa-Group	207
8	Aihara Group	208
9	Wadati Group	209
10	Aoki Group	210
11	Miyashita Group	211
12	Ogata Group	213
13	Tsuneyuki Group	214
14	Fujimori Group	215
15	Uchida Group	216
16	Hasegawa Group	218
17	Fukuyama Group	219
18	Okamoto Group	220
19	Shimano Group	221
20	Theoretical Astrophysics Group	222
21	Murao Group	224
22	Kobayashi Group	225
23	Makishima Group	226
24	Takase Group	227
25	Tsubono Group	228
26	Sano Group	229

27	Yamamoto Group	230
28	Sakai (Hirofumi) Group	232
29	Kuwajima Group	234
30	Nose Group	235

III 2004 年度 物理学教室全般に関する報告 237

1	学部講義概要	239
1.1	2 年生 冬学期	239
1.1.1	電磁気学 I : 駒宮幸男	239
1.1.2	解析力学・量子力学 I : 藤森 淳	239
1.1.3	物理数学 I : 村尾 美緒	240
1.1.4	物理実験学 : 福山 寛、早野 龍五	240
1.2	3 年生 夏学期	241
1.2.1	光学 : 山本 智	241
1.2.2	量子力学 II : 小形正男	241
1.2.3	物理数学 II : 江口 徹	242
1.2.4	現代実験物理学 I : 岡本 徹、桑島 邦博	242
1.2.5	電磁気学 II : 佐野 雅己	242
1.2.6	統計力学 : 和達	243
1.3	3 年生 冬学期	243
1.3.1	物理数学 III: 松尾 泰	243
1.3.2	物質科学基礎 : 溝川 貴司	244
1.3.3	電気力学 : 蓑輪 眞	244
1.3.4	流体力学 : 江尻 晶	244
1.3.5	現代実験物理学 II : 坪野公夫、酒井英行	245
1.3.6	量子力学 III : 大塚孝治	245
1.3.7	生物物理学 : 桑島邦博、能瀬聡直	246
1.3.8	統計力学 II : 青木 秀夫	246
1.4	4 年生 夏学期	246
1.4.1	プラズマ物理学 : 高瀬 雄一	247
1.4.2	原子核物理学 : 初田 哲男・櫻井 博儀	247
1.4.3	統計力学特論 : 小形正男	247
1.4.4	生物物理学特論 : 宮下保司、能瀬聡直	248
1.4.5	量子光学 : 酒井広文	248
1.4.6	場の量子論 : 柳田勉	249
1.4.7	一般相対論 : 須藤 靖	249
1.4.8	固体物理学 I : 常行 真司	250
1.5	4 年生 冬学期	251
1.5.1	素粒子物理学 : 相原 博昭	251
1.5.2	固体物理学 II : 長谷川修司	252
1.5.3	宇宙物理学 : 牧島一夫	252
1.5.4	化学物理学 : 内田 慎一	253
2	各賞受賞者紹介	254
2.1	和達三樹教授 : 紫綬褒章	254
2.2	樽茶清悟教授 : 紫綬褒章	254
2.3	小林孝嘉教授 : 時間分解振動分光学会賞	254
2.4	須藤靖助教授 : 第 9 回日本天文学会林忠四郎賞	255
2.5	長谷川修司助教授 : 日本顕微鏡学会学会賞 (瀬藤賞)	255
2.6	角野秀一助手 (相原研究室) : 第 6 回高エネルギー物理学奨励賞	255
2.7	大栗真宗博士 (須藤研究室) : 東京大学総長賞	255
2.8	藤井新一郎博士 (大塚研究室) : 第 6 回核理論新人論文賞	256
2.9	三宅章雅博士 (和達研究室) : 第 21 回井上研究奨励賞	256

2.10	鈴木謙博士 (早野研究室) : 第 11 回原子核談話会新人賞	256
3	人事異動	257
4	役務分担	258
5	教室談話会	259

I

研究室別 2004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）

原子核理論研究室的概要

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・板垣助手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・佐々木助手・江尻助手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
- 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。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、それらの数が大きく異なるものを指す。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、不安定核での魔法数は安定核のそれとは系統的に異なり、殻進化の一面である。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。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、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。不安定核では、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クラスター構造の結晶的安定化によって現われる、という成果があげられ、この新しい安定化メカニズムや、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。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。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、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、カオスと対称性の関係について新しい概念を導入して研究している。[1, 2, 3, 4, 5, 7, 8]

軽い核におけるクラスター・シェル競合の分析

反対称化分子動力学 (AMD) の手法を発展させ、多数の Slater 行列式を重ね合わせることにより、軽い原子核におけるクラスター構造とシェル構造の競合を明らかにした。特にこれらの核におけるスピン・軌道力の効果に注目し、さらに単純化されたモデルを提案し量子多体問題の1手法として一般化させた。[9, 10, 48, 49, 50, 90]

C 同位体における系統的な構造計算

中性子過剰な炭素同位体に対して、クラスター模型とシェル模型の描像の両方を扱える広い模型空間を用いて系統的な分析を行った。特に、励起状態に現れる 3α クラスター構造が、中性子数の増大と共に気体的な自由なものからはっきりとした3角形構造へと相転移するメカニズムを分析した。[48, 49, 50, 91]。また、最近実験的に注目を集めている ^{16}C の異常電磁遷移確率をクラスター・シェル競合の立場から分析した [48, 49, 50, 92]。

現代的核力に基づく核構造の微視的記述

原子核構造を記述する際の基礎となる核子間有効相互作用をユニタリー相関演算法により自由空間における種々の現代的核力（中間子交換型相互作用、カイラル摂動理論に基づく相互作用等）から微視的に導出した。これらの相互作用を用い、閉殻近傍核の結合エネルギー、殻構造の系統的な計算を行った他、多粒子-多空孔励起が関与する複雑な状態に対しての大規模殻模型計算を行い、それらの状態についての微視的立場からの理解を深めた。[12, 36, 37, 51,

52, 84, 93, 94, 95, 96, 117]

ランダム行列理論による基底状態がもつ対称性の研究

量子多体問題における量子カオスは興味深い研究対象である。特に原子核殻模型においてランダムに与えられた相互作用が与える基底状態の性質の研究は近年盛んになっており、この状態はより高い対称性を持つ傾向があるということが明らかになっている。この基底状態の性質を調べることにより、量子カオス的な混合の観点から議論する事ができることを示した。[13, 54]

中重核の原子核構造と集団運動状態の探求

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た。これにより ^{136}Te の第一励起状態は、通常の集団運動による励起と異なり中性子のみによる励起が主な寄与となっていることを明らかにした。[14] また、 ^{134}Ba 近傍のアイソトープにおいて、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。[97, 53]

質量数 130 領域の原子核の集団運動性と単一粒子性

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 領域の偶偶核、奇核、奇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準位や電磁遷移を再現することに成功した。計算により得られた波動関数を解析し、質量数 130 領域の核構造を明らかにした。[15, 16, 17, 38, 40, 39, 56, 57, 98, 99, 100]

多スレーター行列式による α 相関の研究

軽い原子核でクラスター構造が発展していることを AMD の枠内でより正確に扱うために非常に多くのスレーター行列式を重ね合わせたモデルを採用した。そのことによって α 相関が ^{21}Ne の負パリティ状態において非常におおきな寄与を果たしているということを見ることができた。3 体力を用いた場合にもほぼ同様の傾向があることを見た。次に中性子の軌道を扱うためにまずバレンス中性子の一粒子パリティを新たに定義した。このことによって系が原子核のコア内部での結合が強いような描像に有るのかそれとも、その逆の状態に有るのかを分類することができた。[58, 101, 102, 103, 104]

テンソル力を含んだ Gogny 型有効相互作用による平均場計算

ポテンシャルの相対距離依存性がガウス関数型でテンソル力を含んだ Gogny 型有効相互作用による平均場計算を行った。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るために、Sb アイソトープの、中性子数の変化に伴う陽子・中性子一粒子軌道 $h_{11/2}$ と $g_{7/2}$ のエネルギー差の変化の実験に注目し、テンソル力を含まない Gogny 型有効相互作用とテンソル力を含む Gogny 型有効相互作用の比較計算を試みた。その結果、エネルギー差の変化は主にテンソル力によるものであることを示した。[105]

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、場の量子論における高次総和法に基づく解析的アプローチ、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など、多岐にわたっている。

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、ペンタクォークなど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。

有限温度における格子上的スペクトル関数

J/Ψ , η_c などの重いクォークコンニウムや、 ϕ などの比較的軽い中間子が、クォーク・グルーオン・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注目を集めている。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ベイズ統計解析を用いて研究した。その結果、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、様々なクォークコンニウムが素励起として存在する証拠を得ている。今年度はさらに細かい温度範囲での数値シミュレーションを行い、動的クォーク励起を無視したクエンチ近似の範囲で、

J/Ψ については、約 $1.7T_c$ の温度で急激に共鳴状態が消失する事を示した。更に、軽いベクトル中間子の媒質効果により重イオン衝突実験で観測されるレプトン対生成がどのように影響を受けるかについて、相対論的流体力学に基づいた現象論解析も行った。[18, 19, 20]

高温低密度における QCD 相転移の数値的研究

クォーク・グルーオン・プラズマの実験的生成を目指した重イオン衝突実験を理論の側から支援するために、近年、バリオン数密度がゼロではないがそれほど高くないといった状況での、数値シミュレーションによる QCD の第一原理計算が重要となっている。いくつかのビームエネルギーの違う実験間の違いを説明するためには、その実験で作り出される温度と密度の状態での基本的な熱力学量についての理論的な予言が不可欠である。数年前までは、密度効果を取り入れた QCD のシミュレーションは技術的に難しいと言われてきたが、現在では、技術の進歩によって重イオン衝突実験で興味がある低密度の領域に限って、シミュレーションによる研究ができるようになってきた。さらに、密度ゼロで特異性を伴わない相転移であったカイラル対称性の回復の相転移が、密度が上げるとある密度から一次転移に変化することが現象論的に予想されている。そしてそのことを第一原理計算により確かめることが重要な関心事になっている。我々は、低密度領域で基本的な熱力学量を計算すると同時に、その相転移の様相を確かめる第一段階として、密度が高くなることに伴う熱力学的揺らぎの変化という点に注目した。格子 QCD の数値シミュレーションにより、低密度領域で、バリオン数、アイソスピン、電荷の揺らぎを密度の関数として計算し、その結果が、現象論的な予想と定性的に矛盾なく、密度の高いある点で相転移の様相が変化することを示唆していることがわかった。[21, 89, 106]

格子 QCD 数値実験によるペンタクォークの研究

日本の実験グループ (LEPS collaboration) によって発見された正のストレンジネス ($S=+1$) を持つエキゾチックなバリオン、“ペンタクォーク”状態 $\Theta(1540)$ に関する格子 QCD を用いた研究を世界に先駆けて行った。未だ、実験的に確定していないペンタクォークの量子数 (スピン、パリティ、アイソスピン) に関して、格子 QCD 数値実験を用いてその量子数を予言した。また、負のチャーム ($C=-1$) を持つエキゾチックなバリオン Θ_c の存在に関しても数値実験して、その質量が多くの現象論模型で予測されている程軽くはなく、むしろ核子・D 中間子の崩壊閾値よりもはるかに重いことから、 $\Theta(1540)$ のように寿命の長い共鳴状態ではなく、かなり寿命の短い共鳴状態の可能性が高いことを報告した [22]

格子 QCD 数値計算による Roper 共鳴状態の研究

格子 QCD 数値計算を使用して、核子励起状態の研究を行なった。特に、正パリティの核子励起状態 (Roper 共鳴) $N'(1440)$ と負パリティの核子励起状態 $N^*(1535)$ の準位間の順序の問題に焦点をあてている。この準位の順序に対する理解を与える事は、ハドロンスペクトルに関する長年の問題である。本研究は、格子 QCD 数値計算という第一原理計算からの示唆を与える事を目的としている。格子 QCD 数値計算における困難の一つである励起状態の取り扱いのために、本研究では最大エントロピー法 (MEM) が用いられている。我々は、クォーク質量の広い領域にわたって、二つの励起状態がほぼ縮退する事を発見した。これは、クォーク模型の予想とは対照的であるものの、実験値に見られる特徴を再現している。[46, 64, 43, 23]

格子 QCD による核子励起状態、Delta 励起状態に対する有限体積効果の研究

格子体積が有限である事の効果 (有限体積効果) に焦点を絞って、バリオン (核子、 Δ バリオン) の基底状態、励起状態の質量スペクトルの研究を行なった。境界条件の効果に起因するパリティ混合を抑えるために、適切なパリティ射影の手法が採用されている。基底状態核子の有限体積効果が無視出来る重クォーク領域においてさえ、励起状態に関してはこの効果が無視出来ない事を見出した。正確な質量評価のためには、3fm 程度の大きさの格子が必要とされる。我々の計算における最も大きい格子 (3.2fm) 上での計算結果は、実験的に知られるスペクトルを再現している。さらに、hyperfine splitting (両パリティ・チャンネルにおける核子と Δ バリオン間の質量差) に関する独特な有限体積効果の振る舞いもまた観察した。[46, 108, 24]

Resolving chromomagnetic instability in the g2SC phase

Gapless color superconducting phases, including gapless 2SC (g2SC) and gapless CFL (gCFL) phases, exhibit a type of chromomagnetic instability. Our recent work aims to understand and resolve the chromomagnetic instability in the g2SC phase. We find that, except the chromomagnetic instability, the g2SC phase also exhibits a paramagnetic response to the perturbation of an external baryon current. This suggests a spontaneous current generation in the g2SC phase. The spontaneously generated baryon current breaks the rotational symmetry of the system, and modifies the quark self-energy with a spatial vector condensate. The baryon current instability can explain the 8-th gluon's chromomagnetic instability and the instability with respect to the net momentum of the diquark pair.

We show that the chromomagnetic instability pertaining to the gapless phase can be avoided safely by self-consistently including the spatial vector condensate correction to the quark self-energy. [25, 65, 66, 67]

Critical behavior of interacting fields

We study the critical behaviour of interacting fields. Using lattice monte carlo technique we study two models, $SU(2) + Higgs$ and coupled spin system. In the case of $SU(2) + Higgs$ our results show simultaneous critical behavior at the second order Higgs transition point. We measure the correlation lengths of gauge fields and Higgs field operators. The results show the correlation lengths extracted from large distance behavior of the correlators of Higgs and gauge fields are same. The correlation lengths are also same near the critical point. These results suggest that both Higgs and gauge fields get their critical behavior from a common critical field. Some mean field studies, in case of QCD, have suggested that the common critical field results from the mixing of the interacting fields. However such mixing proposition implies that the correlation lengths should be same at the critical point as well as away from it. However our results for the $SU(2) + Higgs$ model show that away from the critical point the interacting fields have different correlation lengths. We have extended this calculations to interacting spin systems. The interacting spins undergo critical behavior simultaneous, for the same values of the external parameters. But the critical exponents of the individual fields were same or different depending on the form of the interaction term. At present we are preparing a manuscript to submit to a journal.

With my collaborators T. Hatsuda and M. Ohtani I am studying the phase diagram of $SU(3) + Higgs$ model. From the numerical study of this model using monte carlo simulations we expect to draw a phase diagram for the color superconducting phase transitions in QCD for high densities. Preliminary results from our simulations show similarities as well as difference to the phase diagram of $SU(2) + Higgs$ system.

With my collaborator T. Matsuura I am studying topological string solutions in the superconducting phase of high density QCD. The superconducting phase because of the topology of the space spanned by all possible values of the condensate admits abelian as well as non-abelian strings. So far there are no studies of non-abelian strings in the color superconducting phases. In this project we are calculating numerically the configuration of the abelian as well as non-abelian strings. We are also planning to study the effect of color gauge fields on the

non-abelian strings.

格子 QCD を用いた J/Ψ -ハドロン散乱の研究

J/Ψ -ハドロン相互作用の研究は、高温核物質中でのクォーク・グルーオン・プラズマ生成検証指針の1つである J/Ψ 抑制機構の評価や、原子核中での J/Ψ の伝搬を調べる上で重要となる。また、チャーモニウム-軽ハドロン相互作用に軽クォーク交換流が含まれない為、比較的容易に第一原理計算が行うことが可能である。この様な背景をもとに、我々は J/Ψ - π , J/Ψ - ρ 及び J/Ψ - N の弾性散乱長を、ウィルソン・フェルミオンを用いたクエンチ近似に基づく格子 QCD 数値実験 ($\beta = 6.2$, $L^3 \times T = 32^3 \times 48$, $24^3 \times 48$) を用い測定した。その結果、Lüscher の有限体積法に基づく解析により、各系 s チャンネルに引力が働いていることを確認した。また、 J/Ψ -核子系において束縛状態形成の可能性を議論する必要があることも示唆された。

有限温度のカラー超伝導相転移

有限温度・密度の QCD から CJT の方法を用いて構成された Ginzburg-Landau 理論を用いて、クォークの高密度領域で実現されるカラー超伝導の相転移温度付近の相構造を解析した。カラー超伝導への相転移が期待される原始中性子星内部においては、クォーク質量の効果と、それに伴う電気・カラーの中性条件が重要になる。これらの効果はフレーバー間のフェルミ面にずれを誘起させる。このずれにより、相転移は3段階の2次相転移に分離し、中間状態に新しい相 (dSC 相) が出現することを明らかにした。[26] また、各相におけるスペクトルを考察した。フェルミ面の異なるクォーク同士が対を組むと、転移温度付近では超伝導状態にも関わらずクォークにエネルギーギャップが生じないことを示した。[27, 109, 110, ?] 更に、ゲージ場の熱揺らぎが上記の相構造を変化させる可能性を調べた。高密度領域においては、1回の1次相転移により mCFL 相に転移し、階層的な相転移が消滅する可能性を議論した。[111]

相対論系における BCS-BEC クロスオーバー

超流動状態の性質が通常の BCS 状態からボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) 的な状態へと結合の強さとともに連続的に変化する BCS-BEC クロスオーバーは、引力相互作用するフェルミオン系において普遍的現象である。我々はこの現象を、低温高密度クォーク物質で実現するカラー超伝導への応用を念頭に置きつつ、相対論的な枠組みへと拡張した。有限質量を持つ相対論的4体フェルミモデルを用い、粒子数一定の条件に対してガウス揺らぎの効果まで取り入れた上で、臨界温度の結合定数依存性を調べた。その結果、弱結合領域では通常の BCS 状態が実現するが、結合定数の増加とともにフェルミオンの束縛

状態による BEC 状態へと推移することが分かった。さらに結合定数を大きくしていくと今度は反粒子の効果により臨界温度は上昇し、相対論的 BEC 状態 (RBEC) が実現することを指摘した。[28, 112, 113]

カラー分子動力学によるペンタクォークの研究

カラー分子動力学の手法により、ペンタクォークの狭い崩壊幅の原因の研究を行った。ペンタクォークは 2003 年 7 月、SPRING-8 において阪大 RCNP の中野氏らによって発見された。ペンタクォークは K^+n に崩壊することが実験により知られているが、その質量は K^+n の崩壊の閾値より 100 MeV 程度高いにもかかわらず崩壊幅が数 MeV と通常のハドロンの共鳴状態としては非常に安定である。我々は分子動力学にクォークのカラー自由度を取り入れたカラー分子動力学により、ペンタクォークの崩壊の動的シミュレーションを行った。その結果、ペンタクォークの位置配位とカラー配位が同時に中性子と K 中間子になるための困難さが狭い崩壊幅の原因である事がわかった。[29, 47, 69, 114, 115]

ノナクォーク系としてのストレンジトライバリオンの研究

2004 年 7 月に KEK-PS において鈴木氏らにより発見されたストレンジトライバリオン $S^0(3115)$ に関してクォーク描像の立場から理論的解析を行った。 $S^0(3115)$ の構造は単純なハドロンの描像では K^-pnn と考えられるが、クォークの構成は $(3u)(5d)(1s)$ と考えることもできる。この粒子を 9-クォーク系 (ノナクォーク) であると考え、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った。さらにカラー磁気相互作用の効果によりフレーバー 27 重項がスピン 1/2、アイソスピン 1 の状態として最もエネルギーの低い状態になることを示し、発見された $S^0(3115)$ がこのフレーバー 27 重項に属する可能性を指摘した。ストレンジクォークの存在がクォーク多体系としてエネルギー的に安定化することに注目し、発見された $S^0(3115)$ を基準にして、未発見の $S=-2, -3$ のストレンジトライバリオンの存在を予言した。[30, 70, 116]

<受賞>

藤井新一郎：第 6 回核理論新人論文賞、2005 年 3 月

<報文>

(原著論文)

- [1] K.L. Yurkewicz, D. Bazin, B.A. Brown, C.M. Campbell, J.A. Church, D.-C. Dinca, A. Gade, T. Glasmacher, M. Honma, T. Mizusaki, W. F. Mueller, H. Olliver, T. Otsuka, L.A. Riley, and J.R. Terry : "Intermediate-energy Coulomb excitation of ^{52}Fe ", Phys. Rev. **C70**, 034301 (2004).
- [2] Y. Utsuno, T. Otsuka, T. Glasmacher, T. Mizusaki and M. Honma : "Onset of intruder ground state in exotic Na isotopes and evolution of the $N=20$ shell gap", Phys. Rev. **C70**, 044307 (2004).
- [3] K.L. Yurkewicz, D. Bazin, B.A. Brown, C.M. Campbell, J.A. Church, D.C. Dinca, A. Gade, T. Glasmacher, M. Honma, T. Mizusaki, W.F. Mueller, H. Olliver, T. Otsuka, L.A. Riley, and J.R. Terry : "Nuclear structure in the vicinity of $N = Z = 28$ ^{56}Ni ", Phys. Rev. **C70**, 054319 (2004).
- [4] S.N. Liddick, P.F. Mantica, R. Broda, B.A. Brown, M.P. Carpenter, A.D. Davies, B. Fornal, T. Glasmacher, D.E. Groh, M. Honma, M. Horoi, R.V.F. Janssens, T. Mizusaki, D.J. Morrissey, A.C. Morton, W.F. Mueller, T. Otsuka, J. Pavan, H. Schatz, A. Stolz, S.L. Tabor, B.E. Tomlin, and M. Wiedeking : "Development of shell closures at $N = 32, 34$. I. β decay of neutron-rich Sc isotopes", Phys. Rev. **C70**, 064303 (2004).
- [5] B. Fornal, S. Zhu, R.V.F. Janssens, M. Honma, R. Broda, P.F. Mantica, B.A. Brown, M.P. Carpenter, P.J. Daly, S.J. Freeman, Z.W. Grabowski, N.J. Hammond, F.G. Kondev, W. Krolas, T. Lauritsen, S.N. Liddick, C.J. Lister, E.F. Moore, T. Otsuka, T. Pawlat, D. Seweryniak, B.E. Tomlin, and J. Wrzesinski : "Development of shell closures at $N = 32, 34$. II. Lowest yrast excitations in even-even Ti isotopes from deep-inelastic heavy-ion collisions", Phys. Rev. **C70**, 064304 (2004).
- [6] T. Otsuka, "Evolution of Single-Particle Structure and Nuclear Force", Conf. on Nuclei at the Limits, Argonne, July 26-30, 2004.
- [7] K.L. Yurkewicz, D. Bazin, B.A. Brown, C.M. Campbell, J.A. Church, D.C. Dinca, A. Gade, T. Glasmacher, M. Honma, T. Mizusaki, W.F. Mueller, H. Olliver, T. Otsuka, L.A. Riley, and J.R. Terry : "E2 excitation strength in ^{55}Ni : Coupling of the ^{56}Ni 2_1^+ collective core vibration to the $f_{7/2}$ odd neutron hole", Phys. Rev. **C70**, 064321 (2004).
- [8] 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 ^{31}Mg : Evidence for a Strongly Deformed Intruder Ground State", Phys. Rev. Lett., **94**, 022501 (2005)
- [9] N. Itagaki, S. Aoyama, K. Ikeda and S. Okabe: "Cluster-shell competition in light nuclei", Phys. Rev. **C70**, 054307 (2004).
- [10] N. Itagaki, H. Masui, M. Ito and S. Aoyama: "Simplified modeling of cluster-shell competition", Physical Review C in press.
- [11] G. Thiamova, N. Itagaki, T. Otsuka and K. Ikeda: "Systematic study of Structure of Carbon Isotopes with the Antisymmetrized Molecular Dynamics plus Generator Coordinate Method", Euro. Phys. Journal A 22 issue 3, 461 (2004).

- [12] S. Fujii, E. Epelbaum, H. Kamada, R. Okamoto, K. Suzuki, and W. Glöckle: “Low-momentum nucleon-nucleon interaction and its application to few-nucleon systems”, *Phys. Rev. C* **70**, 024003 (2004).
- [13] Y. M. Zhao and A. Arima and N. Shimizu and K. Ogawa and N. Yoshinaga and O. Scholten: “Patterns of the ground states in the presence of random interactions: nucleon systems”, *Phys. Rev. C* **70** 054322, (2004).
- [14] N. Shimizu and T. Otsuka and T. Mizusaki and M. Honma: “Anomalous properties of quadrupole collective states in ^{136}Te and beyond”, *Phys. Rev. C* **70** 054313 (2004).
- [15] N. Yoshinaga and K. Higashiyama: “Systematic studies of nuclei around mass 130 in the pair-truncated shell model”, *Phys. Rev. C* **69**, 054309 (2004).
- [16] T. Takahashi, N. Yoshinaga and K. Higashiyama: “Backbending phenomena in $^{132,134,136}\text{Ce}$ with a pair-truncated shell model”, *Phys. Rev. C* **71**, 014305 (2005).
- [17] K. Higashiyama and N. Yoshinaga: “New Neutron-Proton Single-Particle Mode and Collective Excitations in ^{134}La ”, to be published in *Prog. Theor. Phys.*
- [18] M. Asakawa and T. Hatsuda: “ J/Ψ and η_c above the deconfinement phase transition”, *J. Phys. G* **30** (2004) S1337.
- [19] M. Asakawa and T. Hatsuda: “Charm cluster in quark gluon plasma?”, *Nucl. Phys. A* **738** (2004) 249.
- [20] S. Sarkar, J. Alam and T. Hatsuda: “Medium effects on low mass dileptons from relativistic nuclear collisions”, *J. Phys. G* **30** (2004) 607.
- [21] C.R. Allton, M. Döring, S. Ejiri, S.J. Hands, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann and K. Redlich: “Thermodynamics of two flavor QCD to sixth order in quark chemical potential”, *Phys. Rev. D* **71** (2005) 054508.
- [22] S. Sasaki, “Lattice Study of Exotic $S=+1$ Baryon”, *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 152001.
- [23] K.Sasaki, S.Sasaki, T.Hatsuda: “Spectral Analysis of Excited Nucleons in Lattice QCD with Maximum Entropy Method”, hep-lat/0504020 to be published in *Phys. Lett. B*.
- [24] K.Sasaki, S.Sasaki: “Excited Baryon Spectroscopy from Lattice QCD: Finite Size Effect and Hyperfine Mass Splitting”, hep-lat/0503026 to be published in *Phys. Rev. D*.
- [25] M. Huang: “Spontaneous current generation in g2SC phase”, submitted to *Phys. Rev. Lett.*
- [26] K.Iida, T.Matsuuura, M.Tachibana, and T.Hatsuda: “Melting Pattern of Diquark Condensates in Quark Matter,” *Phys. Rev. Lett.* **93** 132001(2004).
- [27] K.Iida, T.Matsuuura, M.Tachibana, and T.Hatsuda: “Thermal phase transitions and gapless quark spectra in quark matter at high density”, *Phys. Rev. D* **71** 054003(2005).
- [28] Y. Nishida and H. Abuki: “BCS-BEC crossover in relativistic superfluid and its possible realization in QCD”, hep-ph/0504083 (投稿中).
- [29] Y. Maezawa, T. Maruyama, N. Itagaki and T. Hatsuda: “Wandering in Color-Space –why the life of pentaquark is so long?–”, *Acta Phys. Hung.* **A22**, 61 (2005).
- [30] Y. Maezawa, T. Hatsuda and S. Sasaki: “Strange tribaryons as nona-quark states”, hep-ph/0412025, (投稿中).
- (会議抄録)
- [31] T. Otsuka and N. Shimizu: “Chaos and Symmetry”, *Proc. of Int. Conf. on Microscopic Studies of Collective Phenomena*, AIP Conf. Proceedings **726** 43 (2004).
- [32] T. Otsuka: “Perspectives of the Shell Model”, *Proc. of Int. Symp. A New Era of Nuclear Structure Physics*, (World Scientific, 2004), p. 201.
T. Otsuka, T. Suzuki, R. Fujimoto, T. Matsuo, D. Abe, H. Grawe and Y. Akaishi “Evolution of shell and collective structures in exotic nuclei”, *Proc. of Int. Symp. Atomic nuclei at extreme values of temperature, spin and isospin*, *Acta Physica Polonica B* **36** (2005) 1213
- [33] S. Aoyama and N. Itagaki: “Systematic analyses on H- and He-isotopes by using an extended AMD approach”, *Proc. of 8-th Int. Conf. on CLustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics*, *Nucl. Phys. A* **738** (2004), 362.
- [34] N. Itagaki, S. Aoyama, T. Yoshida, T. Otsuka, S. Okabe, and K. Ikeda: “Exotic cluster structure in light neutron-rich nuclei”, *Proc. of 8-th Int. Conf. on CLustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics*, *Nucl. Phys. A* **738** (2004), 13.
- [35] N. Itagaki and S. Aoyama: “Exotic Cluster Structure in Light Neutron-rich Nuclei”, *Proc. of Int. Conf. on The Labyrinth in Nuclear Structure*, an EPS Nuclear Physics Divisional Conference, AIP Conference Proceedings Vol. 701 (2004), 49.
- [36] S. Fujii, R. Okamoto, and K. Suzuki: “Shell structures in oxygen isotopes described with modern nucleon-nucleon interactions”, *Proc. of the Int. Symp. on A New Era of Nuclear Structure Physics*, (World Scientific, Singapore, 2004, p. 70).
- [37] S. Fujii, H. Kamada, R. Okamoto, and K. Suzuki: “Dependence of nuclear binding energies on the cutoff momentum of low-momentum nucleon-nucleon interaction”, *Proc. of the 8th Int. Spring Seminar on Nuclear Physics*, (World Scientific, Singapore, 2005, p. 117).

- [38] N. Yoshinaga and K. Higashiyama: “Triaxiality and Chirality in Nuclei around Mass 130”, in Proc. of *Symmetries in Science XI*, (Kluwer Academic Publishers, 2004), p.589-609.
- [39] K. Higashiyama and N. Yoshinaga: “Microscopic description of doublet bands in lanthanum-134”, in Proc. of *A New Era of Nuclear Structure Physics*, (World Scientific, 2004) p.338-339.
- [40] N. Yoshinaga and K. Higashiyama: “Triaxial deformation and chiral bands in nuclei around mass 130”, in Proc. of *A New Era of Nuclear Structure Physics*, (World Scientific, 2004) p.589-609.
- [41] S. Sasaki: “Pentaquarks: Status and Perspectives for Lattice Calculations”, Nucl. Phys. **B** (Proc. Suppl.) **140** (2004) 127-133.
- [42] S. Sasaki: “Pentaquarks in Lattice QCD”, AIP. Conf. Proc. **717** (2004) 416-420.
- [43] K.Sasaki, S.Sasaki, T.Hatsuda: “Excited nucleons in lattice QCD”, Proc. of the Internatinal Workshop on Quark Nuclear Physics 2005, Feb.22-24, 2005, Phoenix Park, Pyoungchang, Korea.
- (国内雑誌)
- [44] 初田哲男: QCD における未解決問題-クォークの閉じ込めからクォーク・グルオン・プラズマまで- (数理解科学、2004 年 12 月号、サイエンス社)
- [45] 初田哲男: 強く束縛した π 中間子原子とカイラル対称性の部分的回復, (日本物理学会誌、59 巻, No.6, 2004)
- (学位論文)
- [46] K.Sasaki: “Study of the mass spectra of excited baryons from lattice QCD”, 博士論文.
- [47] Y. Maezawa: “Study of the penta-quark in molecular dynamics simulations”, 修士論文.
- (国際会議)
- 一般講演
- [48] N. Itagaki: “Cluster model for light nuclei” New perspectives on p-shell nuclei - the nuclear shell model and beyond, MSU (USA), 22-24 July, 2004
- [49] N. Itagaki: “Cluster-shell competition in light nuclei” 21-th meeting between nuclear astrophysicists and nuclear physicists, Brussels (Belgium), 13-14 December, 2004.
- [50] N. Itagaki: “Molecular orbital structure in light neutron-rich nuclei” Japanese-German Nuclear Structure and Astrophysics Workshop GSI, Dec (Germany). 16-18, 2004.
- [51] S. Fujii: “Unitary-model-operator approach to nuclear many-body problems”, Institute for Nuclear Theory (INT) 2004 Program on Microscopic Nuclear Structure Theory, Oct. 11, 2004, Seattle, USA.
- [52] S. Fujii: “Single-particle levels in oxygen isotopes described using modern nucleon-nucleon interactions”, Japanese-German Workshop on Nuclear Structure and Astrophysics, Dec. 16-18, 2004, GSI, Germany.
- [53] N. Shimizu, T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Honma: “Monte-Carlo Shell Model calculations of triaxially deformed states around $A = 134$ ”, Japanese-German Nuclear Structure and Astrophysics Workshop : 17th, Dec. 2004: GSI, Darmstadt, Germany.
- [54] N. Shimizu, T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Honma: “Monte-Carlo Shell Model calculations of triaxially deformed states around ^{134}Ba ”, International Symposium on Correlation Dynamics in Nuclei : 1st, Feb. 2005: Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan.
- [55] T.Otsuka and N. Shimizu: “Quantum chaos in nuclei”: A Workshop on Nuclei and Mesoscopic Physics: 24th, Oct. 2004: Michigan State University, East Lansing, Michigan, USA.
- [56] K. Higashiyama: “Microscopic description of magnetic dipole bands in the mass $A \sim 130$ ”, Int. Symp. on Correlation Dynamics in Nuclei (CDN05), January 31- February 4, 2005, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
- [57] K. Higashiyama: “Microscopic Investigation of Magnetic Dipole Bands in ^{132}Ba ”, Int. Conf. on NUClear STructure, Astrophysics and Reactions (NUSTAR '05), January 5-8, 2005, University of Surrey, Guildford, United Kingdom.
- [58] T. Yoshida, N. Itagaki, T. Otsuka: “Single-particle motion of excess-neutron around parity-asymmetric cluster”, International symposium on correlation dynamics in nuclei, February 2005, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
- [59] S. Sasaki: “Pentaquark Baryons from Lattice QCD YITP International workshop on MULTI-QUARK HADRONS; FOUR, FIVE AND MORE?”, February 17 - 19, 2004, YITP, Kyoto, Japan.
- [60] S. Sasaki: “Pentaquark Baryons in Quenched Lattice QCD KEK International workshop on NUCLEAR CHIRAL DYNAMICS”, March 18 - 20, 2004, KEK, Tsukuba, Japan.
- [61] S. Sasaki: “Pentaquarks”, The XXII International Symposium on LATTICE FIELD THEORY (LATTICE 2004). June 21 - 26, 2004, Fermilab, USA.
- [62] S. Sasaki: “Highlights of Baryon Spectroscopy from Lattice Calculations”, International Nuclear Physics Conference (INPC 2004), June 27 - July 2, 2004, Göteborg, Sweden.
- [63] S. Sasaki: “Pentaquark Baryons from Lattice Calculations”, International workshop on Pentaquark 2004, July 20 - 23, 2004, SPring-8, Japan.
- [64] K.Sasaki, S.Sasaki, T.Hatsuda: “Excited nucleons in lattice QCD”, Internatinal Workshop on Quark Nuclear Physics 2005, Feb.22-24, 2005, Phoenix Park, Pyoungchang, Korea.

- [65] M. Huang: “Gapless 2-flavor color superconductor”, in the Proceedings of the YITP Workshop “Non-equilibrium dynamics in the QCD phase transitions”, Feb. 22-24, 2005, Kyoto, Japan.
- [66] M. Huang: “What will be the true ground state of charge neutral 2-flavor quark matter?”, YITP Workshop on “Non-equilibrium dynamics in the QCD phase transitions”, Feb. 22-24, 2005, Kyoto, Japan.
- [67] M. Huang: “Chromomagnetic instability in the g2SC phase”, RIKEN Workshop on “Physics at RHIC and Related Topics”, Dec. 6-7, 2004, Wako, Japan.
- [68] K.Iida, T.Matsuura, M.Tachibana and T.Hatsuda: “Thermal phase transitions in realistic dense quark matter,” Chiral05, RIKEN, February 2005.
- [69] Y. Maezawa, T. Maruyama, N. Itagaki and T. Hatsuda: “Dynamics of pentaquark in color molecular dynamics simulations”, PENTAQUARK04, (July 20-23, 2004, Spring-8, Japan).
- [70] Y. Maezawa, T. Hatsuda and S. Sasaki: “Strange tribaryon as nona-quarks”, Chiral 05, (Feb. 15-17, 2005, RIKEN, Japan).
- 招待講演
- [71] T. Otsuka: “Chaos and Symmetry”, Int. Conf. on Microscopic Studies of Collective Phenomena, Cocoyoc, Mexico, April 19-22, 2004.
- [72] T. Otsuka: “Nuclear Forces and Shell evolution in Exotic Nuclei”, Int. Workshop on Blueprints for the Nucleus: From First Principles to Collective Motion, Feza Gursey Inst., Istanbul, May 17-23, 2004.
- [73] T. Otsuka: “Chaos and Symmetry”, 8th Int. Spring Seminar on Nuclear Physics “Key Topics in Nuclear Structure”, Paestum, May 23-27, 2004.
- [74] T. Otsuka, T. Suzuki, R. Fujimoto, T. Matsuo, D. Abe, H. Grawe, and Y. Akaishi, “Shell structure of exotic nuclei and nuclear force”, Int. Symp. on Exotic Nuclei EXON-2004, Peterhof, July 5-12, 2004.
- [75] T. Otsuka, “Effective Interactions in the Shell Model”, Workshop on New perspectives on p-shell nuclei - the nuclear shell model and beyond, East Lansing, July 22-24, 2004.
- [76] T. Otsuka, “Effective Interactions in the Shell Model”, Workshop on New perspectives on p-shell nuclei - the nuclear shell model and beyond, East Lansing, July 22-24, 2004.
- [77] T. Otsuka, “Evolution of Shell Structure and Spin-Isospin Interaction”, Int. Summer School on Subatomic Physics, Beijing, August 25-30, 2004.
- [78] T. Otsuka, T. Suzuki, R. Fujimoto, T. Matsuo, D. Abe, H. Grawe, and Y. Akaishi, “Shell structure of exotic nuclei and nuclear force”, Int. Symp. Atomic nuclei at extreme values of temperature, spin and isospin XXXIX Zakopane School of Physics, Zakopane, August 31 - September 5, 2004.
- [79] T. Otsuka, “Lessons from shell model to effective interactions”, Workshop on Nuclear Forces and the Quantum Many-Body Problem Seattle (INT), October 4-8, 2004.
- [80] T. Otsuka and N. Shimizu, “Quantum Chaos and Symmetries”, Nuclei and Mesoscopic Physics Workshop East Lansing, October 23-27, 2004.
- [81] T. Otsuka, “Mean Field Calculation with Spin-Isospin NN Interactions”, Japanese-German Nuclear Structure and Astrophysics Workshop, Darmstadt (GSI), December 16-18, 2004.
- [82] “Shell structure of exotic nuclei and NN force”, T. Otsuka, T. Suzuki, R. Fujimoto, T. Matsuo, D. Abe, H. Grawe, Y. Akaishi, M. Honma, T. Mizusaki and B.A. Brown, INFN Workshop on Reactions and Structure with Exotic Nuclei. Pisa, February 24-26, 2005.
- [83] “Structure issues of exotic heavy nuclei”, T. Otsuka, T. Suzuki, R. Fujimoto, T. Matsuo, D. Abe, H. Grawe, Y. Akaishi, M. Honma, T. Mizusaki and B.A. Brown, Int. Workshop on Neutron-Rich Radioactive Ion Beams - Physics with MAFF -, Kloster Banz, Germany, March 29 - April 1, 2005.
- [84] S. Fujii: “The unitary-model-operator approach to nuclear many-body problems”, Int. Symp on Correlation Dynamics in Nuclei (CDN05), Jan. 31-Feb. 4, 2005, Tokyo.
- [85] T. Hatsuda: “QCD under Extreme Conditions: Theories and Experiments”, International Nuclear Physics Conference (INPC04), June 27-July 2, 2004, Göteborg, Sweden.
- [86] T. Hatsuda: “Hot and Dense QCD on the Lattice”, 32nd International Conference on High Energy Physics (ICHEP04), August 16-22, 2004, Beijing, China.
- [87] T. Hatsuda: “In-medium Spectral Functions in Lattice QCD”, International Conference on Hard and Electromagnetic Probes of High Energy Nuclear Collisions (Hard Probe 2004), November 4-10, 2004, Ericeira, Portugal.
- [88] T. Hatsuda: “Hadrons in Quark Gluon Plasma from Lattice QCD”, International Workshop on Chiral Restoration in Nuclear Medium (Chiral 05), Feb. 15-17, 2005, RIKEN, Wako, Japan.
- [89] S. Ejiri: “Lattice QCD at finite density”, International Workshop on “Chiral Restoration in Nuclear Medium”, Chiral 05, Feb. 15-17, 2005, RIKEN, Japan
- (国内会議)
- 一般講演
- [90] 板垣直之, 青山茂義: 新しい AMD 法による軽い核のシェルの状態とクラスター状態の競合の分析、日本物理学会第59回分科会 (高知大学、高知、2004年9月)

- [91] 板垣直之, 大塚孝治: クラスターの結晶化構造の検証と意義、日本物理学会第59回分科会 (高知大学、高知、2004年9月)
- [92] 板垣直之、青山茂義、大塚孝治: ^{16}C の異常電磁遷移確率と C 同位体におけるクラスター・シェル競合、日本物理学会第60回年次大会 (東京理科大学、野田、2005年3月)
- [93] 藤井新一郎、瀬部孝、大塚孝治: 広い模型空間を考慮した殻模型計算における陽子・中性子表示による有効相互作用の構築、RIBF-UEC/理研研究会「不安定核物理この10年とこれから」(理化学研究所、和光、2004年6月)
- [94] 藤井新一郎、瀬部孝、大塚孝治: 多粒子-多空孔励起を考慮した ^{16}O 近傍核に対する殻模型計算、日本物理学会2004年秋季大会 (高知大学、高知、2004年9月)
- [95] 藤井新一郎: Unitary-model-operator approach による原子核構造の微視的記述、KEK 研究会「原子核理論呑舟研究会」(高エネルギー加速器研究機構、つくば、2005年3月)
- [96] 藤井新一郎、瀬部孝、大塚孝治、有馬朗人: 多粒子-多空孔励起を考慮した ^{16}O 近傍核に対する殻模型計算 II、日本物理学会2005年第60回年次大会 (東京理科大学、野田、2005年3月)
- [97] 清水則孝、大塚孝治: ランダム行列理論におけるカオスと対称性、日本物理学会第59回分科会 (高知大学、高知、2004年9月)
- [98] 東山幸司、吉永尚孝、大塚孝治: 質量数130領域の magnetic dipole バンド、日本物理学会第59回分科会 (高知大学、高知、2004年9月)
- [99] 東山幸司: 中重核領域の奇奇核における励起モードの起源、原子核理論呑舟研究会 (KEK 2005年3月)
- [100] 東山幸司、吉永尚孝: ^{129}Xe の EDM の殻模型のアプローチ、日本物理学会第60回年次大会 (東京理科大学、野田、2005年3月)
- [101] 吉田亨、板垣直之、大塚孝治: 有限レンジ三体力を含んだ中性子過剰核、日本物理学会第59回分科会 (高知大学、高知、2004年9月)
- [102] 吉田亨、板垣直之、大塚孝治: Single-particle motion of excess-neutron around parity-asymmetric cluster、 α 凝縮ワークショップ (京都大学 2005年2月)
- [103] 吉田亨、板垣直之、大塚孝治: 中性子過剰核な原子核の分子軌道的な状態、原子核理論呑舟研究会 (KEK 2005年3月)
- [104] 吉田亨、板垣直之、大塚孝治: 中性子過剰核な Ne 同位体における分子軌道的な描像とパリティ、日本物理学会第60回年次大会 (東京理科大学、野田、2005年3月)
- [105] 阿部大介、松尾利明、大塚孝治: 不安定核におけるテンソル力と中性子スキンの競合、日本物理学会第60回年次大会 (東京理科大学、野田、2005年3月)
- [106] 江尻信司: 格子 QCD による高温高密度での QCD 相転移の数値的研究、原子核理論呑舟研究会 (KEK、2005年3月)
- [107] 佐々木勝一: Pentaquark Baryons in Lattice QCD、日本物理学会第58回分科会 (九州大学、福岡、2003年4月)
- [108] 佐々木 潔、佐々木 勝一、初田 哲男: 格子 QCD による核子励起状態、Delta 励起状態に対する有限体積効果の研究、日本物理学会第60回年次大会 (東京理科大学、野田、2005年3月)
- [109] 飯田圭、松浦妙子、橘基、初田哲男: “a novel phase structure in realistic quark matter,” 熱場研究会 (基研、2005年8月)。
- [110] 飯田圭、松浦妙子、橘基、初田哲男: 高密度クォーク物質における有限温度カラー超伝導相転移線付近の相構造、原子核理論呑舟研究会 (KEK、2005年3月)
- [111] 飯田圭、松浦妙子、橘基、初田哲男: カラー超伝導相転移におけるクォーク質量の効果とゲージ場の熱揺らぎの競合、日本物理学会第60回年次大会 (東京理科大学、野田、2005年3月)
- [112] 西田祐介、阿武木啓朗: 相対論系における BCS-BEC クロスオーバー、日本物理学会第60回年次大会 (東京理科大学、野田、2005年3月)。
- [113] 西田祐介、阿武木啓朗: 相対論系における BCS-BEC クロスオーバー、原子核理論呑舟研究会 (KEK、2005年3月)
- [114] 前沢祐、丸山敏毅、板垣直之、初田哲男: カラー分子動力学によるペンタクォークの崩壊幅の研究、日本物理学会第59回分科会 (高知大学、2004年9月)
- [115] 前沢祐: カラー分子動力学によるペンタクォークの研究と今後の展望、原子核理論呑舟研究会 (KEK、2005年3月)
- [116] 前沢祐、初田哲男、佐々木勝一: ノナクォーク系としてのストレンジトライバリオンの研究、日本物理学会第60回年次大会 (東京理科大学、野田、2005年3月)

招待講演

- [117] 藤井新一郎: 現代的核力に基づく閉殻近傍核の構造の微視的記述、日本物理学会2005年第60回年次大会 (東京理科大学、野田、2005年3月)
- [118] 初田哲男: Unsolved Problems in QCD、理研理論集中セミナー「QCD ダイナミクスの理解に向けての様々なアプローチ」(理化学研究所、和光市、2005年3月15日)
- [119] 初田哲男: 高密度核物質と中性子星、研究会「重力崩壊型超新星を舞台とする様々な高エネルギー物理現象」(東京大学、本郷、2005年2月2日-4日)

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行っている。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

曲がった背景上の弦理論とDブレーン

江口、菅原は昨年に引き続き、 $N = 2$ リュービル理論、あるいは $SL(2)/U(1)$ 超対称コセット共形場理論に基づく超弦真空の系統的な研究を行った。特に複数の $N = 2$ リュービル・セクターを持つ模型の詳細な解析を行った。これは一般にコンカル特異点を持つ非コンパクト・カラビヤウ多様体を記述することが期待され、典型的には CP^1 上の ALE fibration など超対称ゲージ理論とも深い関係を持つ模型である。閉弦のセクターに関しては、モジュラー不変分配関数及び楕円指数の計算、更に massless 状態のスペクトルの評価を行った。開弦のセクターに関しては、BPS 及び非 BPS D-ブレーンを記述する境界状態を構成し、cylinder amplitudes や開弦のウィッテン指数の一般的な公式を導いた。新たに得られた物理的な知見としては、コニフォールドタイプの模型に典型的なモジュライ空間の構造を見ることに成功し、また、massless スペクトル（‘コホモロジー’）と BPS ブレーンスペクトル（‘ホモロジー’）の間の非対称性など、背景の非コンパクト性に起因する興味深い現象を示した [19, 55, 68]。

曲がった時空中での brane の運動を調べることは、時間発展する系での弦理論の振る舞いを知るために重要な課題となる。近年 Kutasov によって NS5-brane 背景中での brane の振る舞いが有効作用のレベルで tachyon 凝縮の物理にマップされることが予想された。中山、菅原、高柳は、extremal NS5 背景上を運動する D-ブレーンのダイナミクスに関して、境界共形場理論に基づく研究を行った。江口、菅原によって構成された $N = 2$ リュービル理論の D-ブレーンの境界状態をウィック回転することにより、Lorentzian theory での時間に依存する非自明な境界状態を導き、それが Kutasov によって調べられた NS5 背景上の運動する D-ブレーン古典解（‘rolling D-brane’）を記述することを示した。また、この D-ブレーンからの閉弦の輻射率を評価し、それが rolling tachyon に典型的な Hagedorn 的な紫外発散を示すことを示した。この結果は、Kutasov によって古典論レベルで提案されていた ‘tachyon-radion correspondence’ の存在を量子論レベルで示す signal として物理的に大変興味深い [9]。また、中山、高柳は、K. L. Panigrahi, S. J. Rey と共に、一定電場中への拡張を行った [20]。高柳はこれらの論文の内容を元に、 $\mathcal{N} = 2$ Liouville

理論の最近の発展も含めて博士論文としてまとめた [30]。中山、菅原は、Rey 氏（ソウル国立大）とともに、[9] で得られた結果を non-extremal NS5 背景に拡張した。(Lorentzian) 2 次元ブラックホールに吸収される D0-ブレーンの境界共形場理論による解析がその中心部分である。背景が曲がっているため、波動関数の境界条件の ambiguity 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 [68, 43, 69]。

リュービル理論は非臨界弦理論における世界面的記述の基礎となる一方で、特異性を持つ時空を記述する厳密な取り扱いを与えるという点で重要である。中山は、[1] でそのレビューを行った。また、リュービル理論の古典解は uniformization theorem を通じて数学的・物理的に深い意味を持つことが知られている。中山は、[6] において $\mathcal{N} = 2$ Super Yang-Milles 理論のインスタントン解が 2 次の再帰的な構造を持つことを示し、古典リュービル理論と深い関係にあることを G. Bertoldi, S. Bolognesi, M. Matone, L. Mazzucato と共に調べた。さらに、 $SL(2, R)$ WZW 模型とリュービル理論におけるいわゆる Zamolodchikov 関係式を古典リュービル理論と uniformization 理論の見地から G. Bertoldi, S. Bolognesi, M. Matone, L. Mazzucato と共同研究した [16]。中山は、[12] において $\mathcal{N} = 2$ リュービル理論の crosscap states を構築した。

Ghoshal は自己双対半径での $c = 1$ ボゾンの弦理論の FZZT ブレーン上の境界演算子のディスク相関関数を計算した。これらの表式は発散しているが、正則化および繰り込みを行うことによって、有限の結果を得ることができることを示した。これらの結果は弦の物理的状態を表す弦の場の理論の構成に役立つと考えられる [8]。

タキオン場に対して反周期境界条件を課し S^1 コンパクト化した 0 型弦において NS5 ブレーンを 1 枚置くと不安定な時空となる。この時空の T-dual は、フェルミオンに対して反周期境界条件が課した II 型弦にカルーツァクラインモノポールを 2 つ置いた時空となる。この時空は II 型弦の C^2/Z_2 オービフォールドに Taub-NUT の曲率変形をした時空として弦理論を用いて扱うことができる。今村、小山、信山は、オービフォールドに局在化された不安定モードを解析してこの時空の不安定性を考察した。[7]

鈴木は曲がった背景中（とくに Witten の 2 次元ブラックホールと呼ばれる群多様体上）での境界状態を修士論文にまとめた [35]。

戴は修士論文において、A. Sen が提唱した Rolling Tachyon によるブレーン崩壊の記述や、崩壊後の閉弦の生成率について最近の発展をまとめた [36]。

弦の場の理論

弦の場の理論は弦理論の非摂動的定式化の候補の一つであり、この枠組みでブレーンを議論するのは有用なことである。岸本と松尾は、閉弦の場の理論において、ブレーンを記述する境界状態（カーディ状態）を特徴づける冪等方程式を正則化することにより、この関係式が一般には factorization で理解できることを明らかにした。特に背景がトーラスやオービフォールドの場合にスター積のあらわな計算を遂行し、カーディ状態が（正則化した）冪等方程式を満たすことを具体的に確かめた。また、B 場のある背景の Seiberg-Witten 極限において、閉弦の場の理論のスター積から可換で非結合的な Strachan 積が現れることを示した [2, 13]。

岸本と渡辺は昨年度に引き続き閉弦の場の理論に関する研究を行った。ボソンの閉弦の場の理論としては HIKKO 型と呼ばれるものが知られている。岸本と渡辺は HIKKO 型理論の超対称性理論への拡張を試みた。さらにボソンの理論において成り立っていた境界状態間の冪等方程式が超対称性 HIKKO 理論や超対称光円錐の閉弦の場の理論においても得られることを議論した。渡辺はこれらの結果を博士論文としてまとめた [31]。

磯野は修士論文において、さまざまな閉弦の場の理論と、閉弦の場の理論を用いた D-brane の扱いに関する最近の研究についてまとめた [32]。

位相的弦および場の理論、非可換幾何学

通常の開弦の世界面の境界を実数体から p 進数体に置き換えたものは p 進数体開弦理論と呼ばれる。Ghoshal は p 進数体開弦理論の非可換な変形について、有効作用および背景の B 場と世界面との結合という二つの観点から研究を行った。その結果、可換な理論と無限大の非可換性をもつ理論とをつなぐような一群のソリトンが得られた。 p を 1 にする極限においてこれらは通常の開弦理論のソリトンに一致している。タキオンの相関関数の変化や、射影不変性についても解析を行った [10]。さらに川野と Ghoshal は、定数の 2 階反対称テンソルを背景場にもつ平坦な時空上の p 進数体開弦理論を考察した [17]。通常の開弦理論と同様に、形式的には非可換な時空上での開弦理論になっているように見える 2 階反対称テンソル場への相互作用項を見つけることができた。しかしながら、この相互作用項は、通常の開弦理論の世界面にあるメビウス変換に関する対称性に相当するものを破ってしまっているために、あまり好ましいものではないことがわかり、その項による時空の低エネルギー有効作用への効果は非可換な効果を生み出すだけではなく、さらに他の非局所的な項を生成してしまうことも明らかになった。

市川は、D-brane の物理を始めとした弦理論の非摂動的な性質を非自明な背景下において、非可換幾何学による記述することの可能性を考察し、学位論文にまとめた [29]。

桜井は昨年に引き続き、Topological vertex の量子

可積分系的な構造を説明するために、代数曲線上の主 G バンドル (Hitchin 系) の Beilinson-Drinfeld による量子化・量子変形の物理的・代数幾何学的な意味を調べた [54]。また、そこから導かれる chiral de Rham complex とループ空間の K 理論 (モチーフ積分) を用いてシンプレクティック不変量を説明することや、Fano 3-fold を含む位相的 M 理論の拡張の可能性を考えた [61]。

井沢は池田とともに、Poisson シグマ模型を 2 形式で拡張した非線型ゲージ理論について検討し、3 次元から 2 次元への reduction によって得られる模型が相当する構造を持つことを示して、Courant algebroid との関連を考察した [14]。

超対称ゲージ理論、AdS/CFT 対応

d 次元の共形場理論は $d+1$ 次元の AdS 空間上の弦理論と等価であると考えられており、AdS/CFT 対応と呼ばれている。この対応は共形対称性がない、より一般の場の理論へも拡張され、ゲージ/重力対応とも呼ばれている。

近年、ある種の 4 次元共形場理論 (CFT) が可解スピノ鎖と同等であることが分かってきた。その可解スピノ鎖を解いて CFT のスペクトルを求め、AdS 上の半古典的な弦のスペクトルと同定することにより、AdS/CFT の検証が盛んに行われてきた。井手口は、オービフォールドの原点上に D-ブレーンを多数置いた模型に対して、CFT が可解スピノ鎖と対応することを示し、スペクトルが弦理論側と CFT 側で一致することを示した。[11]

岡村は修士論文において、 $AdS_5 \times S^5$ 内の spinning string と $\mathcal{N} = 4$ 超対称 Yang-Mills 理論に付随したスピノ鎖模型との対応について近年の発展をまとめた [33]。

今村はゲージ/重力対応において、ある種の $\mathcal{N} = 1$ 超対称ゲージ理論のバリオンに対応する D ブレーン配位について研究した [18]。SU(N) ゲージ理論におけるバリオンは N 個のクォークが QCD string と呼ばれるひも状の物によって結ばれている束縛状態であるとみなすことができるが、この QCD string は曲がった空間の中での D-ブレーンとして表されることが知られている。 N 個のクォークを QCD string によってつなぐためには string の枝分かれを考える必要がある。今村は、この、枝分かれを持つ D ブレーン配位のエネルギーを数値的に計算した。また、Maldacena-Nunez 解と呼ばれる古典解の上ではこのエネルギーを解析的に計算できることを示した。

標準模型より高いスケールでは、現象論的には 4 次元 $N=1$ 超重力理論で、無質量無荷電粒子を持たないような理論になっているというシナリオが有望であるが、超弦理論の枠内でそのような真空をつくる方法が大量にあることがわかってきた。江口と立川はこの話題に関する一般向けのレビューを執筆した [28]。また、多パラメタのカラビヤウコンパクト化の場合に、非摂動 SU(2) のスケールが階層的にプランクスケールより小さくなる場合がどの程度あるかを調べた [56]。

超対称性をもった理論のソリトンのうち、いくつかの超対称性を保つもの (BPS ソリトン) は非摂動効果への寄与の観点から面白いが、立川は、理研の太田、東工大の坂井、新田、大橋、衛藤、五十棲とともに、8つの超対称性を持つ $U(1)^n$ ゲージ理論のドメインウォールについて研究し、そのモジュライ空間を明らかにした。また、BPS ソリトン間のさまざまな相互作用を解明した [22]。

10 年ほど前、Seiberg と Witten によって 4 次元 $N = 2$ 超対称理論の厳密な低エネルギー有効作用を間接的に決定する方法が編み出され非摂動的な力学に対して多大な進展があったが、数年前にこの結果をインスタントン積分で再現する方法が開発された。立川はこれを例外群やハイパー多重項の存在する場合に拡張した [62, 65, 66]。

八木は修士論文において、 $N=1$ 超対称ゲージ理論の非摂動効果に関する最近の発展をレビューした [37]。

1.2.2 高エネルギー現象論

素粒子の超対称模型、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)。

この SUSY-FCNC 問題の解決法の一つのとして、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 FCNC 問題を起こさない。しかしながら、そのようなミニマルな超重力理論は対称性によって実現することは困難である。そこで、伊部・井沢・柳田は、インフレーションと関連して大きな cutoff スケールが選ばれて、ミニマルな超重力理論が実現する可能性を考察し、その場合に得られる超対称性の破れの様相が自然に観測的に望ましいものになることを示した [15]。

超対称性の破れがゲージ相互作用を通じて現れる模型 (GMSB) でも FCNC は解決され得る。この模型では、グラヴィティーノが最も軽い超対称粒子であり、安定であるという特徴を持っている。伊部・柳田は [5] において、宇宙初期のエネルギー密度が右巻きニュートリノの超対称対 ($\tilde{N}$) のコヒーレントな振動によって満たされていた場合の宇宙論について議論した。この場合、 $\tilde{N}$ の崩壊によって宇宙のバリオン非対称性とグラヴィティーノから成る暗黒物質を同

時に説明出来ることを示した。特に、観測されているバリオン・暗黒物質比から、グラヴィティーノの質量が $\mathcal{O}(10)$ MeV であることが予言されることを示した。また、伊部・戸部・柳田は [23] において、GMSB における非常に軽いグラヴィティーノ ($\mathcal{O} \lesssim 16$ eV) の可能性について議論した。この場合、超対称性の破れを伝える伝達粒子のなかに $\mathcal{O}(10)$ TeV 程度の安定なものが含まれることを予言した。その $\mathcal{O}(10)$ TeV 程度の安定粒子は、現在観測されている銀河中心からの高エネルギー γ 線を説明する可能性がある。

また、SUSY-FCNC 問題の他の解決法として、スケールアノマリーを通して超対称性の破れが現れる模型 (AMSB) が考えられている。しかしながら、AMSB ではスレプトンの二乗質量が負になってしまうという問題がある。この問題の一つの解決策として、AMSB による超対称性の破れの現れ以外に超対称の破れを持つ超対称ゲージ多重項との相互作用を導入することで解決されることが分かっている。伊部・北野・村山・柳田は、この模型ではニュートリノの質量を説明するのに重要な右巻きニュートリノを導入したときに生じるレプトンフレーバーの破れが他の超重力理論などに比べて小さくなることを示した [4]。また、伊部・北野・村山は [21] において、この模型における電弱対称性の破れを詳細に調べた。その結果、ヒッグスセクターを拡張することで、現象論と矛盾しない電弱対称性の破れを実現することが可能であることを示した。

新原は、修士論文において AMSB におけるスレプトン問題についてまとめた。さらに、100TeV 程度の重さの粒子を加えることでこの問題が解決され得るという新しい可能性についても考察した [34]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Nakayama, “Liouville field theory: A decade after the revolution,” *Int. J. Mod. Phys. A* **19**, 2771 (2004).
- [2] I. Kishimoto and Y. Matsuo, “Cardy states as idempotents of fusion ring in string field theory,” *Phys. Lett. B* **590**, 303 (2004).
- [3] T. Eguchi and Y. Sugawara, “ $SL(2, \mathbb{R})/U(1)$ supercoset and elliptic genera of non-compact Calabi-Yau manifolds,” *JHEP* **0405**, 014 (2004).
- [4] M. Ibe, R. Kitano, H. Murayama and T. Yanagida, “Viable supersymmetry and leptogenesis with anomaly mediation,” *Phys. Rev. D* **70**, 075012 (2004).
- [5] M. Ibe and T. Yanagida, “A solution to the baryon and dark-matter coincidence puzzle in a N -tilde dominated early universe,” *Phys. Lett. B* **597**, 47 (2004).
- [6] G. Bertoldi, S. Bolognesi, M. Matone, L. Mazzucato and Y. Nakayama, “The Liouville geometry of $N = 2$ instantons and the moduli of punctured spheres,” *JHEP* **0405**, 075 (2004).

- [7] Y. Imamura, F. Koyama and R. Nobuyama, “Ricci-flat deformation of orbifolds and localized tachyonic modes,” JHEP **0411**, 042 (2004)
- [8] D. Ghoshal, S. Mukhi and S. Murthy, “Liouville D-branes in Two-Dimensional Strings and Open String Field Theory,” JHEP **0411**, 027 (2004)
- [9] Y. Nakayama, Y. Sugawara and H. Takayanagi, “Boundary states for the rolling D-branes in NS5 background,” JHEP **0407**, 020 (2004).
- [10] D. Ghoshal, “Exact noncommutative solitons in p -adic strings and BSFT,” JHEP **0409**, 041 (2004).
- [11] K. Ideguchi, “Semiclassical strings on $AdS(5) \times S^{*5}/Z(M)$ and operators in orbifold field theories,” JHEP **0409**, 008 (2004).
- [12] Y. Nakayama, “Crosscap states in $N = 2$ Liouville theory,” Nucl. Phys. B **708**, 345 (2005).
- [13] I. Kishimoto and Y. Matsuo, “Cardy states, factorization and idempotency in closed string field theory,” Nucl. Phys. B **707**, 3 (2005).
- [14] N. Ikeda and Izawa K.-I., “Dimensional Reduction of Nonlinear Gauge Theories,” JHEP **0409**, 030 (2004).
- [15] M. Ibe, Izawa K.-I. and T. Yanagida, “Realization of Minimal Supergravity,” Phys. Rev. **D71**, 035005 (2005).
- [16] G. Bertoldi, S. Bolognesi, G. Giribet, M. Matone and Y. Nakayama, “Zamolodchikov relations and Liouville hierarchy in $SL(2,R)(k)$ WZNW model,” Nucl. Phys. B **709**, 522 (2005).
- [17] D. Ghoshal and T. Kawano, “Towards p -Adic String in Constant B -field,” Nucl. Phys. **B710**, 577 (2005).
- [18] Y. Imamura, “On String Junctions in Supersymmetric Gauge Theories,” Prog. Theor. Phys. **112**, 1061 (2004).
- [19] T. Eguchi and Y. Sugawara, “Conifold type singularities, $N = 2$ Liouville and $SL(2;R)/U(1)$ theories,” JHEP **0501**, 027 (2005).
- [20] Y. Nakayama, K. L. Panigrahi, S. J. Rey and H. Takayanagi, “Rolling down the throat in NS5-brane background: The case of electrified D-brane,” JHEP **0501**, 052 (2005).
- [21] M. Ibe, R. Kitano and H. Murayama, “A viable supersymmetric model with UV insensitive anomaly mediation,” Phys. Rev. D **71**, 075003 (2005).
- [22] M. Eto, Y. Isozumi, M. Nitta, K. Ohashi, K. Ohta, N. Sakai and Y. Tachikawa, “Global Structure of Moduli Space for BPS Walls,” Phys. Rev. **D71**, 105009 (2005).
- [23] M. Ibe, K. Tobe and T. Yanagida, “A gauge-mediation model with a light gravitino of mass $O(10)$ -eV and the messenger dark matter,” to appear in Phys. Lett. B.
- (会議抄録)
- [24] T. Eguchi, “Modular Bootstrap of Boundary $N=2$ Liouville Theory”, contribution to the proceedings of strings 2004, June 28-July 2, Paris, Comptes Rendus Physique **6**, 209 (2005).
- [25] 岸本 功, “Cardy states as idempotents of fusion ring in string field theory,” 基研研究会「場の理論 2004」研究会報告, 素粒子論研究 **110-3**, C-48 (2004).
- [26] 信山 竜二, 「Orbifold の変形と閉弦のタキオンモード」基研研究会「場の理論 2004」研究会報告, 素粒子論研究 **110-3**, C-55 (2004).
- (国内雑誌)
- [27] 松尾 泰, 「弦理論とゲージ理論」, パリティ 2005 年 1 月号.
- [28] 江口 徹, 立川 裕二, 「超弦理論におけるランドスケープ問題」, 数理科学 2005 年 4 月号.
- (学位論文)
- [29] K. Ichikawa, “A Noncommutative Description of D-branes on Orbifolds.”
- [30] H. Takayanagi, “Boundary states for rolling D-branes in NS5-background.”
- [31] E. Watanabe, “Nonlinear relations among boundary states in supersymmetric closed string field theories.”
- (修士論文)
- [32] 磯野 裕, 「D-brane と閉弦の場の理論」
- [33] 岡村 圭祐, 「Gauge/String 双対性としての Spin chains/Spinning strings 対応」
- [34] 新原 祐喜, 「アノーマリーによる超対称性の破れの伝播」
- [35] R. Suzuki, “Boundary states in curved backgrounds.”
- [36] 戴 大盛, 「タキオンのソリトン配位としての D ブレイン」
- [37] 八木 太, 「 $N=1$ 超対称ゲージ理論の非摂動効果と Dijkgraaf-Vafa の方法」
- (著書)
- [38] 「素粒子の超弦理論」, 江口 徹, 今村 洋介, 岩波講座・物理の世界, 2005 年.
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [39] T. Eguchi, “Modular Bootstrap of Boundary $\mathcal{N} = 2$ Liouville Theory,” Avant strings2004, IHES, Paris, 6/19-6/26, 2004.
- [40] T. Eguchi, “Modular Bootstrap of Boundary $\mathcal{N} = 2$ Liouville Theory,” strings 2004, College de France, Paris, 6/27-7/2, 2004.
- [41] Y. Matsuo, “Boundary states as solutions of closed string field theory,” workshop “String Field Theory Camp”, Banff, Canada, 7/11-7/24, 2004.

- [42] T. Eguchi, “Geometry of $\mathcal{N} = 2$ Liouville Theory,” Ecole Normale Supérieure, Paris, March 2, 2005.
- [43] Y. Sugawara, “D-branes Falling into 2-dimensional Black-Hole and Closed String Radiation,” Workshop “Common Trends in String Theories and Integrable Theories,” Ewha Womans Univ. Seoul, 3/4-3/5, 2005.
- [44] Y. Nakayama, “Effective gauge degrees of freedom and the (non)existence of the glueball superpotential,” Workshop on nonperturbative gauge dynamics, International school for advanced studies (SISSA), Trieste, Italy. 3/10-3/12, 2005.
- [45] Y. Matsuo, “Cardy states as idempotents of fusion ring in closed string field theory,” Saclay, France, March 2005.
- (国内会議)
- 一般講演
- [46] 伊部 昌宏, “A solution to the baryon and dark-matter coincidence puzzle in a $\tilde{N}$ dominated early universe,” 素粒子物理学の進展, 京都大学基礎物理学研究所, 2004 年 6 月.
- [47] 岸本 功, “Cardy states as idempotents of fusion ring in string field theory,” 場の量子論 2004, 京都大学基礎物理学研究所, 2004 年 7 月.
- [48] 信山 竜二, 「Orbifold の変形と閉弦のタキオンモード」, 場の量子論 2004, 京都大学基礎物理学研究所, 2004 年 7 月.
- [49] 高柳 博充, “Boundary states for supertubes,” 場の量子論 2004, 京都大学基礎物理学研究所, 2004 年 7 月.
- [50] 渡辺 英徳, 「閉弦の場の理論の構造」, 2004 年三者若手夏の学校, パノラマランド木島平, 2004 年 8 月
- [51] 井手口 恒太, 「 $AdS_5 \times S^5/Z_M$ 上の半古典的な弦とオービフォルド場の理論のオペレータ」, 日本物理学会, 高知, 2004 年 9 月
- [52] 小山 文一, “Ricci-flat deformation of orbifolds and localized tachyonic modes,” 日本物理学会, 高知大学, 2004 年 9 月
- [53] 中山 優, “The Liouville Geometry of $N=2$ Instantons and the Moduli of Punctured Spheres,” 日本物理学会, 高知大学, 2004 年 9 月
- [54] 桜井 真「Topological chiral algebra を用いた、topological vertex と geometric transition の研究」, 日本物理学会, 高知大学, 2004 年 9 月
- [55] 菅原 祐二: “Non-compact Gepner Models,” 日本物理学会, 高知大学, 2004 年 9 月.
- [56] 立川 裕二, 「多パラメタモデルにおける真空数え上げ」, 日本物理学会, 高知大学, 2004 年 9 月.
- [57] 高柳 博充, “Worldsheet description of D-brane dynamics near NS5-brane,” 日本物理学会, 高知大学, 2004 年 9 月.
- [58] 渡辺 英徳, 「超対称閉弦の場の理論における冪等方程式」, 日本物理学会, 高知大学, 2004 年 9 月.
- [59] 井手口 恒太, “Semiclassical strings on $AdS_5 \times S^5/Z_M$ and operators in orbifold field theories,” 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, 2004 年 12 月.
- [60] 中山 優, “USO and Zamolodchikov relations,” 日本物理学会, 東京理科大学, 2005 年 3 月.
- [61] 桜井 真, 「位相的弦理論のモジュライ空間と Hitchin 系を用いた位相的 M-理論について」, 日本物理学会, 東京理科大学, 2005 年 3 月.
- [62] 立川 裕二 “E, F, G of Instantons,” 日本物理学会, 東京理科大学, 2005 年 3 月.
- 招待講演
- [63] 江口 徹, 「ネクラソフの公式とその周辺」, 場の量子論 2004, 京都大学基礎物理学研究所, 2004 年 7 月.
- [64] 江口 徹, 「 $N=2$ 境界リュービル理論」, 大阪大学研究会, 2004 年 9 月.
- [65] 立川 裕二, “Instanton Counting and Five-Dimensional Chern-Simons Terms,” 研究集会 “Mathematical Aspects of String Theory,” 京大理学部数学科, 2004 年 7 月.
- [66] 立川裕二, 「ネクラソフ予想, インスタントン数え上げとその周辺」研究集会「インスタントンの数理と物理」, 名古屋大学多元数理研究科, 2005 年 2 月.
- [67] 江口 徹, 「Flux Vacua—弦理論は正しい真空を選ぶか?」, 立教大学研究会, 2005 年 2 月.
- [68] 菅原 祐二, “ $N=2$ Liouville, $SL(2)/U(1)$, and Related Topics,” 「弦理論研究会」, 立教大学, 2005 年 2 月
- [69] 菅原 祐二, “D-branes Falling into 2-dimensional Black-Hole and Closed String Radiation,” KEK 理論研究会 2004, KEK, 2005 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、櫻井研究室)

原子核実験研究室は、酒井(英)研究室、早野研究室、櫻井研究室の3研究室で構成される。互いに密接に連絡を取りながら、原子核物理を中心とし、原子物理、素粒子物理などとの境界分野も含めた領域の実験研究を行っている。

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。実験装置として、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。今年度は、300 MeVにおける (p, n) 反応のガモフ・テラー単位断面積の精密測定を遂行した。また、陽子-中性子系のスピンを用いてベルの不等式の検証実験を来年度に予定しており、中性子偏極度計のテスト実験を行った。

早野研究室では、反水素原子(反陽子と陽電子でできた反物質)、反陽子ヘリウム原子(ヘリウム原子核、反陽子、電子の三体系)などの奇妙な原子(エキゾチック原子)、および、 K^- 中間子や η 中間子が原子核に深く束縛された状態の観測を行うことにより、CPT対称性の実験的検証、原子核中でのカイラル対称性の部分的回復などの物理学における基本的対称性を研究している。2004年度の成果として特筆されるのは、高エネルギー加速器研究機構で行われた、 K^- 中間子とヘリウム原子核の深い束縛状態の探索実験において、これまで知られていなかったバリオン数3、全アイソスピン1、ストレンジネス-1、電荷0の新種の粒子-ストレンジトライバリオン $S^0(3115)^-$ が発見されたことである。この粒子が、 K^- 中間子が、ヘリウム原子核に深く束縛された状態であるという解釈が正しければ、通常の原子核よりはるかに密度の高い原子核が作られている可能性があり、新聞等でも大きく報道された。[98, 99, 100, 101, 102]

櫻井研究室では、天然に存在する安定核よりも中性子数や陽子数が極端に多い不安定核を生成し、その高アイソスピンに由来するエキゾチックな性質を探る実験研究を行っている。特に中性子過剰核に現れる特異な現象に着目し、中性子過剰核のハロー構造や殻構造の変化(魔法数の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 (RIKEN

Projectile-fragment Separator)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。

2.1.1 300 MeVにおける (p, n) 反応のガモフ・テラー単位断面積の精密測定(酒井研究室)

高密度な中性子星の内部では、パイ中間子によるボーズ・アインシュタイン凝縮相が発現していると言われてきた。このパイ中間子凝縮相の臨界密度を定量的に推定するためには、核内パイ中間子相関の振る舞いを決めるランダウ・ミグダル相互作用の未知係数 $g'_{N\Delta}$ を実験的に求める必要がある。

遷移量子数 $\Delta S = \Delta T = 1, \Delta L = 0$ を持つガモフ・テラー(GT)型遷移について、総遷移強度を実験的に求め、池田の和則値 $3(N-Z)$ からの減少(クエンチング)を精度良く求めると、 $g'_{N\Delta}$ を決定することができる。クエンチングの度合を表すGT抑制係数は β^- 側反応の総遷移強度と β^+ 側反応の総遷移強度の差($S_{\beta^-} - S_{\beta^+}$)を和則値で割った値として定義される。我々は、既に $^{90}\text{Zr}(p, n)^{90}\text{Nb}$ 反応、 $^{90}\text{Zr}(n, p)^{90}\text{Y}$ 反応の測定により β^- 側、 β^+ 側双方の高精度データを取得済みであり、導出された和則値は $Q = 0.88 \pm 0.06 \pm 0.16$ であった。[7]

この和則値のもっとも大きい誤差(± 0.16)は、微分散乱断面積とGT遷移強度を結び付ける比例係数(GT単位断面積)のもつ誤差に起因する。より正確な議論を行うために300 MeVにおいて ^{90}Zr のGT単位断面積を導出する必要があった。

GT単位断面積を求めるには、 β 崩壊の測定などでGT遷移強度が既知の遷移に対応する微分散乱断面積を測定すればよい。一般に、中重核においては遷移状態の密度が高いため、特定の遷移の微分散乱断面積のみを導出するには、散乱粒子のエネルギーを高精度で測定する必要がある。このために開発した中性子検出器NPOL3を用いて、大阪大学核物理研究センター中性子飛行時間測定施設において、入射エネルギー300 MeVにおける $^{58}\text{Ni}(p, n)$ 、 $^{70}\text{Zn}(p, n)$ 、 $^{118}\text{Sn}(p, n)$ 、 $^{120}\text{Sn}(p, n)$ 反応のスペクトルを取得し、それぞれ、娘核の基底状態への遷移に対応する微分散乱断面積の値を高精度で導出した。つぎに、得られた微分散乱断面積と対応する遷移のGT遷移強度を用いて300 MeVにおけるGT単位断面積をそれぞれ 4.2 ± 0.3 mb/sr、 3.8 ± 0.4 mb/srと求めた。結果を図2.1 aに示す。これらの結果から、質量数58から120におけるGT単位断面積の標準値を300 MeVにおいてはじめて導出し、この質量依存性に基づき、 $^{90}\text{Zr}(p, n)$ のGT単位断面積 3.45 ± 0.12 mb/srを得た。

この結果、従来用いていたGT単位断面積の中心値が正しかったことが300 MeVにおいて直接確認でき、同時に、誤差を大幅に縮小した。 $^{90}\text{Zr}(p, n)^{90}\text{Nb}$

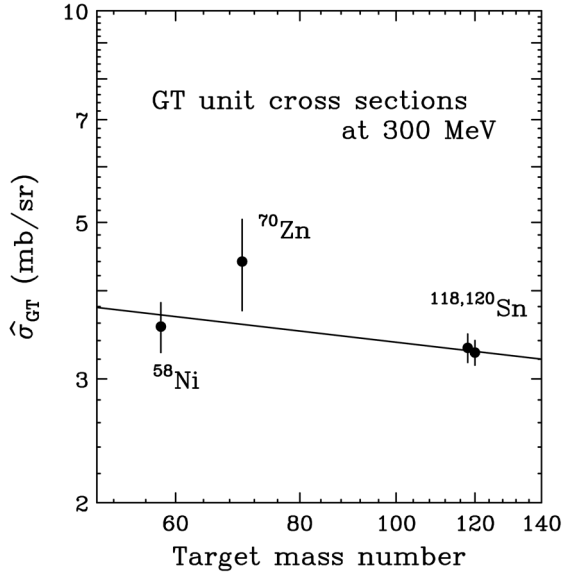


図 2.1 a: Gamow-Teller unit cross sections as a function of the target mass number.

反応、 $^{90}\text{Zr}(n,p)^{90}\text{Y}$ 反応の測定により求めた和則値から得られる $g'_{N\Delta}$ の推定値は 0.25 ± 0.10 となり、パイ中間子凝縮相の臨界密度は、通常核の密度の2倍程度と従来考えられてきた密度の約半分であることが推定される。また、GT 単位断面積の標準値が得られたことで、300 MeV における (p,n) 反応が、GT 遷移強度の最も定量的なプローブとして確立された。[40, 47, 48]

2.1.2 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 (EPR 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なわれ、ほとん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い。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を行った。また、中性子-陽子の異粒子の系でも実験準備を進めている。

備を進めている。

2 陽子系のスピンを用いたベルの不等式の検証

2陽子のスピンを用いたベルの不等式の検証実験を理化学研究所加速器研究施設において行った。270 MeV の重陽子ビームを液体水素標的に入射し、 $^1\text{H}(d, ^2\text{He})n$ 反応によって、スピン1重項状態にある陽子対 (^2He と呼ぶ) を生成した。 ^2He は磁気スペクトロメータ SMART で運動量分析され、焦点面に設置した陽子偏極度計 EPOL で検出した。EPOL では、 ^2He を構成する2個の陽子のスピンの向きが同時に観測される。

測定結果をベルの不等式と比較するために、2陽子のスピン相関の強さを表すスピン相関関数 $C(\phi) = \langle \sigma_1 \cdot \vec{a} \sigma_2 \cdot \vec{b} \rangle$ を導出した。ここで、 $\vec{a}$ 、 $\vec{b}$ はそれぞれ陽子1、陽子2のスピンの大きさを測定する方向の単位ベクトルであり、 ϕ は $\vec{a}$ 、 $\vec{b}$ の間の角度である。この関数は2陽子のスピンの符号の積の期待値に相当し、量子力学では $C_{QM}(\phi) = -\cos \phi$ となる。一方、「隠れた変数」の理論では、ベルの不等式 $|C_{HV}(\phi)| < 1 - \frac{2}{\pi}\phi$ を満たさなければならない。 $0^\circ < \phi < 90^\circ$ の範囲で $|C_{QM}(\phi)| > |C_{HV}(\phi)|$ であるため、測定で得られた $|C(\phi)|$ がベルの不等式を破れば、「隠れた変数」の理論を否定することができる。

図 2.1 b に今回の実験で得た $C(\phi)$ を示す。実験結果は、 $\phi = 45^\circ$ において、ベルの不等式を 2.9σ の精度 (信頼度 99.6%) で破っており、量子力学の予言値の曲線に非常によく一致している。これは、2陽子が巨視的な距離 (この実験では 40 cm) だけではないてもスピン1重項にもつれた状態が維持されていることを示している。[28, 41]

陽子-中性子系のスピン相関測定に向けた中性子偏極度計の開発

いままでは EPR パラドックスに関する実験は、前項の測定を含め、専ら同種粒子についてなされてきた。そこで、異種粒子によるベルの不等式の検証実験を理化学研究所加速器施設で計画している。ここでは、 $^2\text{H}(d, pn)pn$ 反応により、スピン1重項状態の陽子-中性子対を大量に生成し、それぞれのスピンを測定してその相関からベルの不等式を検証する。そのため新たに中性子偏極度計 NPOL の開発に着手した。

今年は、小規模の中性子偏極度計 NPOL を構築し、テストを行った。実験に用いた NPOL の概略を図 2.1 c に示す。NPOL は2面のプラスチックシンチレータ面から成り、それぞれが、位置分解能 ± 5 cm をもつ。したがって入射中性子の二回散乱角 (θ, ϕ) を求めることができ、散乱の非対称より入射中性子の偏極を得ることができる。NPOL の性能評価のため、 ~ 90 MeV の偏極中性子ビームを生成し、NPOL に入射した。その結果、有効偏極分解能 $A_y^n = 0.25 \pm 0.01$ 、2回散乱検出効率 $\varepsilon_n = 2.3 \times 10^{-5}$ を得た。本実験に向け、およそ10倍の検出効率をもつ NPOL を建設

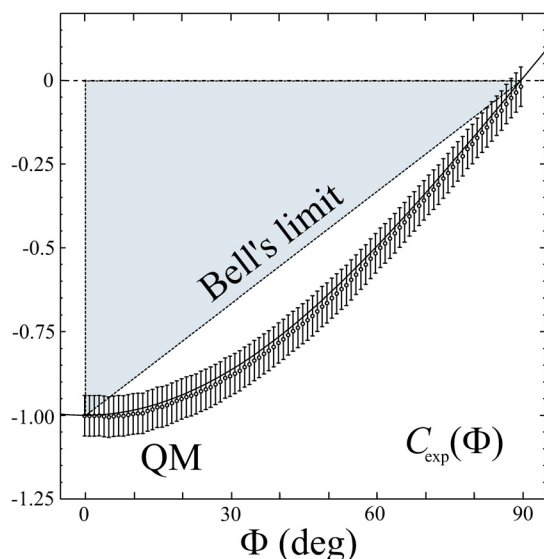


図 2.1 b: Spin correlation function $C(\phi)$. The curve shows the prediction of the quantum mechanics. The hatched region corresponds to the prediction according to Bell's inequality.

中である。

2.1.3 オルソポジトロニウムの 3 光子崩壊を用いた GHZ モデルの検証 (酒井研究室)

GHZ モデル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实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、量子力学と局所实在論の間で異なることを示している。これに対し、GHZ モデルは 3 粒子の相関を考察することで量子力学と局所实在論それぞれが予測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。

GHZ モデルの検証例に、レーザー光を用いて人工的に量子もつれを作り出した実験があり、量子力学を支持する結果が得られている。しかしながら、人工的に作り出した状態は 100% コヒーレントな状態ではないため、自然の崩壊を用いてコヒーレントな状態をつくり、測定を行うのが理想である。

我々は、オルソポジトロニウムの 3 光子崩壊の偏光相関を測定して、GHZ モデルの検証を行うことを計画している。まず、 ^{22}Na の β^+ 崩壊で放出される陽電子を密度 $\sim 0.1 \text{ g/cm}^3$ のエアロジェル中で止め、オルソポジトロニウムを生成する。次に、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

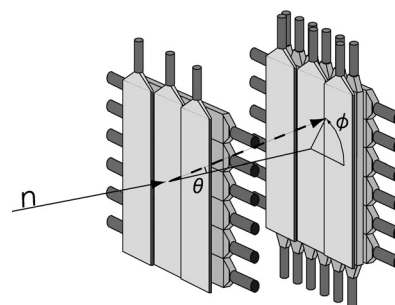


図 2.1 c: Schematic view of the neutron polarimeter. The polar angle θ and the azimuthal angle ϕ are indicated.

子の偏光を同時測定する。今年度は、コンプトン偏光度計の開発を行った。

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に捕獲体の 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。この偏光計を作成し、パラポジトロニウムの崩壊で生じる 2 光子偏光が完全相関することを利用して性能を評価した。その結果、検出効率 2.6×10^{-5} 、偏光分解能 0.57 ± 0.01 を得た。コンプトン散乱のクライン-仁科の公式を用い、検出器の配置と NaI 検出器におけるガンマ線の検出効率を現実的に考慮したシミュレーションによって得られた検出効率は 3.3×10^{-5} 、偏光分解能は、0.58 で実験値とほぼ一致している。このシミュレーションから 3 光子崩壊の事象に対する同時偏光分析確率を求めると、 2×10^{-11} と見積もられる。今後はオルソポジトロニウムをできるだけ多く生成するために線源の最適化を行い、3 光子の偏光相関の測定に移行する予定である。

2.1.4 陽子-重陽子散乱における超狭幅ダイバリオンの探索 (酒井研究室)

ダイバリオンとは 6 つのクォークにより構成される複合粒子である。量子色力学 (QCD) の範囲内で存在が予測されているが、実験的検証は得られておらず、ダイバリオンの発見は新粒子の存在を指し示すだけでなく、QCD 理論に強い制限を与えるという意味でも非常に興味深いものである。

近年モスクワの INR で陽子-重陽子散乱の質量欠損スペクトルから幅の狭いピークが 3 つ観測され、超狭幅ダイバリオンの可能性があると報告されている。超狭幅ダイバリオンとは、Pauli 原理により強い相互作用での崩壊は禁止され、電磁的相互作用によって崩壊するダイバリオンである。その崩壊幅は 1keV 以下と非常に狭く、バックグラウンドと区別しやすいため実験的に探索するのが容易であるとされている。

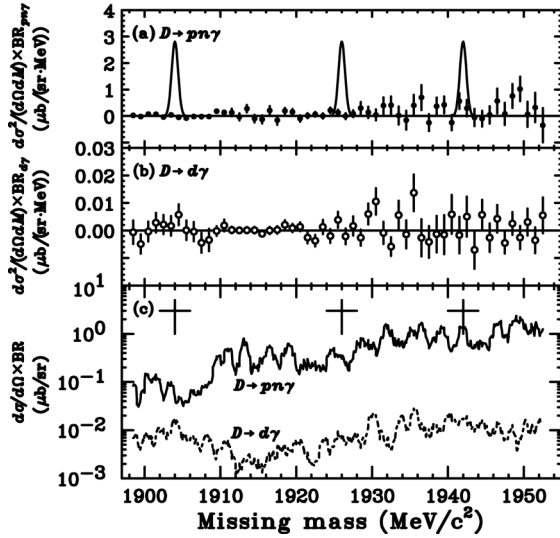


図 2.1 d: (a) Double differential cross section of the dibaryon production multiplied by the branching ratio for the $D \rightarrow pn\gamma$ channel ($BR_{pn\gamma}$). The solid curves represent the expected value on the assumption of a differential cross section of $3 \mu\text{b/sr}$. (b) Same as (a) for the $D \rightarrow d\gamma$ channel. (c) Upper limits of the dibaryon production cross section. The daggers are the cross sections obtained by the INR group.

INR のスペクトルでは、バックグラウンドが多いため、ピークの存在が決定的であるとは言い難い。そこで、我々は大阪大学核物理研究センターにて、INR と同じ運動学条件下で、より高感度の探索実験を行なった。重陽子標的として液体重水素を用い、標的起源のバックグラウンドを減少させるとともに、2 台の高分解能磁気スペクトロメータを使用することで質量分解能の向上を図った。INR で観測されたピークの質量領域を全て覆うように 1898 MeV - 1953 MeV の質量範囲で探索実験を行なった。

結果を図 2.1 d に示す。超狭幅ダイバリオンと思われる有意なピークは観測されず、我々は、INR の結果を否定するものだと考えている。実験データからダイバリオンの生成断面積の上限値を 90% の信頼度で見積もると、ダイバリオンが陽子、中性子、ガンマ線に崩壊するチャンネル ($D \rightarrow pn\gamma$) では、1898 - 1940 MeV の質量領域で $1.5 \mu\text{b/sr}$ 以下となり、INR から報告されている値 $3 \pm 2 \mu\text{b/sr}$ の半分となった。1940 - 1942 MeV の質量領域では $1 \sim 3 \mu\text{b/sr}$ となった。重陽子とガンマ線に崩壊するチャンネル ($D \rightarrow d\gamma$) では、 $0.03 \mu\text{b/sr}$ という上限値を得た。

2.1.5 反陽子ヘリウム原子・イオンのレーザー分光 (早野研究室)

反陽子ヘリウム原子 ($\bar{p}\text{He}^+$) は、反陽子、ヘリウム原子核及び電子から構成される 3 体系のエキゾティックアトムであり、ASACUSA 実験グループは、CERN の AD(反陽子減速器) において反陽子ヘリウム原子のレーザー分光実験を行っている。[11, 13, 14, 60, 61] 過去の実験において $\bar{p}\text{He}^+$ の様々な遷移エネルギーを測定し、理論との比較によって、陽子・反陽子の質量差及び電荷の絶対値の差が、相対精度で 1.0×10^{-8} より小さいという CPT 対称性精密検証の結果を得ている。また、2003 年には反陽子とヘリウム原子核から構成される反陽子ヘリウムイオン ($\bar{p}\text{He}^{2+}$) の寿命の系統的な測定を行った [17]。

2004 年は CPT 対称性の検証精度の更なる向上を目的として、以下の手法で分光を行った。まず、狭線幅・縦単一周波数 CW レーザーの周波数を、Optical Frequency Comb を用いて絶対測定・安定化した。Optical Frequency Comb は、Cs 原子時計に同期されたフェムト秒モードロックレーザーのパルス光の列を周波数の「ものさし」として利用し、周波数を測定する装置である。この周波数測定・安定化された CW レーザーをシード光として、色素セルを用いてパルス増幅 (Pulse Dye Amplification と呼ばれる) を行った。また、増幅前後のレーザーのビート周波数を測定し、増幅の際に生じる周波数変化を補正した。以上の手法により、高精度で周波数安定化された狭線幅のレーザーパルスを生成した。

図 2.1 e は、 $\bar{p}^4\text{He}^+$ の $(n, l) = (37, 35) \rightarrow (38, 34)$ の遷移に関して、2002 年と 2004 年 (preliminary) の分光の結果を比較したものである。この遷移は、反陽子の軌道角運動量と電子のスピン相互作用によって分裂が生じている遷移である。上記の手法を用いた分光の結果、市販のパルスレーザーにより分光を行った 2002 年の測定と比較して、明瞭な分裂の様子を観測することができた。今後の詳細な解析と、理論計算の精度の向上によって、CPT 対称性を以前の 10 倍近い精度で検証できるものと期待される。[73, 74, 79]

2.1.6 冷たい反水素研究 (早野研究室)

早野研究室では CERN の AD にて冷たい反水素原子の大量生成に成功した国際実験グループ ATHENA にも参加している。今年度は従来の装置に新たにレーザー装置を導入して、反水素原子を使った新しい実験へと移行している。早野研究室は本実験にてレーザー装置の導入、同装置の制御系の開発において主要な役割を担した。また平行して行われているこれまでのデータ解析による反水素原子の詳細研究においても重要な役割を果たしている。[65, 75, 76, 77, 78]

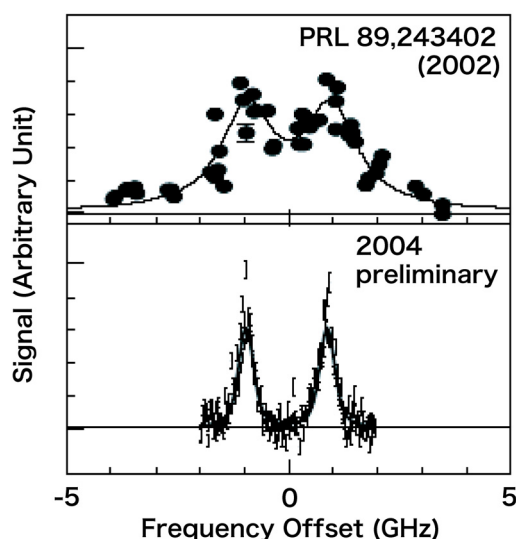


図 2.1 e: $p^4\text{He}^+$ の $(n, l) = (37, 35) \rightarrow (38, 34)$ の遷移に対する分光結果の比較。上図は市販のパルスレーザーを用いた分光 (2002 年)、下図は Pulse Dye Amplification による分光 (2004 年、preliminary)。

反水素原子のレーザー誘導生成実験

反水素原子を使った最も実現性の高い実験の 1 つとして CPT 対称性の検証実験が挙げられている。これは反水素原子の内部構造をレーザー装置で分光しこれを水素原子の値と比較することで CPT 対称性を確かめようというものである。ATHENA に於いてもこの実現を目標に、本年度はその第 1 段階として反水素原子のレーザー誘導生成実験をとり行った。

これまで「冷たい」反水素原子の生成は、その構成部品である陽電子と反陽子を長時間混ぜ合わせそれらが自然にもしくは自発的に結合することを待つ手法をとっていた。しかし、この方法では作られる反水素原子は研究の対象となるエネルギー準位の制御がされていないため次のレーザー分光へと研究を繋げることが困難である。その一つの解決方法として、レーザー光によって陽電子と反陽子を誘導的かつ放射的に結合させて反水素原子を作って、エネルギー準位の制御された反水素原子を作ることが本実験の目標である。実験は今年度の ATHENA の AD のビームタイムの大半をかけて行われ、従来の反陽子と陽電子を混ぜ合わせている領域に適切な波長と強度を持つレーザー光を照射する手法を採った。実験の理想的なパラメーターを入力した理論計算では主量子数 $n = 11$ の反水素原子は秒間最大 60 個程度作られると予想されていたが、実験の結果、このような誘導生成率は観測されなかった。2004 年度のデータの詳細な解析と結果の解釈は進行中である。

データ解析による反水素原子の詳細研究

反水素原子の生成実験に於いても未だ理解されていない重要なことが多々ある。

第一にエネルギー準位など生成後の反水素原子の様々な性格を決定づける反水素原子の生成過程が挙げられる。従来提唱されていたモデルでは反水素の生成個数やその温度依存性などの最近の結果が簡単には説明できないため、我々は生成装置内に於ける荷電粒子の振る舞いに注目した。その結果、反陽子・陽電子の混ぜ合わせ時の反陽子の冷却過程の研究 [8] やシリコン検出器を使った装置の内部での反陽子の消滅位置の研究 (図 2.1 f) [9] から装置内で 2 種の荷電粒子が不規則な運動のもとで複雑な相互作用を行っていることが分かった。一方理論の方からも実験結果を説明すべく磁場の影響を考慮した新しい 3 体過程モデルが提唱される等、これまで考慮されなかったパラメーターの重要性が認知され始めている。反水素原子生成過程の解明のため、これらの研究成果を基に装置内での様々な要因まで含めた総理解が求められる。

次に生成された反水素原子の温度がある。反陽子を加熱した特殊な状況での反水素の温度測定結果 ($> 2000 \text{ K}$) は環境温度 (15 K) よりも遥かに高温であり、どの程度「冷たい」かは依然興味の対象である。我々は反水素原子の生成位置の空間分布から温度情報を引き出すことに成功した [10]。この研究では反陽子が陽電子に冷却され熱平衡状態になる前に両者が結合していることを発見し、更に生成された反水素原子は特に磁場方向で環境温度 (15 K) よりも高く、少なくとも 100 K を超える温度で運動しているという情報を得ることができた。

上記の様に冷たい反水素研究ではいよいよ反水素原子を使つての新たな実験へと足を踏み出す一方で、現時点まで分かっていない問題も多く残されそれらを理解するための研究も日々同時に進められ成果を上げている。

2.1.7 FLAIR : 低エネルギー反陽子、イオン研究施設へ向けての開発 (早野研究室)

2004 年 1 月に、CERN の AD に続く次世代の低エネルギー反陽子施設 FLAIR の実験企画書が、GSI に提出され、2004 年 3 月にこの実験企画書は、GSI のプログラム審査委員会で発表された。企画書は、好意的に審査され、2005 年 1 月に詳細な技術的実験提案書を提出することが求められた。FLAIR は、二つの蓄積リングから成り立っており、一段目で 300 keV まで、二段目で 20 keV まで減速され、AD の 250 分の 1 のエネルギーの反陽子が供給される。FLAIR は、遅い取りだしビームを供給することができ、AD では、実現が不可能だった多くの実験が可能となる。技術的実験提案書に向けての 2004 年度の主な活動は、加速器および実験室の建設のレイアウトを作ることであった。Widmann は数回にわたって GSI を訪問し、

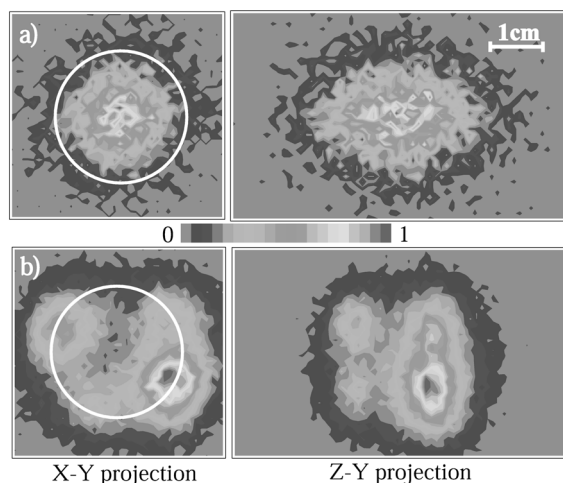


図 2.1 f: 調和型トラップに捕獲された反陽子の消滅点のイメージ。(a) は高圧、(b) は低圧。見積もられたトラップの壁の位置が、白線で示されている。図は、[9] からとられた。

この問題について議論する会議に出席した。反陽子を 300keV まで減速する一段目のリングについては、スウェーデンの Manne Siegbahn 研究所 (MSL) の CRYRING を転用することが計画されている。Widmann は、MSL とストックホルム大学を訪れ、この問題について議論した。CRYRING を FLAIR で使用するのに必要な変更点については、2005 年 1 月に提出された技術的実験提案書のために検討が行われた。[49, 50, 51, 52, 53, 57, 59]

2.1.8 η 中間子の原子核による深い束縛状態探索実験 (早野研究室)

ドイツの GSI 研究所において、2005 年に η 中間子と原子核の束縛状態探索実験が行われる予定である。この実験は、中間子の核媒質中でのふるまいを系統的に理解する事を目的として行う。これまで我々実験グループは、無反跳の反応である ($d, {}^3\text{He}$) 反応を用いて π^- 中間子と原子核の束縛状態探索実験に成功し、原子核中では、真空中に比べ、陽子の質量の起源となっているクォーク凝縮の大きさが $2/3$ に減少していることを示した。[39, 70] π^- 中間子の実験で確立されたこの無反跳反応を利用し、 η 中間子と原子核の束縛状態探索実験を行う。[68]

この実験に用いる検出器には十分な位置分解能と TOF を測定するのに十分な時間分解能の他、高エネルギー deuteron ビームによって標的核内で生成される 100MHz にのぼる Breakup 陽子を棄却する性質が必要とされる。この性質を兼ね備えたチェレンコフ検出器を開発し、これまで KEK、GSI 研究所において本実験と同様のセットアップでテスト実験を行っ

てきた。この結果、十分な位置分解能と時間分解能、そして検出すべき ${}^3\text{He}$ の検出効率を落とすことなく陽子を十分棄却する性能がある事がわかった。

本来のスケジュールでは、2004 年 1 月に本実験が行われる予定であったが、GSI 研究所の加速器の故障により中断され、2005 年 7 月に再スケジュールされた。昨年 1 月、加速器の故障が起こる前までに取ったデータを解析した結果、チェレンコフ光発光体の精度をあげることににより、さらに陽子棄却パワーをあげる事ができる事が予想されており、発光体の再製作を行っている。

2.1.9 反 K 中間子の原子核に於ける深い束縛状態の探索 (早野研究室)

反 K 中間子の原子核による深い束縛状態が観測可能な程に細い幅を持って存在するか否かは、現代のハドロン物理学において極めて重要な問題であり、現在にいたるまで活発な議論が成されている。もしもそのような状態が実在するならば、ストレンジネス核物理学の観点からは、 Λ 及び Σ ハイパー核に続く新しい $S = -1$ の核状態の発見、従って全く新しい物理の分野の地平を開拓することを意味するが、その非常に深い束縛の帰結として予想される超高密度状態の形成と、それに伴うカイラル対称性の自発的破れの部分的回復の研究可能性等、低エネルギー量子色力学に与えるインパクトも非常に大きい。

本研究室においては、赤石-山崎により理論的に予言された反 K 中間子の ${}^3\text{He}$ 原子核による深束縛状態 ${}^3_{\bar{K}}\text{H}$ (全アイソスピン 0) の探索実験 KEK-PS E471 を 2002 年から 2003 年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上の K5 ビームラインで実行し、取得データの詳細な解析の後、 ${}^4\text{He}(\text{stopped } K^-, p)$ スペクトル上に非常に有為なピーク構造を認めた。モンテカルロシミュレーションとの比較等種々の議論の結果、構造は最終的にバリオン数 3、全アイソスピン 1、ストレンジネス -1 、電荷 0、質量約 $3115\text{MeV}/c^2$ の状態 $-\text{ストレンジトライバリオン } S^0(3115)-$ の形成シグナルと解釈されたが (図 2.1 g)、この状態は赤石、山崎の予言した状態とはその 100MeV 程度も大きな束縛エネルギーの他、全アイソスピンにおいて異なっており、直ちに反 K 中間子原子核状態と見なすことは出来ず、 $\Lambda\pi NN$ 束縛状態や Σ ハイパー核の高励起状態、あるいは 9 構成子クォーク状態等種々の解釈が提案されている。[12, 56, 67]

2.1.10 中性子過剰核の安定性 (櫻井研究室)

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

状態に $3/2^-$ のスピンを持つが、第一励起状態のスピンに対しては実験結果がなく、 $5/2^-$ もしくは $7/2^-$ であるとする理論予想があるのみである。第一励起状態のスピンが $5/2^-$ 、 $7/2^-$ のどちらであるかによって、基底状態に遷移する場合、M1 遷移、E2 遷移のどちらが支配的であるかがきまる。簡単なモデル計算によると、M1 遷移が 1ps 程度の早い寿命を持つのにに対し、E2 遷移が 100ps 程度の長い寿命を持つことから、今回の実験結果から、M1 遷移が支配的であることがわかる。第一励起状態のスピンが、 $7/2^-$ の場合、M1 遷移は起こらないため、第一励起状態のスピンを $5/2^-$ であるとする理論予想を支持する結果となった。今後さらに解析を進め、 ^{17}B の励起状態についても寿命を決定する予定である。

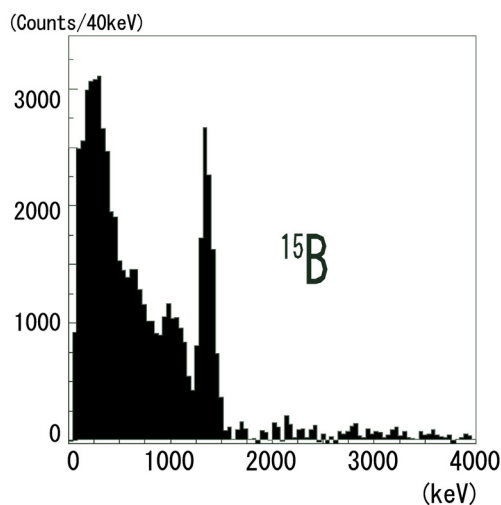


図 2.1 h: Doppler-corrected γ -ray energy spectrum of ^{15}B observed in the fragmentation of ^{18}C .

^{17}C 励起状態の寿命測定

中性子過剰な炭素同位体である ^{17}C は、中性子ハローなどの視点から近年精力的に構造研究がなされてきた。また、近年の ^{16}C における $B(\text{E}2)$ の異常抑制の発見により、その近傍核として新たな重要性を帯びつつある。

現在までの研究から、 ^{17}C には 207 keV および 329 keV に束縛励起準位が存在し、両準位は基底状態へ γ 線をともなって脱励起することが確認されている。殻模型計算によれば、これらの三つの束縛状態は、 $1/2^+$ 、 $3/2^+$ 、 $5/2^+$ のいずれかであることが予測されているが、基底状態に関しては J^π が $3/2^+$ であることが実験的に分かっている。しかしながら、二つの励起状態の J^π および波動関数に関する実験的な情報は現在のところ得られていない。そこで ^{17}C における 207 keV および 329 keV の束縛励起準位と基底状態の間の電磁遷移確率を決定するため、これら二つの励起準位の寿命を RSM により測定した。原子核の低励起状態間の電磁遷移確率は、電磁相互作用のみで記述される物理量であり、実験値を得る

ことで始状態と終状態の波動関数に関する厳密な議論が可能になる。実験では、不安定核 ^{18}C ビームを二次標的である ^9Be に照射し、標的中で起こる ^{18}C の中性子剥離反応によって、 ^{17}C の励起状態を生成した。そして、脱励起 γ 線を標的周辺に設置した 13 層 150 個の NaI(Tl) 群で観測し、RSM を適用することで、励起状態の寿命を決定した。図 2.1 i に、実験で観測したガンマ線スペクトラムを示す。

実験データとモンテカルロ・シミュレーションとの比較から、第一励起準位の平均寿命として約 400ps 程度、第二励起準位の平均寿命として 20 ~ 50ps という初期結果が得られた。殻模型計算によれば、これらの遷移は、M1 あるいは E2 が支配的な遷移であると予測されている。寿命のオーダーから、この二つの遷移は M1 遷移が支配的な過程であることがわかった。[86]

今後、最終的な寿命の値を確定し、理論計算と比較することで ^{17}C の核構造に関して詳細な議論を行う予定である。

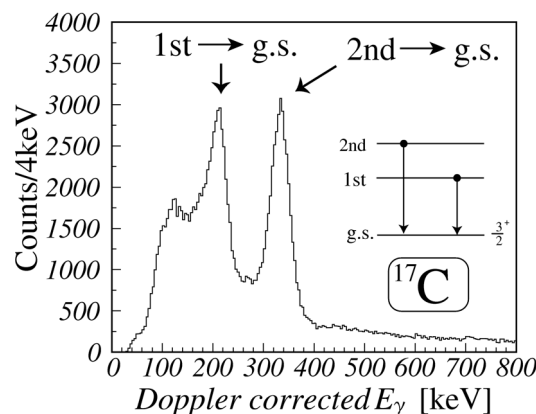


図 2.1 i: Doppler-corrected γ -ray energy spectrum of ^{17}C observed in the fragmentation of ^{18}C .

陽子非弾性散乱

^{16}C の陽子非弾性散乱

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低励起 2^+ 状態を励起する場合は、核力の強い陽子-中性子間力を反映して、中性子側が強く励起されと考えられるため、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と考えられる。陽子非弾性散乱から求められる変形度と、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。

我々は、 ^{16}C における四重極集団性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。

^{16}C は、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。実験では、 ^{16}C ビームを液体水素標的に入射させ、第一励起状態を励起し、脱励起 γ 線の収量から断面積を求めた。この実験値を再現する変形パラメータを光学ポテンシャル模型を用いて求めた。寿命から求めた陽子分布の変形パラメータと比較することにより、中性子側の寄与が陽子側のそれよりおよそ 5 倍大きいことを明らかにした。現在、本研究成果については論文を投稿中である。

^{78}Ni 近傍核の陽子非弾性散乱

陽子非弾性散乱は、不安定核の励起状態を探索する最も効率のよい手法としても重要である。これは、標的の質量数が小さいため、同じエネルギー損失を与える他の標的等と比べ、最大二桁程度標的数を大きくすることが出来るためである。したがって、強度の非常に弱い不安定核ビームを対象とした実験に特に有効な核分光手段となる。[22, 25, 33]

我々は、殻構造の変化・集団性に関して注目されている二重閉殻核 ^{78}Ni 近傍の ^{74}Ni 、 ^{78}Zn を対象に、陽子非弾性散乱による γ 線分光研究を行っている。 $N=40$ 、 50 の同調核では、中性子過剰度にしたがって変形が促進し、魔法数を持った硬い核からソフトな核に移行し、「魔法数の喪失」が観測される可能性がある。

実験は、米国ミシガン州立大学・国立超電導サイクロトロン研究所 (NSCL) にて、日米国際共同研究として遂行された。本年度は、入射粒子、散乱粒子識別に関する解析をほぼ終了し、 ^{74}Ni 、 ^{78}Zn の低励起 2^+ 状態のエネルギーを決定した。遷移強度に関する解析、考察を深め、 ^{78}Ni 周辺の殻構造の振る舞いに関して議論する予定である。[83, 89]

なお、本研究は、日本学術振興会・日米科学協力事業共同研究（日本側代表者：櫻井）によって推進された。

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、 $Z \geq 10$ 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、 $^{78-82}\text{Ge}$ の電気四重極遷移確率の導出を行った。周辺原子核の電気四重極遷移確率の測定値との比較から、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。[54]

2.1.12 ベータ分光を用いた核構造研究 (櫻井研究室)

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 $10 \sim 20$ 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。

陽子過剰核 ^{46}Cr のベータ崩壊

我々は、陽子過剰核 ^{46}Cr に注目し、 ^{46}Cr のガモフテラー (GT)- β 崩壊の測定実験を行った。この ^{46}Cr の GT- β 崩壊は、娘核の ^{46}V がアイソスピン自由度が最も対称な $N=Z$ 核であるため、その核内相互作用や、核力のアイソスピン対称性について調べるのに適している。また、 ^{46}Cr の GT- β 崩壊は、ウィグナーの超多重項理論を検証する上でも有用である。

実験では、生成された ^{46}Cr を止め、そこから放出される β 線と γ 線の同時測定を行った。その結果、 ^{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 993 keV の 1^+ 状態への崩壊の $\log ft$ を 3.6 ± 0.2 と決定することができた。現在、結果について論文を投稿中である。

また、 β 遅延ガンマ線を測定する際の S/N 比を向上させるため BGO を用いたコンプトンシールドを作成し、性能テストを行った。これにより、S/N がほぼ倍に改善することが確認された。

今後は、中性子ドリップライン近傍の炭素、窒素、酸素同位体を対象に $\beta-\gamma$ 分光研究を展開し、これらの領域での核構造を系統的に調べる予定である。

陽子過剰核 ^{24}Si のベータ崩壊

^{24}Si はドリップライン近傍の陽子過剰核である。 ^{24}Si はアイソスピン $T_z = -2$ の系列の比較的軽い核の中で、唯一 β 崩壊様式が不完全な核であった。そこで娘核である $T_z = -1$ の系列と鏡映核である $T_z = 1$ の系列を比べて、アイソスピン対称性の成否を系統的に議論するためには、 ^{24}Si の崩壊様式を定めることが不可欠であった。 ^{24}Si においては β 崩壊の Q 値が 10.8 MeV と大きいため、 β 崩壊時に、陽子放出を伴う遷移の分岐比が無視できず、 β 遅延陽子と、 β 遅延ガンマ線を共に測定することが必要となる。多数の遷移に対する分岐比を精度良く決定することで、娘核 ^{24}Al の核構造について詳細な議論を展開することが可能になる。

我々は理化学研究所において ^{24}Si の β - p 、 β - γ 核分光実験を行った。 β 遅延陽子の測定を行うにあたっては、ガス ΔE 検出器とシリコン E 検出器とを組み合わせた大立体角の ΔE - E 測定システムを開発した。このシステムを用いて、図 2.1 j に示すように、 β 線と陽子を 2 次元プロットで分離することに成功した。

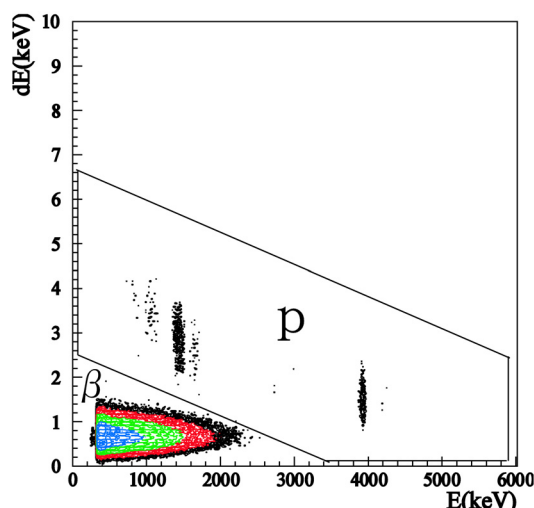


図 2.1 j: The ΔE - E plot obtained by the array of the gas and silicon telescopes. Protons and β rays are well separated from each other.

ΔE - E 情報を用いた粒子識別により、 β 線バックグラウンドを除去し、高精度の陽子スペクトルを得ることに成功した (図 2.1 k)。また、今回の測定では非常に高い統計を得ることができたので、それぞれの陽子ピークについて崩壊曲線を解析し、計 12 本のピークを ^{24}Si の遅延陽子ピークであると同定した。

β 遅延 γ 線の測定は、Clover Ge 検出器とコンプトン散乱によるバックグラウンドを軽減するための BGO シールドを組み合わせた検出器系を用いて行った。この測定では ^{24}Si の娘核 ^{24}Al の第 2 励起準位からの脱励起 γ 線 (664 keV) を初めて観測した。

β 遅延陽子、 γ 線の両測定の結果を合わせて解析することによって、観測した ^{24}Si の β 崩壊遷移についてそれぞれ絶対分岐比、 $\log ft$ を導出した。そのうち、4 つの遷移に対しては初めて絶対分岐比、 $\log ft$ を決定した。特に、第 2 励起準位 (1090 keV) への遷移に関しては、 $\log ft$ が 4.48 と小さいことから、許容遷移であることがわかり、この準位のスピンパリティを 1^+ と決定した。これらの結果により ^{24}Si の崩壊様式をより完全に近いものへと進化させることができた。[44, 88]

今後、本実験で明らかになった崩壊様式に基づいて、娘核 ^{24}Al とその鏡映核 ^{24}Na の低励起準位のスピンパリティ、 $\log ft$ などについて詳細な比較を行い、 ^{24}Al - ^{24}Na 間のアイソスピン対称性についても議論を行う。

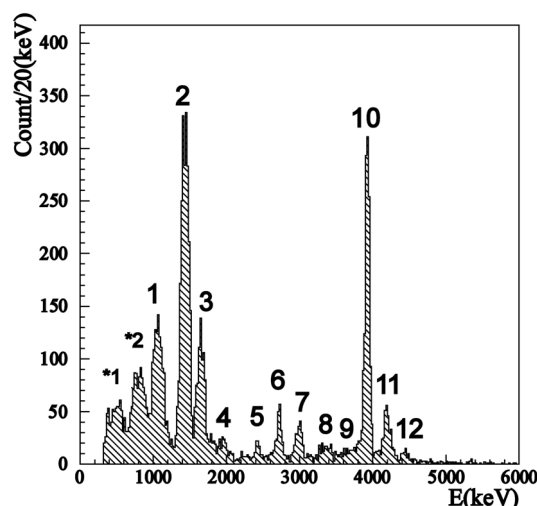


図 2.1 k: The energy spectrum of the β -delayed protons of ^{24}Si (peak 1~12). The proton peaks with the asterisks (*1,*2) are from the β decay of ^{23}Al .

2.1.13 RIBF 開発研究 (櫻井研究室)

軽い中性子過剰核研究では中性子ハローや中性子スキン、魔法数の消失、新魔法数の出現など、安定核にはなかった性質が次々と見出されてきた。この研究をより重い領域の原子核に発展させることで、新たな核構造上の発見のみならず、中重領域中性子過剰核の関与する超新星爆発時における元素合成過程の理解の進展も期待できる。現在、重い不安定核ビームの高強度化を狙い、理研の RI Beam Factory (RIBF) など世界の主要な研究施設で重イオン加速器や不安定核ビーム生成装置の更新、新規建設が計画されている。櫻井研では、理研 RIBF 計画において重い不安定核ビームに対応するための新しいスペクトロメータ、Zero-degree Forward Spectrometer (ZFS)、の建設を推進している。

ZFS は、重い不安定核ビームに対応して 2 次標的下流での粒子識別を高効率かつ高分解能で行えるように設計されている。重い不安定核を用いた場合、逆運動学の性質から標的で散乱した不安定核の散乱角がビームの広がりと同様およびそれ以下であるため、ZFS の立体角はビームの広がり程度である。また ZFS は、運動量分散面をもったダブルアクロマティックスペクトロメータであり、重い核の荷電状態の決定をも容易に行うことができる。本年度は、ZFS の実験プログラムや性能などをまとめ、理化学研究所主催の国際評価委員会でその内容を発表した。[93]

2.1.14 位置感応型 Ge 検出器の開発 (櫻井研究室)

ドリップライン近傍までの不安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破砕反応などの反応を用いて目的の原子核の励起状態を作り、脱励起の 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、ストリップ Ge テレスコープ (SGT) という検出器固有のエネルギー分解能と γ 線の位置検出分解能の双方に優れたインビーム γ 線分光装置を開発した。過去の性能評価実験では、光速の 40% 程度の原子核ビームを用いた γ 線分光実験において、2 MeV の γ 線に対して約 1.5 % (FWHM) の高分解能を達成している。

本年度は、中性子過剰核 ^{16}C を対象に行った γ 線分光データを詳細に解析した。 γ 線ピークの形状解析を行うことにより、励起状態の寿命が導出可能であることを示した。

2.1.15 TOF スペクトロメータ開発 (櫻井研究室)

中重領域の中性子過剰核では、中性子数 40、50 の(擬)魔法数消失、中性子数 34 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、逆運動学非弾性散乱を用いた γ 線核分光が盛んに行われているが、 ΔE - E 法による散乱粒子の質量識別に限界があり、これまで、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、TOF スペクトロメータ開発を行い、質量数 60 程度まで適用できる散乱粒子識別装置を考案した。

TOF スペクトロメータは、散乱粒子の質量識別法として、TOF- E 法を採用している。TOF は、二次標の下流とその約 4 m 後方にプラスチック検出器を配置し測定する。粒子のエネルギーは、最下流に置いたシリコン検出器で測定をする。また角度広がりを持つ散乱粒子の収束のために、理研将来計画 BigRIPS で使用予定の超伝導三連四重極電磁石のプロトタイプ (STQ) を採用した。使用している STQ は、3 つの磁石の有効長がそれぞれ、0.54 m、0.84 m、0.54 m で、磁石の中心同士の距離は 850 mm である。最大磁場勾配は、14.1 T/m で、内筒の半径は 14 cm となっている。TOF スペクトロメータの特徴は、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、RIPS で生成した多核種ビームを使用して TOF スペクトロメータの性能評価実験を行い、STQ 内の粒子軌道の様子や装置の粒子識別能力、輸送効率等を調べた。その結果、陽子数 (Z) 決定精度は 0.75 % (r.m.s.) であり、質量数 (A) の決定精度は

0.51 % (r.m.s.) であることが分かった。陽子数 24、質量数 60 近辺の中重核を分離した場合、それぞれ約 5.5σ (Z)、 3.2σ (A) での分離が可能である。また輸送効率は、中重領域の核を用いた陽子非弾性散乱実験の場合、90 % 程度である。これらのことより、TOF スペクトロメータは、中重領域の中性子過剰核を用いた非弾性散乱実験に使用するための十分な性能を持っていることが分かった。[45, 87]

2.1.16 中性子過剰核の分解反応 (櫻井研究室)

ドリップ線近傍の中性子過剰核は、束縛エネルギーが小さいため、非束縛状態の観測による核分光が不可欠である。反応によって非束縛状態に励起された中性子過剰核は、粒子放出を伴って荷電粒子と複数の中性子に分解するが、これらの運動量を測定し、不変質量を組むことによって非束縛状態を観測することができる。

これまで鉛標的を用いたクーロン分解反応によって中性子ハロー核 ^{11}Be 、 ^{19}C の研究を行い、連続状態の分布からハロー中性子の波動関数に関する情報を導出してきた。より確度の高い情報を引き出すためには、核力などの寄与を調べる必要があるが、これに見合う統計が十分でなかった。また、核力励起を積極的に利用し、角度分布を精度よく測ることによって、共鳴状態の新たな分光手法を確立することも重要である。以上の観点から構造が比較的良くわかっている ^{11}Be をビームとし、鉛・炭素標的を用いた分解反応実験を高統計・高精度で行った。

解析の結果、まず、鉛標的では前方散乱を選ぶことにより、1 次のクーロン励起成分のみを抽出することができた。これにより、 ^{11}Be のハロー中性子の分光因子を精度よく決定した。炭素標的の分解反応では得られたエネルギー分布から既知の共鳴状態の観測に成功した。また、角度分布から移行角運動量を決定し、これら共鳴状態のスピン・パリティに関する情報を得ることができた。鉛標的での核力の寄与についても炭素標的のデータから初めて定量的に見積もることができた。これらのデータは中性子ハロー核の反応機構に関する豊富な情報を含んでおり、理論研究による今後の活発な議論も期待できる。[23, 43]

2.1.17 天体核物理 (櫻井研究室)

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。

しかし、ビーム強度が低く、エネルギーの高い(数

10 A MeV) 不安定核ビームの場合には、天体現象で典型的なエネルギー (10 keV~1 MeV) での直接測定は極めて困難で、別な実験手法を用いなければならない。そこで我々は、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、 $A(p, \gamma)B$ 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 $^{208}\text{Pb}(B, A+p)^{208}\text{Pb}$ 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 $^{22}\text{Mg}(p, \gamma)^{23}\text{Al}$ 反応、 $^{26}\text{Si}(p, \gamma)^{27}\text{P}$ 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。[34]

- [1] 鈴木 謙：第 11 回原子核談話会新人賞、原子核談話会・核物理委員会、2005 年 3 月 25 日。

< 報文 >

(原著論文)

- [2] V.P. Ladygin, T. Uesaka, T. Saito, M. Hatano, A.Yu. Isupov, H. Kato, N.B. Ladygina, Y. Maeda, A.I. Malakhov, J. Nishikawa, T. Ohnishi, H. Okamura, S.G. Reznikov, H. Sakai, N. Sakamoto, S. Sakoda, Y. Satou, K. Sekiguchi, K. Suda, A. Tamii, N. Uchigashima, and K. Yako: “Measurement of the tensor analyzing power T_{20} in the $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$ and $dd \rightarrow {}^3\text{He}p$ at intermediate energies and at zero degree”, Phys. Lett. B **598**, 47–54 (2004).
- [3] P. Mermod, J. Blomgren, B. Bergenwall, A. Hildebrand, C. Johansson, J. Klug, L. Nilsson, N. Olsson, M. Osterlund, S. Pomp, U. Tippawan, O. Jonsson, A. Prokofiev, P.-U. Renberg, P. Nadel-Turonski, Y. Maeda, H. Sakai, and A. Tamii: “Search for three-body force effects in neutron-deuteron scattering at 95 MeV” Phys. Lett. B **597**, 243–248 (2004).
- [4] K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Witala, K. Ermisch, W. Glockle, J. Golak, M. Hatano, H. Kamada, N. Kalantar-Nayestanaki, H. Kato, Y. Maeda, J. Nishikawa, A. Nogga, T. Ohnishi, H. Okamura, T. Saito, N. Sakamoto, S. Sakoda, Y. Satou, K. Suda, A. Tamii, T. Uchigashima, T. Uesaka, T. Wakasa, and K. Yako: “Polarization transfer measurement for ${}^1\text{H}(\vec{d}, \vec{p}){}^2\text{H}$ elastic scattering at 135 MeV/nucleon and three-nucleon force effects”, Phys. Rev. C **70**, 014001 (2004).
- [5] T. Wakasa, H. Sakai, M. Ichimura, K. Hatanaka, M.B. Greenfield, M. Hatano, J. Kamiya, H. Kato, Y. Maeda, H. Okamura, T. Ohnishi, H. Otsu, K. Sekiguchi, K. Suda, A. Tamii, T. Uesaka, T. Yagita, and K. Yako: “Polarization transfer and spin response functions of the ${}^2\text{H}(\vec{p}, \vec{n})$ reaction at 345 MeV”, Phys. Rev. C **69**, 044602 (2004).
- [6] T. Wakasa, H. Sakai, M. Ichimura, K. Hatanaka, M.B. Greenfield, M. Hatano, J. Kamiya, H. Kato, K. Kawahigashi, Y. Maeda, Y. Nakaoka, H. Okamura, T. Ohnishi, H. Otsu, K. Sekiguchi, K. Suda, A. Tamii, T. Uesaka, T. Yagita, and K. Yako: “Pionic enhancement in quasielastic $(\vec{p}, \vec{n})$ reactions at 345 MeV”, Phys. Rev. C **69**, 054609 (2004).
- [7] T. Wakasa, H. Sakai, H. Okamura, H. Otsu, T. Nonaka, T. Ohnishi, K. Yako, K. Sekiguchi, S. Fujita, T. Uesaka, Y. Satou, S. Ishida, N. Sakamoto, M.B. Greenfield, K. Hatanaka: “Total Spin Transfer in Continuum for ${}^{90}\text{Zr}(p, n)$ Reaction at 295 MeV”, J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 1611 (2004).
- [8] M. Amoretti, C. Amsler, G. Bonomi, A. Bouchta, P.D. Bowe, C. Carraro, C.L. Cesar, M. Charlton, M. Doser, V. Filippini, A. Fontana, M.C. Fujiwara, R. Funakoshi, P. Genova, J.S. Hangst, R.S. Hayano, L.V. Jorgensen, A. Kellerbauer, V. Lagomarsino, R. Landua, D. Lindelof, E. Lodi-Rizzini, M. Macri, N. Madsen, G. Manuzio, P. Montagna, H. Pruys, C. Regenfus, A. Rotondi, G. Testera, A. Variola, L. Venturelli, D.P. van der Werf, Y. Yamazaki, “Dynamics of antiproton cooling in a positron plasma during antihydrogen formation”, Phys. Lett. B **590**, 133–142 (2004).
- [9] M. C. Fujiwara *et al.* (ATHENA collaboration): “Three-Dimensional Annihilation Imaging of Trapped Antiprotons”, Phys. Rev. Lett. **92**, 065005 (2004).
- [10] N. Madsen, M. Amoretti, C. Amsler, G. Bonomi, P.D. Bowe, C. Carraro, C.L. Cesar, M. Charlton, M. Doser, A. Fontana, M.C. Fujiwara, R. Funakoshi, P. Genova, J.S. Hangst, R.S. Hayano, L.V. Jorgensen, A. Kellerbauer, V. Lagomarsino, R. Landua, E. Lodi-Rizzini, M. Macri, D. Mitchard, P. Montagna, H. Pruys, C. Regenfus, A. Rotondi, G. Testera, A. Variola, L. Venturelli, D.P. van der Werf, Y. Yamazaki, N. Zurlo, Phys. Rev. Lett. **94**, 033403 (2005).
- [11] J. Sakaguchi, H. Gilg, R.S. Hayano, T. Ishikawa, K. Suzuki, E. Widmann, H. Yamaguchi, F. Caspers, J. Eades, M. Hori, D. Barna, D. Horváth, B. Juhász, H. A. Torii, and T. Yamazaki: “Cryogenic tunable microwave cavity at 13 GHz for hyperfine spectroscopy of antiprotonic helium”, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A. **533**, 598–611, (2004).
- [12] T. Suzuki, H. Bhang, G. Franklin, K. Gomikawa, R.S. Hayano, T. Hayashi, K. Ishikawa, S. Ishimoto, K. Itahashi, M. Iwasaki, T. Katayama, Y. Kondo, Y. Matsuda, T. Nakamura, S. Okada, H. Ota, B. Quinn, M. Sato, M. Shindo, H. So, P. Strasser, T. Sugimoto, K. Suzuki, S. Suzuki, D. Tomono, A.M. Vinodkumar, E. Widmann, T. Yamazaki,

- and T. Yoneyama: “Discovery of a strange tribaryon $S^0(3115)$ in ${}^4\text{He}(\text{stopped } K^-, p)$ reaction”, *Phys. Lett. B.* **597**, 263–269 (2004).
- [13] H. Yamaguchi, R. S. Hayano, T. Ishikawa, J. Sakaguchi, E. Widmann, J. Eades, M. Hori, H. A. Torii, B. Juhász, D. Horváth, and T. Yamazaki: “Systematic study of the decay rates of antiprotonic helium states”, *Phys. Rev. A* **70**, 012501 (2004).
- [14] M. Hori, J. Eades, E. Widmann, T. Yamazaki, R. S. Hayano, T. Ishikawa, H. A. Torii, T. von Egidy, F.J. Hartmann, B. Ketzer, C. Maierl, R. Pohl, M. Kamakura, N. Morita, D. Horváth, and I. Sugai: “Populations and lifetimes in the $v = n - l - 1 = 2$ and 3 metastable cascades of $\bar{p}\text{He}^+$ measured by pulsed and continuous antiproton beams”, *Phys. Rev. A.* **70**, 012504 (2004).
- [15] S.S. Adler, S. Afanasiev, C. Aidala C, *et al.*, “Centrality dependence of charm production from a measurement of single electrons in Au plus Au collisions at $\sqrt{s(NN)} = 200$ GeV”: *Phys. Rev. Lett.* **94**, 082301 (2005).
- [16] S.S. Adler, S. Afanasiev, C. Aidala C, *et al.*, “Nuclear modification factors for hadrons at forward and backward rapidities in deuteron-gold collisions at $\sqrt{s(NN)} = 200$ GeV”: *Phys. Rev. Lett.* **94**, 082302 (2005).
- [17] M. Hori, J. Eades, R.S. Hayano, W. Pirkel, E. Widmann, H. Yamaguchi, H.A. Torii, B. Juhász, D. Horváth, K. Suzuki, T. Yamazaki, “Observation of cold, long-lived antiprotonic helium ions”: *Phys. Rev. Lett.* **94** 063401 (2005).
- [18] S.S. Adler, S. Afanasiev, C. Aidala C, *et al.*, “Double helicity asymmetry in inclusive midrapidity π^0 production for polarized p+p collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV: *Phys. Rev. Lett.* **93**, 202002 (2004).
- [19] S.S. Adler, S. Afanasiev, C. Aidala C, *et al.*, “Measurement of nonrandom event-by-event fluctuations of average transverse momentum in $\sqrt{s(NN)} = 200$ GeV Au+Au and p+p collisions”: *Phys. Rev. Lett.* **93**, 092301 (2004).
- [20] Z. Elekes, Zs. Dombradi, N. Fukuda, *et al.*: “Decoupling of valence neutrons from the core in ${}^{16}\text{C}$ ”, *Phys. Lett. B* **586**, 34–40 (2004).
- [21] C. Signorini, N. Fukuda, H. Sakurai, *et al.*: “Sub-barrier fusion in the systems ${}^{11,10}\text{Be} + {}^{209}\text{Bi}$ ”, *Nucl. Phys. A* **735**, 329–444 (2004).
- [22] Z. Elekes, H. Iwasaki, H. Sakurai, *et al.*: “Bound excited states in ${}^{27}\text{F}$ ”, *Phys. Lett. B* **599**, 17–22 (2004).
- [23] N. Fukuda, T. Nakamura, H. Sakurai, *et al.*: “Coulomb and nuclear breakup of a halo nucleus ${}^{11}\text{Be}$ ”, *Phys. Rev. C* **70**, 054606 (2004).
- [24] Y. Yanagisawa, S. Kubono, T. Teranishi, H. Iwasaki, *et al.*: “Low-energy radioisotope beam separator CRIB”, *Nucl. Instr. Meth. A* **539** 74–83 (2005).
- [25] R. Kanungo, T. Ohnishi, H. Sakurai, *et al.*: “Excited states in neutron rich boron isotopes”, *Phys. Lett. B* **608**, 206–214 (2005).
- (会議抄録)
- [26] H. Sakai: “Looking for Three-Nucleon Force Effects by Nd Scattering at Intermediate Energies”, *Nucl. Phys. A* **737**, 70 (2004).
- [27] H. Sakai: “ ${}^6\text{He}$ Scattering with Polarized Proton Target AIP Conf. Proc. 764, Proc. Conf. on “Nuclei at the Limits”, (AIP, New York), 360–365 (2005).
- [28] H. Sakai: “ ‘Einstein was wrong?’ – Spin correlation experiment for EPR paradox –”, UT Forum in Sweden, Uppsala University, Sweden, February 24–25, 2004.
- [29] H. Sakai: “First experiment of ${}^6\text{He}$ with polarized proton target” The Fourth International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses, Callaway Gardens, Pine Mountain, Georgia, USA, September 12–16, 2004
- [30] H. Sakai: “Construction of polarized proton target and first experiment with ${}^6\text{He}$ ”, 5th Italy-Japan Symp. on “Recent Achievements and Perspectives in Nuclear Physics” Naples, Italy, November 3–7, 2004.
- [31] R.S. Hayano, “Physics using cold antiprotons”: *Nuc. Instr. Meth. A* **532**, 86–91 (2004)
- [32] M.C. Fujiwara, M. Amoretti, C. Amsler, G. Bonomi, A. Bouchta, P.D. Bowe, C. Carraro, C.L. Cesar, M. Charlton, M. Doser, V. Filippini, A. Fontana, R. Funakoshi, P. Genova, J.S. Hangst, R.S. Hayano, L.V. Jorgensen, V. Lagomarsino, R. Landua, D. Lindelof, E. Lodi-Rizzini, M. Macri, N. Madsen, D. Marchesotti, P. Montagna, H. Pruys, C. Regenfus, P. Riedler, A. Rotondi, G. Testera, A. Variola, D.P. van der Werf, Y. Yamazaki, “The first cold antihydrogen”: *Nuc. Instr. Meth. A* **532**, 229–236 (2004)
- [33] Y. Yanagisawa, M. Notani, H. Sakurai, *et al.*: “The First Excited State of ${}^{30}\text{Ne}$ Studied by Proton Inelastic Scattering in Reversed Kinematics”, *Nucl. Phys. A* **734**, 374–377 (2004).
- [34] T. Gomi, N. Imai, H. Sakurai, *et al.*: “Study of the Stellar ${}^{22}\text{Mg}(p,\gamma){}^{23}\text{Al}$ Reaction using the Coulomb-Dissociation Method”, *Nucl. Phys. A* **734**, E77–E79 (2004).
- [35] A. Saito, S. Shimoura, H. Sakurai, *et al.*: “Molecular states in neutron-rich beryllium isotopes”, *Nucl. Phys. A* **738**, 337–341 (2004).
- [36] M. Notani, S. Kubono, T. Teranishi, H. Iwasaki, *et al.*: “Direct measurement of the astrophysical reaction ${}^{14}\text{O}(\alpha, p){}^{17}\text{F}$ ”, *Nucl. Phys. A* **738**, 411–415 (2004).
- [37] M. Notani, S. Kubono, T. Teranishi, H. Iwasaki, *et al.*: “Direct measurement of the astrophysical reaction ${}^{14}\text{O}(\alpha, p){}^{17}\text{F}$ ”, *Nucl. Phys. A* **746**, 113c–117c (2004).

(国内雑誌)

- [38] 鳥居寛之、黒田直史、桧垣浩之、船越亮、大島永康：「低速反陽子ビームの発生・減速・冷却と陽電子プラズマの生成・制御」，プラズマ・核融合学会誌 **80**, 1012-1021 (2004).
- [39] 鈴木謙、板橋健太、比連崎悟、早野龍五：「パイ中間子原子で探るハドロン質量の起源-カイラル凝縮の変化の定量的測定-」，日本物理学会誌 **60**, N0.1, 12-19 (2005).

(学位論文)

- [40] 笹野匡紀：“Precise determination of Gamow-Teller unit cross sections for (p, n) measurements at 200 and 300 MeV” (200, 300 MeV における (p, n) 反応のガモフテラー単位断面積の精密決定、修士論文)。
- [41] 斎藤孝明：“Experimental Test of Bell’s Inequality via the $^1\text{H}(d, ^2\text{He})n$ Reaction” ($^1\text{H}(d, ^2\text{He})n$ 反応によるベルの不等式の実験的検証、博士論文)。
- [42] 今井伸明：“Quadrupole Collectivity of ^{16}C ”，(^{16}C の四重極集団運動性、博士論文)。
- [43] 福田直樹：“Breakup Reaction of the One-neutron Halo Nucleus ^{11}Be ”，(一中性子ハロー核 ^{11}Be の分解反応、博士論文)。
- [44] 市川雄一：“陽子過剰核 ^{24}Si のベータ遅発陽子分光」、(修士論文)。
- [45] 鈴木宏：“超伝導四重極電磁石を用いた TOF スペクトロメータの開発」、(修士論文)。

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [46] H. Sakai: “ ^6He Scattering with Polarized Proton Target”, Conference on “Nuclei at the Limits”, Argonne National Laboratory, USA, July 26–30, 2004.
- [47] M. Sasano: “Measurement of the Gamow-Teller unit cross section of ^{58}Ni at 197 MeV”, Int. Nuclear Physics Conf., Goteborg, Sweden, June 27–July 2, 2004.
- [48] M. Sasano: “Precise determination of Gamow-Teller unit cross sections for (p, n) measurements at 200 and 300 MeV”, Int. Symp. on Correlation Dynamics in Nuclei, – on the occasion of the 50th anniversary of the Configuration Mixing theory of Arima and Horie —, Tokyo, Japan, January 31–February 4, 2005.
- [49] E. Widmann: “FLAIR - A Next-generation Low-energy Antiproton and Ion Facility”, presentation at the Villars meeting of the CERN SPS Committee (SPSC), September 26, 2004.
- [50] E. Widmann: “FLAIR, a Facility for Low-energy Antiproton and ion Research @ FAIR”, seminar at Manne Siegbahn Laboratory, Stockholm, Sweden, September 17, 2004.

- [51] E. Widmann: “Precision spectroscopy of antiprotonic helium and the future of low-energy antiproton physics”, Kolloquium at Department of Physics, Stockholm University, Sweden, September 16, 2004.
- [52] E. Widmann: “A next-generation low-energy antiproton facility”, plenary talk at the International Workshop on Nuclear Physics at J-PARC, Tokai, Japan, August 2–4, 2004.
- [53] E. Widmann: “FLAIR and the future of antiproton physics”, seminar at Institute for Medium Energy Physics, Vienna, June 17, 2004.
- [54] H. Iwasaki, N. Aoi, H. Sakurai *et al.*: “Intermediate-energy Coulomb excitation of the neutron-rich Ge isotopes around $N=50$ ”, The Fourth International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses (ENAM04), Georgia, USA, Sep. 12–16, 2004.
- [55] H. Sakurai: “Spectroscopy of light exotic nuclei”, Japanese-German Nuclear Structure and Astrophysics Workshop, GSI, Germany, Dec. 2004,

招待講演

- [56] T. Suzuki: “Discovery of a strange tribaryon $S^0(3115)$ in the $^4\text{He}(K^-_{\text{stopped}}, p)$ reaction”, Internal Workshop on Strangeness Nuclear Physics (SNP2004), Osaka University, Japan, July 29–31, 2004.
- [57] E. Widmann: “FLAIR, a Facility for Low-energy Antiproton and ion Research @ FAIR”, invited talk at the Sigtuna workshop on future FAIR physics, Sigtuna, Sweden, September 14, 2004.
- [58] E. Widmann: “Testing CPT with antiprotonic helium and antihydrogen – the ASACUSA experiment at CERN-AD”, invited talk at the International Nuclear Physics Conference (INPC2004), Göteborg, Sweden, June 27 – July 2, 2004. Proceedings to appear in Nucl. Phys. A.
- [59] E. Widmann: “Antiprotons and antimatter – precision studies”, invited talk at the IONCATCHER-HITRAP-NIPNET Collaboraiton Meeting, Krakow, Poland, June 3–5, 2004.
- [60] R.S. Hayano: “High precision laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms and ions”, Hydrogen Atom III - International conference on Precision Physics of Simple Atomic Systems, Mangaratiba, Brazil, August 1–4, 2004.
- [61] R.S. Hayano: “High precision laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms and ions”, Third meeting on CPT and Lorentz Symmetry, Bloomington, USA, August 4–7, 2004.
- [62] R.S. Hayano: “Physics using trapped antiprotons”: International school of physics “Enrico Fermi” on Hadron Physics, Lake Como, Italy, June 22 – July 2, 2004.

- [63] R.S. Hayano: “The antiproton absorption at rest and from flight”: International workshop on antiproton ion collider, Vienna, Austria, August 23–24, 2004.
- [64] R.S. Hayano: “AIC – Antiproton Ion collider”: International workshop on the facility for low-energy antiproton and ion research, Darmstadt, Germany, September 20–21, 2004.
- [65] R. Funakoshi: “Technical challenge at ATHENA”, HITAP WORKSHOP, GSI, Darmstadt, Germany, Nov. 11–13, 2004.
- [66] R.S. Hayano: “Review on antiprotonic atoms”: International conference on exotic atoms, Vienna, Austria, February 21–25, 2005.
- [67] T. Suzuki: “An experimental search for deeply bound kaonic nuclei with stopped kaons”, Internal Workshop on Chiral Restoration in Nuclear Medium (Chiral05), Riken, Wako, Japan, February 15–17, 2005.
- [68] R.S. Hayano: “Search for eta and omega mesic nuclei at GSI”: *ibid.*
- [69] R.S. Hayano: “Prospect of CPT tests using antiprotonic helium and antihydrogen”, Workshop on physics with ultra slow antiproton beams, Riken, Wako, Japan, March 14–16, 2005.
- [70] R.S. Hayano: “Partial restoration of chiral symmetry in the nuclear medium”, IIAS Miniworkshop on nuclear bound states of the Nambu-Goldstone Bosons, Kyoto, Japan, November 24–25 2004.
- [71] R.S. Hayano: “ASACUSA experiment, status and future”, CERN SPSC Villars meeting on a “Future Fixed Target Programme at CERN”, Villars, Switzerland, September 22–28, 2004.
- [72] H. Sakurai: “Spectroscopy on neutron-rich nuclei at RIKEN”, The Fourth International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses (ENAM04), Georgia, USA, Sep. 12–16, 2004.
- (国内会議)
- 一般講演
- [73] 大能直哉、他: 「反陽子ヘリウム原子・イオンの高精度レーザー分光 (1)」、日本物理学会 2004 年秋季大会、2004 年 9 月、青森大学。
- [74] 五味川健治、他: 「反陽子ヘリウム原子・イオンの高精度レーザー分光 (2)」、同上。
- [75] 船越亮、Lawrence G. C. Posada, 早野龍五、他 (ATHENA Collaboration): 「反水素原子を使った高精度レーザー分光実験へ向けての展望」、日本物理学会 2004 年秋季大会、2004 年 9 月、高知大学。
- [76] Lawrence G. C. Posada, 船越亮、早野龍五、他 (ATHENA Collaboration): “Laser-Induced Radiative Recombination Experiments for the Formation of Antihydrogen Atoms for CPT Tests (2)”, 同上。
- [77] 船越亮、Lawrence G. C. Posada, 早野龍五、他 (ATHENA Collaboration): 「AD(CERN) における反水素実験の成果」、日本物理学会第 60 回年次大会、2005 年 3 月、東京理科大学。
- [78] Lawrence G. C. Posada, 船越亮、早野龍五、他 (ATHENA Collaboration): 「CO2 レーザーによる反水素原子の誘導生成実験」、同上。
- [79] 大能直哉、他: 「反陽子ヘリウム原子の高精度レーザー分光」、同上。
- [80] J. J. He, S. Kubono, T. Teranishi, H. Iwasaki, *et al.*: “Study of proton resonant states of astrophysical interest in ^{23}Al using RI beam at CNS”, 日本物理学会 2004 年秋季大会、2004 年 9 月、高知大学朝倉キャンパス。
- [81] 山田一成、青井考、櫻井博儀、他: 「クーロン励起法を用いた陽子過剰核 ^{46}Cr , ^{50}Fe , ^{54}Ni の $B(E2)$ 測定 (II)」、同上。
- [82] 新倉潤、井手口栄治、岩崎弘典、他: 「二次核融合反応による ^{50}Ti の高スピン状態の研究」、同上。
- [83] 菅野祥子、青井考、櫻井博儀、他: 「中性子過剰核 ^{74}Ni の陽子非弾性散乱」、同上。
- [84] H. J. Ong, 今井伸明、櫻井博儀、他: 「 ^{18}C の第一 2^+ 励起状態の寿命測定」、日本物理学会第 60 回年次大会、2005 年 3 月、東京理科大学。
- [85] 中尾太郎、岩崎弘典、櫻井博儀、他: 「 $^{15,17}\text{B}$ の励起状態の寿命測定」、同上。
- [86] 鈴木大介、岩崎弘典、櫻井博儀、他: 「 ^{17}C 励起準位の寿命測定」、同上。
- [87] 鈴木宏、青井考、櫻井博儀、他: 「TOF スペクトロメータの性能評価」、同上。
- [88] 市川雄一、久保敏幸、櫻井博儀、他: 「陽子過剰核 ^{24}Si の β - p , β - γ 核分光」、同上。
- [89] 菅野祥子、青井考、櫻井博儀、他: 「中性子過剰核 ^{74}Ni および ^{78}Zn の陽子非弾性散乱」、同上。
- 招待講演
- [90] 早野龍五: 「反陽子原子と反水素原子」、シンポジウム「物質の創成と発展」、日光霧降高原、11 月 4-6 日、2004。
- [91] 早野龍五: 「反陽子ヘリウムの分光」、RCNP ワークショップ「少数粒子系物理の最近の発展と今後の展望」、大阪、Japan, December 23–25, 2004。
- [92] R.S. Hayano: “Weighing the antiproton using high-precision laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms”, invited seminar at LENS - European Laboratory for non linear spectroscopy, March 7, 2005.
- [93] H. Sakurai: “Zero-degree Forward Spectrometer”, International Advisory Committee (IAC) Meeting for RIKEN RI Beam Factory Project, Nov. 2004, Wako, Japan
- (集中講義)

- [94] 早野龍五:物理学特論 II, 埼玉大学、Japan, September 7-9, 2004.

(セミナー)

- [95] 早野龍五:「反水素原子の生成と分光」、物理教室談話会 July 9, 2004.
- [96] R.S. Hayano: “Weighing the antiproton using high-precision laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms”, invited seminar at LENS - European Laboratory for non linear spectroscopy, March 7, 2005.
- [97] H. Sakurai; “In-beam gamma spectroscopy on unstable nuclei with fast radioactive ion beams”, The 3rd CNS International Summer School, Aug. 2004, Wako, Japan.

(記者発表)

- [98] 「原子核より密度が高い!! “超原子核” 新たに発見」、読売新聞、2004 年 8 月 25 日.
- [99] 「密度 10 倍 新原子核を発見 理研など国際チーム「一定・不変」常識破る」、朝日新聞 (夕刊)、2004 年 8 月 25 日.
- [100] 「新たな原子核確認 約 10 倍密度の状態」、毎日新聞、2004 年 8 月 25 日.
- [101] 「超高密度の原子核存在 日米韓の共同研究チーム「一定」の常識覆す」、産経新聞、2004 年 8 月 25 日.
- [102] 「原子核 10 倍の高密度に 理研・東大などチームが発見 「不変」の常識覆す新現象」、東京新聞、2004 年 8 月 25 日.
- [103] 「世界唯一の「反物質工場」スイスで順調に稼働中 宇宙誕生のなぞに迫る」、朝日新聞 (夕刊)、2005 年 1 月 15 日.

2.2 駒宮研究室

素粒子物理の本質的な問題を実験的なアプローチで解明することを目指している。これにはエネルギーフロンティア（最高エネルギー）における加速器実験がもっとも有効な手段である。2000年にデータ取得が終了した CERN の電子陽電子コライダー LEP-II での OPAL 実験のデータ解析は 2004 年度でほぼ終了した。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。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も続けてきた。

2.2.1 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 90 GeV 近辺で実験を開始して以来、 Z^0 粒子を総数 500 万事例観測し、「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 209 GeV 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、これは強い相互作用でのゲージ原理を検証し、Gross, Politzer, 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 115 GeV ~ 250 GeV 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 36 GeV 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。

2.2.2 電子・陽電子リニアコライダー ILC 計画

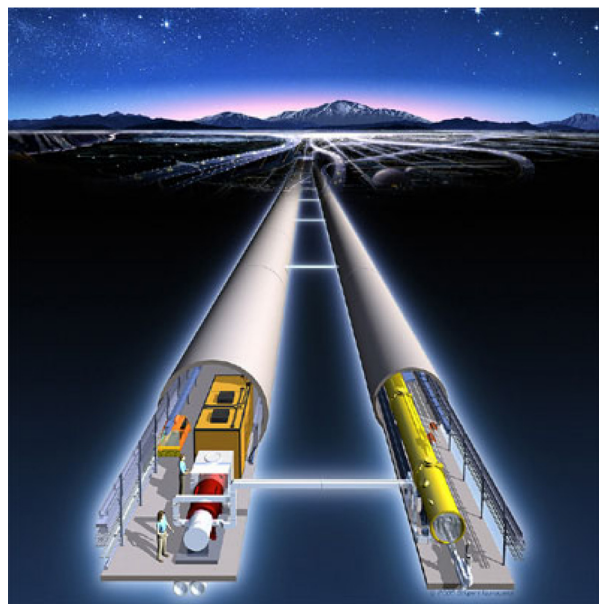


図 2.2 a: ILC 計画

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。これまで 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。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。

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り、測定器のコンセプトを詰めることを国際的に行っている。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、主線形加速器の試験ベンチを建設したが、本研究室は 2004 年度に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。

最終収束システムの研究

2004 年 8 月に、超電導技術を ILC に用いることが決定されたのを期に、線形加速器開発グループを再編し、5つのワーキンググループ(WG)を結成した。それぞれ、(WG1) 全体設計、(WG2) 主線形加速器、(WG3) 入射器、(WG4) ビーム輸送・最終収束系、(WG5) 高電界加速空洞の開発研究を行っている。本研究室助手の佐貫は WG4 のリーダーを務めている。

WG4 は、主線形加速器よりも下流の全てを扱っており、高エネルギーに加速された電子・陽電子ビームを衝突点まで輸送するシステムや輸送の最中にビームを極めて細く絞り込む最終収束系システムの開発、そして、優れた物理実験を可能にするために、加速器と検出器のインターフェースの構築を進めている。主線形加速器が作り出す高エネルギー電子陽電子ビームを確実に衝突させることができ初めて物理実験を行うことができるので、リニアコライダーを用いた物理実験を成功に導くために極めて重要である。

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を開始した。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試験する施設である。 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、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。2007 年

中に 37nm のビームサイズを実現すべく、世界中の研究者が協力している。

ILC 衝突点ビームサイズモニタ (新竹モニタ) の開発研究

ILC 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($\sigma_y^* \sim 5\text{nm}$)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だが、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う。また、ILC に必要な 5nm ビームサイズ測定のための基礎的な開発研究も併せて行う。

XTF における X バンド加速管放電現象の解析

XTF(X-band Test Facility)は、ILC の加速方式の一つとして考えられた X バンド(11.424GHz)高周波と常伝導加速空洞を用いた加速技術を確立するため、KEK に設置された X バンド高電界試験設備である。

X バンド加速技術の現状における最大の課題は、加速管内で起きる放電現象をいかに減少させるかにある。加速管での放電を減少させるためには、加速管で実際に放電が起きた際の放電位置、強度をはじめとした様々な測定を行い、放電のメカニズムを突き止めることがきわめて重要である。当研究室では、この加速管の各種放電モニターを設置して、放電検知、記録を行なうシステムを開発し、これを用いて、XTF に設置された KEK 製 KX01 加速管での放電頻度、放電位置の分布を解析した。

放電頻度の解析では、加速管の運転パラメータ(印加電場強度、パルス幅)に対する放電頻度の依存性を調べた。この結果、パルス幅を増やすと放電頻度が指数関数的に増加することが確かめられた。また、放電の時間的局在性(Spitfest 効果)を実証した。これらは放電メカニズムを探る有力な手がかりである。放電位置の解析では、従来用いられてきた RF 波形を用いて求めた放電位置と、新しい方法である音響センサを用いた放電位置の関係を調べ、両者がおおむね一致することを確認した。これにより放電位置データの信頼性が確立した。また、現在設置されている KX01 では入力、出力カプラ付近での放電が支配的に多いことをつきとめた。これは KX01 のカプラの設計・製作に

改良すべき点があることを示す有力な情報である。

2.2.3 BES 実験

BES 実験は中国・北京の高エネルギー物理研究所 (IHEP) 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。BES 実験は 1989 年より行われ、およそ 12 年間の 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。Beijing electron-positron collider (BEPC) と Beijing Spectrometer (BES) により構成され、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-クォーク、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 luminositiy は $10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 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新しい物理の解析と BES-III 実験に向けた新たな TOF システムの開発を担当している。

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

これまでに観測された CP Violation は CP の異なる 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。 $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$ 過程は dibaryon 崩壊であるから、baryon 数の保存によって Λ と $\bar{\Lambda}$ が混じり合うことはない。よって、mixing によるものとは異なる直接的な、崩壊振幅に起因する CP の破れを探索した。また、 $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$ の branching fraction の測定も行った。

BES-II Detector (図 2.2 b) は中国の IHEP で稼働している 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 クォークと τ レプトンの物理の解析であり、 J/ψ 粒子 (質量 3.097 GeV) が大量に生成される。 e^+e^- の反応により生成される全ての粒子を 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

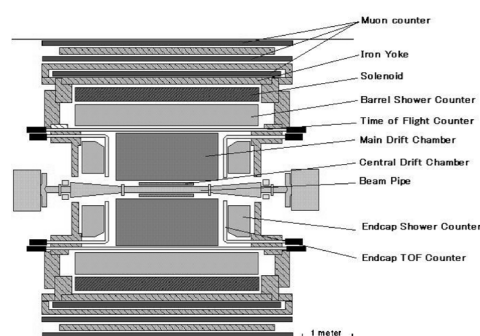


図 2.2 b: BES II detector

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、これまで行ってきた $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$ の崩壊過程の解析を元に 6 月から 8 月の間に IHEP に赴き、現地の研究者と議論を交わしながらこれまでの研究を論文とするために更なる解析を行った。IHEP において、1999 年から 2002 年の間に測定された 5.77×10^7 の全ての J/ψ イベントを用いて解析を行った。また、解析手法についても IHEP の研究者から有益なアドバイスを仰いで修正した。その結果、 $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$ の崩壊率について、現在得られている値 ($1.30 \pm 0.12 \times 10^{-3}$) に対して 6.8σ のずれが観測された。このずれを検証するため、我々は reconstruction の手法を解析し (図 2.2 c)、track の $r-\phi$ 平面および z 方向の hit point の pattern 決定など、まだ改良できる余地のある点について現在修正をすすめており、新たな reconstruction の方法を模索している。

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、現在、測定器のデザインの最適化を進めている。なお、BES-III 実験では、TOF を磁場 1 テスラのソレノイド磁石の内側に設置するため、光電子増倍管については、磁場の影響を受けにくいファインメッシュ型タイプ (R5924-70、浜松ホトニクス製) の使用を決めている。本研究室で

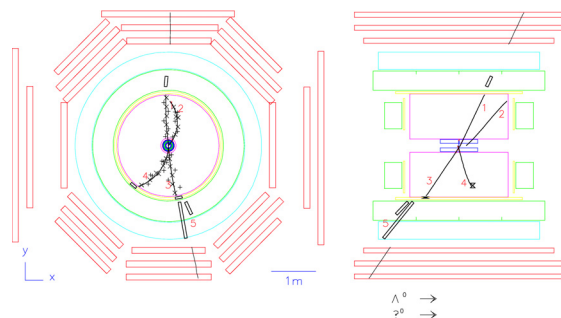


図 2.2 c: $J\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ 過程の reconstruction に不備のあるイベントの例. 2 番目の track が reconstruct 出来ない

は、主に、この光電子増倍管の設計において役割を果たしてきた。

まず、BES-III 実験における光電子増倍管の使用増幅率については、光電子増倍管の寿命の観点から、注意深い検討を行った。光電子増倍管の寿命は、光電子増倍管内を流れるアノード電流の量によって、大きく左右される。そのため、BES-III のようなルミノシティの高い実験では、光電子増倍管の増幅率を下げることで、アノード電流を低く抑えることが必要である。数年オーダーで光電子増倍管を使用し続けるためには、アノード電流を $1\mu\text{A}$ 程度以下にしなければならない。加速器実験では、ビームパイプ内において、残留ガスとの相互作用等で発生したバックグラウンド粒子が TOF カウンターを通過することで、光電子増倍管内にアノード電流を引き起こす。そこで、加速管内のビームシミュレーションおよび BES-III の検出器シミュレーションを行い、アノード電流を十分小さくするような光電子増倍管の増幅率の検討を進め、最終的に 5×10^5 を使用増幅率とすることを決めた。

また本研究室では、2005 年度において、浜松ホトニクス社で BES-III-TOF 用に大量生産される計 515 個の R5924-70 の性能評価試験を高エネルギー加速器研究機構 (KEK) にて行う。陽子シンクロトロン (KEK-PS) の東カウンターホールにある牛若電磁石を用い、各光電子増倍管の電流増幅率や時間分解能についての磁場特性および光量依存性等を詳しく評価し、BES-III 実験において実際に使用すべき 448 個の光電子増倍管の選別を行う。2004 年度より本研究室では、レーザーダイオードを光源に用いた試験のセットアップの検討や、試験を行うためのシステムの構築を進めている。本試験は、2005 年度の夏より開始し、およそ 8ヶ月かけて行う予定である。

2.2.4 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 $10\mu\text{m}$ 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 $10\mu\text{m}$ 程度の未知相互作用の存在を示唆している可能性がある。

この、高さ方向に局在した超冷中性子の分布を精度良く測定する実験を進めている。 $10\mu\text{m}$ 程度の分布を測定する必要があるため、この分布を拡大する中性子光学系と、位置分解能に優れた CCD を組み合わせた装置を考案した。現在は、中性子光学系の精度を確認し、超冷中性子の検出効率を向上させる研究を進めている。

セットアップ

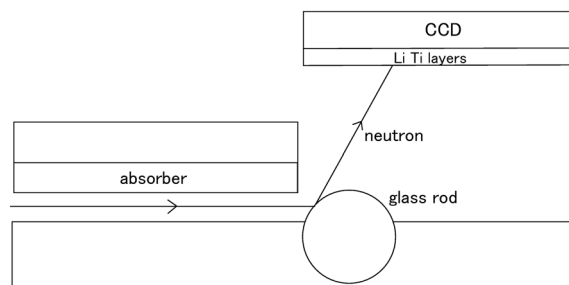


図 2.2 d: 超冷中性子実験のセットアップ

超冷中性子の重力による量子化を検出するための測定器を開発している。

まず、上部に吸収体を付けたスリットに超冷中性子を通す。高さ方向に大きなエネルギーを持つ中性子はスリット上部の吸収体で吸収され、スリットを通り抜けるのは十分に小さなエネルギーを持つ中性子のみである。この中性子は高さ方向に束縛状態を形成する。その典型的な高さは $10\mu\text{m}$ 程である。この分布を精確に測定するため上図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する。

超冷中性子の観測装置としては位置分解能に優れた 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。

この拡大機構と CCD 検出器を組み合わせることに

より、スリット端部での中性子の高さ方向の分布を $1\mu\text{m}$ 以下の精度で測定できるような装置を開発している。

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 Schroedinger 方程式を解くと、固有関数は 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、Schroedinger 方程式を解くことは容易であるが、実際に粒子が waveguide に入ってくる前から waveguide 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 Schroedinger 方程式を解くことになる。waveguide 入口での反射、waveguide 内での吸収材の影響も考慮して中性子の分布を予想した。

2.2.5 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。この計算のためには、(i) 一次宇宙線のエネルギースペクトル、(ii) 地磁気が宇宙線に与える影響、(iii) 宇宙線と大気の相互作用を詳細に知る必要がある。BESS 実験では一次宇宙線の精密測定を行ってきており、大気ニュートリノ計算をする際の標準的なスペクトルとして利用されている。また、地球上の様々な場所で精密測定した大気 μ 粒子のスペクトルは、地磁気の影響や相互作用モデルについて、極めて重要な情報を与える。

計算精度の向上には莫大な時間がかかることが問題であったが、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 粒子の観測結果と計算結果を詳細に比較したところ、利用可能なハドロン相互作用プログラムの中では、DPMJET-III モデルが観測結果を比較的良く再現することが分かった。さらに、このモデルの最適化を進め、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。大気 μ 粒子の生成と崩壊は、大気ニュートリノの生成を伴うので、大気 μ 粒子の観測結果を良く再現できる計算は、大気ニュートリノも精度良く計算できると考えられる。

現在は、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、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を詳細に決定し、その系統誤差を評価するために、非常に大切な結果を与える。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Tests of Models of Color Reconnection and a Search for Glueballs using Gluon Jets with a Rapidity Gap, Eur. Phys. J. C35 (2004) 293-312
- [2] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : A Study of Charm Production in Beauty Decays with the OPAL Detector at LEP, Eur. Phys. J. C35 (2004) 149-158
- [3] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of Charged Current Triple Gauge Boson Couplings using W Pairs at LEP, Eur. Phys. J. C33 (2004) 463-476
- [4] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Experimental Studies of Unbiased Gluon Jets from e^+e^- Annihilations Using the Jet Boost Algorithm, Phys. Rev. D69 (2004) 032002
- [5] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Flavour Independent Search for Higgs Bosons Decaying into Hadronic Final States in e^+e^- Collisions at LEP, Phys. Lett. B597 (2004) 11-25
- [6] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the Partial Widths of the Z into Up- and Down-type Quarks, Phys. Lett. B586 (2004) 167-182
- [7] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Chargino and Neutralino Production at $\sqrt{s} = 192 - 209$ GeV at LEP, Eur. Phys. J. C35 (2004) 1-20
- [8] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : W Boson Polarisation at LEP2, Phys. Lett. B585 (2004) 223-236
- [9] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Constraints on Anomalous Quartic Gauge Boson Couplings from $VV\gamma\gamma$ and $qq\gamma\gamma$ Events at LEP2, Phys. Rev. D70 (2004) 032005
- [10] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the Strange Spectral Function in Hadronic Tau Decays, Eur. Phys. J. C35 (2004) 437-455
- [11] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Scaling Violation of Quark and Gluon Jet Fragmentation Functions in e^+e^- Annihilation at $\sqrt{s} = 91.2$ and $183 - 209$ GeV, Eur. Phys. J. C37 (2004) 25-47
- [12] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Study of Bose-Einstein Correlations in $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ Events at LEP, Eur. Phys. J. C35 (2004) 297-308
- [13] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Neutral Higgs Bosons in CP-Conserving and CP-Violating MSSM Scenarios, Eur. Phys. J. C37 (2004) 49-78
- [14] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Multi-Photon Events with Large Missing Energy in e^+e^- Collisions at $\sqrt{s} = 192 - 209$ GeV, Phys. Lett. B602 (2004) 167-179

- [15] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Determination of LEP Beam Energy using Fermion-Pair Events, Phys. Lett. B604 (2004) 31-47
- [16] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Measurements of R_b in e^+e^- Collisions at 182-209 GeV Phys. Lett. B609 (2005) 212-225
- [17] S.Haino, T. Sanuki et al., Phys. Lett., B594 (2004) 35
- [18] 駒宮幸男, 「リニアコライダー計画の進展」 Physics News in 2004 パリティ2005 年 1 月号
(会議抄録)
- [19] S.Fukuda, M.Akemoto, H.Hayano, T.Higo, T.Suehara et al., R&D Plan of RF Source in KEK GLCTA Proc. 1st Annual Mtg. of Particle Acc. Soc. of Japan and 29th Linear Acc. Mtg. in Japan (Funabashi) (2004) 75-77
- [20] T.Saeki, M.Akemoto, T.Shidara, T.Suehara et al., PPM klystron Operation in GLCTA Proc. 1st Annual Mtg. of Particle Acc. Soc. of Japan and 29th Linear Acc. Mtg. in Japan (Funabashi) (2004) 290-292
- [21] N.Terunuma, H.Hayano, T.Higo, T.Suehara, K.Watanabe, GLCTA Control System Proc. 1st Annual Mtg. of Particle Acc. Soc. of Japan and 29th Linear Acc. Mtg. in Japan (Funabashi) (2004) 302-304
- [22] K.Watanabe, T.Higo, T.Sanuki, T.Suehara et al., High Gradient Test of X-band Accelerating Structure at GLCTA Proc. 1st Annual Mtg. of Particle Acc. Soc. of Japan and 29th Linear Acc. Mtg. in Japan (Funabashi) (2004) 332-334
- [23] T.Suehara, T.Sanuki, S.Komamiya, T.Higo et al., Analysis on X-band Structure Breakdown at GLCTA Proc. 1st Annual Mtg. of Particle Acc. Soc. of Japan and 29th Linear Acc. Mtg. in Japan (Funabashi) (2004) 335-337
- [24] 渡辺謙, 早野仁司, 末原大幹, 佐貫智行 et al., 「GLCTA の現状」 第五回 KEK メカ・ワークショップ紀要, 高エネルギー加速器研究機構, 2004 年 4 月
(学位論文)
- [25] 末原大幹: 「X バンド加速管における放電現象の研究」, 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
- [26] T. Sanuki: "GLCTA and C & X Options" International Conference on Linear Colliders (April 2004) Paris, France
- [27] S. Kawasaki: "Quantum effect due to earth gravity and search for new force by using UCN" Physics with Spallation Ultracold Neutron, (March 2004) RCNP, Osaka
- 招待講演
- [28] S. Komamiya: "News from Asia", American Workshop on Linear Colliders (July. 2004) Victoria, Canada
- [29] S. Komamiya: "Concluding Remarks for ACFA LCWS2005", ACFA Workshop on Linear Colliders (Nov. 2004) Taipei, Taiwan
- [30] T. Sanuki: "BESS", Neutrino Oscillation Workshop (NOW) (September 2004), Conca Specchiulla, Otranto, Italy
- [31] T. Sanuki: "Atmospheric muon fluxes at various locations", RCCN International Workshop (December 2004), ICRR, Kashiwa Japan
- [32] T. Sanuki: "Brief Statement from JAPAN", The First ILC Workshop (November 2004), KEK, Tsukuba, Japan
- (国内会議)
- 一般講演
- [33] 佐貫智行: "BESS 測定器による一次宇宙線, μ 粒子絶対流束の精密測定", 「ニュートリノ振動と起源の解明」 成果公開シンポジウム, 2004 年 11 月, お台場
- [34] 佐貫智行: "高分解能中性子検出器", 中性子基礎物理学研究会, 2004 年 8 月, 理研, 和光
- [35] 佐貫智行: "重力場中に於ける超冷中性子の量子状態測定を用いた未知相互作用検出の検討", 日本物理学会, 2004 年 9 月, 高知大学, 高知
- [36] 佐貫智行: "未知短距離力の探索", 中性子科学会年会 サテライトミーティング基礎物理学研究会, 2004 年 12 月, 北大, 札幌
- [37] 山村大樹: 「リニアコライダー主線形加速器での電子ビーム輸送」, 日本物理学会 (2004 年 9 月) 高知大学
- [38] 末原大幹: GLCTA における X バンド加速管放電現象の解析, 日本物理学会 (2004 年 9 月) 高知大学
- [39] 末原大幹: XTF(GLCTA) における X-band 加速管放電現象の研究, 日本物理学会 (2005 年 3 月) 東京理科大学
- [40] 川崎真介: 「重力場による超冷中性子の量子化状態の測定器の開発」, 日本物理学会 (2004 年 3 月), 東京理科大学
- 招待講演
- [41] 駒宮幸男: 「リニアコライダー計画と素粒子物理学の動向」, 加速器科学研究会 (2004 年 6 月) キャピタル東急ホテル, 東京
- [42] 駒宮幸男: 「最高エネルギー実験の挑戦」, 公開講演会 (2004 年 11 月) 東京大学安田講堂

- [43] 駒宮幸男: 「電子陽電子衝突の歴史と展望」, シンポジウム「物質の創成と展望」(2004年11月) 日光, 栃木県

(セミナー)

- [44] 駒宮幸男: 素粒子と宇宙「分子からクォークまで」, 東京大学オープンキャンパス(2004年8月) 素粒子物理国際研究センター

2.3 衰輪研究室

衰輪 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。

2.3.1 暗黒物質実験

さまざま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の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。暗黒物質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暗黒物質を直接発見することを目的とした研究を行なっている。

我々はこれまで極低温熱量計型検出器 (ボロメータ)、指向性のある有機結晶シンチレータを用いた暗黒物質直接観測を神岡の宇宙線研究所宇宙素粒子研究施設で行なってきた。これらの実験はそれぞれ検出器のターゲットを自由に選べること、銀河中の太陽運動による暗黒物質の到来方向の非等方性の観測が可能という利点があり、それぞれの実験結果から暗黒物質と核子の相互作用に対する上限値を得てきた。しかし、これらの実験では電氣的なノイズや検出器に含まれる放射性不純物などによるバックグラウンドイベントを十分除去することができなかった。暗黒物質と原子核の散乱断面積は極めて小さいことが予想されるため、より厳しい上限値を与えるためにはバックグラウンドイベントを減らすことが重要である。

本年度はこれらの実験に代わる試みとして $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ シンチレータを用いた検出器による暗黒物質直接観測実験を行なった。 CaF_2 は原子核中核子のスピン期待値が大きいとされる ^{19}F を含むため、原子核のスピンの依存した相互作用を通して暗黒物質を検出するのに有利である。また、 $\text{NaI}(\text{Tl})$ シンチレータの 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ができる。放射性不純物の少ない $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 結晶を得るため、大阪大学を中心とした CANDLES 実験で使用している CaF_2 原料と純度の高い EuF_3 粉末を使って結晶を製造した。シンチレーション光を読み出す光検出器として、宇宙線研究所の XMASS 実験で開発された低バックグラウンド仕様光電子増倍管を利用した。さらに、環境放射線を防ぐためのシールド中にも放射性不純物が少ないことが要求されるため、最も内側のシールドとして 99.9999% の高純度銅を使用した。以前の実験と同様に宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設に検出器を設置した。この検出器を用いて暗黒物質直接観測実験を行なった結果、エネルギー閾値は約 2 k.e.e. (keV electron equivalent)、イベントレートは 10 counts/k.e.e./day/kg 以下となった。測定されたスペクトルの解析からスピンに依存した相互作用での暗黒物質と陽子、暗黒物質と中性子のカップリングを表わす a_p と a_n に対する制

限を導出した (図 2.3 a)。この制限は以前に行なった LiF 及び NaF ボロメータの実験から導出された上限値に比べて断面積にして約一桁よい結果であり、暗黒物質を発見したと主張するイタリア DAMA グループの結果から許されるパラメータ領域の多くの部分を制限することができた。

一方、神岡の宇宙線研究所宇宙素粒子研究施設での暗黒物質探索実験を東大本郷キャンパスからネットワーク経由で監視・制御するための簡便な装置を開発した。Lantronix 社製の TCP/UDP とシリアル通信変換が可能なデバイスサーバー XPortTM を用いることによって、遠方に設置した装置のアラームを受け取ったりその装置をリセットする機能、現地実験室内の温度や放射性ラドンモニタを計数して監視する機能などを持たせている。

2.3.2 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) には実験事実と反して CP 対称性を破ってしまう問題、強い CP 問題があることが知られている。アクシオン (axion) 模型はこの問題を解決するものとして期待されているが、それには模型が予言する擬南部ゴールドストーンボソンであるアクシオンの発見が不可欠である。アクシオンは小さい質量を持った中性擬スカラボソンであり、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 付近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 の超伝導電磁石と PIN フォトダイオード X 線検出器を備え、仰角 $\pm 28^\circ$ 、方位角はほぼ全域において天体を追尾することのできる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 $g_{a\gamma\gamma} < (6.8 - 10.9) \times 10^{-10} \text{GeV}^{-1}$ という上限値を得ることに成功している。

我々はまた、X 線検出器として利用している PIN フォトダイオード (S3590-06-SPL, Hamamatsu) の表面に存在する不感層の厚みを正確に測定することによって、アクシオンの検出効率の精度向上を試みた。その結果、表面不感層の厚みを $0.31 \pm 0.02 \mu\text{m}$ 、太陽アクシオンを変換して得られる X 線の主なエネルギー領域 (4 - 10keV) におけるピーク検出効率を 95% 以上であることが確認された。

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、運転に人手を要するために長時間観測に向いていなかったという欠点の解消のために運転の全自動化を進めている。また、1eV までの重い太陽アクシオン探索のために必要とされる高密度低温ヘリウムガスを制御するための装置開発を進めている。

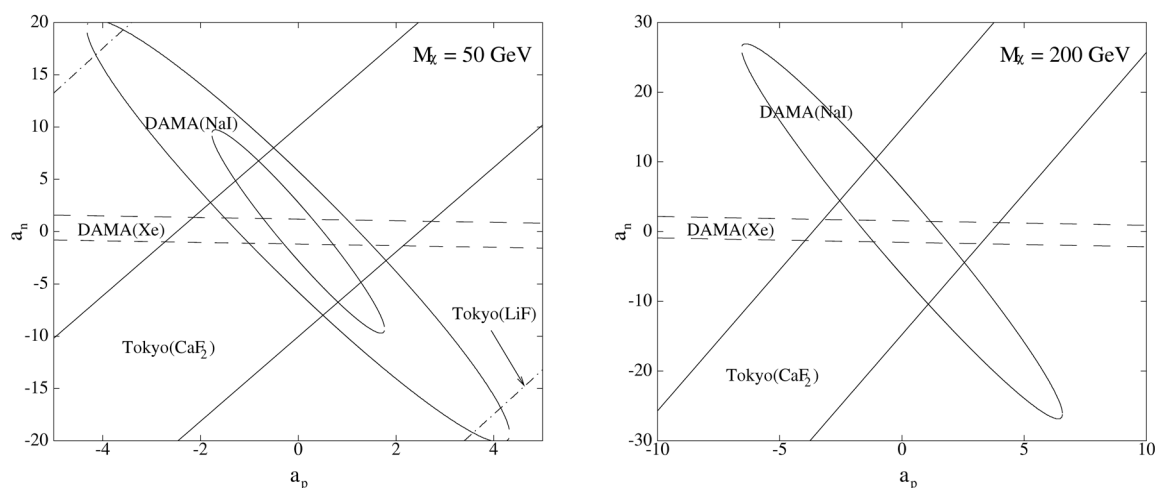


図 2.3 a: 暗黒物質と原子核のスピンに依存した相互作用に対する制限。 a_p 、 a_n はそれぞれ暗黒物質と陽子、暗黒物質と中性子のカップリングを表す。左が暗黒物質の質量 $50\text{GeV}/c^2$ 、右が $200\text{GeV}/c^2$ のとき。

2.3.3 共鳴イオン化質量分析によるニュートリノ検出

これまでの、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検出手段は実質的に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た。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った。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 ± 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、図 2.3 b に示すように、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であるため、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。

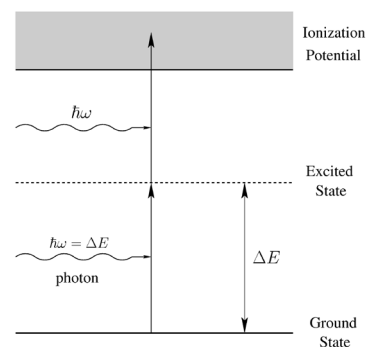


図 2.3 b: 共鳴イオン化の方法

この方法で電子ニュートリノ・反電子ニュートリノの検出を行うための基礎研究を始めた。TOF Spectrometer の最適化や、Q-mass spectrometer による微量元素検出の検討などを始めている。

< 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.

(会議抄録)

- [2] Y. Inoue, H. Sekiya, M. Minowa, Y. Shimizu, W. Suganuma, K. Miuchi, A. Takeda: Current status of Tokyo dark matter experiment, Proc.: Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2003,

Eds: M. Terasawa, S. Kubono, T. Kishida, T. Kajino, T. Motobayashi, K. Nomoto (World Scientific, 2005) pp.123–132.

(学位論文)

- [3] 清水雄輝: Dark matter search experiment in a low radioactive environment with europium-doped calcium fluoride scintillators、平成 17 年 3 月博士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.
- [4] 堀内貴史: 物理実験装置を TCP / IP を用いて簡便に操作する試み、平成 17 年 3 月修士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.
- [5] 秋本祐介: 太陽アクシオン探索実験の結果改善と新規観測にむけての研究、平成 17 年 3 月修士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.

<学術講演>

(国際会議)

- [6] H. Sekiya, M. Minowa, Y. Shimizu, Y. Inoue, W. Suganuma: Dark Matter Search with Direction Sensitive Scintillators, invited talk given at the 5th International Workshop on the Identification of Dark Matter (IDM2004), Edinburgh, Scotland, 6–10 September 2004.

(国内会議)

一般講演

- [7] 秋本祐介: 太陽アクシオン探索実験に用いる PIN フォトダイオードの不感層について、日本物理学会 2004 年秋季大会、高知大学朝倉キャンパス、2004 年 9 月 29 日.
- [8] 清水雄輝: Dark matter search experiment with calcium fluoride scintillator、第 3 回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会、国民休暇村 館山、2005 年 2 月 18 日.
- [9] 清水雄輝: $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ シンチレーターによる暗黒物質直接観測実験、第 11 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、2005 年 2 月 21 日.
- [10] 岩田圭弘: 電子ニュートリノ検出のための 2 段階加速 TOF 質量分析法、日本物理学会第 60 回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、2005 年 3 月 25 日.
- [11] 清水雄輝: $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ シンチレーターを用いた暗黒物質探索実験、日本物理学会第 60 回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、2005 年 3 月 27 日.

(セミナー)

- [12] 蓑輪 眞: 加速器を使わない素粒子実験、集中講義、京都大学大学院理学研究科、2004 年 12 月 15–17 日.
- [13] 蓑輪 眞: 暗黒物質 (ダークマター) の探し方、京都大学大学院理学研究科談話会、2004 年 12 月 17 日.

2.4 相原研究室

当研究室は、高エネルギー粒子加速器を用いた素粒子物理学実験を専門としている。近年は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の B ファクトリーを使った実験 (Belle) で、B 中間子系における CP 非保存現象および、B 中間子の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な検証と新しい物理の探索を行っている。

また、当研究室は、茨城県東海村で建設が進む J-PARC 施設の陽子シンクロトロンを用いたニュートリノ振動実験 (T2K) のためのニュートリノビームラインモニターの開発設計を担当している。さらに将来の大型ニュートリノ検出器用の半導体を使ったハイブリッド型光電子増倍管 (HPD) の開発を行っているほか、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) の開発も開始した。

2.4.1 B 中間子系の CP 非保存現象の精密測定

Belle グループは 2003 年、中性 B 中間子がファイ ϕ 中間子と K_S 中間子に崩壊する過程の CP 非対称度が、小林益川理論による期待値からずれていることを発見した。この崩壊過程は、ペンギンダイアグラム (図 2.4 a) と呼ばれる量子効果のため、小林益川理論を超える新たな物理に対する感度が高い。本年度、Belle グループは、2 億 7400 万個の B 中間子・反 B 中間子対から、175 個の ϕ と K_S^0 中間子への崩壊を観測し、さらに ϕK_S^0 崩壊と同じ振る舞いをすると考えられている他の 6 つの崩壊についても測定に成功して、測定精度を向上した。その結果、標準理論からずれている確率は、全てのモードを足すと 99% になることが明らかになった [1]。このずれは、新しい物理の存在を示唆する、現在最も興味深い結果の一

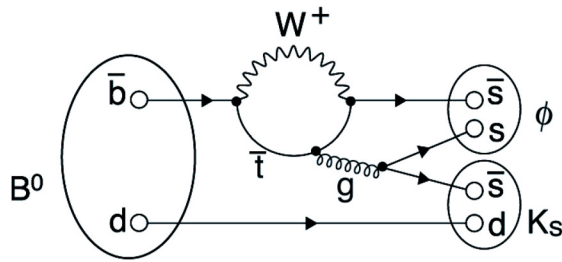


図 2.4 a: $\bar{b} \rightarrow \bar{s}s\bar{s}$ プロセスの代表例である B 中間子が ϕ 中間子と K_S 中間子に崩壊する過程。中間状態において、ボトムクォークが量子効果により、35 倍も重いトップクォークと 16 倍重い W 粒子に化ける過程を示している。

つであり、その解明が B ファクトリーの中心課題であることが一層はっきりした。さらなるデータ量の増加を目指して加速器の改良に取り組んでいる。

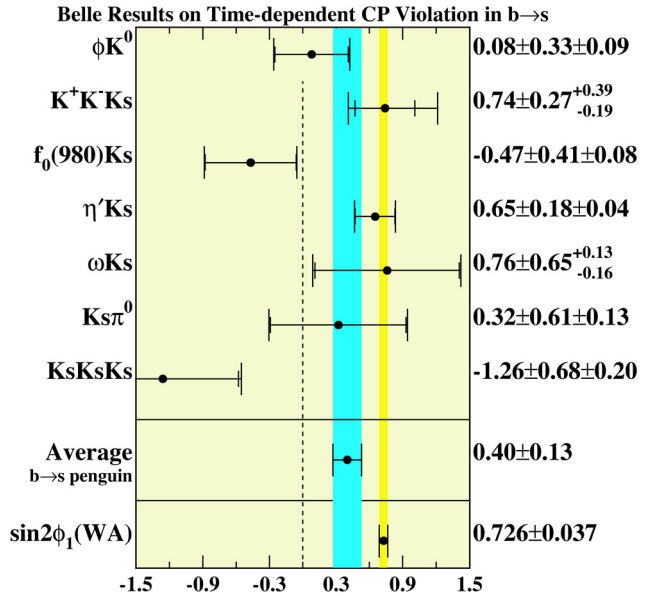


図 2.4 b: B 中間子が ϕ 中間子と K_S 中間子に崩壊する事象 175 例を含む $b \rightarrow s\bar{q}q$ ペンギンプロセスによる B 中間子崩壊を使った CP 対称性の破れのパラメータ $\sin 2\phi_1$ の測定結果。それらの平均値が 0.40 ± 0.13 である。標準理論では、この測定結果が、 $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$ と他の $b \rightarrow c\bar{c}s$ 崩壊事象から得られた値 $\sin 2\phi_1(\text{WA}) = 0.726$ と等しいことが期待されている。

2.4.2 中性 B 中間子の $\pi^+\pi^-$ 崩壊における CP 非対称度測定の実進

中性 B 中間子の $\pi^+\pi^-$ 崩壊における CP 非対称度の測定を昨年度に引き続き行なった。改良されたシリコンバックス検出器 (SVD2) を用いて得られた 1 億 2300 万個の B 中間子・反 B 中間子ペアのデータを新たに追加することで統計精度の向上をはかり、CP 非対称性パラメータ $\mathcal{S}$ と $\mathcal{A}$ について

$$\begin{aligned}\mathcal{S} &= -0.67 \pm 0.16(\text{stat}) \pm 0.06(\text{syst}) \\ \mathcal{A} &= +0.56 \pm 0.12(\text{stat}) \pm 0.06(\text{syst})\end{aligned}$$

の値を得た [2]。得られた $\mathcal{A}$ の値は 4.0σ に相当し、CP 非対称性のより確かな証拠となっている。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。

2.4.3 B 中間子の電弱崩壊の精密測定

超対称性など標準理論を越える新しい物理の出現が期待される $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ (ℓ は e または μ) プロセス (図 2.4 c) の分岐比測定の精度を向上させた。1 億 5200 万個の B 中間子・反 B 中間子ペアを使って、

$$Br(B \rightarrow X_S e^+ e^-) = (4.04 \pm 1.30^{+0.87}_{-0.83}) \times 10^{-6},$$

$$Br(B \rightarrow X_S \mu^+ \mu^-) = (4.13 \pm 1.05^{+0.85}_{-0.81}) \times 10^{-6},$$

これら e と μ のモードを平均して、

$$Br(B \rightarrow X_S \ell^+ \ell^-) = (4.11 \pm 0.83^{+0.85}_{-0.81}) \times 10^{-6}$$

と決定した [3]。ここで、 X_S はストレンジネスを含む任意の終状態である。この結果の測定精度は世界一であり、新しい物理からの寄与に強い制限を与えるものとなっている。

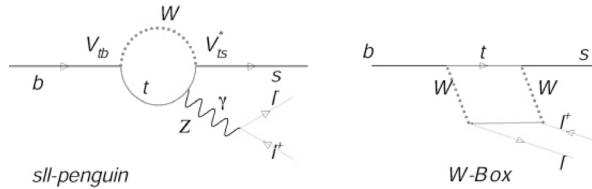


図 2.4 c: $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ electroweak penguin process.

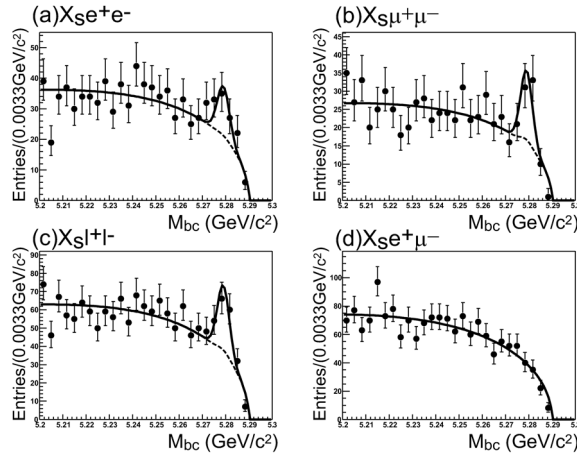


図 2.4 d: 1 億 5200 万個の B 中間子・反 B 中間子ペアを使って $X_S \ell^+ \ell^-$ 終状態を再構成した結果得られた B 中間子の質量分布。信号は 5.28 GeV のまわりにピークを成す [3]。

2.4.4 グリッドデータファームの Belle 実験への応用

Belle 実験では現在毎秒約 10 MB/sec の大量のデータを Belle 検出器から取得・記録している。単位時間あたりに取得されるデータ量は KEKB 加速器の輝度の向上に従って増加しつづけており、効率的にデータを処理する仕組みが必要である。産業技術総合研究所 (産総研) グリッド研究センターで開発されている Gfarm ファイルシステムの Belle 実験データ解析への応用を行なっている。Gfarm ファイルシステムはメタデータサーバおよび多数のファイルシステムノードで構成された仮想ファイルシステム (クラウド/グリッド・ファイルシステム) である。Belle 実験データを Gfarm ファイルシステムノードに並列に分散記録・データ処理を行なうために必要なソフトウェアを開発し、その仕組みを確立した。Belle 実験データをリアルタイムで産総研ノードに並列に記録し、カリフォルニア大サンディエゴ校スーパーコンピュータセンター (SDSC) ノードでデータ処理をする実験を SC2004 国際会議で産総研と共同で行ない、日米間にまたがる複数の拠点で大規模データの共有と解析をリアルタイムで行うことに世界で初めて成功した。

2.4.5 J-PARC 長基線ニュートリノ振動実験 T2K での陽子ビームプロファイルモニターの開発

J-PARC での 50GeV 陽子ビーム、およびスーパーカミオカンデ測定器を用いた次世代長期線ニュートリノ振動実験 (T2K) では、現行の K2K 実験に比べて、100 倍高い強度の陽子ビームが使用される。一方、ニュートリノビームライン上には、超伝導電磁石が使用される。ビーム損失による電磁石のクエンチを防ぐためには、ビームのエネルギー損失を非常に小さく抑える必要がある。したがって、高ビーム強度下で使用可能であり、かつ周囲のコンポーネントへの影響が少ないビームモニターの開発が重要である。

当研究室では、モニターの中でも、高いビーム強度下での使用が難しいとされる、プロファイルモニターの開発を行っている。具体的には、破壊型と非破壊型、二種類のモニターの開発を進めている。破壊型では、ビームライン上に金属のストリップまたはワイヤーを設置し、二次電子放出を利用して、プロファイルを測定する。また、非破壊型では、残留ガスがビームで電離されることにより生成された電子または陽イオンを収集して、プロファイルを測定する。

2004 年度には、上記 2 種類のモニターのうち、非破壊型モニターの試作機を製作し、KEKB の PS ラインにおいてビームテストを行った。結果、陽イオン収集モードを使用した場合、ビームプロファイルの測定に成功した (図 2.4 e 参照)。しかし、電子収集モードを使用した場合は、信号とビーム由来の

バックグラウンドのタイミングが一致するため、多量のバックグラウンドが観測された。したがって、ビーム由来のバックグラウンドを避けるには、陽イオン収集モードで動作させることが必要であることが明らかになった [97][103]。また、測定器の較正方法として、ワイヤーからの熱電子を用いる方法を確立した。破壊型モニターについては、現在新しい試作機を作成し、PSラインにおいてビームテストを行い、詳細な開発を進めている。

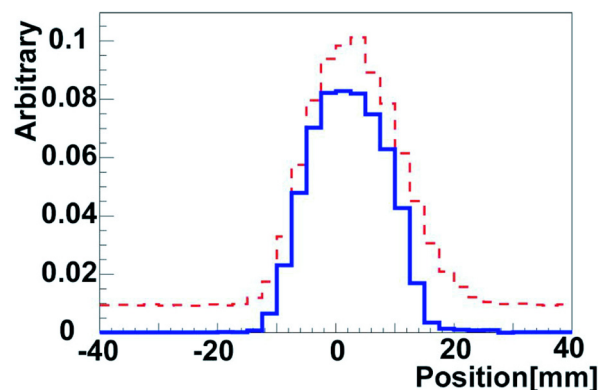


図 2.4 e: 非破壊型陽子ビームプロファイルモニターで得られた KEK PS のビームプロファイル。波線は、比較校正用に用意したワイヤーチェンバーによる測定結果。

2.4.6 ニュートリノビームラインのシミュレーション

J-PARC の 50 GeV 陽子ビームは、非常に強度が高い。したがって、最終収束部にある標的の破壊を防ぐために、ビームサイズと位置をモニターすることが重要になる。一方、標的周辺はビーム損失が非常に大きく、他の構造物質によって空間的にも大きな制約がある。そこで、モニターを標的付近に設置することは大変困難である。

我々は、GEANT 4 を用いたビームラインシミュレーションを構築し、標的の破壊を防ぐには、モニターを、最低どの距離まで近づける必要があるのかを見積もった。その結果、1 mm 間隔でプロファイルを測定する場合、標的から 2 m 以内の距離に設置できれば、標的を保護できることが明らかになった。現在、更に高次の効果として、磁石、モニターの較正の効果、磁場の測定誤差等も含めた詳細な研究を進めている [108]。

2.4.7 次世代水チェレンコフ検出器のためのハイブリッド光検出器開発

次世代メガトン級の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。今年度は、13 インチ HPD (図 2.4 f 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 [102] [111]。

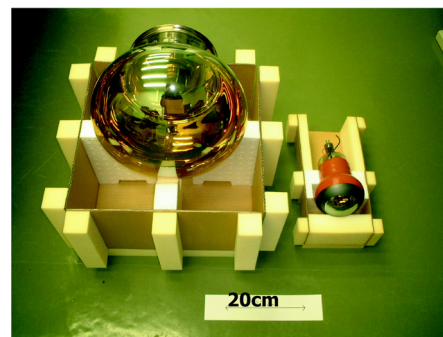


図 2.4 f: 13 インチと 5 インチ Hybrid Photodetector の試作品

2.4.8 国際リニアコライダー加速器用汎用測定器 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) の開発を開始した。SiD は、重心系エネルギー 500 GeV から 1 TeV 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。スタンフォード大学、フェルミ国立研究所 (FNAL) を含む国際協力事業として行っている。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ックス検出器 (Hawaii 大学、FNAL 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、FNAL, KEK, Saclay との共同開発) を含んでいる。

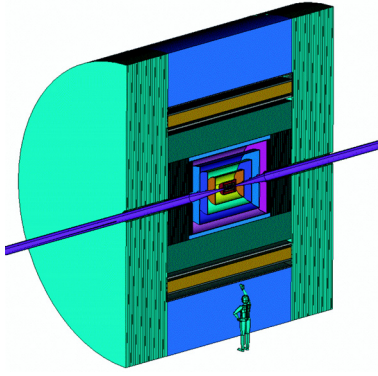


図 2.4 g: Silicon Detector (SiD) の概念図

<報文>

(原著論文)

- [1] K.-F.Chen *et al.*, [Belle Collaboration], “Time-Dependent CP-Violating Asymmetries in $b \rightarrow s\bar{q}q$ Transitions,” [arXiv:hep-ex/0504023]. submitted to PRD.
- [2] H. Ishino *et al.* [Belle Collaboration], “Improved Evidence for Direct CP Violation in $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ Decays and Model-independent constraints on ϕ_2 ,” [arXiv:hep-ex/0502035]. submitted to PRL.
- [3] M. Iwasaki *et al.* [Belle Collaboration], “Improved Measurement of Electroweak Penguin Process $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$,” [arXiv:hep-ex/0503044]. submitted to PRD.
- [4] T. Ziegler *et al.*, “The Belle trigger system with the new silicon vertex detector SVD2,” IEEE Trans. Nucl. Sci. **51**, 1852 (2004).
- [5] H. Ishino *et al.*, “The data acquisition system of the Belle silicon vertex detector (SVD) upgrade,” IEEE Trans. Nucl. Sci. **51**, 2064 (2004).
- [6] R. Abe *et al.*, “BELLE/SVD2 status and performance,” Nucl. Instrum. Meth. A **535**, 379 (2004).
- [7] R. Abe *et al.*, “The new beam pipe for the Belle experiment,” Nucl. Instrum. Meth. A **535**, 558 (2004).
- [8] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of large CP violation and evidence for direct CP violation in $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ decays,” Phys. Rev. Lett. **93**, 021601 (2004) [arXiv:hep-ex/0401029].
- [9] T. Uglov *et al.* [BELLE Collaboration], “Measurement of the $e^+e^- \rightarrow D^{(*)+}D^{(*)-}$ cross-sections,” Phys. Rev. D **70**, 071101 (2004) [arXiv:hep-ex/0401038].
- [10] C. Schwanda *et al.* [Belle Collaboration], “Evidence for $B^+ \rightarrow \omega \ell^+ \nu$,” Phys. Rev. Lett. **93**, 131803 (2004) [arXiv:hep-ex/0402023].
- [11] M. Nakao *et al.* [BELLE Collaboration], “Measurement of the $B \rightarrow K^* \gamma$ branching fractions and asymmetries,” Phys. Rev. D **69**, 112001 (2004) [arXiv:hep-ex/0402042].
- [12] M. Friedl *et al.* [Belles SVD Group], “Readout, First- and Second-Level Triggers of the new Belle Silicon Vertex Detector,” Nucl. Instrum. Meth. A **535**, 491 (2004).
- [13] P. Koppenburg *et al.* [Belle Collaboration], “An inclusive measurement of the photon energy spectrum in $b \rightarrow s \gamma$ decays,” Phys. Rev. Lett. **93**, 061803 (2004) [arXiv:hep-ex/0403004].
- [14] C. H. Wang *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the branching fractions for $B \rightarrow \omega K$ and $B \rightarrow \omega \pi$,” Phys. Rev. D **70**, 012001 (2004) [arXiv:hep-ex/0403033].
- [15] Y. Yusa *et al.* [Belle Collaboration], “Search for neutrinoless decays $\tau \rightarrow 3\ell$,” Phys. Lett. B **589**, 103 (2004) [arXiv:hep-ex/0403039].
- [16] Y. Enari *et al.* [Belle Collaboration], “Search for the lepton flavor violating decay $\tau \rightarrow \mu^- \eta$ at Belle,” Phys. Rev. Lett. **93**, 081803 (2004) [arXiv:hep-ex/0404018].
- [17] J. Dragic *et al.* [BELLE Collaboration], “Evidence of $B^0 \rightarrow \rho^0 \pi^0$,” Phys. Rev. Lett. **93**, 131802 (2004) [arXiv:hep-ex/0405068].
- [18] J. Zhang *et al.* [BELLE Collaboration], “Measurement of branching fraction and CP asymmetry in $B^+ \rightarrow \rho^+ \pi^0$,” Phys. Rev. Lett. **94**, 031801 (2005) [arXiv:hep-ex/0406006].
- [19] A. Poluektov *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of $\phi(3)$ with Dalitz plot analysis of $B^+ \rightarrow D^{(*)} K^+ \pi^-$ decay,” Phys. Rev. D **70**, 072003 (2004) [arXiv:hep-ex/0406067].
- [20] Y. J. Lee *et al.* [BELLE Collaboration], “Observation of $B^+ \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda} K^+$,” Phys. Rev. Lett. **93**, 211801 (2004) [arXiv:hep-ex/0406068].
- [21] P. Chang *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of the decays $B^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0$ and $B^0 \rightarrow \rho^- K^+$,” Phys. Lett. B **599**, 148 (2004) [arXiv:hep-ex/0406075].
- [22] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Study of double charmonium production in e^+e^- annihilation at $s^{*}(1/2)$ approx. 10.6-GeV,” Phys. Rev. D **70**, 071102 (2004) [arXiv:hep-ex/0407009].
- [23] Y. Chao *et al.* [BELLE Collaboration], “Improved measurements of partial rate asymmetry in $B \rightarrow h h$ decays,” Phys. Rev. D **71**, 031502 (2005) [arXiv:hep-ex/0407025].
- [24] C. C. Wang *et al.* [Belle Collaboration], “Study of $B^0 \rightarrow \rho^+ \pi^-$ time-dependent CP violation at Belle,” Phys. Rev. Lett. **94**, 121801 (2005) [arXiv:hep-ex/0408003].

- [25] T. Aushev *et al.* [BELLE Collaboration], “Search for CP violation in the decay $B^0 \rightarrow D^{*+} D^-$,” *Phys. Rev. Lett.* **93**, 201802 (2004) [arXiv:hep-ex/0408051].
- [26] Y. Chao *et al.* [Belle Collaboration], “Evidence for direct CP violation in $B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ decays,” *Phys. Rev. Lett.* **93**, 191802 (2004) [arXiv:hep-ex/0408100].
- [27] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of $B^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$,” arXiv:hep-ex/0408101.
- [28] K. Abe *et al.* [BELLE-Collaboration], “Measurements of branching fractions and polarization in $B \rightarrow K^* \rho$ decays,” arXiv:hep-ex/0408102.
- [29] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Studies of CP violation in $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ decays,” arXiv:hep-ex/0408104.
- [30] S. U. Kataoka *et al.* [Belle Collaboration], “Study of time-dependent CP violation in $B^0 \rightarrow J/\psi \pi^0$ decays,” arXiv:hep-ex/0408105.
- [31] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Time-dependent CP violation effects in partially reconstructed $B \rightarrow D^* \pi$ decays,” arXiv:hep-ex/0408106.
- [32] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Measurement of branching fractions in $B^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ decay,” arXiv:hep-ex/0408107.
- [33] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Improved measurements of anti- $B^0 \rightarrow D^0$ anti- K^0 and anti- $B^0 \rightarrow D^0$ anti- K^{*0} branching fractions,” arXiv:hep-ex/0408108.
- [34] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Observation of $B^0 \rightarrow D/s^+ \pi^-$,” arXiv:hep-ex/0408109.
- [35] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Improved measurement of CP-violation parameters $\sin(2\phi(1))$ and $|\lambda|$, B meson lifetimes, and B^0 anti- B^0 mixing parameter $\Delta(m(d))$,” *Phys. Rev. D* **71**, 072003 (2005) [Erratum-ibid. *D* **71**, 079903 (2005)] [arXiv:hep-ex/0408111].
- [36] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Search for D^0 anti- D^0 mixing using semileptonic decays at Belle,” arXiv:hep-ex/0408112.
- [37] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the inclusive charmless semileptonic branching fraction of B meson using the full reconstruction tag,” arXiv:hep-ex/0408115.
- [38] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Properties of the X(3872) at Belle,” arXiv:hep-ex/0408116.
- [39] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Search for lepton and baryon number violating tau- decays into anti-p gamma, anti-p π^0 , Antilambda π^- , and Lambda π^- ,” arXiv:hep-ex/0408117.
- [40] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Improved measurement of the electroweak penguin process $B \rightarrow X/s \, l^+ l^-$,” arXiv:hep-ex/0408119.
- [41] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of $B \rightarrow K \eta \gamma$,” arXiv:hep-ex/0408120.
- [42] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Search for D^0 anti- D^0 mixing in $D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ decays and measurement of the doubly-Cabibbo-suppressed decay rate,” *Phys. Rev. Lett.* **94**, 071801 (2005) [arXiv:hep-ex/0408125].
- [43] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of a near-threshold omega J/psi mass enhancement in exclusive $B \rightarrow K \omega J/\psi$ decays,” arXiv:hep-ex/0408126.
- [44] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Study of the suppressed decays $B^{+-} \rightarrow (K^- + \pi^+)(D) K^{+-}$ at Belle,” arXiv:hep-ex/0408129.
- [45] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of branching fraction and CP asymmetry in $B \rightarrow \eta h$ decays,” arXiv:hep-ex/0408131.
- [46] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Search for $B^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ and $B^+ \rightarrow l^+ \nu \gamma$ decays,” arXiv:hep-ex/0408132.
- [47] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Search for the $b \rightarrow d \gamma$ process,” arXiv:hep-ex/0408137.
- [48] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Observation of $B^+ \rightarrow K(1270)^+ \gamma$,” arXiv:hep-ex/0408138.
- [49] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Moments of the hadronic mass spectrum in inclusive semileptonic B decays at Belle,” arXiv:hep-ex/0408139.
- [50] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Measurement of polarization and triple-product correlations in $B \rightarrow \Phi K^*$ decays,” arXiv:hep-ex/0408141.
- [51] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Search for $B^0 \rightarrow p \text{ anti-}p$, Lambda Antilambda and $B^+ \rightarrow p \text{ Antilambda}$ at Belle,” *Phys. Rev. D* **71**, 072007 (2005) [arXiv:hep-ex/0408143].
- [52] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Search for $B^- \rightarrow \tau^- \text{ anti-}\nu$ at Belle,” arXiv:hep-ex/0408144.
- [53] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Measurement of exclusive $B \rightarrow X/u \, l \, \nu$ decays with $D^{(*)} l \, \nu$ decay tagging,” arXiv:hep-ex/0408145.
- [54] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Study of decay mechanisms in $B^- \rightarrow \Lambda/c^+ \text{ anti-}p \pi^-$ decay and observation of anomalous structure in the $(\Lambda/c^+ \text{ anti-}p)$ system,” arXiv:hep-ex/0409005.
- [55] G. Majumder *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of $B^0 \rightarrow D^{*-} (5\pi)^+$, $B^+ \rightarrow D^{*-} (4\pi)^{++}$ and $B^+ \rightarrow \text{anti-}D^{*0} (5\pi)^+$,” *Phys. Rev. D* **70**, 111103 (2004) [arXiv:hep-ex/0409008].
- [56] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Observation of $B^+ \rightarrow p \text{ anti-}\Lambda \gamma$,” arXiv:hep-ex/0409009.

- [57] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Study of the baryon antibaryon low-mass enhancements in charmless three-body baryonic B decays,” arXiv:hep-ex/0409010.
- [58] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “CP violation in B anti-B mixing with dilepton events,” arXiv:hep-ex/0409012.
- [59] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Moments of the electron energy spectrum in semileptonic B decays at Belle,” arXiv:hep-ex/0409015.
- [60] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Observation of anti-B0 $\rightarrow$ D/sJ*(2317)+ K- decay,” arXiv:hep-ex/0409026.
- [61] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “New measurements of time-dependent CP-violating asymmetries in $b \rightarrow s$ transitions at Belle,” arXiv:hep-ex/0409049.
- [62] T. Lesiak *et al.* [BELLE Collaboration], “Measurement of masses and branching ratios of $\Xi/c+$ and $\Xi/c0$ baryons,” Phys. Lett. B **605**, 237 (2005) [arXiv:hep-ex/0409065].
- [63] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the differential q^{*2} spectrum and forward-backward asymmetry for $B \rightarrow K(*) l+ l-$,” arXiv:hep-ex/0410006.
- [64] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of the $D1(2420) \rightarrow D \pi+ \pi-$ decays,” arXiv:hep-ex/0410091.
- [65] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Search for pentaquarks at Belle,” arXiv:hep-ex/0411005.
- [66] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of $\phi(3)$ with Dalitz plot analysis of $B_{+-} \rightarrow D(*) K_{+-}$ decay at Belle,” arXiv:hep-ex/0411049.
- [67] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “New measurements of time-dependent CP-violating asymmetries in $B0 \rightarrow K(S) K(S) K(S)$ and $K(S) \pi0$ gamma decays at Belle,” arXiv:hep-ex/0411056.
- [68] S. Nishida *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of $B+ \rightarrow K+ \eta$ gamma,” Phys. Lett. B **610**, 23 (2005) [arXiv:hep-ex/0411065].
- [69] T. Okabe *et al.*, “Spectra of prompt electrons from decays of $B+$ and $B0$ mesons and ratio of Phys. Lett. B **614**, 27 (2005) [arXiv:hep-ex/0411066].
- [70] M. Saigo *et al.*, “Study of the suppressed decays $B- \rightarrow (K+ \pi-)(D) K-$ and $B- \rightarrow (K+ \pi-)(D) \pi-$,” Phys. Rev. Lett. **94**, 091601 (2005) [arXiv:hep-ex/0412025].
- [71] H. Yang *et al.*, “Observation of $B+ \rightarrow K1(1270)+$ gamma,” Phys. Rev. Lett. **94**, 111802 (2005) [arXiv:hep-ex/0412039].
- [72] P. Chang *et al.* [Belle Collaboration], “Measurements of branching fractions and CP asymmetries in $B \rightarrow \eta h$ decays,” arXiv:hep-ex/0412043.
- [73] H. Nakazawa *et al.* [BELLE Collaboration], “Measurement of the $\gamma \gamma \rightarrow \pi+ \pi-$ and $\gamma \gamma \rightarrow K+ K-$ processes at energies of 2.4-GeV - 4.1-GeV,” arXiv:hep-ex/0412058.
- [74] A. Garmash *et al.* [BELLE Collaboration], “Dalitz analysis of the three-body charmless decays $B+ \rightarrow K+ \pi+ \pi-$ and $B+ \rightarrow K+ K+ K-$,” arXiv:hep-ex/0412066.
- [75] R. Mizuk *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of an isotriplet of excited charmed baryons decaying to $\Lambda b/c+ \pi$,” Phys. Rev. Lett. **94**, 122002 (2005) [arXiv:hep-ex/0412069].
- [76] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Study of $B0 \rightarrow$ anti-D(*)0 $\pi+ \pi-$ decays,” arXiv:hep-ex/0412072.
- [77] A. Drutskoy *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of anti-B0 $\rightarrow D^*(sJ)(2317)+ K-$ decay,” Phys. Rev. Lett. **94**, 061802 (2005).
- [78] J. Schumann *et al.* [BELLE Collaboration], “Observation of anti-B0 $\rightarrow D0 \eta'$ and anti-B0 $\rightarrow D^*0 \eta'$,” arXiv:hep-ex/0501013.
- [79] H. Miyake *et al.* [Belle Collaboration], “Branching fraction, polarization and CP-violating asymmetries in $B0 \rightarrow D^{*+} D^{*-}$ decays,” arXiv:hep-ex/0501037.
- [80] K. Hayasaka *et al.*, “Search for $\tau \rightarrow e \gamma$ decay at Belle,” Phys. Lett. B **613**, 20 (2005) [arXiv:hep-ex/0501068].
- [81] G. Majumder *et al.*, “Observation of $B0 \rightarrow D+ D-$, $B- \rightarrow D0 D-$ and $B- \rightarrow D0 D^{*-}$ decays,” arXiv:hep-ex/0502038.
- [82] C. C. Kuo *et al.*, “Measurement of $\gamma \gamma \rightarrow p \text{ anti-}p$ production at Belle,” arXiv:hep-ex/0503006.
- [83] Y. Ushiroda *et al.*, “New measurement of time-dependent CP-violating asymmetry in $B0 \rightarrow K0(S) \pi0$ gamma decay,” arXiv:hep-ex/0503008.
- [84] K. F. Chen *et al.* [BELLE Collaboration], “Measurement of polarization and triple-product correlations in $B \rightarrow \Phi K^*$ decays,” arXiv:hep-ex/0503013.
- [85] L. M. Zhang *et al.* [Belle Collaboration], “Search for $B0 \rightarrow J/\psi \text{ anti-}D0$ and $B+ \rightarrow J/\psi \text{ anti-}D0 \pi+$ decays,” arXiv:hep-ex/0503037.
- [86] Y. Enari *et al.* [Belle Collaboration], “Search for lepton flavor violating decays $\tau \rightarrow l \pi0$, $l \eta$, l ,” arXiv:hep-ex/0503041.
- [87] Y. J. Lee *et al.*, “Observation of $B+ \rightarrow p \text{ anti-} \Lambda b/c \gamma$,” arXiv:hep-ex/0503046.
- [88] M. Z. Wang *et al.*, “Study of the baryon antibaryon low-mass enhancements in charmless three-body baryonic B decays,” arXiv:hep-ex/0503047.
- [89] R. Itoh *et al.* [Belle Collaboration], “Studies of CP violation in $B \rightarrow J/\psi K^*$ decays,” arXiv:hep-ex/0504030.

- [90] A. Limosani *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of inclusive charmless semileptonic B-meson decays at the endpoint of the electron momentum spectrum,” arXiv:hep-ex/0504046.

(会議抄録)

- [91] H. Aihara, “Results from B-factories and perspectives,” Czech. J. Phys. **54**, A311 (2004).

(学位論文)

- [92] 修士論文, 石田 亮介: R&D Beam Monitors at J-PARC Neutrino Beamline

- [93] 修士論文, 伊藤 康: Research and Development of Event Building Farm for SuperKEKB

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [94] H. Aihara: “Recent results from Belle,” 13th International Seminar on High Energy Physics, Quarks-2004, Pushkinskie Gory, Russia, May 24-30, 2004.

- [95] H. Kakuno: “Time dependent CP violation in B to pi+pi- decay,” The XXXXth Rencontres de Moriond on ELECTROWEAK INTERACTIONS AND UNIFIED THEORIES, La Thuile, Aosta Valley, Italy, March 5-12, 2005.

一般講演

- [96] A. Kusaka: “Time-dependent CP analysis, vertexing technique in Belle,” Talk given at 3rd Workshop on the Unitarity Triangle (CKM2005), 15-18 March 2005, University of California San Diego, CA, U.S.A.

- [97] R. Ishida and Y. Nakahama: “R&D of Residual Gas Beam Profile Monitor,” IEEE Nuclear Science Symposium 2004, Rome, Italy, Oct. 16-22, 2004.

- [98] K. Itoh: “Research and Development of Event Building Farm for SuperKEKB,” *ibid.*

(国内会議)

招待講演

- [99] 岩崎 昌子: “Belle の最近の研究から,” 日本物理学会 秋季大会, 高知大学, 2004/9/27-30.

- [100] 角野 秀一: 第6回高エネルギー物理学奨励賞受賞講演 “Measurement of $|V_{ub}|$ using inclusive $B \rightarrow X_u \ell \nu$ Decays with a Novel X_u -Reconstruction Method,” *ibid.*

一般講演

- [101] 日下 暁人: “Study of CP Violation in $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ at Belle with the New Silicon Vertex Detector,” 日本物理学会 秋季大会, 高知大学, 2004/9/27-30

- [102] 中山 浩幸: “水チェレンコフ検出器用ハイブリッドフォトディテクタの開発,” *ibid.*

- [103] 中浜 優: “J-PARC 残留ガスビームプロファイラモニターの基本性能評価,” *ibid.*

- [104] 伊藤 康: “SuperKEKB 用イベントビルディングシステムの研究開発,” *ibid.*

- [105] 日下 暁人: “Measurement of CKM Angle ϕ_2 at the Belle Experiment,” 日本物理学会 2005 年春季大会, 東京理科大学野田キャンパス, 2005 年 3 月 24-27 日

その他

- [106] 岩崎 昌子: “J-PARC・神岡間ニュートリノ振動実験用ビームモニターの開発,” 佐賀大学 (2004 年 6 月 23 日)

- [107] 岩崎 昌子: “J-PARC・神岡間ニュートリノ振動実験用ビームモニターの開発,” 広島大学 (2004 年 7 月 22 日)

- [108] 岩崎 昌子: “Proton Beam Monitors Overview,” The 3rd International Workshop on Nuclear and Particle Physics at J-PARC (NP04), KEK, Aug.24, 2004.

- [109] 岩崎 昌子: “Recent results on B meson rare decays from Belle” 科研費特定領域 第三回研究会「質量起源と超対称性物理の研究」、2005 年 3/7-8, 筑波大学

- [110] 相原 博昭: “Recent Results on CP Violation from Belle,” *ibid.*

- [111] 中山 浩幸: “Development of a Hybrid Photo-Detector (HPD) for a Next Generation Water Cherenkov Detector,” 第 11 回 ICEPP シンポジウム, 2004 年 2 月 22 日

(受賞)

- [112] 角野 秀一: 第 6 回 (2004 年度) 高エネルギー物理学若手奨励賞 “Measurement of $|V_{ub}|$ using inclusive $B \rightarrow X_u \ell \nu$ Decays with a Novel X_u -Reconstruction Method.”

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

スピン自由度をもつ物質波ブライトソリトン

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 [11, 12, 21, 22, 25]。

BEC の基礎方程式である、グロス・ピタエフスキー方程式は、粒子間相互作用起因する非線形項をもち、非線形光学など媒質の非線形性による非線形項をもつ非線形シュレーディンガー (NLS) 方程式と等価である。このため、非線形波動の観点からのアプローチが有効となる。物質波ソリトンと内部自由度の融合した状況の記述には、多成分に拡張された NLS 方程式が用いられる。内部自由度としては、多くのアルカリ原子でみられる $F = 1$ 超微細基底状態を選定した。この場合、凝縮体は 3 成分スピノルと呼ばれる超微細スピン空間で回転対称なベクトル型秩序パラメータで特徴付けられる。我々は、これら 3 成分の場の従う時間発展方程式が、結合定数の調整によって、完全可積分系に帰着できることを証明し、逆散乱法を適用することでスピノル型ブライトソリトン解を厳密に求めた [11, 12, 36]。

ここで得られた解を物理的に解釈することで、以下のことを明らかにした [44]: 1) 内部自由度の持つ対称性に応じ、強磁性ソリトンと極性ソリトンに分類される。2) 強磁性ソリトン同士の衝突は巨視的スピンの歳差運動として解釈される。3) 極性ソリトンにはピークが二山に分かれる解が存在する。4) ソリトン同士の衝突によって、内部自由度間のスイッチングが実現できる。これらの観測は、BEC 研究における近年の実験技術の進展からすると、十分可能であり、物質波での量子情報処理への道が開かれることを期待する。

閉じ込め誘起共鳴を用いた可積分条件の実現

冷却原子の BEC における重要な実験手法の一つに、フェッシュバハ共鳴を用いた原子間相互作用

の制御がある。これまで、引力による凝縮体の崩壊、超流動・絶縁体転移、分子 BEC 形成、BEC-BCS クロスオーバー等の実現に幅広く適用され大きな成功を収めている。通常のフェッシュバハ共鳴では、共鳴状態を作るために凝縮体に外部磁場の印加をおこなう。これはスピン自由度の凍結を引き起こし、スピノル型 BEC を研究する上では大きな障害となる。よって、上記で取り扱った $F = 1$ スピノル型 BEC の可積分模型における可積分条件を実現するためには、磁場を用いない手法が必要となる。我々は、この問題を動径方向の閉じ込めポテンシャルの強度を調整することによって解決できることを明らかにした [11, 37]。この技術は閉じ込め誘起共鳴として知られる擬一次元系特有の相互作用制御手法で、閉じ込めポテンシャルとしてレーザー光を用いれば、磁場を用いずにトラップと可積分条件の双方を同時に実現することが可能となる。

スピノル型ダークソリトンとドメインウォール

凝縮体の平均場相互作用が斥力である場合、凝縮体中の密度欠陥としてダークソリトンの発生・伝播が観測されている。我々はこのダークソリトンの伝播を、スピノル凝縮体のような多成分系に拡張した場合を考察し、ブライトソリトンの場合に有効であった逆散乱法による厳密解の構成が同じく可能であることを示した [25]。

非線形発展方程式の解析手法である逆散乱法では、ブライトソリトンの場合と比較すると、ダークソリトンの解析において境界条件の取り扱いの違いから技術的な困難が生じる。このため、行列型の多成分系への拡張といった試みは、具体的な解の構成レベルにおいてこれまで行われていなかった。そこで、まず多成分 NLS 方程式系における可積分な境界条件の存在を示し、はじめて行列型 NLS 方程式の多成分ダークソリトン解を一般に構成した [25]。

この結果を、平均場相互作用が斥力であるような $F = 1$ スピノル BEC の一次的なダイナミクスに応用し、スピノル凝縮体におけるダークソリトン解を導出した。この解析により、凝縮体中のスピントクスチャーのダイナミクスとして、スピン空間におけるドメインウォールの伝播が生じることを明らかにした [47]。

3.1.2 ソリトン方程式

繰り込みとソリトン方程式

1997 年、D. Kreimer は場の理論におけるファインマン図形のなす線形空間が、Hopf 代数の構造を持つことを示し、繰り込みの代数的構造を見つけた。さらに A. Connes と D. Kreimer は、繰り込みとは、その Hopf 代数の指標群のループ群に対する Birkhoff 分解に他ならないことを示した。また β 関数の幾何学的解釈も得られた。Hopf 代数やループ群の Birkhoff 分解は、可積分系でよく用いられ、関連が期待され

る。[8]において、Connes–Kreimer 理論と、古典可積分系、特に AKNS 型ソリトン方程式の理論との対応を示した。繰り込み点 $\ln \mu$ はソリトン方程式の時間に対応し、 β 関数はポテンシャルに対応する。また散乱型公式の簡単な導出を示し、次元正則化のパラメータ ε に対する指標の微分方程式を導出した。

非可換空間上のソリトン方程式

4 次元非可換空間上の自己双対ヤン・ミルズ方程式は、近年よく研究され、解空間等も分かっている。一方、低次元 (1+1, 1+2 次元) 非可換空間上のソリトン方程式は、さほど手が付けられておらず、その構造はよく分かっていない。[9]において、演算子係数の擬微分作用素のなす群の Birkhoff 分解を用いて、非可換空間上の KP 階層を研究した。特にその解空間が可換な場合と同等であることを示した。また、非可換空間上の戸田階層を、演算子を成分として持つ無限サイズの行列の Birkhoff 分解を用いて構成した。また波動関数が双線形恒等式を満たすことを示し、 N -ソリトン解を求めた。その簡約として非可換 KP 階層の N -ソリトン解も得た。

3.1.3 高分子物理学

単一高分子鎖の統計物理学は、フローリーによる先駆的研究を端緒とし、その後ドゥジェンヌによって、臨界現象との関係が指摘されるに至り、一般には、問題はすべて解決済みとされている。しかし、フローリーの用いた仮定は正当でないことも知られている。従来、単一高分子鎖を統計物理学的に扱う方法としては、鎖に沿った座標を用いる方法が採られてきた。この方法によれば、高分子鎖のエントロピーを求めることが可能であるが、セグメント間の相互作用を採り入れることは困難である。鎖に沿って長距離であっても、実空間上では短距離になりえるためである。

このような困難さを持つ高分子鎖の統計に対して、我々は、セグメントの分布密度関数を導入することにより、この困難さを回避する 1 つの可能性を提案した。そして、弾性エネルギーに基づくエントロピーを仮定してフローリーの膨潤指数を求め、これが従来知られている、末端間距離に関する $3/5$ 乗則と一致することを確認した。さらに、鎖がある程度の柔軟性を持っている限り、この法則はかなり普遍的なものであることが示唆された [27]。

3.1.4 非平衡統計物理

1 次元非平衡モデル

1 次元格子上で体積排除相互作用及び左右非対称にランダムホッピングする粒子の多体系のモデルとして知られる非対称単純排他過程 (Asymmetric Simple

Exclusion Process) は、定常状態に緩和した後も一定の粒子の流れを生じているという意味で非平衡なモデルである。

このモデルの定常状態は様々な物理量が解析的に表せることが知られており、粒子流や粒子密度といったバルク量だけでなく相関関数の積分表式を厳密に書き下すことができる。我々は、境界のある系について転送行列の固有値分布から相関長に関する相図を得た。また相関長が発散する相については、より具体的に n 点関数の積分表式の漸近形を評価し、有限サイズ補正の leading term を計算した。[15, 39, 49]

マイノリティゲーム

マイノリティゲームは、相互依存的な状況下での社会集団の多数決意思決定と学習過程をモデル化したものである。その学習過程には非平衡系としての興味もあり、統計物理学の手法を応用して近年研究が進められている。

我々はプレイヤー間の相互作用の有無をグラフ G として表現出来ることに注目し、プレイヤー間にネットワーク構造がある場合の少数派ゲームの研究を行った。そのような系の一例として、グラフ G が指数型分布に従うランダムグラフを考え、ランダムグラフ上におけるバッチ学習型マイノリティゲームについて解析的手法により調べた。プレイヤーたちの学習の時間発展を記述する Chapman-Kolmogorov 方程式から出発し、生成汎関数を考えることにより、熱力学極限においてはある Gauss 雑音のもとでの一体の確率過程に帰着されることを示し、その有効一体確率過程の性質を議論した。[46]

3.1.5 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る。特にその固有値相関は、行列要素の乱雑さの性質によらない普遍的な構造を持っている。また、この普遍性は量子カオスにおけるエネルギー準位相関やメソスコピック系におけるコンダクタンスゆらぎ等に現れることが明らかにになり、ランダム行列理論の物理学への応用も活発に議論されている。

最近、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大きな注目を集めている。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、ゆらぎの境界条件依存性やランダム行列理論との関係などを考察した。具体的には以下の通りである。

外場のある PNG 模型における高さゆらぎ

両端に外場がある場合の PNG 模型においてその高さゆらぎの多点分布関数を厳密に導出し、ゆらぎの性質が外場の大きさに応じてどのように変化するのかを考察した [13]。高さゆらぎの性質は、両端の外場の大きさの積が臨界値より大きいのか、小さいのか、等しいかで三つに分類できることを明らかにした。まず外場の積が臨界値より大きい時、すべての点での高さゆらぎはガウス分布で記述されることがわかった。次に外場の積が臨界値より小さい時は、バルクの高さゆらぎは GUE ランダム行列の最大固有値分布 (GUE Tracy-Widom 分布) で表され、エッジ付近の高さゆらぎはガウス分布で表されることが分かった。さらにエッジとバルクの統計が競合する特別な点 (GOE² 点) が存在し、その点での高さゆらぎは 2 つの GOE の固有値分布を独立に重ね合わせたものの最大固有値分布 (GOE²) で記述されることがわかった。最後に外場の積が臨界値に等しい時は特別な点 (F₀ 点) を除くすべての点における高さゆらぎはガウス分布であり、F₀ 点における高さゆらぎは F₀ と呼ばれる分布で記述できることを明らかにした。また GOE² 点や F₀ 点のまわりの多点分布関数を考察し、これらの点から離れていくにつれ、高さゆらぎがどのように GOE² から GUE Tracy-Widom 分布へ、もしくは F₀ からガウシアンへと遷移していくのかを明らかにした。

PNG 模型、非交差ブラウン粒子系と外場のあるランダム行列理論

上記の GOE² および GOE² 点付近の多点分布関数に関するランダム行列理論による解釈を行った [14]。その結果、GOE² は外場のあるランダム行列の特別な場合における最大固有値分布という別のランダム行列解釈が出来ることを示した。この解釈は、GOE² だけでなく上記の GUE Tracy-Widom 分布から GOE² への遷移をも記述出来るという点で、より自然で統一である。

外場のあるランダム行列は Brézin-氷上により最初に研究され、最近では特に確率過程との関連で活発に研究が行われている。我々はさらに、外場のある PNG モデルと密接に関係している非交差ブラウン粒子系と外場のあるランダム行列との関係を議論し、このランダム行列が確率過程としてどのような意味を持つのかを考察した。

3.1.6 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

の手法を拡張し、引力相互作用する 1 次元 δ 関数スピンの 1/2 フェルミ気体の基底状態において、準粒子のスピンの分布関数を定める積分方程式 (Gaudin 積分方程式) を得た。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。そして、この展開パラメータにあるスケール変換をほどこすと、相互作用の強い場合において、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 [38]。また、この極限は 1 次元剛体ボース気体とも一致をみた。その剛体球の実効的な半径は、粒子の統計性の違いを反映し、ボース気体の時は負、フェルミ気体の時は正とみなせることも判明した。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ということが結論された [16]。

一方、 $T = 0$ における 1 次元量子多体系の相関関数の漸近的な振る舞いは、時空 $(1 + 1)$ 次元の共形場の理論により記述されることが知られている。臨界指数は、dressed charge、dressed energy とよばれる、2 つの積分方程式の解を用いて表される。我々はこれらの物理量についても同様の計算手法を適用することにより、 $T = 0$ において 1 次元ボース気体の dressed charge と dressed energy を求め、2 次の範囲で相関関数の臨界指数の計算を行った [45]。

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 [17, 18, 28, 32, 50, 59, 60]。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。

3.1.7 量子情報と量子計算

量子多体系のエンタングルメントの性質

エンタングルメントと呼ばれる非局所的量子相関は、古くは Einstein, Podolsky, Rosen (EPR) によって量子論のパラドックスとして提案されたものであったが、現在では量子情報処理を行うために必須の資源と考えられており、同時に量子論の根本に多くの新しい理解を与えている。それ故、エンタングルメントの特徴付け・定量化は大きな関心事である。特に、現代情報化社会はネットワークを構成し多くの構成要素が作用しあうことで高度な情報処理を遂行しているので、量子情報においても多体構成要素間での量子情報処理およびそれを可能とする多体系のエンタングルメントはとても重要なテーマとなっている。加えて、量子系を制御・操作する実験技術の進歩は目を見張るものがあり現在 3 体以上の多体系を扱えるようになりつつあるので、呼応して理論も進展することが望まれている。

そこで、前年度に引き続き多体系でのエンタングルメントの性質と量子情報処理への活用を研究した。制御操作によってどのようにエンタングルメントが変換されるかを興味深い 3 体系で主に解析した。この変換性を決めているエンタングルメントの指標を明らかにすることにより、エンタングルメントの多体間での共有に際しての制限も考察した。これは、多体系ではじめて重要な課題となるだけでなく、量子暗号などの応用面も期待されるエンタングルメントの基本性質である。また、量子コンピュータにおける多体エンタングルメントのダイナミクスを統計力学におけるフリーフェルミオンモデルへ写像することにより、古典コンピュータ上でも模倣できる量子計算の古典的部分の性質を議論した。

3.1.8 結び目理論・低次元トポロジー

量子不変量

ジョーンズによる結び目不変量の発見以降、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。われわれはトラス絡み目の色つきジョーンズ多項式が半整数重みをもつ保型形式と関係することを明らかにし、保型性を用いて不変量の漸近展開を厳密に得た。[3] この手法をさらに発展させ、ザイフェルト多様体の Witten-Reshetikhin-Turaev 不変量と保型形式との関係を明らかにして漸近展開を詳細に調べた。[4, 7] その結果、Chern-Simons 不変量や Casson 不変量といった位相不変量が保型形式の立場から解釈できることを示した。また、色つきジョーンズ多項式の漸化式が A 多項式と一致するとの AJ 予想をトラス結び目の場合について証明した。[6]

<受賞>

- [1] 和達：紫綬褒章
- [2] 三宅：第 2 1 回井上研究奨励賞

<報文>

(原著論文)

- [3] K. Hikami: Quantum invariant for torus link and modular forms, *Commun. Math. Phys.* **246**, 403–426 (2004)
- [4] K. Hikami: Quantum Invariant, Modular Form, and Lattice Points, *IMRN* **2005**:3 (2005) 121–154.
- [5] L. Amico and K. Hikami: Integrable spin-boson interaction in the Tavis–Cummings model from a generic boundary twist, *Euro. Phys. J. B* **43**, 387–391 (2005)
- [6] K. Hikami: Difference equation of the colored Jones polynomial for torus knot, *Int. J. Math.* **15**, 959–965 (2004).
- [7] K. Hikami: On the Quantum Invariant for the Brieskorn Homology Spheres, *Int. J. Math.* (2005), to appear.
- [8] M. Sakakibara: On the Differential equations of the characters for the Renormalization group, *Mod. Phys. Lett.* **A19** (2004) 1453–1456.
- [9] M. Sakakibara: Factorization methods for noncommutative KP and Toda hierarchy, *Jour. Phys.* **A37** (2004) L599–L604.
- [10] A. Miyake: Multipartite entanglement under stochastic local operations and classical communication, *Int. J. Quant. Info.* **2**, 65–77 (2004).
- [11] J. Ieda, T. Miyakawa, and M. Wadati: Exact analysis of soliton dynamics in spinor Bose-Einstein condensates, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 194102–1–4 (2004).
- [12] J. Ieda, T. Miyakawa, and M. Wadati: Matter-Wave Solitons in an $F = 1$ Spinor Bose-Einstein Condensate, *J. Phys. Soc. Jpn.* **73**, 2996–3007 (2004).
- [13] T. Imamura and T. Sasamoto: Fluctuations of the one-dimensional polynuclear growth model with external sources, *Nuc. Phys. B* **43**, 503–544 (2004).
- [14] 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).
- [15] M. Uchiyama and M. Wadati: Correlation Function of Asymmetric Simple Exclusion Process with Open Boundaries, *J. Nonlinear Math. Phys.* **12** Suppl. 1, 676–688 (2005)
- [16] T. Iida and M. Wadati: Exact analysis of δ -function attractive fermions and repulsive bosons in one-dimension, *J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005), in press.

- [17] R.Sakamoto, J.Shiraishi, D.Arnaudon, L.Frappat, E.Ragoucy, Correspondences between conformal field theory and Calogero-Sutherland model, Nucl. Phys. B **704**, 490-509 (2005).
- [18] R.Sakamoto, Explicit formula for the singular vectors of the Virasoro algebra with central charge less than 1, Chaos, Solitons & Fractals **25**, 147-151 (2005).

(会議抄録)

- [19] K. Hikami: Asymptotic Behavior of the WRT Invariant and Modular Form, in Proceedings of Intelligence of Low-Dimensional Topology, pp. 53-62 (2004).
- [20] M. Sakakibara: Super Nambu-Poisson System, in "Mathematical Physics Frontiers", pp. 141-157, edited by C. V. Benton, Nova Science Pub. Inc.
- [21] 家田: Multi-Component NLS for Spinor Condensates, 数理解析研究所講究録**1368**, pp. 96-102 (2004).
- [22] 家田: Matter-Wave Solitons in a Multi-Component Bose-Einstein Condensate, 素粒子論研究**109**, F52 (2004).

(国内雑誌)

- [23] K. Hikami: Quantum Invariants for Links and 3-Manifolds, 立教大学 SFR 講究録, in press.
- [24] 三宅, 和達: 多体エンタングルメントと多次元行列式: ペアに成らない幸せ、不幸せ, 数理科学 **500**, 21-28 (2005)

(学位論文)

博士論文

- [25] 家田: Study of Matter-Wave Solitons in Spinor Bose-Einstein Condensates.
- [26] 今村: Exact solutions in one-dimensional polynuclear growth model.

修士論文

- [27] 加藤: Statistical Physics of Single Polymer Chain.
- [28] 坂本: Jack symmetric functions and representations of the Virasoro algebra.
- [29] 茂地: Integrable Aspects of Two Dimensional Topological Field Theory

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [30] K. Hikami: Asymptotics of the WRT Invariant and Modular Form ("Intelligence of Low Dimensional Topology", Osaka, 2004 年 10 月)

- [31] K. Hikami: Quantum Invariant for Torus Knot and Modular Form (Workshop for Francesco Calogero 70th birthday "Solitons, Boomerons and Isochronous Solutions to Nonlinear Systems", Rome, 2005 年 2 月)
- [32] R.Sakamoto, Jack symmetric functions, power sums and representations of the Virasoro algebra ("Recent progress in solvable lattice models", Kyoto University, July 2004).

一般講演

- [33] A. Miyake and H.J. Briegel: W-state entanglement purification protocols, (Oberurgl meeting 2005 Quantum Optics, Innsbruck, Austria, 2005 年 3 月)
- [34] T.Imamura: Fluctuations of the 1D polynuclear growth model with external sources. ("Random Matrices and Probability" Warwick, UK, 2004 年 5 月)
- [35] T.Imamura: Polynuclear growth model and universality in random matrix with a deterministic source. (STATPHYS 22, Bangalore, India, 2004 年 7 月)
- [36] J. Ieda, T. Miyakawa, and M. Wadati: Integrable Model for a Multi-component Bose-Einstein Condensate and Matter-wave Solitons, (SPQS "Novel Orders and Dynamics", Sendai, 2004 年 7 月)
- [37] J. Ieda: Implementation of Spinor Solitons in Bose-Einstein Condensates, (COE21 QUESTS "New Horizons in Condensed-Matter Physics", Univ. of Tokyo, 2004 年 11 月)
- [38] 飯田, 和達: Exact Analysis of Repulsive Bosons and Attractive Fermions in One Dimension (同上)
- [39] 内山, 和達: Exact Correlation Functions of a One-dimensional Nonequilibrium Model (同上)

(国内会議)

招待講演

- [40] 樋上: On the colored Jones polynomial and the A-polynomial (A 多項式サマースクール、東工大、2004 年 8 月)

一般講演

- [41] 三宅: Topics on multipartite entanglement, (量子情報未来テーマ開拓研究会, 沖縄ホテルサンライズ知念, 2004 年 8 月)
- [42] 今村: 1 次元多核成長模型におけるエアリー過程の一般化 ("行列模型、vicious walk、弦理論/ゲージ理論", 中央大学, 2004 年 8 月)
- [43] 三宅: 量子計算中の古典的模倣可能な演算について, (日本物理学会 2004 年秋季大会, 青森大学, 2004 年 9 月)
- [44] 家田, 宮川, 和達: $F = 1$ スピノール BEC における多成分ソリトンのスピンドYNAMICS (同上)

- [45] 飯田、和達: 1次元デルタ関数ボース気体の dressed energy, dressed charge と相関関数の解析 (同上)
- [46] 黒沼: ランダムグラフ上のマイノリティゲームについての生成汎関数による研究 (同上)
- [47] 家田、和達: スピノル凝縮体におけるダークソリトンの伝播 (日本物理学会 第60回年次大会、東京理科大学、2005年3月)
- [48] 今村: 多核成長模型と外場のあるランダム行列 (同上)
- [49] 内山、和達: 1次元非対称単純排他過程における相関関数の振舞い (同上)
- [50] 坂本: Jack 対称関数と Virasoro 代数の表現 (同上)
(セミナー)
- [51] 樋上: 結び目の体積予想: 保型形式とのかかわりあい (筑波大学、2004年4月)
- [52] 樋上: Torus knot and minimal model (京都大学数理解析研究所、2004年6月)
- [53] 樋上: Asymptotic expansion of the WRT invariant (東工大、2004年9月)
- [54] 樋上: 量子不変量と保型形式 (立教大学数学教室談話会、2004年10月)
- [55] 樋上: 保型形式を用いた量子不変量の漸近展開 (東京大学数理科学、2004年11月)
- [56] 家田: Multicomponent extension of bright matter-wave solitons in Bose-Einstein condensates (東京大学 COE ワークショップ、2005年1月)
- [57] 今村: ランダム行列理論の対称空間による分類とその応用 (統計力学・確率論セミナー、中央大学、2004年4月)
- [58] 今村: Polynuclear growth model and random matrix with an external source. (Mathematical Physics & Probability Seminar, カリフォルニア大学デービス校 2005年3月)
- [59] R.Sakamoto, Jack symmetric functions and representations of the Virasoro algebra (Tokyo Institute of Technology, November 2004).
- [60] R.Sakamoto, Jack symmetric functions and representations of the Virasoro algebra (University of Tokyo, Komaba, February 2005)
(集中講義)
- [61] 和達: 厳密に解ける模型 (茨城大学、2004年9月14–16日)

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正方格子上の斥力 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) を持つ超伝導を示し、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ときは、 T_C が飛躍的に上昇し得ることを指摘していた。最近、コバルト酸化物超伝導体 Na_xCoO_2 が我国で発見されたが、この物質は、元々の黒木・有田理論でポケット状非連結フェルミ面 (Fig. 3.2 a) の典型例とされた三角格子をもつ。有田は黒木、田仲（名大）等とともに、これが実際超伝導に有利に働く可能性を議論し、*Phys. Rev. Lett.* に発表した [2, 3]。有田はコバルト酸化物の電子状態を第一原理計算によって詳しく調べた [10]。

電子相関による超伝導には「スピン・ギャップを持つ系にキャリアをドーピングすると超伝導」という観点も論じられてきたが、木村等は、Shastry-Sutherland 格子という、ダイマーがヘリンボン状に並んだ格子でこれを考察し、超伝導が最も強くなるのはフェルミ面が非連結になる電子密度近傍であることがわかった [1, 19]。

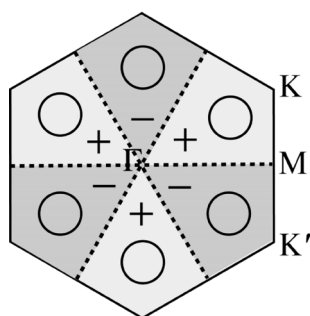


図 3.2 a: Fermi surface of the superconducting cobalt compound with the sign of the gap function indicated [2, 3].

長距離斥力からのスピン・トリプレット超伝導

近年、有機導体 $(\text{TMTSF})_2\text{X}$ 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。黒木、木村、有田、田仲はこれらの系に対応する格子上の斥力 Hubbard 模型に対して、量子モンテカルロ法によりペアリング相互作用を計算した結果、TMTSF に対してはトリプレット f 波という黒木等の以前の理論と整合するが、ルテニウム酸化物では説明できないことがわかった [4]。そもそも Hubbard (on-site 斥力) 相互作用に対しては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・青木の理論があるので、有田等は、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、動的クラスター近似を用いて解析した。その結果、off-site 斥力によって時間反転対称性を自発的に破ったトリプレット $p_{x+y} + ip_{x-y}$ が有利になり得、これは最近の回転磁場下の比熱実験とも整合する。この成果は *Phys. Rev. Lett.* に掲載された [5, 22, 35, 36, 39, 42]。

大成はより一般的に、電荷揺らぎ媒介とスピン揺らぎ媒介が共存する場合の超伝導を調べ、超伝導のペアリング対称性の相図を求めた [13, 23, 44]。電子間相互作用が長距離 ($1/r$ クーロン型) である電子気体では希薄のときに超伝導という提案がされているが、これへのクロスオーバーも探った [43]。大成は以上の成果を博士論文にまとめた [52]。

磁場誘起トリプレット超伝導の可能性

一般に強磁性スピン揺らぎ交換はトリプレット超伝導を利用するがシングレットに比べれば不利であるが、超伝導が強磁性秩序と共存すれば有利化することが現象論的に指摘されていた。一方有田・青木理論からは、電子相関による超伝導では 3 次元系より 2 次元系の方が有利であるが、強磁性は 2 次元では抑えられる。有田、黒木、青木は、2 次元系に磁場をかけて有限の磁化を立たせればこのジレンマを解消できることを提案し、数値的に確かめた [6]。

多軌道系における超伝導

近年、軌道の自由度がもたらす電子相関効果に注目が集まっているが、酒井、青木は多軌道系における超伝導を考えた。興味は多軌道に特有な交換相互作用（フント結合）の効果であるため、モット転移を記述できる利点をもつ動的平均場理論 (DMFT) をフント結合多軌道模型に拡張した。DMFT の量子モンテカルロ (QMC) 解法では、フント結合が深刻な負符号問題を引き起こすので、酒井は 2 軌道系に対して新たな補助場変換を考案し、負符号を大幅に軽減させることに成功した。これにより、スピントリプレット $\otimes$ 軌道シングレットという特徴あるペアリングが、相図上の広い領域で安定であることを見出

した [14, 26]。

また、3 軌道あるいはそれ以上の系への拡張は、現実物質の観点からも重要であるが、従来の QMC 法は 3 軌道系に適用するのは困難である。そこで、酒井、有田、青木は、Rombouts らによって定式化された連続時間量子モンテカルロ法を DMFT の解法として用いることを提案し、定式化した [31, 45]。

電子・電子斥力と電子・フォノン相互作用が共存する系

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ブ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をもたれるが、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。フォノン (ボゾン) を含む系では大きな Hilbert 空間を扱う必要があるが、Jeckelmann 等が提案した自由度を分割して系に取り込む方法を採用したが、電子相関の強い場合は問題があった。手塚は新たなアルゴリズムを考え、比較的広い領域で相関関数も含めて計算を可能にした。SDW 相 (電子・電子由来) と CDW 相 (電子・フォノン由来) の中間を調べたところ、電子構造に electron-hole 対称性があるときには (純電子模型である Hubbard 模型におけるような) CDW と on-site 超伝導の縮退が見られるのに対し、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。[25, 29, 30, 46]

3.2.2 非磁性元素系における電子相関からの遍歴強磁性

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。

有機高分子強磁性の物質設計

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、新物質 (五員環高分子 polyaminotriazole Fig. 3.2 b) 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 [27, 40]。この物質は本学化学教室の西原研究室において、現在合成が試みられている。

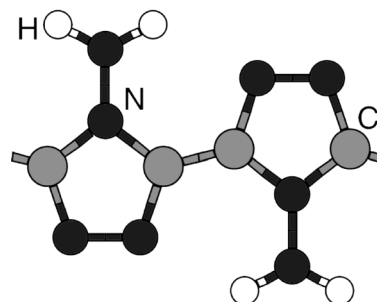


図 3.2 b: An organic polymer which we predict to be ferromagnetic.

シャトルcock型フラレン誘導体の電子状態と磁性

有田、青木は、本学化学教室中村研究室で合成されたシャトルcock型フラレン (C_{60} に他分子の“羽”を生やさせたもの) の電子状態計算を、岡田、押山 (筑波大) とともにスピン密度汎関数を用いて行った。その結果、この物質のフェルミ面近傍の電子状態は、羽のためにフラレンの 60 個の炭素の sp 混成が変わり、波動関数は 5 個と 50 個に局在したものに分かれること (Fig. 3.2 c)、この「分子欠」効果によりフェルミ面近傍のバンド幅が極めて狭くなり、電子相関による反強磁性が期待できることを見出した。[11]

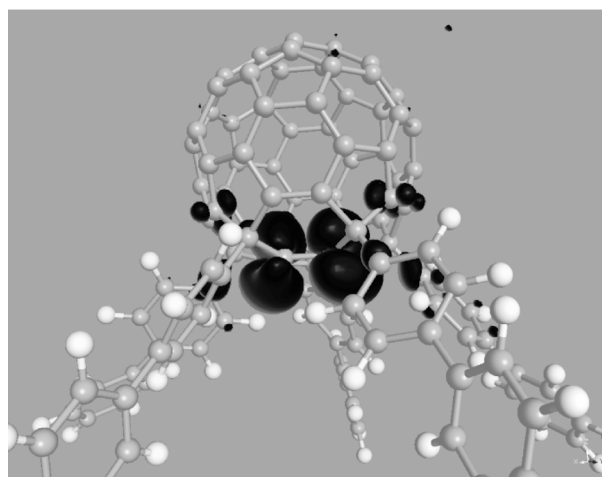


図 3.2 c: “Shuttlecock fullerene” with a typical wavefunction indicated[11].

アルカリ金属吸蔵ゼオライト — supercrystal

ゼオライトは、(ケージと呼ばれる) 隙間の多い興味深い結晶構造をもつが、アルカリ金属等のクラスターをケージ中に吸蔵でき、新奇な物性が期待される。事実、野末(阪大)により、単純金属(K)を吸蔵したゼオライトにおいて強磁性が約10年前に実験的に発見されたが、その発見機構は明らかでない。理論的な興味は、(i) この系は単位胞に数百個の原子を含む複雑な系であるが、ナノサイズ・ケージに閉じ込められた状態(“superatom”)の並びと見るような単純な電子構造と考えると良いか、(ii) 強磁性等の多体効果が期待できるほど強相関電子系であるか、である。有田は、三宅(東工大)、小谷(阪大)、van Schilfgaarde(アリゾナ大)、岡、黒木、野末、青木とともに、この系の第一原理計算を初めて行った[7]。結果、フェルミ準位近傍の電子構造は単純なtight-binding 模型で驚くほど良くフィットでき、系全体をsuperatomの集合(“supercrystal”)と見なす描像を支持する。第一原理計算の波動関数から評価したクーロンや交換相互作用は、この系が確かに強磁性領域を含む強相関領域にあり、多彩な多体効果や物質設計を期待できることを示す。

3.2.3 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・非線形現象は、開拓の余地の大きい興味深い問題である。岡、有田、青木は、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.* に掲載された[12, 24, 32, 47]。

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。その過程でまず、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Heisenberg-Euler 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った。[33, 34, 48]。また、岡は非平衡多体系における非線形光学効果も考察した[49]。岡は以上の成果を博士論文にまとめた[53]。

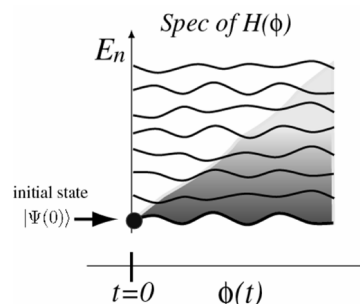


図 3.2 d: Non-adiabatic quantum tunnelling in strong electric fields makes the probability amplitude spread on the many-body energy levels[53].

3.2.4 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21世紀C O E 国際シンポジウムにおいて総合報告を行った。

3次元における整数量子ホール効果

量子ホール効果は普通は2次元系に特有と考えられているが、整数量子ホール効果に類似の効果が3次元でも存在し得ることが越野(現東工大)等により示されている。これは(2次元での名残りではない)3次元に特有な効果であり、異方的3次元系に磁場を傾けてかけた場合に傾け角の関数としてエネルギー・スペクトルにフラクタル的なギャップが開くことに起因し、多重連結フェルミ面上での軌道の量子トンネリングとして理解できる。越野、青木は、これが等方的な3次元系でも存在することを見出し[20]、現実にはこのような3次元系を用意する一法として、通常の3次元金属に外部から音響波などの変調を加えることを提案した[15, 20]。

非平衡量子ホール系における散逸と発光

下村は、最近非平衡状態においてサイクロトロン発光が観測され始めている量子ホール系に対して、その散逸機構と発光についてのレビューをおこない、修士論文にまとめた [54]。

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 $\sim 100 \text{ \AA}$) 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)、今村 (東北大)、青木は提案してきた。最近、樽茶グループ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まとめた。

3.2.5 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「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おり、本年度は以下の成果を挙げるとともに、中間報告書を発行した。

金属/絶縁体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 Schottky 障壁などを支配することは知られていたが、絶縁体/金属界面では MIGS は無視できるとされていた。実験的にも、原子レベルできれいな絶縁体/金属界面を作り難いために殆ど調べられなかったが、最近木口 (新領域、現北大)、斉木等により、アルカリ・ハライド/銅において MIGS が初めて観測された。有田は、谷田 (富士通)、青木とともに、絶縁体/金属系の第一原理計算を行い、界面の原子 1 層中に、絶縁体/金属界面特有な MIGS が存在することを示し、実験を再現した。多体効果の観点からは、MIGS が絶縁体/金属界面における「exciton 機構超伝導」に有利に働き得ることを提案した [8, 28, 41]。さらに、有機絶縁体/金属界面 (アルカン/銅) でも MIGS が生じることを木口等が観測し、有田、谷田、青木はこれに対する第一原理計算を行い再現し、かつ基板を強磁性金属 (Ni) にすれば有機物をスピン偏極させ得ることを予言した。

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。[9, 41]。

3.2.6 周期的極小曲面上の電子

越野等は、 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考えてきた。ゼオライト構造のモデルとして極小曲面を採用し、極小曲面に対する 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、一つの極小周期曲面と別の極小周期曲面が 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 (巻頭カラー口絵参照) [16]。

3.2.7 その他

桂 (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。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。

青木は、無機物・有機物における超伝導 [38]、フラストレートした系における超伝導 [17]、界面およびナノ構造における電子相関設計 [18]、ヘテロ界面における新しい電子状態と制御 [50]、量子ホール効果の進展と展望 [51] について、また有田は理論物質設計 [39, 40]、金属誘起ギャップ状態 [28] についての総合報告、講演を行った。

青木は、21 世紀 COE シンポジウム “New Horizons in Condensed-Matter Physics” (2004 年 11 月) を主催した。

2004 年 10 月より、助手の有田は Alexander von Humboldt Research Fellow として 2006 年 3 月までの予定で Stuttgart の Max-Planck 研究所に出向して研究を始めた。

< 報文 >

(原著論文)

[1] T. Kimura, K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki:

- Possibility of superconductivity in the repulsive Hubbard model on the Shastry-Sutherland lattice, *Phys. Rev. B* **69**, 054501 (2004).
- [2] K. Kuroki, Y. Tanaka and R. Arita: Possible spin-triplet f -wave pairing due to disconnected Fermi surfaces in $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 077001 (2004).
- [3] K. Kuroki, Y. Tanaka and R. Arita: Competition between singlet and triplet pairing in $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$, *Phys. Rev. B* **71**, 024506 (2005).
- [4] K. Kuroki, Y. Tanaka, K. Kimura and R. Arita: Quantum Monte Carlo study of the pairing symmetry competition in the Hubbard model, *Phys. Rev. B* **69**, 214511 (2004).
- [5] R. Arita, S. Onari, K. Kuroki and H. Aoki: Off-site repulsion-induced triplet superconductivity — a possibility for chiral p_{x+y} -wave pairing in Sr_2RuO_4 , *Phys. Rev. Lett.* **92**, 247006 (2004).
- [6] R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: Magnetic-field induced triplet superconductivity in the repulsive Hubbard model on the triangular lattice, *J. Phys. Soc. Jpn.* **73**, 533 (2004).
- [7] R. Arita, T. Miyake, T. Kotani, M. van Schilf-gaarde, T. Oka, K. Kuroki, Y. Nozue and H. Aoki: Electronic properties of alkali-metal loaded zeolites — a “supercrystal” Mott insulator, *Phys. Rev. B* **69**, 195106 (2004).
- [8] R. Arita, Y. Tanida, K. Kuroki and H. Aoki: Electronic properties of metal induced gap states at insulator/metal interfaces: dependence on the alkali halide and the possibility of excitonic mechanism of superconductivity, *Phys. Rev. B* **69**, 115424 (2004).
- [9] R. Arita, Y. Tanida, S. Entani, M. Kiguchi, K. Saiki and H. Aoki: Polar surface engineering in ultrathin $\text{MgO}(111)/\text{Ag}(111)$: Possibility of a metal-insulator transition and magnetism, *Phys. Rev. B* **69**, 235423 (2004).
- [10] R. Arita: Electronic structure of sodium cobalt oxide: Comparing mono- and bilayer hydrate, *Phys. Rev. B* **71**, 132503 (2005).
- [11] S. Okada, R. Arita, Y. Matsuo, E. Nakamura, A. Oshiyama and H. Aoki: Electronic structure of stacked C_{60} shuttles *Chem. Phys. Lett.* **399**, 157 (2004).
- [12] T. Oka, N. Konno, R. Arita and H. Aoki: Break-down of an electric-field driven system: a mapping to a quantum walk *Phys. Rev. Lett.* **94**, 100602 (2005) (*Virtual J. of Quantum Information* にも採録).
- [13] S. Onari, R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: Phase diagram of the two-dimensional extended Hubbard model: Phase transitions between different pairing symmetries when charge and spin fluctuations co-exist *Phys. Rev. B* **70**, 094523 (2004).
- [14] S. Sakai, R. Arita and H. Aoki: Numerical algorithm for the double-orbital Hubbard model: Hund-coupled pairing symmetry in the doped case *Phys. Rev. B* **70**, 172504 (2004).
- [15] Mikito Koshino and Hideo Aoki: Integer quantum Hall effect and Hofstadter’s butterfly spectra in three-dimensional metals in external periodic modulations, *Phys. Rev. B* **69**, 081303(R) (2004).
- [16] M. Koshino and H. Aoki: Electronic structure of an electron on the gyroid surface, a helical labyrinth, *Phys. Rev. B* **71**, 73405 (2005).
- (Reviews)
- [17] Hideo Aoki: Superconductivity in frustrated systems, a Viewpoint article in *J. Phys.: Condensed Matter* **16**, V1 (2004).
- [18] Hideo Aoki: Design of electron correlation effects in interfaces and nanostructures, *Applied Surf. Sci.* **237**, 2 (2004).
- (国際会議録)
- [19] K. Kimura, K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki: Superconductivity in the Hubbard model on the Shastry-Sutherland lattice, *J. Low Temp. Phys.* **134**, 805 (2004).
- [20] M. Koshino and H. Aoki: Integer quantum Hall effect in isotropic 3D systems, *Physica E* **22**, 214 (2004).
- [21] H. Aoki, M. Koshino, D. Takeda, H. Morise and K. Kuroki: Electronic structure of periodic curved surfaces — continuous surface versus graphitic sponge, *Physica E* **22**, 696 (2004).
- [22] R. Arita, S. Onari, K. Kuroki and H. Aoki: Off-site repulsion-induced triplet pairing: DCA and FLEX study for Sr_2RuO_4 , *Physica B* **359-361**, 584 (2005).
- [23] S. Onari, R. Arita, K. Kuroki, and H. Aoki: Phase diagram of the two-dimensional extended Hubbard model: pairing from charge and spin fluctuations, *Physica B* **359-361**, 518 (2005).
- [24] T. Oka, R. Arita and H. Aoki: Nonlinear transport in one dimensional Mott insulator in strong electric fields, *Physica B* **359-361**, 759 (2005).
- [25] M. Tezuka, R. Arita and H. Aoki: A DMRG study of correlation functions in the Holstein-Hubbard model, *Physica B* **359-361**, 708 (2005).
- [26] S. Sakai, R. Arita and H. Aoki: Superconductivity in multi-orbital systems: a dynamical mean field + quantum Monte Carlo study, *Physica B* **359-361**, 554 (2005).
- (国内雑誌)
- [27] 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).

- [28] 木口学、斉木幸一朗、有田亮太郎、青木秀夫：金属誘起ギャップ状態 — 金属/絶縁体界面で何がおこるか、*固体物理* **39**, 13 (2004)。

<学術発表>

(国際会議)

一般講演 (国際会議録掲載以外)

- [29] M. Tezuka, R. Arita, H. Aoki, Correlation functions in the Holstein-Hubbard model calculated with an improved algorithm for DMRG, *Recent Progress and Prospects in Density-Matrix Renormalization* (Leiden Univ., 2004.8.2-13).
- [30] M. Tezuka, R. Arita and H. Aoki, When Electron-electron and Electron-phonon Interactions Coexist: A Density-matrix Renormalization Group Study for Superconductivity, *New Horizons in Condensed-Matter Physics* (東大, 2004.11.29-30).
- [31] S. Sakai, R. Arita, and H. Aoki: Spin-triplet, orbital-antisymmetric superconductivity in correlated electron systems with multiorbitals — a role of Hund's coupling, *New Horizons in Condensed-Matter Physics* (東大, 2004.11.29-30).
- [32] T. Oka, N. Konno, R. Arita and H. Aoki: Quantum walk and dissipation in a ring, *STATPHYS22* (Bangalore, 2004.7.4-9).
- [33] T. Oka and H. Aoki: An analogue of Schwinger's vacuum polarization and electric-field induced insulator-to-metal transition, *Int. Conf. Statistical Physics of Quantum Systems* (Sendai, 2004.7.17-20).
- [34] T. Oka, R. Arita and H. Aoki: Time dependent DMRG study of the one-dimensional Hubbard model in strong electric fields, American Physical Society March meeting (Los Angeles, 2005.3.21-25).
- [35] S. Onari, R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: Spin-triplet superconductivity induced by coexistence of spin and charge fluctuations in Sr_2RuO_4 , *Int. Symposium on Spin-Triplet Superconductivity and Ruthenate Physics* (Kyoto, 2004.10.25-28).
- [36] S. Onari, R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: Spin-triplet superconductivity breaking time reversal symmetry induced by charge fluctuation in Sr_2RuO_4 , *New Horizons in Condensed-Matter Physics* (東大, 2004.11.29-30).

招待講演

- [37] H. Aoki: High T_c and quantum Hall physics — a quest for designing electron correlation, *New Horizons in Condensed-Matter Physics* (東大, 2004.11.29-30).
- [38] H. Aoki: A quest for higher T_c in inorganic and organic superconductors, *Int. Symposium on Physics of Organic & Inorganic Superconducting Materials* (Aoyama-Gakuin Univ., 5 Feb 2005).

(Colloquia)

- [39] R. Arita: An off-site repulsion-induced triplet pairing: DCA and FLEX study for Sr_2RuO_4 , Max-Planck-Institut für Festkörperforschung (2004.7.25).
- [40] R. Arita: Possible flat-band ferromagnetism in organic polymers, Seminar zur Theorie der kondensierten Materie, Augsburg Univ. (2005.1.25).

(国内会議)

一般講演

- [41] 有田亮太郎: 金属/絶縁体界面の電子状態 — MIGS と極性面 (理論) (日本物理学会、青森、2004.9.12-15).
- [42] 有田亮太郎、大成誠一郎、黒木和彦、青木秀夫: Sr_2RuO_4 における off-site 斥力誘起トリプレット・ペアリングの対称性 (日本物理学会、青森、2004.9.12-15).
- [43] 大成誠一郎、有田亮太郎、黒木和彦、青木秀夫: 長距離斥力系の超伝導対称性、(日本物理学会、青森、2004.9.12-15).
- [44] 大成誠一郎: さまざまな対称性を持つ超伝導の理論 (東大理学系 COE 合同シンポジウム、東京、2005.3.7-8).
- [45] 酒井志朗、有田亮太郎、青木秀夫: 連続時間量子 Monte Carlo 法の動的平均場理論への応用と多軌道 Hubbard model への適用 (日本物理学会、東京理科大学、2005.3.24-27).
- [46] 手塚真樹、有田亮太郎、青木秀夫: 密度行列繰り込み群による 1 次元 Hostein-Hubbard 模型の超伝導 (日本物理学会、青森、2004.9.12-15).
- [47] 岡 隆史、今野紀雄、有田亮太郎、青木秀夫: 多重 Landau-Zener 遷移と量子ウォーク模型 (日本物理学会、青森、2004.9.12-15).
- [48] 岡 隆史、青木秀夫: 絶縁破壊の指標としての非断熱過程有効作用 (日本物理学会、青森、2004.9.12-15).
- [49] 岡 隆史、有田亮太郎、青木秀夫: 時間依存 DMRG による一次元相関電子系の光学応答 (日本物理学会、青森、2004.9.12-15).

招待講演

- [50] 青木秀夫: ヘテロ界面における新しい電子状態と制御 — はじめに (日本物理学会、青森、2004.9.12-15).
- [51] 青木秀夫: はじめに — 量子ホール効果の進展と展望 (「量子ホール系とその周辺における新展開」シンポジウム、日本物理学会、東京理科大学、2005.3.24-27).

(学位論文)

- [52] 大成誠一郎: Superconductivity mediated by spin and charge fluctuations (博士論文、2004 年 12 月)。
- [53] 岡隆史: Non-linear responses of correlated electron systems in strong electric fields (博士論文、2004 年 12 月)。
- [54] 下村一石: 量子ホール系における発光と散逸の理論 (修士論文、2005 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クスなどについて研究を進めている。昨年度は、微小分子磁性体などナノシステムにおける量子ダイナミクス、緩和現象、電子スピン共鳴などの研究、新しいタイプの量子フェリ磁性状態の探索、スピントロニクスや電荷移動など電子状態が変化する系での相転移、スピングラスなど相互作用が競合するフラストレート系でのリエントラント相転移現象や記憶効果などの非平衡現象を研究した。

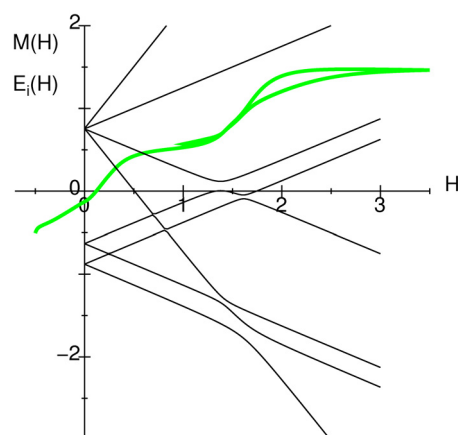


図 3.3 a: 反強磁性三角系スピントラスターのエネルギー準位 (細い線) と磁化の時間変化 (太い線): 初期には $H(t) = -0.7$ の基底状態から出発し磁場を $H(t) = -0.7 \rightarrow 3.5 \rightarrow 0.9 \rightarrow 3.5$ と変化させたときの磁化の変化: エネルギー構造を反映して磁化が $1/2$ のあたりからループ構造がはじまる。今の場合、レベル間の緩和が遅いので磁場を $H(t) = 0.9 \rightarrow 3.5$ ではループの上の線に戻っている。

3.3.1 微小分子磁性体のダイナミクス

量子断熱変化の起源

量子ダイナミクスを研究する際には、外部からの磁場などの変化に応じてどのように量子状態が変化するかが重要である。この変化を特徴づける最も基本的な関係は、擬反発エネルギー交差におけるランダウ・ゼナー遷移の機構である。我々はこれまで、微小磁性体などナノスケール系での量子遷移現象をこの機構を用いて調べてきた。このような量子遷移を定量的に扱うためには、擬反発エネルギー交差を引き起こす異なる量子状態を混合させる機構を明らかにすることが重要である。磁性体では、異なる磁化を持つ状態を混合させるための最も一般的な相互作用はジャロチンスキー・守谷相互作用である。しかし、この相互作用によって引き起こされる擬反発エネルギー交差はかける磁場の方向に大きく依存することを発見した。また、この機構では擬反発エネルギー交差が生じない場合に実験的に見いだされている磁化の断熱変化を説明する機構について研究した。特に、格子のゆらぎなどに起因する virtual な相互作用による磁化の断熱変化や核スピンとの超微細相互作用による機構についても調べた。

動的な外場による量子状態制御と緩和現象

微小磁性体では、エネルギー構造を反映した量子ダイナミクスが期待できる。外場の操作に応じて系が見せる特徴を整理し、強磁場パルスなどの新しい利用方法について提案した。特に、三角系からなるスピントラスターに特徴的なエネルギー構造では低磁場領域では縮退した 2 つの二重項状態 ($S = 1/2$) が基底状態になり、高磁場では単独の $S = 3/2$ の状態が基底状態になる。この間の磁化の移り変わりは熱平衡状態では $m = 1/2 \rightarrow 3/2$ であるが、断熱的には $m = 1/2 \rightarrow 1$ である。この違いは速い磁場掃引で実験的にも発見されているが、実際には準位間の緩和現象のため磁気ダイナミクスに履歴が生じる。この履歴の特徴を量子マスター方程式を用いて明らかにし、その緩和の原因について考察した。

コヒーレント電子操作

コヒーレントな量子状態操作の研究は、量子情報理論を反映させたデバイス作成には欠かせないものであり、実験的な研究も盛んになってきている。量子状態操作には急峻なパルス外場を加えたり、共鳴周期外場をかける方法などがあるが、バリエーションが少ないのが現状である。我々は Landau-Zener 遷移のメカニズムの特にストークス位相に注目し、1 周期のみの周期的外場によって離散準位の量子状態を操作する一般的な公式を書き下した。またその方法により実際に結合量子ドットでコヒーレント電子操作が実現可能であることも示した。

3.3.2 新規な量子状態

量子系が基底状態で示す様々な秩序形態についても研究を進めてきた。三角格子反強磁性体は、磁化過程において様々な磁気誘起相転移を示すことが知られている。特に、弱い XY 異方性をもつハイゼンベルグモデルの場合には CsCuCl_3 の実験での磁化の飛びの発見以来、量子ゆらぎや熱ゆらぎによって引き起こされる相転移が議論されていた。その基底状態での多様な相構造について密度行列繰り込み群 (DMRG) や積波動関数繰り込み群 (PWFRG) などを用いて詳しい相図を求めた。また、これに関連して、三角形のチューブからなる物質が基底状態でエネルギーギャップを持つかどうかに関して研究を行

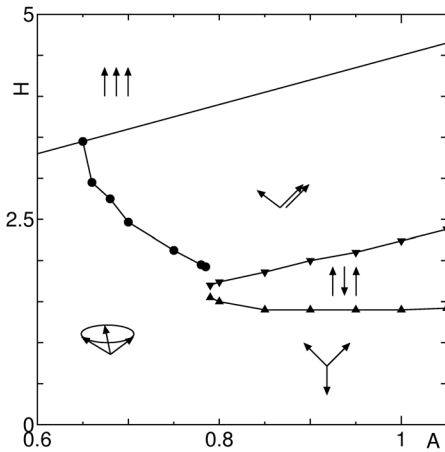


図 3.3 b: XY 異方性をもつ三角格子反強磁性体の基底状態での相図: $a = J_z/J$, $J = J_x = J_y$, H は Z 方向の磁場の大きさ

い、これまで知られている同じ向きに三角形が並んだ場合には三角形をつなぐ相互作用の強さにかかわらずエネルギーギャップが存在するのに対し、三角形が交互に並んだ場合には相互作用にある臨界値がある可能性を示し、引き続き研究を進めている。

量子フェリ磁性状態

フェリ磁性体は反強磁性相互作用が主に働くにもかかわらず、スピンの完全打ち消しあわないことから全体として磁化をもつ現象であるが、古典的にもスピンの同じ方向をもつコリニアな形態と、スピンの平行でない形をもつノンコリニアな形態が知られている。量子系でのそれらの状態に対応する状態を調べるために、一つのパラメータを操作することで両方の状態を作り出すモデルを考案しそのモデルの相図を詳しく調べた。そこでの新しい発見として、ノンコリニアな状態では古典的には格子の構造を反映した整合的なスピン構造が現れるのに対し、量子系ではパラメータとともに周期が変化する不整合（インコメンシュレート）な構造が出現することを見いだした。

3.3.3 電子スピン共鳴

磁性体における電子スピン共鳴

電子スピン共鳴の吸収線を相互作用ハミルトニアンから直接久保公式を用いて数値的に求める方法の開発をこれまで進めてきた。その方法を用いて、微小分子磁性体、特に V_{15} の吸収の温度変化や磁場変化について研究し対応する実験との比較を行った。また、 V_{15} を特徴づける 3 つのスピンの系での双極子

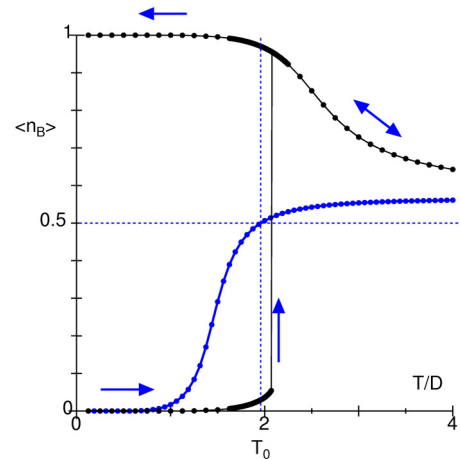


図 3.3 c: 電荷の移動度を表す $\langle n_B \rangle$ の温度変化: 電荷の反発係数 $\epsilon = 3$ (blue dots) と 6 (black dots) の場合。高温の $\langle n_B \rangle > 0.5$ の状態から $\langle n_B \rangle < 0.5$ の低温の状態へ $\epsilon = 3$ の場合にはスムーズに、数 $\epsilon = 6$ の場合には一次転移で変化している。モンテカルロの結果 (T_0 (点線) は厳密な転移温度。そこからのずれはヒステリシス現象を示している。)

相互作用、ジャロチンスキー・守谷相互作用などの吸収線への効果を調べた。

格子の空間構造を反映した電子スピン共鳴

純粋なハイゼンベルグモデルでは ESR の吸収は単独スピンからのもの (EPR) と一致するが、実際には交換相互作用がほぼ完全なハイゼンベルグ相互作用でも、双極子相互作用の影響でずれが起こる。このずれは格子の幾何学的な構造を反映する。ジグザグ格子や三角系、正四面体構造などでのこのずれを調べ、対応する実験との比較をおこなった。

3.3.4 揺動する媒体のもとでの相転移

スピントロスオーバー原子系での電荷移動相転移や磁気相転移

また、これまでスピン系の研究は主に与えられた格子構造のもとで行われてきたが、スピン自身の大きさが変わるスピントロスオーバーや電荷移動によってスピンの大きさが変化する場合には秩序の形成過程も興味深い問題である。最近、合成され興味深い電荷移動相転移、磁気相転移を示す物質の相転移に関して研究を進めた。特に、基底状態では磁気相互作用が無くなる低温スピン配置のもとで実験的に

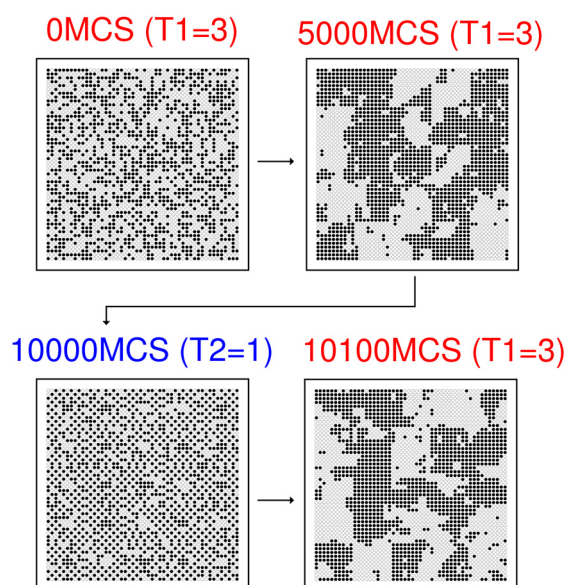


図 3.3 d: 温度を $T_0 \rightarrow T_2 \rightarrow T_2 \rightarrow T_1$ と変化させたときの、リエントラント転移と、スピン配位のメモリー効果。ここでは 10×10 のクラスターが 5×5 に配置されそれぞれ弱くつながっている。また各クラスター内の相互作用は温度とともに非単調な変化をする飾りボンドからなり、メモリースポットと呼ばれる記憶の核を持っている。

見つかっている低温での磁気秩序機構について、ゆらぎによって誘起される相転移の見方にたって研究を進めた。古典的な熱ゆらぎでは低次元ではゆらぎの効果が小さいことがわかり、そのような場合の機構として磁化の量子混合効果について調べ、磁気相転移に有効ないくつかの機構を発見した。

光誘起磁気相転移

また、光照射によってスピンやスピン間の相互作用が変化することによって引き起こされる相転移の動的性質や化学的構造変化についても研究を進めている。光照射の対象になるスピンのクロスオーバー現象と磁気相互作用の両方を含む一般化されたモデルを提唱し、そこでの準安定性のあり方を調べ、光照射後の磁化の時間発展などに関する理論的枠組みを研究している。また、より多彩な光磁気現象の探索、機構解明に関連する化学グループと連携をとりながら研究を進めている。

3.3.5 揺動する媒体のもとでの相転移

3.3.6 競合する相互作用のもとでの相転移

スピン間の相互作用の競合は秩序形成の温度変化、時間変化に興味深い特徴をもたらす。特に、スピングラスにおいて様々な履歴現象がエイジング現象として調べられ、いろいろな温度操作のもとでの秩序化の進行における履歴現象が興味を集めている。その中で、ある温度での秩序形成がそれ以下の温度での秩序形成と必ずしも対応しないという若返り効果と呼ばれる現象と、ある温度で進めた秩序形成がそれ以下の温度で一見忘れられるように見えるのにも関わらず、その温度に戻した場合に以前にその温度でどこまで秩序化を進めたかを系が覚えているメモリー効果と呼ばれる現象に注目し、その微視的な機構について規則的な配置をもつフラストレートモデルを用いて研究した。秩序形態の温度変化は実効的な相互作用が温度とともに非単調に変わる飾りボンドで現象が平衡状態の形態としてはよく説明できるが、そのような飾りボンドでのダイナミクスを詳しく調べると、緩和が非常に長くなるダイナミカルメタステイブル状態とも呼ぶべき現象があることが発見された。このような機構を利用したメモリー保存機構の研究を進めている。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] H. De Raedt, S. Miyashita, and K. Michielsen: Energy-level diagrams of high-spin and low-spin molecules Phys. Stat. Sol. **241** (2004) 1180-1185. Dzyaloshinskii-Moriya interactions and adiabatic magnetization dynamics, Phys. Rev. **B70** (2004) 064401 (1-12).
- [2] S. Yoshikawa, K. Okunishi, M. Senda and S. Miyashita: Quantum Fluctuation-induced Phase Transition in $S=1/2XY$ -like Heisenberg Antiferromagnets on the triangular lattice, J. Phys. Soc. Jpn. **73** (2004) 1798-1004.
- [3] M. Nishino, K. Sakai, M. Shiroishi and S. Miyashita: Quantum Monte Carlo study on commensurate-incommensurate transition in the spin-1/2XXZ chain at finite temperatures, J. Phys. A **37** (2004) 5295-5303.
- [4] H. De Raedt, S. Miyashita, K. Michielsen and M. Machida: Dzyaloshinskii-Moriya interactions and adiabatic magnetization dynamics, Phys. Rev. **B70** (2004) 064401 (1-12).
- [5] K. Saito and Y. Kayanuma: Nonadiabatic electron manipulation in quantum dot arrays Phys. Rev. B **70** (2004) 201304-201307(R).

(会議抄録)

- [6] K. Saito and Y. Kayanuma: Nonadiabatic Electron Manipulation in a Quantum-Dots Array and Related Transport Phenomena: J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. 2005 in press.

- [7] 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. 2005 in press.
- [8] M. Machida, T. Iitaka and S. Miyashita: Anisotropy and Dzyaloshinsky-Moriya Interaction in V_{15} , J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. 2005 in press.
- [9] S. Yoshikawa and S. Miyashita: Nature of Ferromagnetic Ground States in Quantum Spin Models, J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. 2005 in press.
- [10] S. Tanaka and S. Miyashita: Dynamical Properties of Temperature Chaos and Memory Effect, Prog. Theor. Phys. Suppl. **157** (2005) in press.
- (学位論文)
- [11] 小西優祐: "Mechanisms of the magnetic ordering via fluctuating interactions in charge transfer complexes" (修士論文) 2005
- [12] 田中 宗: "Dynamical properties of the reentrant phase transition in frustrated spin systems" (修士論文) 2005
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [13] S. Miyashita: "Frustrated Quantum Magnets", ハノバ大学理論研究所ミクスカ教授退官記念講演会, 30 April. 2004.
- [14] S. Miyashita: "Antiferromagnets on the Triangular Lattice" International Conference on Statistical Physics of Quantum Systems, - Novel Orders and Dynamics - SPQS, Sendai, Japan, 2004/07/17 - 2004/07/20
- [15] K. Saito, and Y. Kayanuma: "Nonadiabatic Electron Manipulation in a Quantum-Dots Array and Related Transport Phenomena", International Conference on Statistical Physics of Quantum Systems, - Novel Orders and Dynamics - SPQS, Sendai, Japan, 2004/07/17 - 2004/07/20
- [16] Seiji Miyashita: Quantum Mixing of Magnetic States in the Ground State and the Adiabatic Magnetic Processes, 第9回分子磁性国際会議, つくば国際会議場, 10/5-8
- 一般講演
- [17] S. Tanaka, S. Miyashita: "Dynamical Properties of Temperature Chaos and Memory Effect" (Statistical Physics of Disordered Systems and Its Applications, SPDSA2004, Shonan Village Center, Hayama, Japan, 2004.07.12-15)
- [18] M. Machida, T. Iitaka and S. Miyashita, "Anisotropy and Dzyaloshinsky-Moriya Interaction in V_{15} ", International Conference on Statistical Physics of Quantum Systems, Sendai, Miyagi, Japan, July 17-20, 2004.
- [19] S. Yoshikawa and S. Miyashita, "Nature of ferromagnetic ground states in quantum spin models", International Conference on Statistical Physics of Quantum Systems, Sendai, Miyagi, Japan, July 17-20, 2004
- [20] Y. Konishi and S. Miyashita, "Fluctuation-induced magnetic ordering at finite temperatures", International Conference on Statistical Physics of Quantum Systems, Sendai, Miyagi, Japan, July 17-20, 2004.
- [21] Nishino, M., Boukheddaden, K., Miyashita, S., and Varret, F.: "Relaxation dynamics of two-step spin crossover", IXth International Conference on Molecule-based Magnets (Epocal Tsukuba; October 4-8)
- [22] Tokoro, H., Miyashita, S., Hashimoto, K., and Ohkoshi, S.: "Photomagnetic phenomenon in rubidium manganese hexacyanoferrate", IXth International Conference on Molecule-based Magnets (Epocal Tsukuba; October 4-8)
- [23] Seiji Miyashita: Effects of virtual Dzyaloshinsky-Moriya interaction on quantum dynamics and dissipation, International Symposium on Quantum Spin Systems, 湘南国際村センター, 11/30-12/3
- [24] Seiji Miyashita: Effects of virtual DM interaction in quantum dynamics, International workshop on Beyond the spin gap in quantum magnetic systems LaLa 御殿場, 12/3-4
- (国内会議)
- 一般講演
- [25] 宮下精二: 三角格子ラダーの磁化過程, 特定領域研究「磁場が誘起する磁性体の新量子現象」研究会, 箱根「静雲荘」, 5月24日
- [26] 轟木義一、宮下精二: Blume-Capel モデルにおける量子揺らぎ誘起相転移, 日本物理学会秋季大会, 青森大学, 9月11-15日
- [27] 宮下精二: ジャロチンシキー・モリヤ相互作用による断熱変化の機構, 日本物理学会秋季大会, 青森大学, 9月11-15日
- [28] 町田学、宮下精二、飯高敏晃: V_{15} の ESR における吸収強度の温度依存性, 日本物理学会秋季大会, 青森大学, 9月11-15日
- [29] 奥西巧一、吉川信一郎、坂井徹、宮下精二: 三角スピントチューブの低エネルギー励起, 日本物理学会秋季大会, 青森大学, 9月11-15日
- [30] 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磁性現象のメカニズムの解明 日本物理学会秋季大会, 青森大学, 9月11-15日
- [31] 田中宗、宮下精二: スピングラスにおける記憶効果の微視的機構, 日本物理学会秋季大会, 青森大学, 9月11-15日
- [32] 齊藤圭司、萱沼洋輔: 量子ドットにおける非断熱遷移を用いた電子制御と輸送, 日本物理学会秋季大会, 青森大学, 9月11-15日

- [33] 齊藤圭司: 離散準位を反映した量子ダイナミックス-物理現象から制御まで-, (研究会、モンテカルロ法の新展開 3、京都大学基礎物理学研究所、2004.02.28-03.02)
- [34] 西野正理、K. Boukheddaden、宮下精二、F. Varret: 「磁気転移を伴うスピントロニクスオーバー現象のモデル」、日本物理学会、青森大学、2004 年 9 月 12-15 日
- [35] 小西優祐、宮下精二: 「電荷移動のゆらぎによって誘起される磁気秩序の機構について」、日本物理学会 2004 年秋期大会、青森大学、2004 年 9 月 12-15 日
- [36] 吉川信一郎、宮下精二: 「相互作用の強さに依存したフェリ磁性の創出」、日本物理学会、青森大学、2004 年 9 月 12 日-15 日
- [37] 宮下精二: 強磁場によるスピンの量子状態制御, 100 テスラ領域の強磁場スピ科学, 物性研究所 1/11-12
- [38] M.Machida, T. Iitaka, and S.Miyashita: Numerical calculation of the Kubo formula for huge Hamiltonian quantum systems at finite temperature, 日本物理学会春季大会, 東京理科大学野田キャンパス, 3 月 24-27 日
- [39] 奥西巧一、吉川信一郎、松本宗久、坂井徹、宮下精二: 三角スピントロニクスの低エネルギー誘起, 日本物理学会春季大会, 東京理科大学野田キャンパス, 3 月 24-27 日
- [40] 田中宗、宮下精二: 飾りバンド系における温度サイクリングに伴う記憶効果 (日本物理学会、東京理科大学、2005.03.24-27、25aYF-8)
- [41] 西野正理、K. Boukheddaden、宮下精二、F. Varret: 「Prussian Blue 化合物における光誘起磁気とスピントロニクスオーバー現象のダイナミクス」、日本物理学会、東京理科大学野田キャンパス、2005 年 3 月 24-27 日
- [42] 所裕子、松田智行、橋本和仁、宮下精二、大越慎一: 「Mn-Fe シアノ錯体における室温光スイッチング」、日本物理学会、東京理科大学野田キャンパス、2005 年 3 月 24-27 日
- [43] 小西優祐、宮下精二: 「電荷移動する錯体における量子ホッピングが誘起する磁気秩序の機構」、日本物理学会 2005 年春期年会、東京理科大学、2005 年 3 月 24-27 日
- [44] 坂本昌彦、宮下精二: 「いろいろな幾何学的構造を持つ磁性体における DM 相互作用の結果と ESR」、日本物理学会、東京理科大学野田キャンパス、2005 年 3 月 24 日-27 日
- [45] 白木高輔、吉田誠、大久保晋、太田仁、坂本昌彦、宮下精二、Alexei A.Belik、東正樹、高野幹夫: 「一次元 zigzag 鎖化合物 MCuP_2O_7 ($\text{M}=\text{Sr}, \text{Pb}$) の強磁場 ESR 測定 III」、日本物理学会、東京理科大学野田キャンパス、2005 年 3 月 24 日-27 日
- [46] 坂本昌彦、宮下精二: 「磁性体の幾何学的構造と電子スピン共鳴」、NAREGI ナノサイエンス実証研究第 3 回公開シンポジウム、自然科学研究機構岡崎コンファレンスセンター、2005 年 2 月 14-15 日
- [47] 吉川信一郎、宮下精二: 「量子磁性体におけるフラストレーションと磁化過程」、NAREGI ナノサイエンス実証研究第 3 回公開シンポジウム、自然科学研究機構岡崎コンファレンスセンター、2005 年 2 月 14-15 日
- (国内雑誌)
- [48] 齊藤圭司、宮下精二: 量子磁性体を数値計算で解明する, 日本物理学会誌 解説 **59** (2004) 760-767.
- (著書)
- [49] 宮下精二: 『有限温度の物理学』, 丸善 1-192
- (セミナー)
- [50] S. Miyashita: "Phase Transition induced by quantum and thermal fluctuation", 26 April 2004 Groningen Univ.
- [51] S. Miyashita: "Phase Transition induced by quantum and thermal fluctuation", 3 May 2004 Hannover Univ.
- [52] S. Miyashita: "Phase Transition induced by quantum and thermal fluctuation", 22 Oct. 2004, CNRS, Grenoble.
- [53] S. Miyashita: "Phase Transition induced by quantum and thermal fluctuation", 3 Nov. 2004, Saclay SPEC.
- [54] S. Miyashita: "Dynamical aspects of decoration bond system", 25 Feb. 2005 Uppsala Univ.

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

典型的な強相関電子系のモデルである 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。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で、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が分かった。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。[14, 33, 38]

高温超伝導のエネルギー解析 1

高温超伝導発現のメカニズムに対してエネルギー利得の観点から解析を行った。1つの方法として、電子相関を考慮した波動関数を用い、変分法によって基底状態のエネルギーを評価することを行った。超伝導を持つ状態と持たない状態(正常状態)のエネルギーを比較することにより、エネルギー利得の微視的なメカニズムを調べることができる。数値計算の結果、ハバードモデルでは弱相関の領域と強相関の領域が急激なクロスオーバーによって区別されていることが明らかになった。弱相関の領域では通常のBCS理論に近い状態が実現し、凝縮エネルギーは非常に小さい。これが、量子モンテカルロ法などによって、ハバードモデルでの超伝導が見出されていなかった原因であると考えられる。これに対して、強相関の領域では $J = 4t^2/U$ を引力とする超伝導が実現し、凝縮エネルギーは大きい。さらに、通常のBCS理論とは異なり、運動エネルギーが利得することによって超伝導が発生するという新しい形の超伝導状態であることがわかった。[4, 16, 20, 28, 44]

高温超伝導のエネルギー解析 2

もう1つの方法として、FLEX近似によって超伝導転移温度以下でのエネルギー利得の微視的なメカニズムを調べることができる。今までの多くの理論においては、準粒子間に働く有効引力相互作用によってBCS不安定性が生じるという一般的な枠組に基づいて超伝導現象が記述されてきた。これと相補的な理解として、転移温度以下での超伝導によるエネルギー利得の微視的なメカニズムから超伝導を議論することができる。その結果、運動エネルギーが超伝導の安定性に寄与しているという通常のBCS理論とは逆の結論が得られた。これは超伝導ギャップが非常に大きい高温超伝導体特有の現象であり、超伝導ギャップが準粒子の繰り込みパラメータを変化させることに起因する。また、この結果が実験的に観測されている光学総和則の破れと密接に関係していることを示した。[15, 28, 30, 44, 55]

高温超伝導体におけるランダムネスと超伝導揺らぎ

短いコヒーレンス長と擬二次元性が高温超伝導体の顕著な特徴である。このような状況では、超伝導揺らぎの乱れに対する応答が通常とかなり異なることが考えられる。今までの超伝導揺らぎに対する乱れの効果の研究では、Born近似やT-matrix近似などの摂動的手法が広く用いられた。これに対して、乱れの効果を非摂動的に考慮し、空間依存性をフルに取り入れた計算を行なった。まず、平均場レベルの解析で摂動論による理論が破綻することが示された。これは、2次元性とコヒーレンス長が短いことによって局所的な超伝導が安定化し、微視的な不均一性が生じることに起因する。また、この不均一性は超伝導揺らぎを増強し、超伝導転移温度の著しい低下を導く。しかし転移温度がかなり下がった状況でも擬ギャップは残ることが分かった。[56]

3.4.2 コバルト酸化物における異方的超伝導

最近発見されたコバルト酸化物超伝導体 $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ 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。

軌道縮退を考慮した多軌道型超伝導におけるスピン三重項超伝導

コバルト酸化物の系において、Coの t_{2g} 軌道の自由度が重要な役割を果たしている多軌道型超伝導体である可能性を指摘し、超伝導発現のメカニズムやその性質を調べた。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。[11, 13] また摂動論による解

析も行った。[12, 22] その結果、スピン三重項超伝導が広い領域で安定化され、さらに p 波超伝導および f 波超伝導がほぼ縮退して現われることが分かった。これは、軌道間フント相互作用による強磁性揺らぎを媒介としたものであると考えられる。これらの結果には軌道縮退が本質的に重要であるといえる。また、これまでに見つかっている f 電子系でのスピン三重項超伝導体と比較して、d 電子系では微視的理論の発展が期待される。[29, 31, 32, 36, 37, 41, 43, 45, 46, 48, 52, 53] さらに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。[13]。

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。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、摂動論および RPA 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。一方、f 波超伝導の場合には多重相転移が期待できないことも分かった。[62]

電荷揺らぎによる超伝導状態

また、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も議論された。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電荷整列状態がエネルギー的に安定化すると予想される。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ことがわかった。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。[1, 23, 34]

3.4.3 有機導体に関する理論

擬二次元有機導体における超伝導と電荷の揺らぎ

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、いくつかの物質は電荷秩序を示すことが知られている。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 -(DIETS) $_2$ $[\text{Au}(\text{CN})_4]$ は、常圧下において $T = 226\text{K}$ で金属-絶縁体転移を示すが、一軸性圧力によってこの相転移を抑制すると、絶縁相に隣接した超伝導が現れる。このような系での超伝導における電荷揺らぎの効果を調べるため、異方的三角格子上で U と V を考慮した拡張ハバードモデルを考え、RPA 近似を用いた計算を行った。その結果、電荷の揺らぎはスピン一重項と三重項ともに引力的に寄与し、異方的三角格子上では CDW 相の近傍で拡張 s 波と f 波の超伝導が有利になるという結果を得た。CDW 相近傍では、大きな電荷揺らぎのために電子間の有効相互作用が、ある特徴的な波数において引力的になる。これら超伝導は、この引力を利用して安定化したと考えることができる。[3, 5, 39, 75, 76]

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。[8, 49, 58, 71, 74, 77]

3.4.4 異方的超伝導体の理論

渦糸状態での電子状態

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る。ところが、異方的超伝導体であると考えられるルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 に対する実験では、熱伝導度による結果と比熱による結果とが矛盾する結論を示していた。この問題に対し、空間的に非一様な超伝導体を扱う標準的な理論である Bogoliubov-de Gennes 方程式と準古典方程式に基づく方法を併用し、全ての励起状態を取り込む微視的な解析を行って状態密度の磁場方向依存性を調べた。その結果、磁場方向

依存性はエネルギー領域によって微妙に変化することが明らかになった。この結果に基づき、 Sr_2RuO_4 の実験で見られた矛盾に説明を与えることができることを示した。比熱の実験結果から、a 軸および b 軸方向の超伝導ギャップにノード的な構造があることを導いた。[7]

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

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 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ 及び $\kappa\text{-(BEDT-TTF)Cu(NCS)}_2$ 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。 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ 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すべきものであることが分かった。[9, 35, 57] また、 $\kappa\text{-(BEDT-TTF)Cu(NCS)}_2$ 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。[40, 66]

d 波超伝導体・ハーフメタル二層構造系における超伝導・磁氣的近接効果

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氣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トリプレット超伝導近接効果、超伝導体側では、長距離秩序の交換ポテンシャルを誘起する磁氣的近接効果が引き起こされることが明らかになった。これらの結果は、銅酸化物高温超伝導体・マンガン酸化物多層構造系におけるの最近の実験で発見された磁氣的近接効果のメカニズムの 1 つと考えられる。[42]

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 $t\text{-}J$ モデルでの超伝導相関

コバルト酸化物に触発されて、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 $t\text{-}J$ 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 波またはパラメータによっては f 波超伝導の相関が発達することが明らかになった。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。[29, 33, 38, 45]

三角格子における電荷秩序と超伝導

いくつかの物質において、電荷ゆらぎを起源とする超伝導の可能性が指摘され、さかんに研究が行われている。長距離クーロン斥力が電荷秩序を誘起し、その近傍では電荷ゆらぎによって超伝導が発現する可能性がある。このことを念頭に置き、最近接クーロン相互作用 V を取り入れた二次元三角格子上の拡張ハバードモデルにおける電荷秩序と超伝導の可能性について調べた。変分モンテカルロ法による解析の結果、オンサイト斥力と最近接斥力 V と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。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。[27, 54]

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

磁氣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。その結果、格子のフラストレーションの割合を変えていくと、KT 転移とカイラリティ転移が独立に起こることを見出した。[26, 67]

3.4.6 金属絶縁体転移の理論

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 $\text{CaNaCuO}_2\text{Cl}_2$ 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 [63]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Tanaka, Y. Yanase and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 319-322 (2004). "Superconductivity in $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ due to Charge Fluctuation"
- [2] Y. Yanase: J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 1000-1017 (2004). "Pseudogap and Superconducting Fluctuation in High- T_c Cuprates: Theory beyond 1-loop Approximation"
- [3] A. Kobayashi, Y. Tanaka, M. Ogata and Y. Suzumura: J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 1115-1118 (2004). "Charge-Fluctuation-Induced Superconducting State in Two-Dimensional Quarter-Filled Electron Systems"
- [4] H. Yokoyama, Y. Tanaka, M. Ogata and H. Tsuchiura: J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 1119-1122 (2004). "Crossover of Superconducting Properties and Kinetic-Energy Gain in Two-Dimensional Hubbard Model"
- [5] Y. Tanaka, Y. Yanase and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 2053-2056 (2004). "Superconductivity due to Charge Fluctuation in θ -type Organic Conductors"
- [6] T. Watanabe, H. Yokoyama, Y. Tanaka, J. Inoue and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 3404-3412 (2004). "Variational Monte Carlo Studies of Pairing Symmetry for the t - J Model on a Triangular Lattice"
- [7] M. Udagawa, Y. Yanase and M. Ogata: Phys. Rev. B **70**, 184515-1-184515-8 (2004). "Quasiparticle density of states in layered superconductors under a magnetic field parallel to the ab plane: Determination of the gap structure of Sr_2RuO_4 "
- [8] 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"
- [9] 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 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ "
- [10] Y. J. Uemura, P. L. Russo, A. T. Savici, C. R. Wiebe, G. J. MacDougall, G. M. Luke, M. Mochizuki, Y. Yanase, M. Ogata, M. L. Foo, and R. J. Cava: "Unconventional superconductivity in $\text{Na}_{0.35}\text{CoO}_2 \cdot 1.3\text{D}_2\text{O}$ and proximity to a magnetically ordered phase"
- [11] 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 $\text{Na}_{0.35}\text{CoO}_2 \cdot 1.3\text{H}_2\text{O}$: FLEX study of the multi-orbital Hubbard model"
- [12] Y. Yanase, M. Mochizuki and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 430-444 (2005). "Multi-orbital analysis on the Superconductivity in $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ "
- [13] M. Mochizuki, Y. Yanase and M. Ogata: to appear in J. Phys. Soc. Jpn. "Ferromagnetic and triplet-pairing instabilities controlled by the trigonal distortion of the CoO_6 octahedra in $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ "
- [14] 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"
- [15] Y. Yanase and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, No.5 (2005). "Kinetic Energy, Condensation Energy, Optical Sum Rule and Pairing Mechanism in High- T_c Cuprates"

(会議抄録)

- [16] M. Ogata, H. Yokoyama, Y. Yanase, Y. Tanaka, and H. Tsuchiura: The 7th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2004) (Sitges, 2004), submitted in J. Phys. Chem. Solids. "Kinetic energy pairing and condensation energy in cuprates"
- [17] H. Yokoyama, Y. Tanaka, and M. Ogata: The 7th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2004) (Sitges, 2004), submitted in J. Phys. Chem. Solids. "Stability of superconductivity and antiferromagnetism in two-dimensional Hubbard model with diagonal transfer"
- [18] T. Watanabe, H. Yokoyama, Y. Tanaka, J. Inoue, and M. Ogata: The 7th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors

- (SNS2004) (Sitges, 2004), submitted in J. Phys. Chem. Solids. “Variational Monte Carlo Studies of Pairing Symmetry and Ferromagnetism in the t - J model on a Triangular Lattice”
- [19] T. Watanabe, H. Yokoyama, Y. Tanaka, J. Inoue, and M. Ogata: The 7th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2004) (Sitges, 2004), submitted in J. Phys. Chem. Solids. “Effect of Next-Nearest-Neighbor Transfer on Superconductivity and Antiferromagnetism in Two-Dimensional t - J Model”
- [20] H. Yokoyama, Y. Tanaka, and M. Ogata: The 7th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2004) (Sitges, 2004), submitted in J. Phys. Chem. Solids. “Superconducting Properties in Two-Dimensional Hubbard Model”
- [21] M. Mochizuki, Y. Yanase and M. Ogata: to appear in Physica B. “Ferromagnetic fluctuation and superconductivity in $\text{Na}_{0.35}\text{CoO}_2 \cdot 1.3 \text{H}_2\text{O}$: FLEX study of multi-orbital Hubbard model”
- [22] Y. Yanase, M. Mochizuki and M. Ogata: to appear in Physica B. “Theoretical analysis on the multi-orbital model for the superconductivity in Na_xCoO_2 ”
- [23] Y. Tanaka, Y. Yanase and M. Ogata: to appear in Physica B. “Superconductivity due to charge fluctuation in a triangular lattice”
- [24] T. Watanabe, H. Yokoyama, Y. Tanaka, J. Inoue, and M. Ogata: 17th International Symposium on Superconductivity (ISS2004), (Niigata, 2004), to appear in Physica C. “Variational Monte Carlo studies of the superconducting state for the t - t' - J - J' model on an anisotropic triangular lattice”
- (国内雑誌)
- [25] 宇田川将文、小形正男: 固体物理 **39**, 577-584 (2004). 「磁場下におけるスピンアイスの種類々の振舞い」
- (学位論文)
- [26] 五十嵐 亮: “Frustration effect in a two-dimensional antiferromagnetic XY spin model” (2次元反強磁性 XY スピン模型におけるフラストレーション) (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)
- [27] 渡部 洋: “Charge order and superconductivity in a two-dimensional triangular lattice” (二次元三角格子における電荷秩序と超伝導) (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
- [28] M. Ogata: International Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides (Sendai, November 22-24, 2004). “Energy Consideration on Superconductivity near Mott Transition”
- [29] M. Ogata: The 2nd COE Symposium “New Horizons in Condensed-Matter Physics” (Yayoi Tokyo, 2004, 11.29-30) “Microscopic Theories for Anisotropic Superconductivity on a Triangular Lattice”
- [30] Y. Yanase and M. Ogata: 2nd Asia Pacific Physics Workshop “Frontier in Condensed Matter Physics” Hong Kong, China, Jun. 2004. “Condensation Energy, Kinetic Energy and Optical Sum Rule in High-Tc Cuprates”
- [31] Y. Yanase, M. Mochizuki and M. Ogata: The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems'04 (SCES'04), (Karlsruhe, 7.26-30, 2004) “Theoretical analysis on the multi-orbital model for the Superconductivity in Na_xCoO_2 ”
- [32] M. Mochizuki, Y. Yanase, and M. Ogata: The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems'04 (SCES'04), (Karlsruhe, 7.26-30, 2004) “Ferromagnetic fluctuation and possible triplet superconductivity in $\text{Na}_{0.35}\text{CoO}_2 \cdot 1.3\text{H}_2\text{O}$: FLEX study of the multi-orbital Hubbard model”
- [33] T. Koretsune and M. Ogata: The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems'04 (SCES'04), (Karlsruhe, 7.26-30, 2004) “Possible pairing symmetry in the two-dimensional t - J model on square and triangular lattices”
- [34] Y. Tanaka, Y. Yanase and M. Ogata: The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems'04 (SCES'04), (Karlsruhe, 7.26-30, 2004) “Superconductivity due to charge fluctuation in a triangular lattice”
- [35] M. Udagawa, Y. Yanase and M. Ogata: The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems'04 (SCES'04), (Karlsruhe, 7.26-30, 2004) “Theory of extracting superconducting gap structure from field-angle rotational experiments”
- [36] M. Mochizuki, Y. Yanase, and M. Ogata: KINKEN International Workshop “ t_{2g} 軌道縮退系の新展開” (IMR, Tohoku, 2004, 10.14-15) “Ferromagnetic fluctuation and possible triplet superconductivity due to inter-orbital Hund's-rule coupling in $\text{Na}_{0.35}\text{CoO}_2 \cdot 1.3\text{H}_2\text{O}$ ”
- [37] Y. Yanase, M. Mochizuki and M. Ogata: International Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides (Sendai, 11.22-24, 2004). “Multi-Orbital Analysis on the Unconventional Superconductivity in $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ”
- [38] T. Koretsune and M. Ogata: International Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides (Sendai, 11.22-24, 2004). “Effective pairing interaction in the two-dimensional t - J model on square and triangular lattices”
- [39] Y. Tanaka and M. Ogata: The 2nd COE Symposium “New Horizons in Condensed-Matter Physics” (Yayoi Tokyo, 2004, 11.29-30) “Dynamical Property of Two-dimensional Extended Hubbard Model at Quarter Filling”

- [40] M. Udagawa, Y. Yanase and M. Ogata: The 2nd COE Symposium "New Horizons in Condensed-Matter Physics" (Yayoi Tokyo, 2004, 11.29-30) "Theoretical basis of field-rotational experiment"
- [41] Y. Yanase, M. Mochizuki and M. Ogata: International Workshop on "Materials Science and Nano-Engineering" Osaka, Japan, Dec. 2004. "Spin triplet superconductivity in multi-orbital Hubbard model for $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ "
- [42] K. Yoshida: International Workshop on "Electronic and Spin Transport in Superconductor / Ferromagnet Nanostructures" (Lorentz Center at Universiteit Leiden, 2.21-25, 2005) "Proximity Effects In Superconductor/Half-metal Junctions"
- [43] M. Mochizuki, Y. Yanase, and M. Ogata: APS March Meeting, (Los Angeles, 2005, 3.21-25) "Possible triplet superconductivity due to the inter-orbital Hund's-rule coupling in $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ "
- 招待講演
- [44] M. Ogata: Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS '2004) (Sitges, Spain, July 11-16 2004). "Kinetic-Energy Pairing and Condensation Energy in Cuprates"
- [45] M. Ogata: Workshop in Yukawa International Seminar 2004 (YKIS2004) "Physics of Strongly Correlated Electron Systems" (Yukawa Institute, November 17-19, 2004). "Spin, Charge and Superconductivity in a Triangular Lattice"
- [46] M. Ogata: International Workshop on Materials Science and Nano-Engineering (Osaka, December 11-14, 2004). "Microscopic Theories for Anisotropic Superconductivity in $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ "
- [47] Y. Yanase, M. Udagawa and M. Ogata: International Symposium on "Spin-Triplet Superconductivity and Ruthenate Physics" (STSR2004) Kyoto, Japan, Oct. 2004. "Effect of spin-orbit coupling in the pairing of Sr_2RuO_4 "
- [48] Y. Yanase, M. Mochizuki and M. Ogata: Yukawa International Seminar 2004 (YKIS2004) "Physics of Strongly Correlated Electron Systems" (Yukawa Institute, November 1-19, 2004). "Spin triplet superconductivity in Multi-orbital Hubbard model for $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ "
- [49] H. Seo, J. Merino, and M. Ogata: Yukawa International Seminar 2004 (YKIS2004) "Physics of Strongly Correlated Electron Systems" (Yukawa Institute, November 1-19, 2004). "Charge order and frustration in two-dimensional organic conductors"
- (国内会議)
- 一般講演
- [50] 小形正男: 日本物理学会、青森大学 2004, 9.12-9.15 (秋期大会) "カゴメアイス系における新しい見方による基底状態の縮退"
- [51] 小形正男: 日本物理学会、青森大学 2004, 9.12-9.15 (秋期大会) "新しい手法によるハバードモデルの絶縁体状態 II"
- [52] 望月維人、柳瀬陽一、小形正男: 日本物理学会、青森大学 2004, 9.12-9.15 (秋期大会) " $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ の超伝導: 多軌道ハバード模型に基づく研究"
- [53] 柳瀬陽一、望月維人、小形正男: 日本物理学会、青森大学 2004, 9.12-9.15 (秋期大会) " $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ の超伝導に対する多軌道解析"
- [54] 渡部 洋、小形正男: 日本物理学会、青森大学 2004, 9.12-9.15 (秋期大会) " $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ の超伝導: 拡張ハバード模型の変分モンテカルロ法による解析"
- [55] 柳瀬陽一、小形正男: 日本物理学会、青森大学 2004, 9.12-9.15 (秋期大会) "高温超伝導のメカニズムとエネルギー論: 運動エネルギー、凝縮エネルギーと光学総和則の破れ"
- [56] 柳瀬陽一、小形正男: 日本物理学会、青森大学 2004, 9.12-9.15 (秋期大会) "高温超伝導体におけるランダムネスと超伝導揺らぎ: ミクロな不均一性と擬ギャップ"
- [57] 宇田川将文、柳瀬陽一、小形正男: 日本物理学会、青森大学 2004, 9.12-9.15 (秋期大会) "磁場回転実験の理論的基礎付けについて"
- [58] Jaime Merino、妹尾仁嗣、小形正男: 日本物理学会、青森大学 2004, 9.12-9.15 (秋期大会) 13pWE11 "フラストレーションによる電荷秩序の量子融解"
- [59] 横山寿敏、田仲由喜夫、小形正男: 日本物理学会、青森大学 2004, 9.12-9.15 (秋期大会) "d 波超伝導状態の擬フェルミ面とペア相関関数"
- [60] 堀田知佐、小形正男、福山秀敏: 日本物理学会、青森大学 2004, 9.12-9.15 (秋期大会) "1/4-filling 拡張近藤格子模型の基底状態の解析"
- [61] 小形正男: 日本物理学会、東京理科大学 2005, 3.24-3.27 (年会) "異方的三角格子 t - J モデルでのシングレット超伝導: Na_xCoO_2 での可能性"
- [62] 柳瀬陽一、望月維人、小形正男: 日本物理学会、東京理科大学 2005, 3.24-3.27 (年会) " $\text{Na}_x\text{CoO}_2(\text{H}_2\text{O})_y$ におけるスピン三重項超伝導と D-vector: スピン-軌道相互作用と磁場中相図の微視的理論"
- [63] 進藤龍一、井村健一郎、小形正男: 日本物理学会、東京理科大学 2005, 3.24-3.27 (年会) "non-local な operator を使った非磁性絶縁体の記述法"
- [64] 是常隆、小形正男: 日本物理学会、東京理科大学 2005, 3.24-3.27 (年会) "高温超伝導体のアンダードープ領域における熱力学的性質"
- [65] 田中康寛、小形正男: 日本物理学会、東京理科大学 2005, 3.24-3.27 (年会) "二次元拡張ハバードモデルの動的感受率"
- [66] 宇田川将文、柳瀬陽一、小形正男: 日本物理学会、東京理科大学 2005, 3.24-3.27 (年会) "磁場回転実験の定量的理論- κ -(BEDT-TTF) $\text{Cu}(\text{NCS})_2$ への応用"

- [67] 五十嵐 亮、小形 正男：日本物理学会、東京理科大学 2005, 3.24-3.27 (年会) “2 次元古典 XY モデルにおけるフラストレーション”
- [68] 金子真人、小形正男：日本物理学会、東京理科大学 2005, 3.24-3.27 (年会) “ θ -(BEDT-TTF) $_2$ X における電荷秩序の平均場近似による解析”
- [69] 横山寿敏、田仲由喜夫、小形正男：日本物理学会、東京理科大学 2005, 3.24-3.27 (年会) “d 波超伝導状態と交替フラックス状態”
- [70] 小形正男：IFCAM workshop 2004, 6.2-6.3 (東北大学金研) “f-wave and p-wave superconductivity in multi-orbital systems”
- [71] 妹尾仁嗣、Jaime Merino、小形正男：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」ワン・デイ・シンポジウム、学習院大学、2004, 8.3, “フラストレーションによる電荷秩序の融解”
- [72] 小形正男：Vortex 研究会 2004, 8.23-8.24 (東北大学金研) “高温超伝導体の磁束中の問題”
- [73] 小形正男：特定領域研究「異常量子物質の創製 — 新しい物理を生む新物質 —」キックオフミーティング 2004, 10.15-10.16 (青山学院大学) “磁場下におけるスピンアイスの種々の振舞い”
- [74] 妹尾仁嗣、Jaime Merino、小形正男：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」研究会「新物性の理論」(名古屋大学 2004, 11.1-2) “Frustration Effects on Charge Order in 2D ET Salts”
- [75] 田中康寛、小形正男：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」研究会「新物性の理論」(名古屋大学 2004, 11.1-2) “二次元拡張ハバードモデルの動的性質”
- [76] 小形正男：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 3 回シンポジウム 2005, 1.7-1.8 (京都大学 桂ホール) “2 次元拡張ハバードモデルでの電荷揺らぎ”
- [81] 柳瀬陽一、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 2004 年 10 月 “高温超伝導のメカニズムとエネルギー - 論：運動エネルギー - 、凝縮エネルギー - と光学総和則の破れ”
- [82] 柳瀬陽一：青山学院大学 物理・数理学科 コロキウム青山学院大学 2004 年 12 月 “弱結合からのアプローチからみた異方的超伝導のメカニズム”
- [83] 柳瀬陽一：東京大学理学部 内田研究室セミナー東京大学 2004 年 12 月 “弱結合からのアプローチからみた異方的超伝導のメカニズム”

招待講演

- [77] 小形正男：日本物理学会、東京理科大学 2005, 3.24-3.27 (年会) シンポジウム「電荷秩序近傍の新しい電子相」“はじめに：電荷秩序を作る、溶かす、揺らがせる”

(セミナー)

- [78] 小形 正男：Theoretical Seminar in Academia Sinica (Taipei) 2005 年 2 月 “Kinetic-Energy Pairing and Condensation Energy in Cuprates”
- [79] 小形 正男：Condensed-Matter Seminar in National Tsing Hua University (Shinzu, Taiwan) 2005 年 2 月 “Microscopic Theories for Anisotropic Superconductivity in $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ”
- [80] 柳瀬陽一、望月維人、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 2004 年 10 月 “ $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ の超伝導に対する多軌道解析”

3.5 常行研究室

分子動力学法や密度汎関数法に基づく第一原理電子状態計算などの計算物理学的手法を用いて、具体的な物質の結晶構造や物性をミクロな観点から探ることにより、物性理論研究の新たな展開を目指している。とくに実物実験が困難な超高压下の物性、あるいは新しいデバイスや触媒反応の研究にもつながる表面・界面物性を、理論的に予測・予言することが、我々の主たる研究テーマである。またそのための新しい手法開発にも力を注いでいる。

3.5.1 固体表面構造と化学反応

プロトンリレー機構による Si(001) 表面での水の反応

我々は以前、Si(001) 清浄表面における水分子の解離吸着反応において、水素結合した複数の水分子が近接ダングリングボンド間に架橋構造を作ってプロトンをリレーするというメカニズムを提案した (図 3.5 a)。その検証作業の一つとして理研の実験グループと共同研究を行ない、密度汎関数理論に基づく第一原理分子動力学法シミュレーションと STM 観察実験を用いて、10Å 以上離れた遠隔ダングリングボンド間でも同様のメカニズムで反応が進行していること、および、環状の水素結合ネットワークが Si-OH の H に対してもプロトン交換反応を誘起していることを明らかにした。

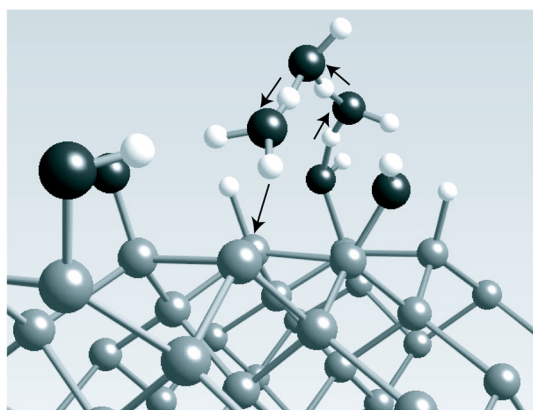


図 3.5 a: Si(001) 表面に残存する遠隔ダングリングボンド間を結ぶプロトンリレー型の水分子解離吸着。図は4分子の水によるプロトンリレー反応の遷移状態。矢印の方向に水素原子が移動し、水分子の解離吸着が起きる。

Si(001) 表面における不飽和炭化水素の化学吸着プロセスの解明

Si(001) 清浄表面には化学的に活性なダングリングボンドを有する再構成構造がある。ある種の不飽和炭化水素分子は規則的に化学吸着されることが知られているが、その吸着プロセスはまだ十分には解明されていない。我々は ethylene や acetylene、1,4-cyclohexadiene といった分子の吸着プロセスを第一原理的手法を用いて詳細に調べ、分子の構造や電子状態の違いが precursor state の構造とそのまわりのポテンシャル面に大きく影響し、それが最終的な吸着構造の違いにつながることを見いだした。これは、よく知られた有機化学の反応論と表面特有の立体障害という2つの要素のせめぎあいとして理解できた。

表面自己組織化シミュレーションのための弾性格子グリーン関数

Cu(001) 清浄表面に N 原子を吸着させると、理想的には fourfold hollow と呼ばれるサイトに吸着し、 $c(2 \times 2)$ 再構成表面ができる。ところがこの被覆率を 0.25ML 程度にすると、銅の表面に窒素原子が一边 5nm の正方形を形作るように吸着し、それがお互い 2nm の間隔をあけて規則正しく田圃のように並ぶという自己組織化が起きることが知られている。このようなスケールの大きな自己組織化には、吸着した窒素原子間の有効引力の存在に加え、原子吸着によって下地に生じる格子歪を通して、吸着子間が長距離相互作用することが重要であると考えられる。我々はその微視的機構を明らかにするために、第一原理分子動力学法を用いた全エネルギー計算と構造最適化、ならびに原子論的および弾性論的なモデルシミュレーションを行ってきた。

三次元結晶の清浄表面に原子が2個吸着し、それぞれ格子ひずみを誘起した場合、弾性論によれば吸着子間には距離の3乗に反比例する相互作用が生じる。我々のテスト計算によれば、この遠距離相互作用を弾性論的な薄膜モデルを用いてシミュレーションするためには、少なくとも吸着子間距離と同程度の厚さの薄膜を用いなければならない。通常の第一原理計算で扱う程度の小さな系、あるいは周期の小さな規則吸着表面の場合には、電子系が収束する程度の薄い薄膜モデルを用いても、格子ひずみの影響は十分定量的に計算可能である。ところが吸着構造のサイズが大きく、数多くの吸着子が関与する場合には、弱い遠距離相互作用の積分値が重要になるため、遠距離相互作用を十分正しく表現できるかどうかはシミュレーションの重要な要件になると考えられる。すなわち自己組織化の表面並行方向の空間スケール L に対して、考慮すべき粒子は L^2 ではなく、 L^3 (面積×深さ) で増えることになり、このことは第一原理計算だけでなくモデル計算にとっても深刻な問題となる。

そこで我々は深さ方向の影響を取り入れるため、最近提案された弾性格子グリーン関数を導入することにし、その一般化とプログラム作成、およびテスト

計算を行った。その結果、表面近傍のみ（再近接相互作用しかなければ1層のみ）をあらわに扱って2層目からはグリーン関数で表現することにより、さまざまな外力に対する格子ひずみの空間分布や吸着子間相互作用が精度良く、また高速に計算できることを確認した。

3.5.2 超原子価カルコゲナイド As_2Te_3 の巨大有効電荷

典型元素化合物の原子は基本的に共有結合を形成し、各原子のまわりに価電子を8つ配するオクテット則を満たす原子構造をとる。このオクテット則に従えば As_2Te_3 の As や Te はそれぞれ3配位及び2配位の共有結合を形成することになるが、実験では系の構造は As に Te が6配位した正八面体を周期的に並べた構造であり、上のオクテット則から大きく逸脱した超原子価型原子構造が観測される。我々はこの超原子価構造の微視的起源、及び物性への影響を第一原理計算を用いて調べている。

我々はこの超原子価性は特に電子格子相互作用に関わる物性に強く影響すると考え、この系の動的有效電荷を計算した。As 及び Te の有効電荷はそれぞれ+7 及び-5 であり、これは As_2S_3 や As_2Se_3 のような他の共有結合型カルコゲナイドに比べると約3倍以上大きいことが分かった。現在この巨大有効電荷の起源について解析を進めている。

3.5.3 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。たとえば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 Theory, 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ー関数 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 ($\mathcal{H}_{\text{TC}} = F^{-1}\mathcal{H}F$) 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 法におけるクーブ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。HF 法に比べて原理的に優位な特徴をもつ TC 法であるが、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発散の問題が生じる困難があるため応用例が無かった。

我々は一昨年から平面波を基底関数に用いた TC 法のプログラム開発を行ってきたが、今年度、擬ポテンシャルまで含めたプログラムがほぼ完成し、最初のテスト計算結果を物理学会で発表した。また電子ガスの状態密度を計算すると、ジャストロー関数によって電子相関効果を取り入れたことにより、HF 法で見られるフェルミ準位での異常がまったく見られなくなることを示した (図 3.5 b)。

このほか、モンテカルロ積分を使って3体積分を評価しながら安定に自己無撞着方程式を解く方法を提案し、数値基底を用いた孤立原子の計算で有効性を実証した。また原子・分子で励起状態計算を行う方法を提案した。

現在、固体の電子状態計算手法として最も精度が高いと考えられている拡散モンテカルロ (DMC) 法では、HF 法や DFT できめた波動関数のノード (節) を動かさないという近似 (節固定近似) を用いており、これが方法論の信頼性における最大の問題となっていた。TC 法を用いて精密な節構造を決定できれば、この問題をある程度回避できることが期待される。

第一原理計算に基づくハバードハミルトニアンのパラメータ評価

遷移金属酸化物など、いわゆる強相関電子系の研究においては、ハバード模型に代表される単純化された格子模型を用いて電子相関効果の研究が進められてきた。ハバード模型は局在電子間トランスファー

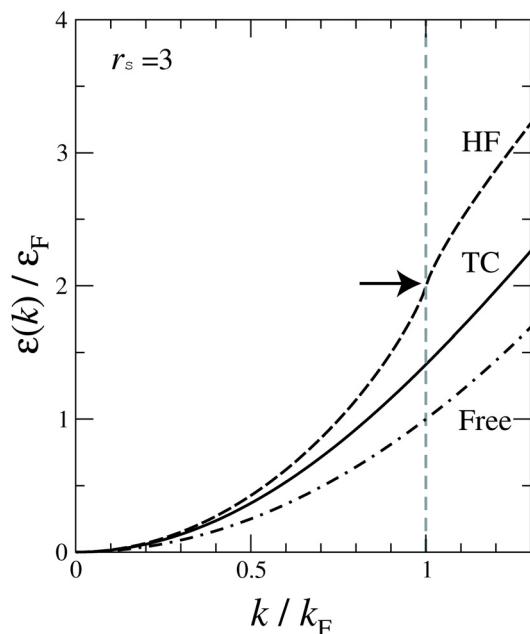


図 3.5 b: 電子ガス模型における一電子エネルギーの波数依存性。エネルギーは自由電子ガスのフェルミエネルギー ε_F で規格化してある。ハートリーフック法（破線）ではフェルミ面 ($k = k_F$, 矢印の位置) に対数異常がみられるが、トランスコリレイティッド法（実線）では異常が見られない。

積分 t とオンサイト有効クーロン斥力 U の 2 つのパラメータをもつ。このうち t は DFT 計算で得られたバンド構造を再現するように決めることができるが、 U は原子軌道を用いたクーロン積分で得られる値が、光電子分光などの実験から予想される値の数倍ほど大きな値になることが知られている。そこで理論値は使わず、実験値を代表値として人工的に操作し、物性への影響を評価することが行われてきた。

我々は、モデル自体の妥当性まで評価するためにはハバード模型（あるいは拡張ハバード模型）のパラメータを完全に第一原理的に評価する方法論開発を行っている。局在電子間トランスファー積分 t とオンサイト有効クーロン斥力 U の 2 つのパラメータをもつが、前者は系の最大局在ワニア関数を構築しこれの下での Kohn-Sham ハミルトニアン行列の解析から、後者は上のワニア関数により定義されるオンサイト占有数についての constrained LDA 計算を実行することで求められる。我々は本計算手法のアルゴリズム開発を行い、汎用性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。

本プログラムを 3d 遷移金属 (Sc~Cu) の U の評価に適用しオージェ分光より得られる実験結果と比較したところ、スクリーニング効果を無視してこの値を見積もった場合、値は実験に比べて 10 eV 以上大きかったが、この効果を constrained 計算により適切に取り込むことで U 値は減少し実験を再現した。

本計算は実験に見られる U 値の原子種依存性 (Sc から Cu にかけて U 値が 10 eV 程度増加する傾向) さえ再現しており、このことは本手法が単にモデルハミルトニアン構築の手段のみならず、実験結果の解釈においても有効であることを意味している。

レプリカ交換分子動力学法

自己組織化のように大規模な構造の発生をシミュレーションしようとする場合、系が局所安定構造にトラップされ、シミュレーション時間内に熱力学的な安定構造に達しない可能性が極めて高い。この問題を回避するため、拡張アンサンブル法の導入を検討し、そのうちで比較の実装の容易なレプリカ交換法を使った圧力一定の分子動力学法プログラムを作成して性能評価を行った。Lennard-Jones ポテンシャルで相互作用する粒子系の体積の温度変化を調べたところ、通常の分子動力学法にくらべ、同じ計算量で精度の高い状態曲線が得られることがわかった。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] M. Nagao, H. Umeyama, K. Mukai, Y. Yamashita, J. Yoshinobu, K. Akagi and S. Tsuneyuki, Precursor mediated cycloaddition reaction of ethylene to the Si(100)c(4 x 2) surface, J. Am. Chem. Soc. 126 (2004) 9922.
- [2] K. Akagi, S. Tsuneyuki, Y. Yamashita, K. Hamaguchi and J. Yoshinobu, Structural and chemical property of unsaturated cyclic-hydrocarbon molecules regularly chemisorbed on Si(001) surface, Appl. Surf. Sci. 234 (2004) 162.
- [3] N. Umezawa and S. Tsuneyuki, Excited electronic state calculations by the transcorrelated variational Monte Carlo method: Application to a helium atom, J. Chem. Phys. 121 (2004) 7070.
- [4] Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki, First-principles study on the strain effect of the Cu(001)-c(2x2)N self-organized structure, Appl. Surf. Sci. 237 (2004) 274.
- [5] H. Kageshima, M. Uematsu, K. Akagi, S. Tsuneyuki, T. Akiyama and K. Shiraishi, Theoretical study of excess Si emitted from Si-oxide/Si interfaces, Japan. J. Appl. Phys. 43 (2004) 8223.
- [6] Y. Higuchi, K. Kusakabe, N. Suzuki, S. Tsuneyuki, J. Yamauchi, K. Akagi and Y. Yoshimoto, Nanotube-based molecular magnets with spin-polarized edge states, J. Phys. Cond. Mat. 16, (2004) S5689.
- [7] J. Tsuchiya, T. Tsuchiya and S. Tsuneyuki, First-principles study of hydrogen bond symmetrization of phase D under high pressure, Am. Mineral. 90 (2005) 44.
- [8] N. Umezawa, 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., in press.

- [9] K. Nakamura and S. Tsuneyuki, Effect of through-space electron transfer on infrared spectrum of amorphous selenium, J. Chem. Phys., 122 (2005) 194503.

(国内雑誌)

- [10] 常行真司, 梅澤直人, 佐久間怜「新しい第一原理電子状態計算手法トランスコリレイティッド法」, 固体物理 vol.39 (11), 722 (2004).

(学位論文)

- [11] (修士論文) 岩崎健男, Replica-exchange molecular dynamics method with isobaric-isothermal ensemble, the University of Tokyo (2005).
- [12] (修士論文) 遠藤 良, 「弾性格子グリーン関数を用いた表面構造シミュレーション」, 東京大学 (2005).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [13] S. Tsuneyuki: Quantum Effect of Hydrogen Atoms in Solids, 1st Annual Symposium on Japanese-Germany Frontiers of Science (JGFoS), Mainz, Germany, Jan. 27-30, 2005.
- [14] K. Nakamura, M. Matsui, and S. Tsuneyuki: Anomalous effective charge of hypervalent chalcogenide As₂Te₃: First-principles study, 2005 March Meeting of the American Physical Society, Mar. 21, 2005.
- [15] N. Umezawa, S. Tsuneyuki, T. Ohno, K. Shiraishi and T. Chikyow: The Transcorrelated Method Combined with the Variational Monte Carlo Calculation: Application to Atoms, 2005 March Meeting of the American Physical Society, Mar. 24, 2005.

招待講演

- [16] S. Tsuneyuki, N. Umezawa and R. Sakuma 'The Transcorrelated Method: A New Scheme for First-Principles Study of Materials', Joint Conference of ICCP6 & CCP2003, Xi'an, China, 2004.5.23-28.
- [17] S. Tsuneyuki, N. Umezawa and R. Sakuma, 'The Transcorrelated Method: A new scheme for first-principles study of materials', NAREGI Workshop on Electronic Transport, Excitation and Correlation in Nanoscience, 2004.10.4-7.

(国内会議)

一般講演

- [18] 常行真司「第一原理計算で見た固体中水素の量子効果」, 「水素の科学」研究会 (中央大学), 2004年6月4日.
- [19] 赤木和人, 影島博之, 植松真司, 常行真司: 「Si/SiO₂ 界面近傍の SiO₂ 中で何が起きているか」, 第5回表面エレクトロニクス研究会, 物性研究所, 2004年8月3日.
- [20] 赤木和人, 常行真司: 「不飽和結合・水酸基・アミノ基を持つ有機分子の Si(001) 表面での拡散プロセスへの第一原理的アプローチ」, 日本物理学会 2004 年秋季大会, 青森大学, 2004 年 9 月 13 日.
- [21] 吉本芳英, 常行真司: 「N/Cu(001) 自己組織化表面での狭い島間ギャップの生成理由」, 日本物理学会 2004 年秋季大会, 青森大学, 2004 年 9 月 15 日.
- [22] 中村和磨, 有田亮太郎, 常行真司: 「遍歴電子系及び強相関電子系のハバード U の第一原理計算」, 日本物理学会 2003 年秋季大会, 青森大学, 2004 年 9 月 15 日.
- [23] 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」, 分子構造総合討論会 2004, 広島国際会議場, 2004 年 9 月 29 日.
- [24] K. Akagi: Chemisorption Process of Unsaturated Hydrocarbon Molecules on Si(001) Surface, 第4回CREST 領域ミーティング, キャンパス・イノベーションセンター (東京・芝浦), Feb. 11, 2005.
- [25] 吉本芳英, 常行真司: 「歪みによる表面ナノ構造形成と surface stiffness」, NAREGI 第3回公開シンポジウム, 自然科学研究機構 (岡崎), 2005 年 2 月 14 日.
- [26] 中村和磨, 有田亮太郎, 常行真司, 吉本芳英: 「3 d 遷移金属のオンサイト有効クーロン相互作用の第一原理計算」, NAREGI ナノサイエンス実証研究第3回公開シンポジウム, 自然科学研究機構 (岡崎), 2005 年 2 月 14 日.
- [27] 遠藤良, 常行真司: 「弾性格子グリーン関数を用いた表面構造シミュレーション」, NAREGI 第3回公開シンポジウム, 自然科学研究機構 (岡崎), 2005 年 2 月 14 日.
- [28] 岩崎健男, 常行真司: 「定圧定温のレプリカ交換分子動力学法」, NAREGI 第3回公開シンポジウム, 自然科学研究機構 (岡崎), 2005 年 2 月 15 日.
- [29] 常行真司「固体物理と計算科学」, 「J-PARC の中性子科学と計算科学」研究会, 2005 年 3 月 18 日.
- [30] 赤木和人, 常行真司: 「Si(001) 表面に化学吸着したアルケン/アルキン分子の配向性の差異の起源」, 日本物理学会第60回年次大会, 東京理科大学, 2005 年 3 月 25 日.
- [31] 吉本芳英, 常行真司: 「N/Cu(001) の表面歪みの理解における surface stiffness の必要性」, 日本物理学会 2005 年年次大会, 東京理科大学, 2005 年 3 月 25 日.
- [32] 中村和磨, 有田亮太郎, 常行真司, 吉本芳英: 「3 d 遷移金属のオンサイト有効クーロン相互作用の第一原理計算」, 日本物理学会 2005 年春季大会, 東京理科大学, 2005 年 3 月 27 日.

- [33] 佐久間怜, 常行真司:「TC 法による固体の第一原理計算」, 日本物理学会 第 60 回年次大会, 東京理科大学, 2005 年 3 月 27 日.
- [34] 岩崎健男, 常行真司:「定圧定温のレプリカ交換分子動力学法」, 日本物理学会 第 60 回年次大会, 東京理科大学, 2005 年 3 月 27 日.

招待講演

- [35] 常行真司「トランスコリレイティッド法」, 日本物理学会 2004 年秋季大会シンポジウム「計算機ナノマテリアルデザイン・量子シミュレーション手法の開発と応用」, 青森大学, 2004 年 9 月 13 日.
- [36] S. Tsuneyuki, 'The Transcorrelated Method: Electronic Structure Calculation with a Slater-Jastrow Wave Function', 東大 C N S 研究会「殻模型の学際的展開—宇宙物理と物性物理—」, 2005 年 3 月 4 日.
- [37] 常行真司「電子と陽子の量子シミュレーション」, 日本物理学会第 60 回年次大会シンポジウム「固体における水素の科学の新展開」, 東京理科大学 (野田), 2005 年 3 月 25 日.

(セミナー)

- [38] 常行真司「新しい第一原理電子状態計算手法 トランスコリレイティッド法」, 金沢大学理学部セミナー, 2004 年 10 月 21 日.
- [39] 常行真司「水素 — 境界領域の物質科学」, 熊本大学理学部セミナー, 2004 年 11 月 17 日.
- [40] S. Tsuneyuki, 'First-Principles Study of Materials with Many-Body Wave Functions', 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) PF セミナー, 2005 年 3 月 11 日.
- [41] 中村和磨「オン・サイト有効クーロン相互作用の第一原理計算: 3 d 遷移金属への適用」, 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) PF セミナー, 2005 年 3 月 11 日.

(集中講義ほか)

- [42] 常行真司「コンピュータにより開かれた新しい科学」, 金沢大学総合科目, 2004 年 10 月 22 日, 29 日.
- [43] 常行真司「コンピュータシミュレーションと物質科学」, 熊本大学基礎物理学科, 2004 年 11 月 16 日～18 日.

活することも見出された。表面準位に影響されない、運動量空間の対角線方向では、La 系と同様なフェルミ・アークが観測された。

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。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、低次元電子系、重い電子系が示す金属-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、近藤効果などの機構解明と、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

La 系、Bi 系銅酸化物超伝導体の電子構造の相違

希薄ドーブ領域にある Bi 系超伝導体の電子構造を角度分解光電子分光により調べ、同じホール濃度をもつ La 系超伝導体 ($\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$) と比較した。Bi 系超伝導体は La 系超伝導体に比べて母体絶縁体のバンド分散が大きいこと、運動量 $\mathbf{k} = (\pi, 0)$ 付近の“フラット・バンド”の位置が深いことを見出した。また、ドーピングによるケミカル・ポテンシャルのシフトが大きいこと、フェルミ面が $\mathbf{k} = (\pi, \pi)$ を中心とした正方形に近いことも、Bi 系超伝導体の特徴として明らかになった。これらの Bi 系超伝導体の特徴を、1 バンド・モデルにおける次近接 Cu 間の移動積分 t' が大きいためであるとした。

希薄ドーブ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の角度分解光電子分光

絶縁体から非超伝導金属領域にある Y 系銅酸化物の電子構造を角度分解光電子分光により調べた。最適ドーブの Y 系超伝導体は、表面準位のためにフェルミ面マッピングが困難であることが知られていたが、最低ドーブ量の試料では表面準位が消えることがわかったが、少量のホールドーブで表面準位が復

1 層超伝導体 $\text{Bi}_2\text{La}_x\text{Sr}_{2-x}\text{CuO}_{6+\delta}$ の電子構造のドーピング依存性

CuO_2 面を 1 層持つ La 系銅酸化物超伝導体と 2 層持つ Bi 系銅酸化物超伝導体の電子構造の違いの原因を明らかにするために、 CuO_2 面を 1 層持つ Bi 系銅酸化物 $\text{Bi}_2\text{La}_x\text{Sr}_{2-x}\text{CuO}_{6+\delta}$ の光電子分光測定を行った。希薄ドーブ領域を中心に、ハバード・バンドの分散の大きさ、化学ポテンシャル・シフト、フェルミ面形状のドーピング依存性を調べた。いずれも、La 系と 2 層 Bi 系の中間的振る舞いを示し、スペクトル形状は 2 層 Bi 系に近かった。このように、異なった物質系で系統的な電子構造の変化が確認され、臨界温度と電子構造の関係の解明に重要な情報が得られた。

4.1.2 強相関遷移金属酸化物

単結晶薄膜を用いた $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ の電子構造の研究

パルス・レーザー蒸着法で作成した $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ 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、ホール・ドーピングおよび温度変化に伴う電子構造の変化を高精度で調べた。ホール・ドーピングにより、母体の反強磁性絶縁体 LaFeO_3 のバンドギャップ中に新しい状態が現れ、成長していく様子が観測された。すべてのドーピング領域で、状態密度はフェルミ準位でギャップあるいは擬ギャップをつくることが示された。 $x = 0.4$ 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。

バンド幅制御系 $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_3$ 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 $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ において、コヒーレント・ピークと非コヒーレント・ピーク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 $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_3$ の光電子分光を行い、表面成分の補正を行った後にコヒーレント・ピークと非コヒーレント構造の間にスペクトル強度を観測した。

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実験的な情報が得られていなかった。我々は、3次元で軌道縮退のある、典型的なモット・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、電子比熱の増大と矛盾のないものであった。

層状物質 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_{1+x}\text{MnO}_4$ における電荷・軌道整列

3次元構造をもつ PrMnO_3 等に50%ホールをドーブした物質では、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%ホールをドーブした物質でも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、さらに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。

Na_xCoO_2 単結晶薄膜の化学ポテンシャルの温度変化

高い熱電特性で注目を集めている Na_xCoO_2 の熱起電力の起源を探るために、光電子スペクトルの温度変化を調べた。CoOと炭酸ナトリウムの固相エピタキシー反応で作製した単結晶薄膜試料は、その表面が化学的に安定であるために、光電子分光スペクトルの詳細は温度依存性の測定が可能となった。化学ポテンシャルのシフトは通常の金属と比べて非常に大きく、熱起電力の原因が化学ポテンシャルの温度依存性によることが示唆された。

4.1.3 磁性半導体

GaNにMnをドーブした系

室温で強磁性を示すという報告がある $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{N}$ 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MnN₄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 $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$

室温を超えるキュ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 $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ 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。

室温強磁性半導体 $\text{Zn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Te}$

最近、半導体ZnTeのZn原子をCrで置換した $\text{Zn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Te}$ が室温で強磁性を示すことが報告され、注目を集めている。この強磁性が不純物や析出物によるものでないことを確かめるために、Cr 2p内殻→3d軟X線吸収スペクトルの磁気円二色性測定を行った。強い磁気円二色性信号が得られ、またスペクトル形状は Cr^{3+} イオンに特有なものであった。このことから、 $\text{Zn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Te}$ 自体が室温強磁性を担っている可能性が強まった。

4.1.4 界面、ナノ構造

DNAの光電子分光

ナノ・デバイスの配線材料としてDNAの利用が考えられているが、DNAが電気伝導性を持つのか絶縁体なのかに関しては、異なった実験結果が報告されており、議論が続いている。本研究では、Si基板上に合成DNA分子をネットワーク状に分散させた試料の光電子スペクトルを測定し、DNA分子の状態密度と、半導体-DNA界面におけるバンドダイアグラムを得た。DNA分子の光電子スペクトルは、第一原理分子動力学計算による状態密度の計算値と比較してよい一致を示した。また、Si基板のフェルミ準位は、DNA分子のバンド・ギャップの中間に位置することがわかった。

<受賞>

- [1] 岡林潤：井上研究奨励賞「高エネルギー分光によるIII-V族希薄磁性半導体及び関連するナノ構造の研究」（2002年物理学専攻博士（理学）取得）

<報文>

(原著論文)

- [2] X. J. Zhou, T. Yoshida, D.-H. Lee, W. L. Yang, V. Brouet, F. Zhou, W. X. Ti, J.W. Xiong, Z.X. Zhao, T. Sasagawa, T. Kakeshita, H. Eisaki, S. Uchida, A. Fujimori, Z. Hussain and Z.-X. Shen: The Dichotomy between Nodal and Antinodal Quasiparticles in Underdoped $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ Superconductors, *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004) 187001-1-4; cond-mat/0403181.
- [3] A. Ino, T. Okane, S.-i. Fujimori, A. Fujimori, T. Mizokawa, Y. Yasui, T. Nishikawa, and M. Sato: Evolution of the Electronic Structure from Electron-Doped to Hole-Doped States in the Two-Dimensional Mott-Hubbard System $\text{La}_{1.17-x}\text{Pb}_x\text{VS}_{3.17}$, *Phys. Rev. B* **69** (2004) 195116; cond-mat/0405144-1-8.
- [4] H. Kumigashira D. Kobayashi, R. Hashimoto, A. Chikamatsu, M. Oshima, N. Nakagawa, T. Ohnishi, M. Lippmaa, H. Wadati, A. Fujimori, K. Ono, M. Kawasaki, H. Koinuma: Inherent Charge Transfer Layer Formation at $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{FeO}_3/\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ Heterointerface, *Appl. Phys. Lett.* **84** (2004) 5353-5355.
- [5] M. Seto, J. Matsuno, A. Fujimori, T. Mitsui, Y. Kobayashi, S. Kitao, R. Haruki, S. Kawasaki and M. Takano: Enhancement of Elastic Scattering with Magnetic Ordering in the Energy Spectra of Incoherent Nuclear Resonant Scattering, *J. Phys. Soc. Jpn* **73** (2004) 1669-1672.
- [6] D. J. Huang, C. F. Chang, H.-T. Jeng, G. Y. Guo, H.-J. Lin, W. B. Wu, H. C. Ku, A. Fujimori, Y. Takahashi and C. T. Chen: Spin and Orbital Magnetic Moments of Fe_3O_4 , *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 077204-1-4.
- [7] D. D. Sarma, S.R. Krishnakumar, M. Bertolo, S. La Rosa, G. Cautero, T. Y. Koo, P. A. Sharma, S-W. Cheong and A. Fujimori: Direct Observation of Large Electronic Domains with Memory Effect in Doped Manganites, *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 097202-1-4; cond-mat/0409343
- [8] K. Tanaka, T. Yoshida, A. Fujimori, Z.-X. Shen, X.-J. Zhou, H. Eisaki, Z. Hussain, S. Uchida, T. Sugaya, T. Mizuno, T. Fujii and I. Terasaki: Effects of Next-Nearest-Neighbor Hopping t' on the Electronic Structure of Cuprates, *Phys. Rev. B* **70** (2004) 092503-1-4; cond-mat/0312575
- [9] J. Matsuno, M. Seto, S. Kitao, Y. Kobayashi, R. Haruki, T. Mitsui, A. Fujimori, Y. Takeda, S. Kawasaki and M. Takano: Effects of Charge Disproportionation on the Phonon Density of States in Fe Perovskites, *J. Phys. Soc. Jpn.* **73** (2004) 2768-2770.
- [10] J. Okabayashi, M. Mizuguchi, K. Ono, M. Oshima, A. Fujimori, H. Kuramochi and H. Akinaga: Density Dependent Electronic Structure of the Zinc-Blende-Type MnAs Dots on GaAs (100) Studied by *in situ* Photoemission Spectroscopy, *Phys. Rev. B* **70** (2004) 233305-1-4.
- [11] H. Wadati, K. Okazaki, Y. Niimi, A. Fujimori, H. Tabata, J. Pikus and J. P. Lewis: Photoemission Study of Poly(dA)-Poly(dT) DNA : Experimental and Theoretical Approach to the Electronic Density of States, *Appl. Phys. Lett.* **86** (2005) 023901-1-7; cond-mat/0409637.
- [12] H. Wadati, D. Kobayashi, H. Kumigashira, K. Okazaki, T. Mizokawa, A. Fujimori, K. Horiba, M. Oshima, N. Hamada, M. Lippmaa, M. Kawasaki, and H. Koinuma: Hole-Doping-Induced Changes in the Electronic Structure of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$: Soft X-Ray Photoemission and Absorption Study of Epitaxial Thin Films, *Phys. Rev. B* **71** (2005) 035108-1-7; cond-mat/0404435
- [13] J. Okamoto, K. Mamiya, S.-i. Fujimori, T. Okane, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, K. Yoshii, A. Fujimori, A. Tanaka, M. Abbate, T. Koide, S. Ishiwata, S. Kawasaki and M. Takano: Antiferromagnetic-to-Ferromagnetic Transition Induced by Diluted Co in $\text{SrFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$: Magnetic Circular X-Ray Dichroism Study, *Phys. Rev. B* **71** (2005) 104401-1-5.
- [14] K. Takubo, T. Mizokawa, S. Hirata, J.-Y. Son, A. Fujimori, D. Topwal, D. D. Sarma, S. Rayaprol, and E.-V. Sampathkumaran: Electronic Structure of Ca_3CoXO_6 ($X = \text{Co}, \text{Rh}, \text{Ir}$) Studied by X-Ray Photoemission Spectroscopy, *Phys. Rev. B* **71** (2005) 073406-1-4; cond-mat/0503169.
- [15] 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.*, in press; cond-mat/0408467.
- [16] 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 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{N}$, *Phys. Rev. B*, in press; cond-mat/0504048.
- [17] 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 $\text{La}_{0.33}\text{Sr}_{0.67}\text{FeO}_3$ across the Charge Disproportionation Phase Transition, *Phys. Rev. B*, in press.

(会議抄録)

- [18] J. Okamoto, K. Mamiya, S.-i. Fujimori, T. Okane, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Fujimori, S. Ishiwata and M. Takano: Magnetic Circular X-ray Dichroism Study of Paramagnetic and Anti-Ferromagnetic States in SrFeO_3 Using a 10-T Superconducting Magnet, *Proceedings of 8-th*

- International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2003)*, AIP Conference Proceedings Vol. 705 (AIP, Melville, NY, 2004) p. 1110-1113.
- [19] T. Okane, S.-i. Fujimori, K. Mamiya, J. Okamoto, Y. Muramatsu, A. Fujimori, H. Suzuki, T. Matsumoto, T. Furubayashi, M. Isobe and S. Nagatani: High-Resolution Soft X-Ray Photoemission Spectroscopy of Spinel-Type Compound CuIr_2S_4 , *Proceedings of International Conference on Magnetism (ICM)*; J. Mag. Mag. Mater. **272-276** (2004) e297-e298.
- [20] J. Okabayashi, M. Mizuguchi, K. Ono, M. Oshima, A. Fujimori, M. Yuri, C.T. Chen, and H. Akinaga: Density Dependence of Zinc-Blende MnAs Dots Studied by X-Ray Absorption Spectroscopy and X-Ray Magnetic Circular Dichroism, *Proceedings of International Conference on Magnetism (ICM)*; J. Mag. Mag. Mater. **272-276** (2004) e1553-e1555.
- [21] W. B. Wu, D. J. Huang, G. Y. Guo, H.-J. Lin, T. Y. Hou, C. F. Chang, C. T. Chen, A. Fujimori, T. Kimura, H. B. Huang, A. Tanaka and T. Jo: Orbital Polarization of LaSrMnO_4 Studied by Soft X-Ray Linear Dichroism, *Proceedings of 9-th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure (ICES-9)*; J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **137-140** (2004) 641-645.
- [22] T. Okane, J. Okamoto, K. Mamiya, S.-i. Fujimori, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Fujimori and A. Ochiai: X-Ray Absorption Magnetic Circular Dichroism at the $\text{U } N_{4,5}$ Edges of Uranium Chalcogenides US , USe and UTe , *Proceedings of the Conference on Polarised Neutron and Synchrotron X-rays for Magnetism*; Physica B **345** (2004) 221-224.
- [23] T. Yoshida, X.J. Zhou, H. Yagi, D. H. Lu, K. Tanaka, A. Fujimori, Z. Hussain, Z.-X. Shen, T. Kakeshita, H. Eisaki, S. Uchida, K. Segawa, A.N. Lavrov and Y. Ando: Thermodynamic and Transport Properties of Underdoped Cuprates from ARPES Data, *Proceedings of International Symposium on Synchrotron Radiation Research for Spin and Electronic States in d and f Electron Systems (SRSES2003)*; Physica B **351** (2004) 250-255; cond-mat/0401565.
- [24] K. Tanaka, T. Yoshida, A. Fujimori, D. H. Lu, Z.-X. Shen, X.-J. Zhou, H. Eisaki, Z. Hussain, S. Uchida, Y. Aiurad, K. Onoe, T. Sugaya, T. Mizuno and I. Terasaki: Effects of Next-Nearest-Neighbor Hopping t' on the Electronic Structure of Cuprates, *ibid*; Physica B **351** (2004) 277-279.
- [25] Y. Ishida, J.I. Hwang, M. Kobayashi, A. Fujimori, H. Saeki, H. Tabata and T. Kawai: Photoemission Study of the Ferromagnetic Diluted Magnetic Semiconductor $\text{Zn}_{1-x}\text{V}_x\text{O}$, *ibid*; Physica B **351** (2004) 304-306.
- [26] A. Ino, M. Higashiguchi, K. Yamazaki, T. Yamasaki, T. Narimura, K. Kobayashi, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, T. Yoshida, A. Fujimori, T. Kakeshita, S. Uchida, S. Adachi, S. Tajima: ARPES Study of T^* -Cuprate Superconductor $\text{SmLa}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$, *ibid*; Physica B **351** (2004) 274-276.
- [27] T. Koide, H. Miyauchi, J. Okamoto, T. Shidara, A. Fujimori, H. Fukutani, K. Amemiya, H. Takeshita, S. Yuasa, T. Katayama and Y. Suzuki: Angle-, Field-, Temperature-, and Size-Dependent Magnetic Circular X-Ray Dichroism in Au/Co Nanoclusters/ $\text{Au}(111)$, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **136** (2004) 107-115.
- [28] G. A. Medvedkin, S. I. Goloshchapov, V. G. Voevodin, K. Sato, T. Ishibashi, S. Mitani, K. Takanashi, A. Fujimori, Y. Ishida, J. Okabayashi, D. D. Sarma: Novel Spingtronic Materials Based on Ferromagnetic Semiconductor Chalcopyrites, *Proceedings of 11th International Symposium on Nanostructures: Physics & Technology*; Interntl. J. Nanoscience **3** (2004) 39-50.
- [29] A. Fujimori, J. Okabayashi, Y. Takeda, T. Mizokawa, J. Okamoto, K. Mamiya, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, M. Oshima, S. Ohya, 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., in press.
- [30] 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 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ Epitaxial Thin Films, *ibid*; J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom., in press.
- [31] 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 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ Thin Films Grown by Laser MBE, *ibid*; J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom., in press.
- [32] 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 $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{FeO}_3/\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ Heterointerface, *ibid*; J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom., in press.
- [33] 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., in press.

(編著書)

- [34] 藤森淳: 強相関物質の基礎—原子, 分子から固体へ (内田老鶴圃, 2005 年)
(綜説, 解説, その他)
- [35] T. Mizokawa, A. Fujimori, J. Okabayashi and O. Rader: Photoemission Spectroscopy of Diluted Mn in and on Solids, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **136** (2004) 21-30.
- [36] 和達大樹: $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ エピタキシャル薄膜の *in-situ* 光電子分光, *物性論研究* **82** (2004) 978-1010.
- [37] 藤森淳, 吉田鉄平: 擬ギャップとフェルミ・アーク—高温超伝導体の電子状態, *パリティ* **19** (2004) No.11, 4-10.
- [38] 藤森淳: 光量子仮説に基づく光電効果の理論とは, *科学* **75** (2005) 194-197.
(学位論文)
- [39] 田中清尚: Photoemission Study of Bi-Cuprate High- T_c Superconductors in the Lightly-Doped to Underdoped Regions (博士論文)
- [40] 小林正起: Photoemission and X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of the Diluted Magnetic Semiconductor $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ (修士論文)
- [41] 橋本信: Photoemission Study of Single-Layer Cuprate High- T_c Superconductors (修士論文)
- [42] 滝沢 優: Photoemission Study of Transition-Metal Oxide Thin Films: $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_3$ and $\text{LaTiO}_3/\text{SrTiO}_3$ Superlattices (修士論文)
- [43] 江端一晃: Chemical Potential Shift and Orbital Ordering in Mixed-Valence Mn Oxides (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] D. Toyota, D. Kobayashi, M. Takizawa, H. Wadati, R. Hashimoto, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, T. Ohnishi, M. Lippmaa, A. Fujimori, K. Ono, M. Kawasaki and H. Koinuma: *In-situ* Photoemission Study on SrRuO_3 Epitaxial Thin Films *12th International Conference on Solid Films and Surfaces* (Hamamatsu, June 2004)
- [45] 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 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ Epitaxial Thin Films, *XIX-th International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics* (Cairns, July 2004)
- [46] Y. Ishida, H. Ohta, M. Hirano, A. Fujimori and H. Hosono: Observation of Depletion Region in ZnO/NiO *p-n* Junction by Photoemission Spectroscopy, *ibid*
- [47] 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 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ Thin Films Grown by Laser MBE, *ibid*
- [48] H. Kumigashira, D. Toyota, M. Takizawa, D. Kobayashi, H. Wadati, R. Hashimoto, A. Chikamatsu, M. Oshima, T. Ohnishi, M. Lippmaa, A. Fujimori, K. Ono, M. Kawasaki and H. Koinuma: *In-situ* Photoemission Study on SrRuO_3 Epitaxial Thin Films with Well-Ordered Surfaces, *ibid*
- [49] 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 $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{FeO}_3/\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ Heterointerface, *ibid*
- [50] Y. Saitoh, K. Kobayashi, T. Wakita, T. Matsushita, T. Nakano, A. Fujimori, T. Kida, M. Kato, Y. Yamamura, M. Koyano, H. Tsuji and S. Katayama: Soft X-Ray Spectroscopic Study of Fe_xNbS_2 , *ibid*
- [51] S-i. Fujimori, J. Okamoto, K. Mamiya, T. Okane, Y. Saito, Y. Muramatsu, A. Fujimori, H. Yamagami, S. Ikeda, Y. Tokiwa, T. Matuda, Y. Haga, E. Yamamoto and Y. Onuki: High-Energy Photoemission Study on Uranium Compounds, *ibid*
- [52] J. Okamoto, S-i. Fujimori, T. Okane, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, K. Mamiya, A. Fujimori, Y. Takeda and M. Takano: Magnetic Circular Dichroism Study of Ferromagnetic Transition in $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_3$, *ibid*
- [53] D. J. Huang, W. B. Wu, G. Y. Guo, H.-J. Lin, T. Y. Hou, C. F. Chang, C. T. Chen, A. Fujimori, T. Kimura, H.B. Huang, A. Tanaka and T. Jo: Nature of Orbital Ordering in $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{1.5}\text{MnO}_4$ Studied by Soft X-Ray Linear Dichroism, *ibid*.
- [54] Y. Ishida, H. Ohta, M. Hirano, A. Fujimori and H. Hosono: Observation of Depletion Region in ZnO/NiO *p-n* Junction by Photoemission Spectroscopy, *11th International Workshop on Oxide Electronics* (Hakone, October 2004)
- [55] M. Kobayashi, Y. Ishida, J. 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 Ferromagnetic Semiconductor $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ Thin Film, *ibid*.
- [56] 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 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ Thin Films, *ibid*

- [57] R. Hashimoto, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, T. Ohnishi, M. Lippmaa, H. Wadati, A. Fujimori, K. Ono, M. Kawasaki and H. Koinuma: *In-situ* Synchrotron-Radiation Photoemission Characterization of $\text{SrTi}_3/\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ Heterointerfaces, *ibid*
- [58] H. Kumigashira, R. Hashimoto, A. Chikamatsu, M. Oshima, N. Nakagawa, T. Ohnishi, M. Lippmaa, H. Wadati, A. Fujimori, K. Ono, M. Kawasaki and H. Koinuma: Inherent Charge Transfer Layer Formation at $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{FeO}_3/\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ Heterointerfaces Studied by *in-situ* Resonant Photoemission, *it ibid*
- [59] Y. Hotta, Y. Mukunoki, T. Susaki, H. Y. Hwang, H. Wadati, A. Fujimori: Growth and Electronic Structure of LaVO_x Film, *ibid*
- [60] T. Yoshida¹, X. Zhou, S. Komiya, Y. Ando, H. Eisaki, S. Uchida, A. Fujimori, Z. Hussain and Z.-X. Shen: Effects of Zn Impurities in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ Studied by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, *4th International Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides* (Sendai, November 2004)
- [61] H. Wadati, A. Chikamatsu, M. Takizawa, R. Hashimoto, H. Kumigashira, A. Fujimori, M. Oshima, N. Hamada, M. Lippmaa, M. Kawasaki, and H. Koinuma: Angle-Resolved Photoemission Study of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$, *ibid*
- [62] H. Wadati, T.-T. Tran, M. Takizawa, K. Tanaka, H. Yagi, M. Hashimoto, T. Mizokawa, A. Fujimori, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, S. Ishiwata, M. Azuma and M. Takano: Electronic Structure of $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{NiO}_3$ Studied by Photoemission and X-Ray Absorption Spectroscopy, *ibid*
- [63] M. Takizawa, D. Toyota, H. Wadati, A. Chikamatsu, R. Hashimoto, H. Kumigashira, A. Fujimori, M. Oshima, M. Lippmaa, M. Kawasaki and H. Koinuma: Spectral Weight Transfer in the Photoemission Spectra of $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_3$, *ibid*
- [64] M. Hashimoto, K. Tanaka, T. Yoshida, A. Fujimori, Z.-X. Shen, S. Ono and Y. Ando: Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy of Lightly Doped $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_{6+\delta}$, *ibid*
- [65] A. Chikamatsu, H. Wadati, R. Hashimoto, M. Takizawa, H. Kumigashira, M. Oshima, A. Fujimori, T. Ohnishi, M. Lippmaa, K. Ono, M. Kawasaki and H. Koinuma: *In-situ* Angle-Resolved Photoemission Study on $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ Thin Films, *ibid*
- [66] 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* Synchrotron-Radiation Photoemission Study of $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3$ Heterointerfaces, *ibid*
- [67] H. Kumigashira, D. Toyota, A. Chikamatsu, I. Ohkubo, M. Oshima, T. Ohnishi, M. Lippmaa, M. Takizawa, A. Fujimori, K. Ono, M. Kawasaki and H. Koinuma: Thickness Dependence of Electronic Structures for SrRuO_3 Thin Films Studied by *in-situ* Photoemission Spectroscopy, *ibid*
- [68] H. Wadati, A. Chikamatsu, M. Takizawa, R. Hashimoto, H. Kumigashira, T. Mizokawa, A. Fujimori, M. Oshima, N. Hamada, M. Lippmaa, M. Kawasaki and H. Koinuma: Angle-Resolved Photoemission Study of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$: Effects of Hole Doping and Charge Disproportionation, *2nd COE Workshop "New Horizons in Condensed-Matter Physics"* (University of Tokyo, November 2004)
- [69] K. Tanaka, H. Yagi, T. Yoshida, A. Fujimori, D.-H. Lu, W.-S. Lee, K.M. Shen, Z.-X. Shen, Risdiana, T. Fujii and I. Terasaki: Photoemission Spectra and Transport Properties in Lightly-Doped High- T_c Superconductor $\text{Bi}_2\text{212}$, *ibid*
- [70] Y. Ishida, H. Ohta, M. Hirano, A. Fujimori and H. Hosono: Observation of Depletion Region in ZnO/NiO p - n Junction by Photoemission Spectroscopy, *ibid*.
- [71] T. Kamo, K. Yamazaki, T. Yamasaki, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, A. Fujimori, Z.-X. Shen, K. Fujita and S. Uchida: Angle-Resolved Photoemission Study of Single-Layer High- T_c Cuprate $\text{Bi}_2\text{Bi}_2\text{Sr}_{1.6}\text{La}_{0.4}\text{CuO}_{6+\delta}$ using Low-Energy Excitation Photons, *The 9th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation* (Hiroshima University, March 2005)
- [72] T. Yamasaki, K. Yamazaki, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, A. Fujimori, Z.-X. Shen, M. Ishikado, S. Uchida: Angle-Resolved Photoemission Study of $\text{Bi}_2\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ using Low-Energy Excitation Photons, *ibid*
- [73] M. Arita, K. Shimada, Y. Takeda, M. Nakatake, H. Namatame, M. Taniguchi, T. Saitoh, A. Fujimori, T. Konomata: Photoemission Study of FeSi using Low-Energy Photons, *ibid*
- [74] H. Wadati, K. Okazaki, Y. Niimi, A. Fujimori, H. Tabata, J. Pikus and J. P. Lewis: Photoemission Spectroscopic Study of Poly(dA)-poly(dT) DNA, *Third International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE3)* (Tokyo, March 2005)
- [75] T. Yoshida, K. Tanaka, H. Yagi, A. Ino, H. Eisaki, A. Fujimori, Z.-X. Shen: Direct Observation of Mass Renormalization in SrVO_3 by Angle Resolved Photoemission Spectroscopy, *American Physical Society March Meeting* (Los Angeles, March 2005).
- [76] K. Tanaka, T. Yoshida, K.M. Shen, D.H. Lu, W.-S. Lee, H. Yagi, A. Fujimori Z.-X. Shen, Risdiana, T. Fujii and I. Terasaki: Evolution of the Electronic Structure from the Insulator to the Superconductor in $\text{Bi}_2\text{212}$ Cuprates, *ibid*.

- [77] W.B. Wu, D.J. Huang, J. Okamoto, H.-J. Lin, C.T. Chen, A. Tanaka, F.C. Chou and A. Fujimori: Orbital Symmetry and Electron Correlation in Na_xCoO_2 , *ibid*
- [78] J. Okamoto, D.J. Huang, H.-J. Lin, C.T. Chen, A. Fujimori and E.V. Sampathkumaran: X-Ray Absorption Study of the Electronic Structures of Quasi-One-Dimensional Co Oxides Ca_3CoYO_6 ($Y = \text{Co, Rh, Ir, Mn}$), *ibid*
- [79] X. J. Zhou, T. Yoshida, W. L. Yang, V. Brouet, S. Komiyama, Y. Ando, F. Zhou, J. W. Xiong, W. X. Ti, Z. X. Zhao, T. Sasagawa, T. Kakishita, H. Eisaki, S. Uchida, A. Fujimori, Z. Hussain and Z.-X. Shen: Evolution of Electronic Structure with Doping in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, *ibid*
- 招待講演
- [80] A. Fujimori: Structural Effects on the Electronic Structure of High- T_c Cuprates, *Dynamic Energy Landscapes and Functional Systems (DELFS 04)* (Santa Fe, USA, April 2004)
- [81] A. Fujimori: Thermodynamic and Transport Properties of Lightly-Doped Cuprates from ARPES Data, *2nd Asia-Pacific Physics Workshop: Frontier in Condensed Matter Physics* (Hong-Kong, June 2004)
- [82] A. Fujimori: Pseudogap and Fermi Arc in Lightly-Doped Cuprates, *Spectroscopies in Novel Superconductors 2004* (Sitges, Spain, July 2004)
- [83] A. Fujimori: Photoemission and MCD Study of Magnetic Semiconductors for Spintronics, *XIV-th International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics* (Cairns, Australia, July 2004)
- [84] A. Fujimori: Magnetic Circular Dichroism and Soft X-Ray Photoemission of Correlated System and Nano-Materials, *Workshop on Frontier Science Using Soft X-Rays at the APS* (Advanced Photon Source, Argonne, U.S.A., August 2004)
- [85] A. Fujimori: Structural Effects on the Electronic Structure of Cuprates, *Stripes 2004 International Conference* (Rome, September 2004)
- [86] A. Fujimori: Electron Correlation in V and Ru Oxides, *NAREGI Workshop on Electronic Transport, Excitation and Correlation in Nano-Science* (Hokkaido University, October 2004)
- [87] A. Fujimori, Y. Ishida, J.-I. Hwang, M. Kobayashi, Y. Takeda, Y. Saitoh, J. Okamoto, T. Okane, Y. Muramatsu, K. Mamiya, T. Koide and A. Tanaka: Core-Level MCD Study of Magnetic Semiconductors, *2nd Programme International de Cooperation Scientifique France/Japon (PICS) Workshop* (SPRING-8, November 2004)
- [88] A. Fujimori: Material-Dependent Electronic Structure of Lightly-doped Cuprates, *4th International Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides* (Sendai, November 2004)
- [89] A. Fujimori: Pseudo-gap and Fermi Arc in High-Temperature Superconductors *2nd COE Workshop "New Horizons in Condensed-Matter Physics"* (University of Tokyo, November 2004)
- [90] A. Fujimori: Electron Correlation in Mott-Hubbard-Type Transition-Metal Oxides at Surface, Bulk and Interfaces (Pusan, Korea, December 2004)
- [91] A. Fujimori: Photoemission and Core-Level MCD Studies of Diluted Magnetic Semiconductors *Nanomagnetism: New Insights with Synchrotron Radiation* (Bad Honnef, Germany, January 2005)
- [92] T. Yoshida: Material Dependence of the Electronic Structure of High- T_c Cuprates, *Electron-Phonon Interaction in High- T_c Superconductors* (AIST, Tsukuba, January 2005)
- [93] A. Fujimori: ARPES and Core-Level Spectroscopy of High- T_c Superconductors, *Frontier Conference on Synchrotron Radiation and Related Methods in Advanced Materials Science* (Lund University, January 2005)
- [94] A. Fujimori: Photoemission and Magnetic Circular Dichroism Studies of Magnetic Semiconductors, *American Physical Society March Meeting* (Los Angeles, March 2005)
- (国内会議)
- 一般講演
- [95] 藤森淳：光電子分光による磁性半導体の物性研究，科研費特定研究「半導体ナノスピントロニクス」平成16年度夏の研究会（東京工業大学，2004年6月）
- [96] Y. Ishida, J. I. Hwang, M. Kobayashi, A. Fujimori, J. Okamoto, K. Mamiya, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Tanaka, H. Saeki, H. Tabata, and T. Kawai: Photoemission and Magnetic Circular Dichroism Study of the Ferromagnetic Diluted Magnetic Semiconductor $\text{Zn}_{1-x}\text{V}_x\text{O}$, 第10回「半導体スピン工学の基礎と応用」研究会 (PASPS10) (東京工業大学, 2004年6月)
- [97] J. I. Hwang, Y. Ishida, M. Kobayashi, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Kondo and H. Munekata: X-Ray Photoemission Study of the Nitride-Based Diluted Magnetic Semiconductor $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{N}$, 同上
- [98] M. Kobayashi, Y. Ishida, J. I. Hwang, T. Mizokawa, A. Fujimori, J. Okamoto, K. Mamiya, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Tanaka, H. Saeki, H. Tabata and T. Kawai: Photoemission and X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of the Ferromagnetic Diluted Magnetic Semiconductor $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$, 同上
- [99] 藤森淳：はじめに-PLDで作製した強相関ペロブスカイト型遷移金属酸化物の光電子分光，科研費基盤研究A「薄膜化により物性制御した強相関系遷移金属酸化物の電子構造研究」平成16年度研究会（東京工業大学，2004年6月）

- [100] 橋本龍司, 近松彰, 組頭広志, 尾嶋正治, 大西剛, Lippmaa Mikk, 和達大樹, 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・X 線吸収分光による $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3$ ヘテロ界面の電子状態評価, 応用物理学会学術講演会 (東北学院大学, 2004 年 9 月)
- [101] 吉田鉄平, 永崎洋, 井野明洋, 田中清尚, 八木創, 藤森淳, Z.-X. Shen: 3 次元ペロブスカイト SrVO_3 の角度分解光電子分光, 日本物理学会秋の分科会 (青森大, 2004 年 9 月)
- [102] 吉田鉄平, Xingjiang Zhou, 小宮世紀, 安藤陽一, 永崎洋, 内田慎一, 藤森淳. Z. Hussain, Z.-X. Shen: $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の角度分解光電子スペクトルにおける Zn-不純物効果, 同上
- [103] 田中清尚, 吉田鉄平, 八木創, 藤森淳, Donghui Lu, Wei-Sheng Lee, Kyle Shen, Z.-X. Shen, 藤井武則, Risdiana, 寺崎一郎: Bi_{2212} における化学ポテンシャルの温度変化
- [104] 八木創, 小林正起, 滝沢優, 和達大樹, 吉田鉄平, 藤森淳, 幸坂祐生, 笹川崇男, 高木 英典: $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ の化学ポテンシャルシフト, 同上
- [105] 和達大樹, Tran Thanh Trung, 滝沢優, 田中清尚, 八木創, 橋本信, 溝川貴司, 藤森淳, 近松彰, 組頭広志, 尾嶋正治, 石渡晋太郎, 東正樹, 高野幹夫: $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{NiO}_3$ の光電子分光と軟 X 線吸収分光, 同上
- [106] 和達大樹, 近松彰, 滝沢優, 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: 薄膜 *in situ* 角度分解光電子分光による $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ バンド構造の決定, 同上
- [107] 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: $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ の化学ポテンシャルシフト, 同上
- [108] 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: $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_3$ 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
- [109] 橋本信, 田中清尚, 吉田鉄平, 藤森淳, Z.-X. Shen, 小野新平, 安藤陽一: 微少ドープ $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_{6+\delta}$ の角度分解光電子分光, 同上
- [110] 間宮一敏, 小出常晴, 藤森淳, 戸叶洋之, 真中浩貴, 田中新, 豊崎秀海, 福村知昭, 川崎雅司: 室温強磁性体ルチル型 $\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$ の Co *L*-吸収端 XMCD, 同上
- [111] 近松彰, 和達大樹, 橋本龍司, 滝沢優, 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: $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 薄膜の *in situ* 角度分解光電子分光; 組成依存性, 同上
- [112] 近松彰, 和達大樹, 橋本龍司, 滝沢優, 組頭広志, 尾嶋正治, 藤森淳, 浜田典昭, 大西剛, Mikk Lippmaa, 小野寛太, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: Laser MBE 法で作製した $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 薄膜のバンド構造・フェルミ面; *in situ* 角度分解光電子分光, 同上
- [113] 近松彰, 和達大樹, 橋本龍司, 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: Laser MBE 法で作製した $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 薄膜の *in situ* 共鳴光電子分光; 温度・組成依存性, 同上
- [114] 田久保耕, 平田玄, 孫珍永, 溝川貴司, 藤森淳, D. D. Sarma, R. Rayaprol, E.-V. Sampathkumaran: Ca_3CoXO_6 ($X = \text{Co}, \text{Rh}, \text{Ir}$) の光電子分光, 同上
- [115] 藤森伸一, 斎藤祐児, 岡根哲夫, 村松康司, 藤森淳, 山上浩志, 常盤欣文, 池田修悟, 松田達磨, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 大貫惇睦: UTGa_5 ($T = \text{Fe}, \text{Pt}$) の放射光光電子分光, 同上
- [116] 藤森伸一, 斎藤祐児, 岡根哲夫, 村松康司, 藤森淳, 山上浩志, 常盤欣文, 池田修悟, 松田達磨, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 大貫惇睦: ウラン化合物に対する軟 X 線放射光光電子分光実験, 同上
- [117] 寺井恒太, 岡根哲夫, 竹田幸治, 藤森伸一, 斎藤祐児, 村松康司, 岡本淳, 藤森淳: PLD 法により作製した SrRuO_3 薄膜の *in-situ* 軟 X 線吸収磁気円二色性測定, 同上
- [118] 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, 田中雅明: GaMnAs の軟 X 線磁気円二色性の磁場依存性, 同上
- [119] 岡根哲夫, 竹田幸治, 岡本淳, 藤森伸一, 斎藤祐児, 村松康司, 藤森淳, K. Dhar: $(\text{CePd}_3)_8\text{Mn}$ の軟 X 線吸収磁気円二色性測定, 同上
- [120] 山崎達也, 山崎健太郎, 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: 低エネルギー励起光を用いた $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ の角度分解光電子分光, 同上
- [121] 井野明洋, 山崎達也, 山崎健太郎, 東口光晴, 島田賢也, 生天目博文, 谷口雅樹, 吉田鉄平, 藤森淳, Z.-X. Shen, 掛下照久, 内田慎一, 安達成司, 田島節子: T^* 相銅酸化物高温超伝導体 $\text{SmLa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の ($\pi/2$, $\pi/2$) および (π , 0) における準粒子構造, 同上
- [122] 和達大樹, Tran Thanh Trung, 滝沢優, 田中清尚, 八木創, 橋本信, 溝川貴司, 藤森淳, 近松彰, 組頭広志, 尾嶋正治, 石渡晋太郎, 東正樹, 高野幹夫: 光電子分光と軟 X 線吸収分光による $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{NiO}_3$ の価数変化の観測, 日本放射光学会 (佐賀, 2005 年 1 月)
- [123] 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, 浜田典昭, Mikk Lippmaa, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ 薄膜の *in situ* 角度分解光電子分光, 同上
- [124] 近松彰, 和達大樹, 橋本龍司, 滝沢優, 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: $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 単結晶薄膜の *in-situ* 角度分解光電子分光, 同上
- [125] 橋本龍司, 近松彰, 組頭広志, 尾嶋正治, 大西剛, Mikk Lippmaa, 和達大樹, 藤森淳, 小野寛太, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: $\text{SrTiO}_3/\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 多層膜の *in-situ* 共鳴光電子分光・X 線吸収分光, 同上
- [126] 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: SrRuO_3 極薄膜の *in-situ* 放射光光電子分光, 同上

- [127] 藤森淳：軟 X 線 MCD による磁性半導体の研究，原研放射光科学研究シンポジウム (SPRING-8, 2005 年 3 月)
- [128] 石田行章，橋本信，藤森淳，杉浦健二，太田弘道，平野正浩，細野秀雄： $\text{Na}_{0.8}\text{CoO}_2$ 薄膜単結晶の光電子分光，日本物理学会大 60 回年会（東京理科大，2005 年 3 月）
- [129] 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： $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ の角度分解光電子スペクトルとタイトバインディング計算の比較，同上。
- [130] 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，同上
- [131] 小林正起，石田行章，黄鐘日，溝川貴司，藤森淳，岡本淳，間宮一敏，竹田幸治，岡根哲夫，斎藤祐児，村松康司，田中新，佐伯洋昌，田畑仁，川合知二：希薄磁性半導体 $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ の磁気円二色性，同上
- [132] 江端一晃，和達大樹，滝沢優，近松彰，組頭広志，尾嶋正治，藤森淳，富岡泰秀，十倉好紀： $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ の光電子スペクトルの組成依存性，同上
- [133] 黄鐘日，石田行章，小林正起，長船義敬，藤森淳，竹田幸治，藤森伸一，岡根哲夫，村松康司，橋本政彦，田中浩之，長谷川繁彦，朝日一：希薄磁性半導体 GaN:Cr の光電子分光，同上
- [134] 橋本信，田中清尚，八木創，和達大樹，小林正樹，滝沢優，吉田鉄平，藤森淳，小野新平，安藤陽一： $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_{6+\delta}$ のケミカルポテンシャルシフト，同上
- [135] 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：カルコパイライト型 MnGeP_2 の光電子分光と内殻吸収磁気円二色性，同上
- [136] 橋本龍司，近松彰，組頭広志，尾嶋正治，大西剛，Mikk Lippmaa，和達大樹，藤森淳，小野寛太，川崎雅司，鯉沼秀臣： $\text{SrTiO}_3/\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ ヘテロ界面の *in-situ* 放射光光電子分光，同上。
- [137] 寺井恒太，竹田幸治，岡根哲夫，藤森伸一，斎藤祐児，村松康司，小林啓介，藤森淳：遷移金属酸化物 $\text{CaMn}_{1-x}\text{Ru}_x\text{O}_3$ 薄膜の硬 X 線光電子分光と軟 X 線吸収磁気円二色性測定，同上
- [138] 間宮一敏，小出常晴，戸叶洋之，長船義敬，石田行章，藤森淳，鈴木義茂，片山利一，湯浅新治： $\text{Au}(001)$ 表面上 Co 超薄膜の角度分解軟 X 線内殻磁気円二色性，同上
- [139] 石田行章，藤森淳，太田裕道，細野秀雄：その場' 固相反応エピタキシ法による単結晶薄膜 Na_xCoO_2 の光電子分光，第 52 回応用物理学関係連合講演会（埼玉大，2006 年 3 月）
- [140] 和達大樹，岡崎浩三，新見康洋，藤森淳，田畑仁，Jared Pikus，James P. Lewis：光電子分光法による DNA の電子状態の観測，同上
- [141] 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
- [142] 斎藤祐児，竹田幸治，柳田剛，田中秀和，川合知二，藤森淳： $\text{La}_{0.7}\text{Ce}_{0.3}\text{MnO}_3$ 薄膜の軟 X 線吸収磁気円二色，同上
- [143] 橋本龍司，和達大樹，近松彰，大久保勇男，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：コンビナトリアル放射光光電子分光を用いた $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 薄膜の成長条件最適化，同上

招待講演

- [144] 藤森淳：内殻 MCD から見た遍歴磁性体，物性研短期研究会「遍歴系の特異な磁性と磁性材料への応用」（物性研，2004 年 5 月）
- [145] 藤森淳：ペロブスカイト型酸化物薄膜・界面の光電子分光，平成 16 年度東北大学金属材料研究所ワークショップ「強相関酸化物の機能開発とコンビナトリアル手法の応用」（東北大金研，2005 年 1 月）
- [146] 藤森淳：鉄ペロブスカイトのラマン分光，「酸素ホール」科研費研究会（京大化研，2005 年 1 月）
- [147] 和達大樹： $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{NiO}_3$ の電子構造，同上
- [148] 藤森淳：磁性半導体の軟 X 線 MCD，日本応用磁気学会第 6 回スピンエレクトロニクス専門研究会「強磁性半導体およびスピン依存伝導する最近の話題」（東大工学部，2005 年 2 月）

セミナー

- [149] A. Fujimori: Photoemission Spectroscopy of Strongly Correlated Transition-Metal Oxides (University of Wisconsin, April 2004)
- [150] A. Fujimori: Soft X-Ray Photoemission and Magnetic Circular Dichroism of Correlated Systems and Nano-Materials (National Synchrotron Radiation Research Center, Taiwan, August 2004)
- [151] A. Fujimori: Spectroscopic Studies of Diluted Magnetic Semiconductors for Future Spintronics (Academia Sinica, Taiwan, August 2004)
- [152] 藤森淳：磁性半導体の軟 X 線 MCD（高エネルギー研物構研・放射光セミナー，2004 年 12 月）
- [153] 吉田鉄平：高温超伝導体の角度分解光電子分光：電子構造の物質依存（東大工学部応用化学，2005 年 1 月）

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ましい現象を引き起こすと考えられるようになってきた。我々は、高温超伝導体を主体に、1, 2 次元構造 Cu 酸化物を対象とし、電子のもつ電荷・スピンの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・スピン自由度のダイナミクスや集団励起モードと高温超伝導発現との関係を調べている。特に μ SR、中性子散乱、光電子分光、そして STM での国際共同研究を推進しており、世界的な研究ネットワークから数多くの epoch-making かつ新たな研究の流れを形成する成果を生産し続けている。最近の、代表的な研究テーマと成果は、

- 1) 1 次元における電子のスピン・電荷分離の観測と非線型光学応答 (Phys. Rev. Lett. (1996) (1998) (2001) (2003))。
- 2) 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))。
- 3) 磁場と結晶構造制御による高温超伝導体のテラヘルツ光学スペクトル操作 (Phys. Rev. Lett. (2001), (2002) (2003))。
- 4) 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))。
- 5) 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))。

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、電子相関が支配的な系、特にナノメートルスケールの電子系、での電子の運動、秩序形成を決める「原理」/「法則」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 ユニットの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ドーピングが難しいが、光励起によって電子-正孔対をつくることのできる。その正孔のダイナミ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、正孔ドーピングされた 1 次元 Cu 酸化物は、偶然、高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ あるいは非超伝導体 $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 中に存在している。 $\text{Pr}123$ が超伝導体にならないことから、間接的ながら、ドーピングされた 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、 $\text{Sr}_{14-x}\text{Ca}_x\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ 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)

圧力誘起超伝導と電荷秩序

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。

超伝導は高ドーピング ($x > 10$)、高圧下 (>3GPa) で絶縁体-超伝導 (SI) 転移を経て実現する。この SI 転移は 2 次元の転移であることが輸送現象から明らかになっている。圧力の効果は、梯子系電子の次元を 1 から 2 へ増加させることがわかる。更に、NMR で超伝導クーパー対の対称性を調べたところ、 T_c の近傍で、BCS-s 波超伝導体に特徴的な「コヒーレンスピーク」がみつかった。2 次元 Cu 酸化物の高温超伝導とは異なるクーパー対形成が行われている事を示唆している。

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 c 軸光学スペクトルで探る超伝導ギャップと擬ギャップ

超伝導状態を特徴づける 2 つの基本的なパラメーターは超伝導ギャップと超流動密度 (クーパー対の密度) である。光学スペクトルは両者を同時に測定できる有効な物性実験プローブである。高温超伝導体

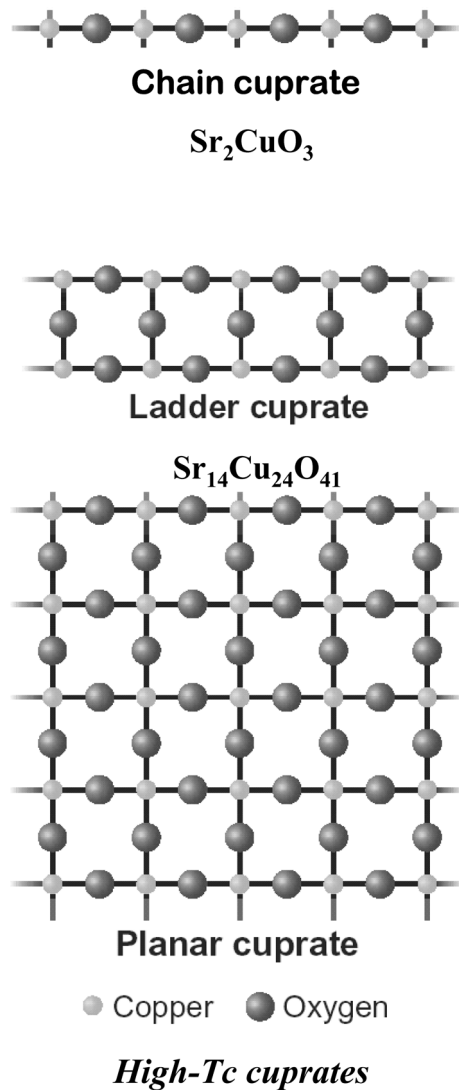


図 4.2 a: 1 次元梯子型、2 次元 Cu 酸化物

では超伝導ギャップのほかに、状態伝導状態でもギャップが存在する。これは「擬ギャップ」を持っているが、高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ の c 軸光学応答は d 波ギャップが最大値を取る運動量空間の電子情報を与える。このことを利用して両ギャップの関係を調べた。その結果、次のことがわかってきた。 1) 擬ギャップは超伝導ギャップより大きなエネルギーをもっている。 2) 超伝導状態においても擬ギャップが観測される。擬ギャップが超伝導ギャップの前駆的なものではなく、超伝導とは独立の電子相に付随するギャップであることを示している。次に記すように、Bi 系超伝導体においても両相の競合が STM で観測されており、乱れの少ない物質と考えられている YBCO でも、このように観測された事は、不均一性、相競合が高温超伝導固有のものであることを示唆している。(図 4.2 b)

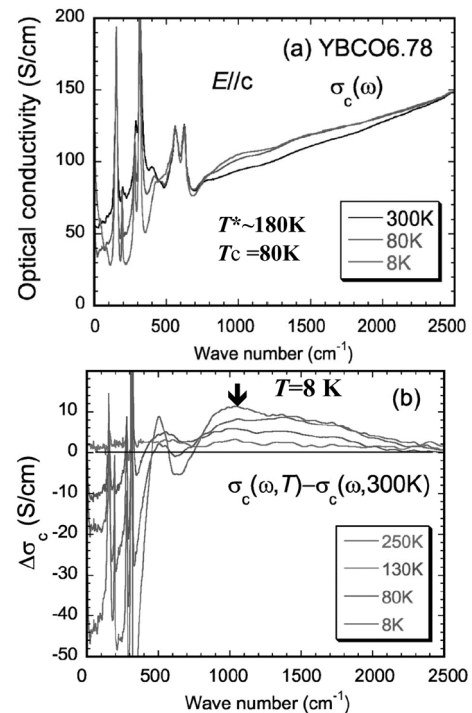


図 4.2 b: 超伝導ギャップと擬ギャップの共存を示す高温超伝導体 YBCO の c 軸光学スペクトル

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 (ドーピングされていない) モット絶縁体状態であり、電子のもつスピンの表に現れて、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。

Nd を部分置換した $\text{La}_{2-x-y}\text{Nd}_y\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ では、ストライプ秩序が静的に安定化し、超伝導秩序を抑制する。特に、 $x=0.12$ (〜1/8) の正孔濃度 のときストライプが最も安定になり、超伝導がほぼ消滅する。

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 ($\sim 2\text{nm}$)、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。図のフェルミ面上で第 1 ブリュアン帯の対角線方向の運動量をもつ電子 (正孔) がつくるクーパー対は超伝導ギャップを持たず (ギャップノード)、一方、帯境界近くの電子 (正孔) がつくるクーパー対は最大のギャップをもつのである (アンチノード)。

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 観測を行ったところ、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。

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、それを通して見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。

擬ギャップ相

エネルギー (バイアス電圧) /運動量の大きさで、見え方が違うことから、観測された不均一性が相

離によるものかどうかという疑問が生ずる。しかし、明らかに超伝導 CuO_2 面の一部に非超伝導領域が存在し、それは空間的に固定されている。実際、正孔ドーピング量を減少させると、この非超伝導領域の面積比は増大する。従って、 T_c 以上の正常状態で観測される「擬ギャップ」状態、そして超伝導秩序の破壊された量子化磁束の芯の部分で擬ギャップが観測されることを考えると、非超伝導領域では超伝導秩序と競合する未知の秩序が発達していると想像できる。その候補として、反強磁性秩序、ストライプ秩序、あるいは理論的に提唱されている電子対のウィグナー結晶、DDW のような新奇な秩序が挙げられている。この秩序を明らかにすることが擬ギャップの正体、そして高温超伝導メカニズムの解明の鍵を握っていると考えられる。(図 4.2 c)

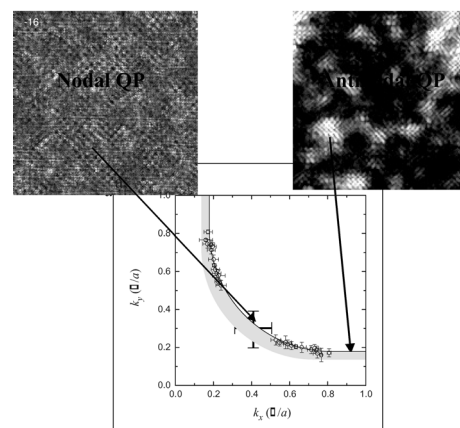


Fig. 4

図 4.2 c: ノード及びアンチノード準粒子のコヒーレンス

< 報文 >

(原著論文)

- [1] K. M. Shen, T. Yoshida, D. H. Lu, F. Ronning, N. P. Armitage, W. S. Lee, X. J. Zhou, A. Damascelli, D. L. Feng, N. J. C. Ingle, H. Eisaki, Y. Kohsaka, H. Takagi, T. Kakeshita, S. Uchida, P. K. Mang, M. Greven, Y. Onose, Y. Taniguchi, Y. Tokura, S. Komiya, Y. Ando, M. Azuma, M. Takano, A. Fujimori, and Z. X. Shen: Fully gapped single-particle excitations in lightly doped cuprates, *Phys. Rev. B* **69**, 054503 (2004).
- [2] R. Kadono, W. Higemoto, A. Koda, M. I. Larkin, G. M. Luke, A. T. Savici, Y. J. Uemura, K. M. Kojima, T. Okamoto, K. Kakeshita, S. Uchida, T. Ito, K. Oka, M. Takigawa, M. Ichioka, and K. Machida: Expansion of vortex cores by strong electronic correlation in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ at low magnetic induction, *Phys. Rev. B* **69**, 104523 (2004).
- [3] Y. -J. Kim, J. P. Hill, H. Benthien, F. H. L. Essler, E. Jeckelmann, H. S. Choi, T.W. Noh, N. Motoyama, K. M. Kojima, S. Uchida, D. Casa, and

- T. Gog: Resonant Inelastic X-Ray Scattering of the Holon-Antiholon Continuum in SrCuO₂, Phys. Rev. Lett. **92**, 137402 (2004).
- [4] X. J. Zhou, T. Yoshida, D. -H. Lee, W. L. Yang, B. Brouet, F. Zhou, W. X. Ti, J. W. Xiong, Z. X. Zhao, T. Sasagawa, T. Kakeshita, H. Eisaki, S. Uchida, A. Fujimori, Z. Hussain, and Z. -X. Shen: Dichotomy between Nodal and Antinodal Quasiparticles in Underdoped (La_{2-x}Sr_x)CuO₄ Superconductors, Phys. Rev. Lett. **92**, 187001 (2004).
- [5] A. Sekiyama, H. Fujiwara, S. Imada, S. Suga, H. Eisaki, S. I. Uchida, K. Takegahara, H. Harima, Y. Saitoh, I. A. Nekrasov, G. Keller, D. E. Kon-dakov, A. V. Kozhevnikov, Th. Pruschke, K. Held, D. Vollhardt, and V. I. Anisimov: Mutual Experimental and Theoretical Validation of Bulk Photoemission Spectra of Sr_{1-x}Ca_xCuO₃, Phys. Rev. Lett. **93**, 156402 (2004).
- [6] K. Tanaka, T. Yoshida, A. Fujimori, D. H. Lu, Z. X. Shen, X. -J. Zhou, H. Eisaki, Z. Hussain, S. Uchida, Y. Aiura, K. Ono, T. Sugaya, T. Mizuno, and I. Terasaki: Effect of next-nearest-neighbor hopping t' on the electronic structure of cuprate superconductors, Phys. Rev. B. **70**, 092503 (2004).
- [7] K. M. Kojima, J. Yamanobe, H. Eisaki, S. Uchida, Y. Fudamoto, I. M. Gat, M. I. Larkin, A. Savici, Y. J. Uemura, P. P. Kyriakou, and G. M. Luke: Site-dilution in the quasi-one-dimensional antiferromagnet Sr₂(Cu_{1-x}Pd_x)O₃: Reduction of Néel temperature and spatial distribution of ordered moment sizes, Phys. Rev. B **70**, 094402 (2004).
- [8] Y. J. Kim, J. P. Hill, G. D. Gu, F. C. Chou, S. Wakimoto, R. J. Birgeneau, S. Komiya, Y. Ando, N. Motoyama, K. M. Kojima, S. Uchida, D. Casa, T. Gog: Molecular orbital excitations in cuprates: Resonant inelastic x-ray scattering studies, Phys. Rev. B **70**, 205128 (2004).
- [9] S. Azuma, M. Sato, Y. Fujimaki, S. Uchida, Y. Tanabe, and E. Hanamura: Optical response due to many magnons in α -Fe₂O₃, Phys. Rev. B **71**, 094508 (2005).
- [10] S. Tajima, Y. Fudamoto, T. Kakeshita, B. Goshunov, V. Zlezny, K. M. Kojima, M. Dressel, and S. Uchida: In plane optical conductivity of La_{2-x}Sr_xCuO₄: Reduced superconducting condensate and residual Drude-like response, Phys. Rev. B **71**, 094508 (2005).
- [11] M. K. Crawford, R. L. Harlow, S. Deemyad, V. Tissen, J. S. Schilling, E. M. McCarron, S. W. Tozer, D. E. Cox, N. Ichikawa, S. Uchida, and Q. Huang: High-pressure study of structural phase transitions and superconductivity in La_{1.48}Nd_{0.4}Sr_{0.12}CuO₄, Phys. Rev. Lett. **71**, 104513 (2005).
- [12] 藤巻洋介: 光でみる強電子相関係のスピンの励起。(修士論文)
- [13] 飯島大輔: 高温超伝導体の擬ギャップと Zn 置換効果。(修士論文)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [14] S. Uchida: Pseudogap phase investigated by STM, ARPES, and c-axis optical spectrum (The 2nd Asia Pacific Workshop on Physics Correlated Electrons, Hong Kong, June 21, 2004).
- [15] S. Tajima, K. M. Kojima, and S. Uchida: Strongly reduced superconducting condensate in inhomogeneous high-T_c cuprates: Far-infrared study (The 7th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors—SNS2004, Sitges Spain, July 11, 2004).
- [16] S. Uchida: Pseudogap and microscopic inhomogeneity in high-T_c cuprates investigated by optical spectroscopy (The 7th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors—SNS2004, Sitges Spain, July 14, 2004).
- [17] S. Uchida: Paradox in the Superfluid Density of High-T_c Cuprates (2004 International Conference on Stripes, Rome, September 28, 2004).
- [18] S. Uchida: Physics and Chemistry of T_c in Cuprates (The 10th International Workshop on Chemical Designing and Processing of High-T_c Superconductors and Related Materials—Chem-HTSC X, 長津田, November 21, 2004).
- [19] S. Uchida, Competing Phases in High-T_c Cuprates—Overview (The 3rd Asia Pacific Workshop, 仙台, November 22, 2004).
- [20] S. Uchida, High-T_c Superconductivity: Experiments (The 21C-COE Symposium on New Horizons of Condensed Matter Physics, 東京, November 30, 2004).
- [21] S. Uchida: Resonance Mode vs Buckling Phonon (International Workshop on Electron-Phonon Coupling in High-T_c Superconductors, 筑波, January 05, 2005).
- 一般講演
- [22] K. M. Kojima, S. Uchida, and S. Tajima: Coexistence of superconducting gap and pseudogap in underdoped YBCO as evidenced by the c-axis optical response (The 7th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors - SNS2004, Sitges Spain, July 11, 2004).
- [23] K. M. Kojima, S. Uchida, and S. Tajima: Coexistence of Superconducting gap and pseudogap in underdoped BCO as evidenced by the c-axis optical response (The 7th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors - SNS2004, Sitges Spain, July 15, 2004).
- [24] T. Kakeshita, K. M. Kojima, S. Uchida, and S. Tajima: c-axis charge dynamics in T* Cuprate superconductors (The 17th International Symposium on Superconductivity—ISS2004, 新潟, November 25, 2004).

(国内会議)

一般講演

- [25] 石角元志, 小嶋健児, 内田慎一: Bi2212 の光学応答で見た超伝導凝集量 (2), 日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学, 2004 年 9 月)
- [26] 山崎達也, 山崎健太郎, 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: 低エネルギー励起光を用いた $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学, 2004 年 9 月)
- [27] 井野明洋, 山崎達也, 山崎健太郎, 東口光晴, 島田賢也, 生天目博文, 谷口雅樹, 吉田鉄平, 藤森淳, Z.-X. Shen, 掛下照久, 内田慎一, 安達成司, 田島節子: T^* 同酸化物高温超伝導体 $\text{SmLa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の $(\pi/2, \pi/2)$ および $(\pi, 0)$ における準粒子構造, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学, 2004 年 9 月)
- [28] 藤田和博, 小嶋健児, 内田慎一, 永崎洋: アンダードープ Bi2201 における結晶の乱れの効果, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学, 2004 年 9 月)
- [29] 藤巻洋介, 小嶋健児, 内田慎一: 低次元スピン系の赤外吸収と磁氣的励起, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学, 2004 年 9 月)
- [30] 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氣励起, 日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学 2005 年 3 月)
- [31] 藤田和博, 小嶋健児, 内田慎一, 永崎洋: 面間の乱れによる超伝導-絶縁体転移, 日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学 2005 年 3 月)
- [32] 加茂剛, 山崎健太郎, 山崎達也, 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: $\text{Bi}_2\text{Sr}_{1.6}\text{La}_{0.4}\text{CuO}_{6+d}$ の低エネルギー励起光角度分解光電子分光, 日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学, 2005 年 3 月)
- [33] 石角元志, 小嶋健児, 内田慎一: アンダードープ Bi2212 の光学応答, 日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学, 2005 年 3 月)
- [34] 杉本晁, 柏谷聡, 永崎洋, 田仲由喜夫, 藤田和博, 内田慎一: STM/STS による不純物ドープ Bi2201 系超伝導体における空間的不均一性の観測, 日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学, 2005 年 3 月)

4.3 長谷川研究室

4 月から修士課程 1 年生として宮田伸弘と細村嘉一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。9 月には科学技術振興機構研究員 Alexander Konchenko がロシアに帰国し、12 月には、博士課程 3 年生の守川春雲が中退し、当大学院化学専攻岩澤研究室の助手として転出した。

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。特に、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バンドの電子輸送特性を明らかにし、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

高分解能光電子分光による自由電子的表面状態の電気伝導の研究

$\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Ag}$ はフェルミ準位を横切る放物線的なバンドを持つ二次元自由電子的な金属的表面である。これまでの電気伝導測定によって、(1)Ag などの貴金属原子を極微量吸着させて $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 相を作ると表面電気伝導度が増加し、さらに (2) 室温から約 150K まで冷却すると表面伝導度が増加する金属的な性質を示すことが見出されてきた。そこでこれに対応する電子状態の変化を高分解能光電子分光法によるバンド及びフェルミ面マッピングで定量的に調べた。電気伝導度は最も単純には系の全価電子数と移動度に比例する Drude モデルで表されるが、我々は 2 次元 Boltzmann 方程式をもとに、より一般的でしかも光電子分光の結果と比較し易い以下の式を導出した。

$$\sigma = \frac{e^2}{2} \cdot (\tau \cdot v_F) \cdot v_F \cdot \mathcal{D}. \quad (3.1.1)$$

これにより電気伝導度 (σ) はフェルミ準位での状態密度 ($\mathcal{D}$)、フェルミ速度 (v_F)、緩和時間 (τ) で書ける。まず、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相から $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 相に変化したとき、追加蒸着された原子からの電子ドーピングにより、フェルミ面の円の半径が増大するとともに逆格子空間での周期性が縮小してバンドの折り返しが起こり、多数キャリアの振る舞いが電子的からホールのへと変化することを発見した。この測定により得られた $\mathcal{D}$ と v_F 、および τ から上式に基づいて表面状態の電気伝導度を見積もった結果、いままでに測定された電気伝導度と定量的に一致していること

が分かった。一方、表面電気伝導の温度変化は、光電子ピークのエネルギー幅の温度依存性から電子格子相互作用に起因する τ の変化に対応していることが確認された。

自由電子的表面状態のホール効果の測定

上述のように、 $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Ag}$ から $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 表面構造への変化に従って、フェルミ面の折り返しによって表面状態の多数キャリアの振る舞いが電子的からホールのへと変化するを見出した。そこで、この多数キャリアの変化を実際に検出するため超高真空超伝導マグネットチャンバーを立ち上げ、マクロ 4 端子法による磁場中でのホール効果測定を行った。端子間隔が数 mm であるため、下地基板の寄与が大きく、表面状態の成分だけを取り出してホール係数の符号反転を直接検出することはできなかったが、Two Layer Model に基づく定量的な解析の結果、この構造変化に伴い測定されたホール係数の変化は基板の表面空間電荷層の変化とは逆で、表面状態から予測された変化と一致していた。これは表面状態でのホール効果検出に初めて成功したことを意味する。

室温から極低温までの $\text{Si}(111)\text{-Au}$ 表面上のガラス・結晶転移での電気伝導

1 原子層の Au を蒸着した $\text{Si}(111)\text{-Au}$ 表面はガラス・結晶転移を起こす。すなわち熱処理のみで 6×6 表面 (結晶相) と $\beta\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面 (ガラス相) を可逆的に作り変えることができる。本研究では両表面の表面状態電気伝導度 (σ_{ss}) を室温から約 10K まで測定した。その結果 6×6 表面は $\beta\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面より高い σ_{ss} を持ち、特に約 100K 以下の熱活性型ホッピング伝導が起こっている温度領域では約 3 倍となった。また、15K 以下で $\beta\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面 (ガラス相) のみが Mott 型の可変領域ホッピング伝導と考えられる伝導に切り替わることが判った。そのことは $\beta\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面 (ガラス相) には乱れによってフェルミ面近傍に局在した電子状態が形成されたとことを示唆しており、現在その存在を STM および光電子分光法を用いて探索している。

室温から極低温までの $\text{Si}(111)\text{-}\alpha\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Au}$ 表面の電気伝導

2/3 原子層の Au を蒸着した $\text{Si}(111)\text{-}\alpha\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Au}$ 表面は金属的な表面バンドを持つことが光電子分光法からわかっている。この表面の表面状態伝導度 σ_{ss} の温度依存性を測定したところ、室温から 110K までは温度の逆数に比例する金属的な振る舞いを示すが、約 110K で鋭い金属絶縁体転移を示し、約 110K から 15K までは半導体的な熱活性型の温度依存性を示した。STM による観察からこの表面は金属的な部分が分域境界によって細かく分断されていることが

判っている。現在金属絶縁体転移のメカニズムの解明を目指し、分域境界による局在化や金属半導体ネットワークに基づく解析を行っている。

Si(111)-7×7 清浄表面上の Na の吸着と電気伝導

昨年度、Si(111)-7×7 清浄表面上に Na を微量吸着させる過程での高分解能光電子分光測定を行った結果、Na 原子から供給された電子によって half-filled のダングリングボンド状態の電子占有度があがって最後には充満帯になってしまうこと、コーナーホール周りのダングリングボンドが優先的に電子供給を受けることなどがわかった。この過程での表面電気伝導度をマイクロ 4 端子プローブ法で測定したところ、Na の吸着量の増加に伴って伝導度が減少することがわかった。これは、上述の光電子分光法の測定結果を考え合わせると、ダングリングボンド状態による電気伝導が消滅したとよると考えられる。なお、この過程での表面空間電荷層の伝導度の変化は無視できるくらい微小であった。

β-SiC(001) 表面の電気伝導

β-SiC(001) 表面は、Si 原子の被覆率や加熱温度に依存してさまざまな表面超構造をとることが知られているが、それらの表面に対して温度可変マイクロ 4 端子プローブ法による伝導度測定を行った。その結果、電気抵抗値は表面構造に依存して著しく異なり、Si-rich 3×2 表面が最も高い伝導度を示した。また、3×2 と 2×1 表面の伝導度は半導体的な温度依存性を示すこともわかった。

コバルトシリサイド・ナノワイヤの電気伝導特性

近年、ボトムアッププロセスによる微細化を狙って、ナノワイヤ、ナノチューブの研究が精力的に行われている。金属的なナノワイヤは素子間の配線やナノ電極として、半導体的なナノワイヤはトランジスタなどの素子としての利用が考えられている。本研究では Si(110) 表面に 750°C で Co を蒸着して自己組織的に作製される金属的な CoSi₂ ナノワイヤの電気伝導特性を独立駆動型 4 探針 STM(走査トンネル顕微鏡) によって室温で測定した。平均的なナノワイヤの大きさは、幅 60nm、長さ 5μm であった。測定の結果、ナノワイヤと Si 基板はショットキー障壁によって電氣的に良く絶縁されていることがわかり、また、大気に晒した後でもナノワイヤの抵抗率がほとんど変わらないこともわかった。抵抗率は室温で約 30μΩcm と十分小さく、これらの結果から Si 基板上に作製した CoSi₂ ナノワイヤは将来のナノデバイスへの応用が期待できる。今後はより細いナノワイヤの作製と評価、並びに Ni、Fe などの物質の金属的、半導体的なナノワイヤの作製と評価、量子効果の観測を行う予定である。

Ag 探針から形成した局所表面構造での I-V 特性

超高真空中で Ag 探針を高温の Si 結晶表面に接触させると、Ag 原子が Si 表面上に輸送され、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 吸着表面構造のパッチを局所的に作るができる。昨年度は、このときの Ag 探針と Si 表面との間の電流電圧 (I-V) 特性を室温で測定し、その結果はダイオードモデルで説明できた。今年度は、この手法を用いて多探針の測定を行った。Ag 探針によって $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 構造のパッチを 2 箇所つくり、2 探針測定した場合でも同様にダイオードモデルで説明でき、I-V 特性は 2 つのダイオード特性の重ね合わせにより得られた。 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 構造のパッチを作らずに直接 7×7 清浄表面に探針を接触させて 4 探針測定すると非常に不安定で測定不能であったが、各探針の接触部に $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 構造のパッチを作成すると安定した 4 探針測定が可能となった。その測定された抵抗率は、バルクの抵抗率より 2 桁ほど大きい値であり、表面空間電荷層および表面状態を測定していると思われる。

金属被覆カーボンナノチューブ STM 探針の評価

当研究室で開発した 4 探針 STM 装置は、SEM(走査電子顕微鏡) 中で 4 つの独立駆動する STM ヘッドを持ち、ナノ構造体の電気特性を調べるのに非常に有効である。しかし、通常の W 探針は先端の直径が 100 nm 程度であるため、それ以下の距離に探針どうしを近づけることができず、ナノメートルスケールの多探針測定ができない。そこで、半径が 10 nm 程度で、アスペクト比が非常に高く、機械的に安定なカーボンナノチューブ (CNT) を W 探針の先端に接合して利用すると、多探針測定時の探針間距離を 1/10 程度 (~20 nm) まで縮めることができると期待される。しかし、通常、W 探針と CNT の接合部分の電気抵抗が大きく、STM や電気伝導測定に不向きである。そこで、本研究では大阪大学工学部尾浦研究室と共同で、W 探針および接合した CNT 全体を数 nm の金属薄膜で被覆した「金属被覆 CNT 探針」を作成し、その探針自身の電気伝導特性及び機械的強度について評価を行った。

W 探針と CNT の接合は SEM/STM 複合装置を用いて行い、その後パルスレーザー蒸着法 (PLD) によって W や PtIr をそれぞれ 5~6 nm の膜厚で被覆した。これらの W 被覆 CNT 探針、PtIr 被覆 CNT 探針、および比較のため金属被覆無し CNT 探針について、4 探針 STM を用いて電気伝導特性の評価を行った。その結果、PtIr 被覆を行った場合には接合部の抵抗が 0.2k Ω~25k Ωと金属被覆無し (60 kΩ~数百 kΩ) に比べ著しく低下し、被覆材料として非常に有効であった。また、この探針を 100 回ほど金属試料に接触させて電流・電圧測定を行っても探針が壊れることがなく、十分な強度を保っていることが分かった。W 被覆 CNT 探針は被覆前と同程度の抵抗を示し、これは酸化の影響と考えられる。また、現状で確認している最小探針間隔は 50nm であり、SEM の分解能を高めて、これをさらに縮めること、CNT の取り付け向きの制御性などの向上を目指して開発

を行っていく予定である。(大阪大学工学研究科尾浦研究室との共同研究)

4.3.2 表面構造と相転移

Si(111)- $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Ag+Au) 表面の構造モデル

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面上に 0.1~0.2 原子層程度の Au 原子を吸着させると、 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Ag+Au) 表面超構造が現れる。この表面超構造の原子配列について今まで 4 つの原子構造モデルが提出されているが、決着していない。今までの研究は、この表面構造そのものに限られていたが、本研究では、この表面構造の形成過程について詳細の観察した。つまり、Au 原子の吸着量が極めて少なく、 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 超構造が形成される前の段階の様子を低温 STM で観察した。Au の吸着量が 0.02ML 程度では表面上に三回対称性を持つプロペラ状のクラスタが散在した。吸着量が 0.14ML 程度になると、このクラスタが凝集して $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 超構造が形成された。しかもその単位胞は一つのプロペラ状クラスタによって形成されていた。この形成過程は、今までに提唱されているいずれの原子構造モデルでも説明できないことが分かった。その代わりに、我々は新しい構造モデルを提出した。このモデルは Au4f と Si2p の内殻光電子分光法の実験結果と矛盾しないことがわかった。

Pb, Ge/Ge, Si(111)- $\alpha\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3} \leftrightarrow 3 \times 3$ 相転移

2 次元や 1 次元の金属系では、その低次元性ゆえに時に特異な「対称性の破れ」現象が発現する。Ge または Sn 結晶の (111) 表面上に 1/3 原子層の Pb または Sn を吸着させて形成される $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面系では、低温において 3×3 相に相転移し、これは電荷密度波転移か秩序無秩序相転移か、数年来表面物理コミュニティで盛んに議論・研究されているが、メカニズムの決着はまだついていない。相転移にはフェルミ面付近の電子状態が密接に関わっているのだが、この系は複雑なバンド構造を持ち、電子状態が明確にされていないからである。本研究では、昨年度までに立ち上げた自動フェルミ面マッピング装置を用いて、室温における電子状態を探った結果、これらの系のフェルミ面は室温においても 3×3 周期に従うことがわかった。続いて、温度可変 μ -4 端子プローブ法による室温から 100 K までの表面電気伝導度測定、室温から 6 K までの走査トンネル顕微鏡観察、走査トンネル分光測定を行い、相転移に伴う電子状態変化を追った。その結果、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3} \rightarrow 3 \times 3$ 相転移は、金属-金属相転移であり、金属-絶縁体転移である電荷密度波転移のモデルとは矛盾することがわかった。以上より、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3} \rightarrow 3 \times 3$ 相転移は、電子状態の本質的な 3×3 周期に伴う秩序無秩序型相転移であるといえる。

Ge(111)- $\beta\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb 表面

Ge(111) 表面に 1 原子層の鉛を吸着させると前述の α 相とは異なる $\beta\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 構造が形成される。この表面は金属的であり、低温における Peierls 転移が理論的に予言されている。そこで、室温におけるフェルミ面マッピングによってその電子状態を探り、室温及び 6 K における走査トンネル顕微鏡観察でその相転移を探った。その結果、この表面は正六角形のフェルミ面を持ち、良い nesting 条件を満たすにも関わらず、何の相転移も起こさないことがわかった。その原因は nesting vector と格子の整合性にあり、電子格子間の整合性エネルギーが相転移による電子エネルギーの利得より大きいことが原因と結論づけた。

Ge(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag, Au 表面の電子状態

Si(111) 表面に Ag または Au を吸着させて作られる $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面は最も典型的な金属/半導体表面として知られる。類似の系は Ge(111) 表面上にも形成されるが、その電子状態は殆ど調べられていない。そこで、昨年度までに立ち上げたフェルミ面マッピング装置を用いて、これらの系のフェルミ面、価電子帯の電子状態を探った結果、Ag/Ge(111) 表面には Ag/Si(111) 表面と同様の自由電子的バンドが見られ、その他細部に渡っても Ag/Si(111) 表面との類似の電子状態が見られた。このことは、Ag/Ge(111) の原子配列が Ag/Si(111) と同じ honeycomb chained triangle 或いは inequivalent-triangle 模型で記述されることを示唆する。一方、Au/Ge(111) 表面には Au/Si(111) 表面と同様の自由電子バンドが見られたが、その他のバンド構造は Au/Si(111) とは著しく異なり、異なる格子構造を持つことが示唆された。

Si(111)-c(12 × 2)-Ag 表面の低温 STM 観察

Si(111) 表面上に 1/3 原子層の Ag を吸着させた 3×1 -Ag 表面の原子構造を解析するために、65 K で STM 観察を行った。c(12 × 2) 相は 3×1 相 (≥ 500 K) から 6×1 相 (≥ 100 K) を経て、次々に相転移を起こした末の基底状態であるが、STM 観察の結果から、Honeycomb Chain-Channel モデルにしたがう再構成によってよく説明できることがわかった。この構造相転移は、まず表面に平行方向の Ag 原子のゆらぎが凍結し、次いで表面に垂直方向の Ag 原子のゆらぎが凍結することによって起こる二段階の秩序-無秩序相転移であると考えられる。

Si(111) 表面上 Bi 薄膜の高分解能光電子分光測定

Si(111) 表面上に Bi 原子を蒸着させると濡れ層を経て二次元成長によりエピタキシャル薄膜が形成される。5 原子層以下では表面垂直方向に回転の自由度がある {012} 方位の薄膜が、5 原子層以上では (001) 方位の薄膜が成長する。これらの薄膜は膜厚方向の

閉じ込め効果及びストレス緩和のための原子変位によりバルクとは異なる電子状態が実現していると推測される。本研究では高分解能光電子分光法を用いて Bi 薄膜の電子状態測定を行った。 $\{012\}$ 薄膜についてはバルク壁開面と異なり二層同士で結合しダングリングボンドを飽和しているので半導体的な電子状態が予測されていたが、測定の結果フェルミ準位を横切る金属的なバンドの存在が示唆された。 (001) 薄膜については壁開面とほぼ同じバンド構造が測定された。この表面では二つの金属的なバンドがスピン・軌道分裂しているのではないかという報告があるので、それを確かめるためにブリルアンゾーンの対称点で二つのバンドが縮退しているかを調べたが、明確な縮退は見られなかった。

Si(111) 表面上の Pb 薄膜における量子井戸状態

近年、Si(111) 上に成長させた Pb 薄膜において、量子サイズ効果に起因して、膜厚に依存してホール係数の符号が反転したり、伝導度や超伝導転移温度が振動的に変化するなど特異な現象が報告されている。そこで、Si(111) 上に $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb 表面超構造を形成した後、10 原子層程度の Pb 薄膜を成長させ、光電子分光法を用いて、電子状態の膜厚依存性や面内分散を系統的に調べた。 $\bar{\Gamma}$ 点での光電子ピークは奇数層膜においてのみ強度が異常に増大し、過去に報告されている 2 層成長様式を示唆する結果となった。また、面内分散を測定して、各奇数層で $\bar{\Gamma}$ 点周りにホールポケット、 $\bar{K}$ 点周りに電子ポケットを形成していることもわかり、これは過去のフェルミ面の計算結果とも一致した。

Au 探針と Si 表面の直接接合

超高真空 SEM 中で Si 結晶表面上に Au 探針を直接接合させると、基板温度が Au-Si 共晶点以下では何の変化も生じないが、共晶温度以上では、Au 探針が Si に浸食され、シリサイドと思われるアイランドが表面に形成された。さらに、その周辺にパッチ状に薄膜が形成されてひろがっていった。 μ -RHEED 観察からこの薄膜は Au が $2/3$ 原子層で形成される $\alpha\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au 構造であった。また、薄膜パッチの広がりや加熱時間の関係から拡散係数得られ、その拡散係数の活性化エネルギーは、1.4 eV であった。これは真空蒸着によって形成される薄膜パッチの活性化エネルギー、1.3 eV と同程度であり、同じ熱活性化過程によって薄膜パッチが成長していると考えられる。

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、5 nm 程度の径の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。このナノドット系の光電

子分光測定を行い、ドットの平均粒径が小さいほど価電子バンド上端がフェルミ準位から離れることを見出した。これは、ドット内に形成された量子化準位のうちの最高占有状態を検出していることを意味し、量子閉じ込めが実際に起こっていることを実証した。マイクロ 4 端子プローブによる伝導度測定の結果、ナノドット層は伝導に全く寄与しないことがわかった。これは、ドット間が電氣的に接触していないか、あるいは隣接するドットの量子化準位が一致しないために伝導に寄与しないことによると考えられる。

4.3.3 新しい装置の立ち上げ

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 4 探針 STM 装置を昨年度より開発している。また、この装置では遅延グリーン関数の測定が可能となる。グリーン関数は輸送現象において本質的な役割を果たしているが、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信号を他の探針で検出する必要があり、10 pA オーダーの高精度のトンネル電流検出機構、液体ヘリウム程度の低温、数十 nm まで近づけられる鋭い探針が要求される。昨年度までに、真空装置や SEM の設営は完了しており、今年度は、SEM の分解能向上、STM 単体での動作を確認した。また、探針製作法を工夫し、多探針 STM に最適な探針を安定して作成できるようになった。来年度は、室温から液体ヘリウム温度までの温度範囲で表面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。

電子輸送中のフェルミ面測定システムの立ち上げ

本研究では、固体表面の電気伝導を測定する新しい実験技術を開発する。通常、金属の電気伝導はボルツマン方程式を通じて、金属のフェルミ面のずれに対応している。この考え方は長年周知であったが、そのフェルミ面の様子を直接観測されたことはない。そこで、超高分解能電子分析器を用いた光電子フェルミ面マッピング法により、電場印加中のこのフェルミ面の“ずれ”を直接測定し、系の電子輸送現象の研究を行う。本年度はこの実験に必要な超高真空中での電場印加システムの立ち上げを行った。

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われた。記して感謝いたします。

- ・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 若手研究 A 「半導体表面上ナノ構造のフェルミオロジー」(代表者 松田巖)
- ・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 巖)

・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)

< 報文 >

(原著論文)

- [1] I. Matsuda, M. Ueno, T. Hirahara, R. Hobara, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *Electrical Resistance of a Monatomic Step on a Crystal Surface*, Physical Review Letters **93**, 236801 (2004).
- [2] T. Tanikawa, I. Matsuda, T. Kanagawa, and S. Hasegawa: *Surface-state electrical conductivity at a metal-insulator transition on silicon*, Physical Review Letters **93**, 016801 (2004).
- [3] T. Nagao, J. T. Sadowski, M. Saito, S. Yaginuma, Y. Fujikawa, T. Kogure, T. Ohno, Y. Hasegawa, S. Hasegawa, and T. Sakurai: *Nanofilm Allotrope and Phase Transformation of Ultrathin Bi Film on Si(111)-7 × 7*, Physical Review Letters **93**, 105501 (2004).
- [4] H. Morikawa, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Direct observation of soliton dynamics in charge density waves on a quasi-one-dimensional metallic surface*, Physical Review B **70**, 085412 (2004).
- [5] H. Okino, R. Hobara, I. Matsuda, T. Kanagawa, S. Hasegawa, J. Okabayashi, S. Toyoda, M. Oshima, and K. Ono: *Nonmetallic transport of a quasi-one-dimensional metallic Si(557)-Au surface*, Physical Review B **70**, 113404 (2004) (Subsequently selected to appear in Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology **10**, (2004)).
- [6] C. Liu, S. Yamazaki, R. Hobara, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Two-Dimensional Liquid-Solid Phase Transition Observed on Atomic Scale*, Physical Review B **71**, 041310(R) (2005).
- [7] A.A. Saranin, A.V. Zotov, I.A. Kuyanov, V.G. Kotlyar, M. Kishida, Y. Murata, H. Okado, I. Matsuda, H. Morikawa, N. Miyata, S. Hasegawa, M. Katayama, and K. Oura: *Reversible structural transitions at the one-monolayer Ti/Si(100)2 × 1 interface*, Physical Review B **71**, 165307 (2005).
- [8] T. Hirahara, I. Matsuda, M. Ueno and S. Hasegawa: *The effective mass of a free-electron-like surface state of the Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface investigated by photoemission and scanning tunneling spectroscopies*, Surface Science **563**, 191-198 (2004).
- [9] C. Liu, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *STM observation at initial stage of Cs adsorption on Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface*, Surface and Interface Analysis **37**, 101-105 (2005).
- [10] R. Hobara, S. Yoshimoto, T. Ikuno, M. Katayama, N. Yamauchi, W. Wongwiriyan, S. Honda, I. Matsuda, S. Hasegawa, and K. Oura: *Electronic Transport in Multiwalled Carbon Nanotubes Contacted with Patterned Electrodes*, Japanese Journal of Applied Physics **43**, L1081-L1084 (2004).
- [11] M. Konishi, I. Matsuda, C. Liu, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *A $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ phase formed by Na adsorption on Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface and its electronic structure*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3**, 107-112 (2005).
- [12] N. Miyata, I. Matsuda, M. D'angelo, H. Morikawa, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *STM observation of the Si(111)-c(12 × 2)-Ag surface*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3**, 151-155 (2005).
- [13] F. Shimokoshi, I. Matsuda, S. Hasegawa, and S. Ino: *Successive Phase Transitions Induced by Ca and Sr Adsorptions on a Si(111) Surface*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3**, 178-185 (2005).
- [14] 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, in press (June 2005).
- [15] 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, in press (July 2005).
- [16] 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, in press.
- [17] 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, in press (July, 2005).

(国内雑誌)

- [18] 守川春雲、松田巖、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, **25**, 407-415 (2004).
- [19] 坂本克好, 名取晃子, 河野勝泰, 長谷川修司: *Ag 探針を用いた表面エレクトロマイグレーションの SEM 観察*, 表面科学 **25**, 534-540 (2004).
- [20] 松田巖: 注目の論文「金属-単分子-金属接合の構造および電子状態の直接観察」, 化学 **59**(No.10), 63 (2004).
- [21] 山崎詩郎、松田巖、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、in press.

- [22] 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, in press.

(著書)

- [23] 長谷川修司 (分担執筆): 物理学大事典 (第 11.8 節 表面) (鈴木増雄、荒船次郎、和達三樹編集、朝倉書店)、印刷中.
- [24] S. Hasegawa: Multi-probe scanning tunneling microscopy, in: *Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale*, Eds. S. Kalinin and A. Gruverman, Chap. 8 (Vol. 2), (Springer 2005)、印刷中.

(学位論文)

- [25] 平原徹: 自由電子的な表面状態の輸送現象と光電子分光 (Surface transport and photoemission spectroscopy of free-electron like surface states) (修士論文)
- [26] 吉本真也: 金属被覆カーボンナノチューブ S T M 探針の製作と電気伝導特性評価 (修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [27] S. Hasegawa: *Electrical conduction through surface states on silicon*, The 12th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-12), 2004 年 6 月 23 日 (浜松).
- [28] S. Hasegawa: *Electrical conduction through atomic/nano wires on silicon*, Korean Vacuum Society, 2004 年 8 月 19 日 (Taegu, Korea).
- [29] S. Hasegawa: *Electrical Conduction through Atomic/Nano Wires on Silicon*, IUMRS-ICA (The IUMRS International Conference in Asia)-2004, 2004 年 11 月 16 日 (Shinchu, Taiwan).
- [30] S. Hasegawa: *Electrical Conduction through Atomic/Nano Wires on Silicon*, The First Workshop on Nanoscale Sensing and Manipulation, 2004 年 11 月 18 日 (Tien Lai Spring Resort Hotel, Taiwan).
- [31] S. Hasegawa: *Electronic Transport through Metallic Mono-layers and Atomic Chains*, International Workshop of COE Program on 'New Horizons in Condensed Matter Physics', 2004 年 11 月 30 日 (東京大学).
- [32] S. Hasegawa: *Electrical Conduction through Atomic/Nano Wires on Silicon*, International Conference on Nanoelectronic and Nanostructures and Carrier Interactions (NNCI), 2005 年 1 月 31 日 (NTT 厚木 R&D Center).

一般講演

- [33] C. Liu, S. Yamasaki, R. Hobara, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Atomic scale observations of two-dimensional Liquid Solid Phase Transition on the Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface*, Beijing-TEDA 2004 Scanning Probe Microscopy, Sensors and Nanostructures. 2004 年 5 月 23 日 (Beijing, China)
- [34] I. Matsuda, M. Ueno, H. Okino, and S. Hasegawa: *Temperature Dependence of Surface Electrical Conductance of Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag Studied by Micro-Four Point Probe Method*, The 12th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-12), 2004 年 6 月 21 日 (浜松).
- [35] C. Liu, I. Matsuda, T. Hirahara, S. Hasegawa: *Alkali metal adsorptions on Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag Surface*, The 12th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-12), 2004 年 6 月 21 日 (浜松).
- [36] H. Morikawa, T. Tanikawa, H. Okino, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Role of impurities against a CDW transition on a silicon surface*, The 12th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-12), 2004 年 6 月 22 日 (浜松).
- [37] T. Hirahara, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Photoemission-structure-factor effect for Fermi rings of the Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface*, The 12th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-12), 2004 年 6 月 22 日 (浜松).
- [38] H. Okino., R. Hobara, I. Matsuda, T. Kanagawa, S. Hasegawa, J. Okabayashi, S. Toyoda, M. Oshima, and K. Ono: *Electronic transport mechanism of Si(557)-Au surface*, The 12th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-12), 2004 年 6 月 22 日 (浜松).
- [39] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *Surface electron transport study of a glass-crystal transition of Au/Si(111)*, The 12th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-12), 2004 年 6 月 22 日 (浜松).
- [40] M. D'angelo, M. Konishi, I. Matsuda, C. Liu, and S. Hasegawa: *Alkali-metal induced $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ superstructures on Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface: the Na case*, The 12th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-12), 2004 年 6 月 22 日 (浜松).
- [41] A. Konchenko, I. Matsuda, S. Hasegawa, and M. Ichikawa: *Formation and properties of ultra small Ge and Mn dots on Si(111)*, The 12th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-12), 2004 年 6 月 24 日 (浜松).
- [42] H. Morikawa, T. Tanikawa, H. Okino, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Role of impurities against the phase transition of In/Si(111)- $4 \times 1 \rightarrow 8 \times 2'$* , The 16th International Vacuum Congress(IVC-16) / 12th International Conference on Solid Surfaces(ICSS-12) / 8th International Conference on Nanometer-scale Science and Technology(NANO-8) / 17th Vacuum National

- Symposium(AIV-17), 2004 年 6 月 30 日 (Venice, Italy).
- [43] I. Matsuda, M. Ueno, T. Hirahara, H. Morikawa, R. Hobara, and S. Hasegawa: *Resistance of a Monatomic Step on a Crystal Surface*, The 16th International Vacuum Congress(IVC-16) / 12th International Conference on Solid Surfaces(ICSS-12) / 8th International Conference on Nanometer-scale Science and Technology(NANO-8) / 17th Vacuum National Symposium(AIV-17), 2004 年 7 月 2 日 (Venice, Italy).
- [44] T. Hirahara, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Brillouin-zone selection for Fermi rings of the Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface*, The 14th International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics(VUV-14), 2004 年 7 月 19 日 (Cairns, Australia) .
- [45] I. Matsuda, T. Hirahara, M. Konishi, C. Liu, H. Morikawa, M. D'angelo, and S. Hasegawa: *Fermi surface evolved by electron doping from a monovalent atom into a free-electron-like surface state of Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag*, The Sixth Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surfaces (JRSSS-6), 2004 年 10 月 10 日 (富山) .
- [46] M. D'angelo, I. Matsuda, T. Hirahara and S. Hasegawa: *Na interaction with the Si(111)- 7×7 surface studied by valence band photoemission*, The Sixth Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surfaces (JRSSS-6), 2004 年 10 月 10 日 (富山) .
- [47] C. Liu, M. D'angelo, I. Matsuda and S. Hasegawa: *Studies of Au adsorption on the Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface*, The Sixth Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surfaces (JRSSS-6), 2004 年 10 月 10 日 (富山) .
- [48] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *Surface electronic transport study of a glass-crystal transition on Au/Si(111) surface*, The Sixth Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surfaces (JRSSS-6), 2004 年 10 月 10 日 (富山) .
- [49] N. Miyata, I. Matsuda, H. Morikawa, T. Hirahara, M. D'angelo, and S. Hasegawa: *STM observation of the Si(111)- $c(12 \times 2)$ -Ag surface*, The 6th Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surface (JRSSS-6), 2004 年 10 月 13 日 (富山) .
- [50] A. A. Saranin, A. V. Zotov, I. A. Kuyanov, V. G. Kotlyar, T. V. Kasyanova, M. Kishida, Y. Murata, H. Okado, I. Matsuda, H. Morikawa, N. Miyata, S. Hasegawa, M. Katayama and K. Oura: *Phase transitions in Ti/Si(100) system*, The 6th Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surface (JRSSS-6), 2004 年 10 月 13 日 (富山) .
- [51] M. D'angelo: *Transport électronique des surfaces et nanostructures de surface de semi-conducteurs*, Journées Scientifiques Francophones, 2004 年 11 月 14 日 (東京).
- [52] H. Okino, Y. Hosono, I. Matsuda, S. Hasegawa, P. A. Bennett: *In situ resistance measurement of epitaxial silicide nanowires*, Fall MRS Meeting, 2004 年 11 月 25 日 (Boston, USA).
- [53] H. Okino, R. Hobara, I. Matsuda, T. Kanagawa, S. Hasegawa: *Electronic Transport Mechanism of Si(557)-Au Surface*, International Workshop of COE Program on 'New Horizons in Condensed Matter Physics', 2004 年 11 月 29 日 (東京大学).
- [54] S. Yoshimoto, H. Okino, R. Hobara, I. Matsuda, Y. Murata, M. Kishida, T. Ikuno, D. Maeda, T. Yasuda, H. Okado, M. Katayama, K. Oura, and S. Hasegawa: *Electrical Characterization of Metal-Coated Carbon Nanotube Tip*, The 12th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, 2004 年 12 月 9 日 (熱川) .
- [55] Y. Murata, M. Kishida, T. Ikuno, D. Maeda, T. Yasuda, H. Okado, M. Katayama, K. Oura, S. Yoshimoto, R. Hobara, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Metal-Coated Carbon Nanotube Tip towards Multi-Tip STM Prober*, The 12th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, 2004 年 12 月 9 日 (熱川) .
- [56] S. Hasegawa: *Electrical Conduction through Atomic/Nano Wires on Silicon*, Symposium on Surface Physics 2005, 2005 年 1 月 27 日, Shizukuishi, Japan.
- (国内会議)
- 招待講演
- [57] 長谷川修司: 表面電気伝導 一原子レベル欠陥の影響一, ISSP ワークショップ「ナノスケール表面物性の現状と展望」 2004 年 8 月 4 日 (東京大学物性研究所).
- [58] 松田巖: 結晶表面上単原子ステップの電気抵抗、日本物理学会秋季大会、領域 9 特別講演、2004 年 9 月 14 日 (青森大学) .
- [59] 長谷川修司: 表面原子ステップでの電気抵抗, 第 25 回表面科学セミナー (日本表面科学会)、2004 年 10 月 8 日 (東京理科大学、神楽坂).
- [60] 長谷川修司: 表面ナノ構造の電気伝導, 日本真空協会連合講演会、2004 年 10 月 29 日 (大阪大).
- [61] 長谷川修司: ナノプローブ 4 探針 STM, 日本表面科学会東北支部講演会、2005 年 3 月 10 日 (日本大学、郡山).
- 一般講演
- [62] 長谷川修司: さきがけ研究のその後、さきがけ研究「構造と機能物性」領域研究会、2004 年 8 月 6 日 (東レ総合研修センター、三島) .
- [63] 劉燦華, Marie D'angelo, 松田巖, 長谷川修司: 金原子吸着した Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面についての研究, 日本物理学会 第 59 回年次大会, 2004 年 9 月 14 日 (青森大学).

- [64] 坂本克好, 名取晃子, 河野勝泰, 長谷川修司: 金属 tip を用いた薄膜形成の UHV-SEM による観察, 日本物理学会 第 59 回年次大会, 2004 年 9 月 13 日 (青森大学).
- [65] M. D'angelo, I. Matsuda, T. Hirahara and S. Hasegawa: 1. Na interaction with the Si(111)-7x7 surface studied by valence band photoemission, 日本物理学会 第 59 回年次大会, 2004 年 9 月 14 日 (青森大学).
- [66] 守川 春雲, 松田 巖, 長谷川 修司: 室温 ~ 極低温 STM/STS による Ge(111) 表面上 Pb, Sn 吸着系 $\sqrt{3} \times \sqrt{3} \rightarrow 3 \times 3$ 相転移の電子状態研究, 日本物理学会 第 59 回年次大会, 2004 年 9 月 14 日 (青森大学).
- [67] 保原麗, 吉本真也, 松田巖, 長谷川修司: 低温型四探針 STM による電気伝導測定, 日本物理学会 第 59 回年次大会, 2004 年 9 月 14 日 (青森大学).
- [68] 平原徹, 松田巖, 小西満, Marie D'angelo, 長谷川修司: 一価金属吸着 Si(111) 表面上 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 超構造のフェルミ円と表面電気伝導の研究, 日本物理学会 秋季大会, 2004 年 9 月 14 日 (青森大学).
- [69] 山崎詩郎, 松田巖, 沖野泰之, 守川春雲, 長谷川修司: Si(111)-Au 表面上のガラス-クリスタル転移の電気伝導度測定, 日本物理学会 2004 年秋季大会, 2004 年 9 月 20 日 (青森大学).
- [70] 長谷川修司, 松田巖: Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面: 何が問題か?, ISSP ワークショップ「Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 構造と相転移」, 2004 年 12 月 15 日 (東京大学, 柏).
- [71] 松田巖, 劉燦華, 平原徹, 長谷川修司: Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の電気伝導 II, 日本物理学会第 60 回年次大会, 2005 年 3 月 24 日 (東京理科大学, 野田).
- [72] 平原徹, 松田巖, 保原麗, 吉本真也, 長谷川修司: 表面状態のホール抵抗測定, 日本物理学会第 60 回年次大会, 2005 年 3 月 24 日 (東京理科大学, 野田).
- [73] 沖野泰之, 松田巖, 保原麗, 細村嘉一, Zhian He, P. A. Bennett, 長谷川修司: CoSi₂ ナノワイヤの電気伝導特性, 日本物理学会 第 60 回年次大会, 2005 年 3 月 24 日 (東京理科大学, 野田).
- [74] 山崎詩郎, 松田巖, 沖野泰之, 守川春雲, 長谷川修司: 室温から極低温までの Au/Si(111) 表面の表面電子輸送研究, 日本物理学会 2005 年 年次大会, 2005 年 3 月 26 日 (東京理科大学, 野田).
- [75] 吉本真也, 保原麗, 松田巖, 村田裕也, 岸田優, 生野孝, 前田大輔, 保田達郎, 本多信一, 片山光浩, 尾浦憲治郎, 長谷川修司: 金属被覆カーボンナノチューブ探針の電気伝導特性, 日本物理学会春季大会, 2005 年 3 月 24 日 (東京理科大学, 野田).
- [76] 宮田伸弘, 松田巖, 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, 日本物理学会 2005 年 年次大会, 2005 年 3 月 25 日 (東京理科大学, 野田).
- [77] 沖野泰之, 松田巖, 保原麗, 細村嘉一, Zhian He, P. A. Bennett, 長谷川修司: 自己組織化によって作製された CoSi₂ ナノワイヤの電気伝導特性, 第 52 回 応用物理学関係連合講演会, 2005 年 3 月 29 日 (埼玉大学).
- [78] 坂本克好, 名取晃子, 河野勝泰, 長谷川修司: 探針から形成した薄膜の IV 特性, 第 52 回 応用物理学関係連合講演会, 2005 年 3 月 29 日 (埼玉大学).
- [79] 松田巖, 平原徹, 守川春雲, ダンジェロ マリー, 小西満, 長谷川修司: 半導体表面上 2 次元金属単原子層への一価原子吸着と電子移動, 第 24 回日本表面科学会講演大会, 2004 年 11 月 8 日 (早稲田大学).
- [80] 劉燦華, Marie D'angelo, 松田巖, 長谷川修司: 金原子吸着した Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面についての研究, 日本表面科学会 第 24 回表面科学講演大会, 2004 年 11 月 8 日 (早稲田大学).
- [81] 守川 春雲, 沖野 泰之, 山崎 詩郎, 松田 巖, 長谷川 修司: Pb または Sn 吸着 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面構造の低温における 3×3 相転移とそれに伴う電子状態の変化, 第 24 回表面科学講演大会, 2004 年 11 月 10 日 (早稲田大学).
- [82] 平原徹, 松田巖, 小西満, Marie D'angelo, 長谷川修司: Si(111) $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -Ag 超構造のフェルミ円と電気伝導の研究, 第 24 回表面科学講演大会, 2004 年 11 月 9 日 (早稲田大学).
- [83] 山崎詩郎, 松田巖, 沖野泰之, 守川春雲, 長谷川修司: Au/Si(111) 表面構造のガラス・結晶化転移での電子輸送, 第 24 回表面科学講演大会, 2004 年 11 月 9 日 (早稲田大学).
- [84] 宮田伸弘, 松田巖, 平原徹, Marie D'angelo, 守川春雲, 長谷川修司: 低温における Si(111)-c(12×2)Ag 表面の STM 観察, 第 24 回表面科学講演大会, 2004 年 11 月 8 日 (早稲田大学).
- [85] 細村 嘉一, 中山 隆, 長谷川 修司: 松田 巖マイクロ 4 探針プローブ法の数値シミュレーション, 第 24 回表面科学講演大会, 2004 年 11 月 8 日 (早稲田大学).
- (セミナー)
- [86] I. Matsuda: *Electron Transport Measurement on Semiconductor Surfaces in UHV*, 2004 年 10 月 25 日 (Arizona-State University, USA).
- [87] 守川 春雲: 半導体表面上金属ナノ構造の低次元ダイナミクス, 127th SPring-8 セミナー, 2004 年 10 月 15 日 (SPring-8, 兵庫).
- [88] 長谷川修司: 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, 2005 年 3 月 8 日 (豊田工業大学).
- (講義等)
- [89] 長谷川修司: 表面・ナノ構造と電気伝導, 総合理学序説「構造と機能」, 2004 年 10 月 6 日, 横浜市立大学.
- [90] 長谷川修司, 松田巖, 山崎詩郎 (TA), 沖野泰之 (TA): 物理学実験 I (3 年生) X 線回折, 2004 年度夏学期 (本郷).
- [91] 長谷川修司: 固体物理学 II (学部 4 年生講義) 2004 年度冬学期 (本郷).
- [92] 長谷川修司: 物理学セミナー (学部 3 年生) 2004 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) に至る広範な低温領域で発現する様々な量子多体現象や相転移現象、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 超低温における量子流体/固体

グラファイト上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。この系には下地の吸着第 1 層に対して整合な局在相 (4/7 相) が第 2 層目に出現することが知られている。前年度行った比熱測定からグラファイト表面をヘリウム 4 で 1 層 (12.0 nm^{-2}) プレコートした上に吸着した 2 次元ヘリウム 3 は、面密度の増加とともにフェルミ流体的な振舞いから特異な性質をもつ量子相を経て、4/7 整合相へと連続的にその性質を変えることが明らかになった。この領域は従来フェルミ流体相と 4/7 整合相との 2 相共存状態であると考えられてきたが、我々の熱容量測定の結果はそれでは説明できない。そこで、この状態が 4/7 整合相に零点空格子点をドーブした系として理解できるとする仮説を提唱した。

2 次元 ^3He の核磁気共鳴測定

前述の仮説を検証するため、今年度は核磁気共鳴法 (NMR) で磁化、緩和時間の測定を $100 \mu\text{K}$ まで行った。その結果、この系は面密度によって 4 つの領域に分けられることが分かった (図 4.4 a)。4/7 整合相の密度 ($\rho_{4/7} \approx 7.0 \text{ nm}^{-2}$) 直下の密度域 (領域 II) では通常の 2 相共存では説明できない非線型の磁化およびスピン-スピン緩和時間の密度依存性が見られた。これは熱容量測定の結果を強く支持している。面密度を 4/7 整合相よりも十分大きくする (領域 IV) と磁化の温度依存性に強磁性的な振舞いが見られ始めた。これは粒子の 3 体交換が支配的になってきたためか、3 層目に形成され始めた流体相との間の RKKY 的な層間相互作用のためかどちらかと考えられる。最も興味深いのは、4/7 整合相直上の密度域 (領域 III) である。高温超伝導体が反強磁性絶縁相の近傍で超伝導を示すことのアナロジーからこの領域 III においても何らかの新たな量子相が出現している可能性が高いと考えている。

2 次元 ^3He の熱容量測定 –2 層目 ^4He 置換効果–

^4He の吸着量を増やして 2 層目にも ^4He (核スピン 0 のボース粒子) が混じった混合系をつくることができる。我々は熱容量変化の測定から ^4He 混入効果を調べた。図 4.4 b に ^4He 量が異なる試料 (0.0 と 0.9 nm^{-2}) の熱容量の差分 (C_{ex}) を示す。 $\rho_{4/7}$ よりも

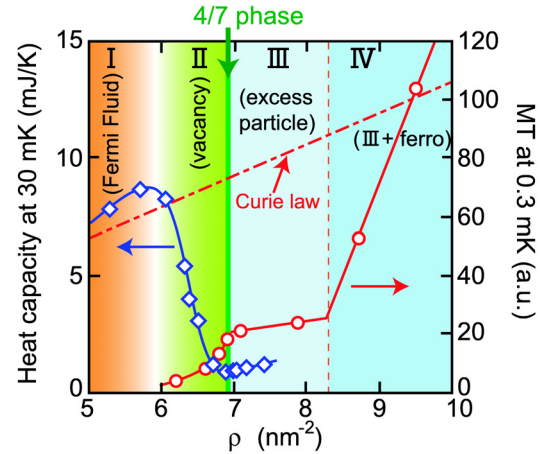


図 4.4 a: 2 次元 ^3He の量子相図。熱容量 (左) および磁化 (M) $\times$ 温度 (T) の等温曲線の面密度 (ρ) 依存性。 ρ の増加とともに領域 I~領域 IV、反強磁性的から強磁性的な振舞いへと大きく変化している。図中の点線は自由スピン (キュリー則) の磁化曲線を示す。

十分低い面密度域では T^2 に似た温度依存性を示し、 $\rho_{4/7}$ に近づくにつれ熱容量の生データと同じ 30 mK になだらかなピークをもつ。さらに、 $\rho_{4/7}$ 近傍ではそのピークはほぼ消えることが分かった。この C_{ex} の振舞いはホールドーブした 4/7 整合相という描像を支持するもので、 ^4He 粒子がホールの運動に何らかの影響を与えていることを示唆している。 C_{ex} は $\rho_{4/7}$ を超えた密度域でもその温度依存性を変えながら存在するが、 7.5 nm^{-2} 付近で突然消失するという興味深い振舞いを示す。このことから、 $\rho_{4/7} < \rho < 7.5 \text{ nm}^{-2}$ の領域では、例えば domain wall 構造や doublon 状態といった interstitial 領域が実現している可能性もある。

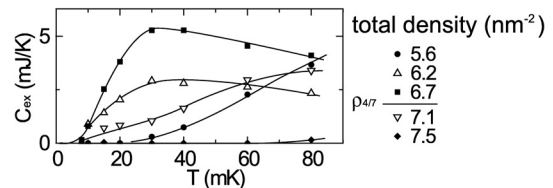


図 4.4 b: 2 次元 ^3He 熱容量に及ぼす ^4He 置換効果。吸着第 2 層目の ^4He 量が異なる試料 (0.0 と 0.9 nm^{-2}) の熱容量の差分 (C_{ex}) をプロットした。各シンボルの数字は ^3He と ^4He の面密度の合計。

4.4.2 走査トンネル顕微/分光法による低温量子物性

我々が独自に開発した超低温 ($T_{min} = 20$ mK)、高磁場 ($B_{max} = 6$ T)、超高真空 ($P \ll 10^{-8}$ Pa) で作動する世界的にもユニークな超低温走査トンネル顕微鏡 (ULT-STM) を使用して、以下の研究を行った。

不純物周りに束縛された 2 次元電子状態—— ランダウ量子化の実空間観測 ——

擬 2 次元半金属であるグラファイトは電子有効質量が小さいために、半導体 2 次元電子系と同様、比較的低磁場でもランダウ量子化に起因した電子状態を観測できる。昨年度は高配向性熱分解グラファイト (HOPG) とよばれる人工グラファイトが多くの積層欠陥を内包するため、2 次元性の高い電子状態をもつことを走査トンネル分光 (STS) 測定から明らかにした。さらに、磁場中ホール抵抗にプラトー構造が観測され、量子ホール状態が実現している可能性を指摘した。

今年度は超低温・強磁場中で HOPG 表面上の点欠陥近傍の STM/STS 観測を行い、バイアス電圧に依存した局在状態と非局在状態の実空間観測に成功した。図 4.4 c(a),(b) はそれぞれ $B = 6$ T, 3 T における隣接する 2 つのランダウ準位 ($n = 1, 2$) の間 (谷) のエネルギーで走査したときの dI/dV (トンネルコンダクタンス) 像である。図中央の欠陥に束縛された電子状態が磁気長程度の幅をもって円環状に広がっている様子がわかる。一方、図 4.4 c(c),(d) にあるように、ちょうどランダウ準位 ($n = 2$) に対応するエネルギーで走査した dI/dV 像にはこのような束縛状態は現れず、電子状態は比較的一様に広がっている。このことから、図 (a),(b) と (c),(d) はそれぞれ量子ホール状態における局在状態と非局在状態に対応しており、整数量子ホール状態で本質的な役割を担っていると考えられている不純物局在の効果を初めて実空間上で観測したものと考えられる。

グラファイト端 (エッジ) 状態

グラファイトの端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にのみ、 π 電子の局在状態「グラファイト端状態」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。これを実験的に検証するために、グラファイト表面のステップ端の STM/STS 観測を行った。その結果、ジグザグ端では端に近づくにつれて E_F 直下の -20 meV 付近に dI/dV ピークが成長するのが観測され、さらにこのピークは端を通り越すと直ちに消失することがわかった (図 4.4 d(a))。一方、アームチェア端ではそのようなピークは現れなかった (図 4.4 d(b))。田上・塚田 (早稲田大学) によるステップ端近傍の電子

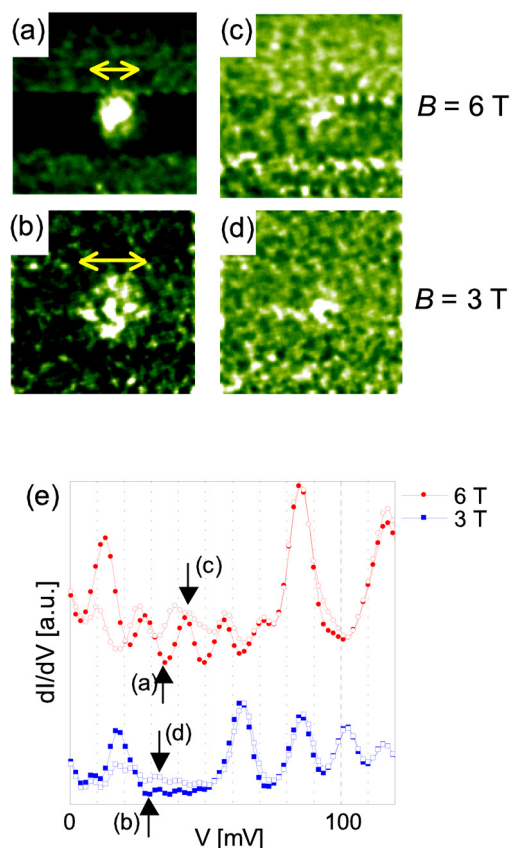


図 4.4 c: HOPG 表面の不純物付近で観測された dI/dV 像 ($80 \text{ nm} \times 80 \text{ nm}$, $T = 30$ mK)。 (a),(b) : $B = 6$ T, 3 T での局在状態。 (c),(d) : $B = 6$ T, 3 T での非局在状態。図中の矢印はそれぞれの磁場での磁気長 ($l_B = \sqrt{\hbar/eB}$) の 2 倍を示す。 (e) : 不純物付近 (open symbol) と遠方 (filled symbol) でのトンネル分光の比較。

状態密度の第一原理計算は我々の実験結果をよく説明する (図 4.4 d(c),(d))。以上のことから、ジグザグ端でのみ観測された -20 meV 付近での dI/dV ピークは、グラファイト端状態を初めて実験的に見出したものといえる。

半導体 2 次元電子系および量子ドットの超低温・磁場中電子状態

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、成長過程で四面体積層欠陥 (表面では正三角形の欠陥として現れる) が形成され、表面 2 次元電子系が欠陥内に 0 次元的に閉じ込められた電子状態 (量子ドット) が実現することが知られている。この系に磁場を印加するとドット

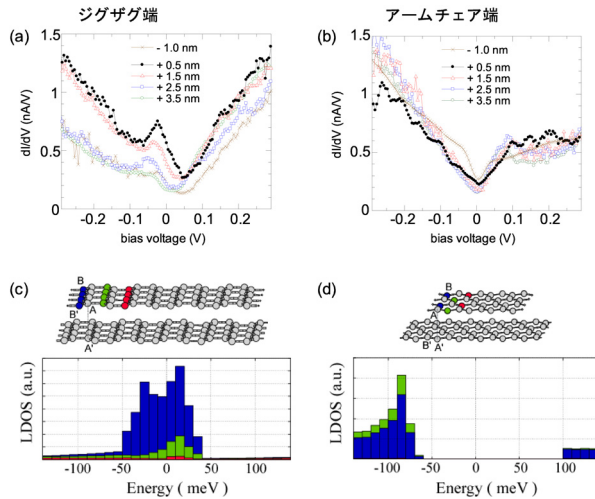


図 4.4 d: (a) ジグザグ端近傍と (b) アームチェア端近傍の STS 測定の結果 ($T = 77$ K、超高真空中)。第一原理計算による (c) ジグザグ端近傍と (d) アームチェア端近傍の局所電子状態密度。

内状態の軌道縮退が解けること、またドット外では 2 次元電子系が量子ホール状態にあるため欠陥周囲に沿って特異な端電流が流れていることなどが期待される。今年度は予備的な実験としてゼロ磁場下で積層欠陥近傍の STM/STS 測定を行った。試料には表面劣化を防ぐためのヒ素保護膜が蒸着してあるので、ULT-STM の超高真空チャンバー内でこの保護膜を加熱除去するための条件の最適化を計った。その結果、量子ドット特有の局所状態密度の空間分布とエネルギー依存性が確認され、欠陥内に 0 次元電子状態が形成されていることを確認した (図 4.4 e)。なおこの研究は NTT 物性基礎研究所の平山グループとの共同研究である。

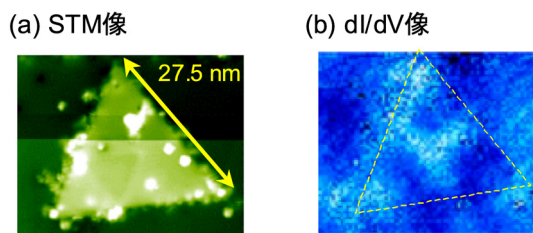


図 4.4 e: ULT-STM ($T = 30$ mK, $B = 0$ T) で観測した四面体積層欠陥の (a) STM 像と (b) その内部に閉じ込められた 0 次元電子系の状態密度の空間分布 (図は第 2 励起状態を示す)。

異方性超伝導体 Sr_2RuO_4 の超低温走査トンネル分光

Sr_2RuO_4 は、銅を含まない層状ペロブスカイト構造をもつ物質の中で唯一超伝導を示す。そのクーパー対の対称性はスピン部分がほぼ確実に 3 重項、軌道部分はおそらく p 波と考えられている。我々は、超低温走査トンネル分光法により、この超伝導体の電子状態の研究を行っている。清浄試料表面は、100 K に予冷した後、超高真空中 ($\sim 10^{-8}$ Pa) で ab 面に平行に劈開することにより得た。図 4.4 f (右) の STM 像は Sr_2RuO_4 の表面原子配列を表す。原子間の結合力の強さから劈開面は SrO 面と考えられ、輝点は Sr 原子サイトと推測される。この表面上では、コンダクタンスは非対称な形を示し、 ± 50 meV 付近から緩やかな減少が観測された。また低エネルギー付近には超伝導ギャップとは異なる $\Delta \sim 5$ meV の大きなギャップ構造が観測された (図 4.4 f (左))。このギャップの由来は現在まだ明らかではない。超伝導ギャップが直接観測されていないのは超伝導を担う RuO_2 面が最表面に現れていないためと考えられる。

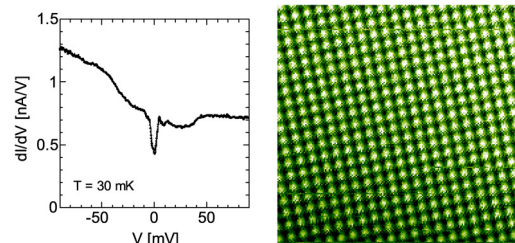


図 4.4 f: (左): Sr_2RuO_4 表面上のトンネルコンダクタンス ($T = 30$ mK, トンネル電流は ab 面に垂直の方向)。 (右): 劈開面の STM 像 ($7 \text{ nm} \times 7 \text{ nm}$, $V = -0.1$ V, $I = 0.2$ nA)。

4.4.3 低次元導体における量子輸送現象

HOPG の磁場中電気抵抗測定を $2 \text{ mK} < T < 2 \text{ K}$, $0 < B < 14 \text{ T}$ という広い温度・磁場範囲で行った。その結果、2 桁の温度範囲にわたって面内縦抵抗に対数温度依存性が観測された (図 4.4 g)。対数依存性の係数は磁場の増加と共に減少し、2 T 以上で一定値に収束する (図 4.4 g 挿入図)。これは 2 次元系における弱局在と電子間相互作用の効果として説明される。これらは共に伝導度の対数依存性を与えるが、低磁場で両者が競合するのに対し、高磁場では局在効果は抑制され、磁場に依存しない電子間クーロン相互作用の効果が支配的になる。一方、ホール抵抗の磁場依存性には低温・高磁場の量子極限で温度に依存しないプラトーが少なくとも 2 つ観測された (図 4.4 h)。これらはフィリング $\nu = 3, 5$ の整数量子ホール状態に対応している可能性が高い。2 次元グラファイトシート (グラフェン) では整数量子ホール状態が実現することが理論的にも期待されて

おり、我々の実験結果はこれと深く関係していると思われる。いずれにしてもこれらの結果はHOPGが2次元的な電子状態をもつことを示している。

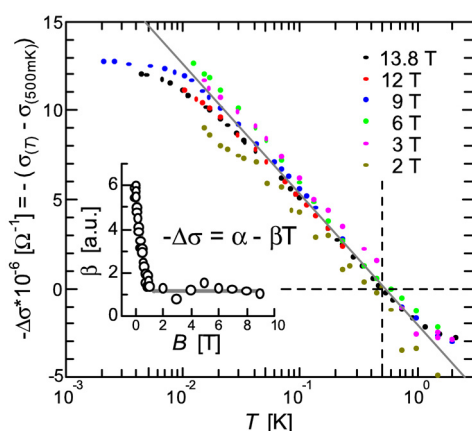


図 4.4 g: HOPG 試料の磁気伝導度の温度依存性。10 mK < T < 500 mK で対数温度依存性がみられる。挿入図：対数温度依存性の係数の磁場変化。磁場と共に減少し、 $B > 2$ T で一定値に収束する。

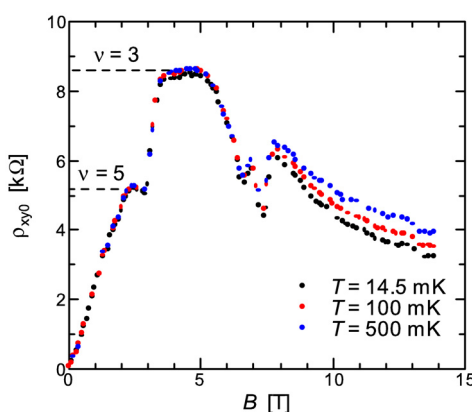


図 4.4 h: HOPG 試料のホール抵抗の磁場依存性。 $B \sim 2.2$ T、 $3 < B < 6$ T で温度によらないプラトー構造を示す。

4.4.4 低温実験技術

小型断熱消磁冷凍機の開発

比熱測定など長時間低温を維持する必要のない実験や、走査プローブ実験など振動を極度に嫌う実験に用いるための小型電子スピン断熱消磁冷凍機の開発を進めた。この冷凍機の特徴は（１）構成要素が

1 K ポットと熱スイッチと常磁性塩だけからなるので、希釈冷凍機に比べて構造がずっと簡単で製作が容易、安価、取り扱いが簡便である、（２）希釈冷凍機や ^3He 冷凍機と違って ^3He ガスの排気を要しないので排気ポンプからの振動が少ないこと、などが挙げられる。

今回は 50 mK 程度までの比熱測定用として、i) 液体ヘリウム可搬容器内に挿入したまま実験ができるよう最外径を 50 mm 以下に納める、ii) 操作を簡便化するため鉛の超伝導熱スイッチの開閉は消磁用超伝導マグネットの漏れ磁場で動作させる、という設計のもとで装置を試作した。予備的なテストでは、1 K ポットによって 4.4 g の硫酸アンモニウム鉄 (III)12 水和物（通称 FAA）を 2.9 T の磁場中で 2 時間で 1.6 K まで予冷し、その後 30 分の消磁で試料空間を 135 mK まで冷却できた。今後は熱スイッチの形状を最適化し開時の熱流入量を小さくすることで実用性を向上させる予定である。

また、低温下での精密圧力測定のための差圧式容量型精密圧力計を設計製作した。77 K でのテストで 1 mPa 以下の分解能と 60 Pa 以上の最大負荷圧力の性能をもつことが分かった。今後はこれを 2 次元 ^3He のモット転移近傍の圧縮率測定に使用する予定である。

< 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, *Phys. Rev. Lett.* (in print).
- [2] Y. Niimi, T. Matsui, H. Kambara, K. Tagami, M. Tsukada, and Hiroshi Fukuyama: Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy Studies of Graphite Edges, *Appl. Surf. Sci.* **241**, 43-48 (2005).
- [3] H. Akisato, S. Murakawa, Y. Matsumoto, D. Tsuji, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: NMR Measurements of a Possible New Quantum Phase in 2D ^3He , *J. Low Temp. Phys.* **138**, 265-270 (2005).
- [4] Y. Matsumoto, D. Tsuji, S. Murakawa, H. Akisato, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: Heat Capacities of the Anomalous Fluid Phase in Two-Dimensional ^3He , *J. Low Temp. Phys.* **138**, 271-276 (2005).
- [5] D. Tsuji, Y. Matsumoto, S. Murakawa, H. Akisato, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: Effects of ^4He Substitution on Low Temperature Heat Capacities of 2D ^3He Adsorbed on Graphite, *J. Low Temp. Phys.* **138**, 277-282 (2005).

(国内雑誌)

- [6] 福山 寛：超低温 STM で見る固体表面の電子状態、*バリエィ* (丸善) **20**, 29-32 (2005).

(学位論文)

- [7] 秋里英寿：局在近傍の2次元ヘリウム3のNMR測定 (NMR measurements of two-dimensional helium three in the vicinity of localization) (修士論文)
- [8] 飯田高敏：超低温におけるグラファイトの磁気抵抗測定 (修士論文)
- [9] 森田悦久：ヘリウム単原子層膜の吸着圧力・比熱測定のための装置開発 (修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] H. Akisato, S. Murakawa, Y. Matsumoto, D. Tsuji, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: NMR Measurements of a Possible New Quantum Phase in 2D ^3He , International Symposium on Quantum Fluids and Solids: QFS2004 (Trento, Italy, Jul. 5-9, 2004).
- [11] Y. Matsumoto, D. Tsuji, S. Murakawa, H. Akisato, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: Heat Capacities of the Anomalous Fluid Phase in Two-Dimensional ^3He , International Symposium on Quantum Fluids and Solids: QFS2004 (Trento, Italy, Jul. 5-9, 2004).
- [12] D. Tsuji, Y. Matsumoto, S. Murakawa, H. Akisato, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: Effects of ^4He Substitution on Low Temperature Heat Capacities of 2D ^3He Adsorbed on Graphite, International Symposium on Quantum Fluids and Solids: QFS2004 (Trento, Italy, Jul. 5-9, 2004).
- [13] Y. Matsumoto, D. Tsuji, S. Murakawa, H. Akisato, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: Heat Capacity Measurements of Novel Quantum Phases in 2D ^3He Adsorbed on Graphite, Quantum Condensed System ISSP-9, Todai International Symposium 2004 (ISSP, University of Tokyo, Kashiwa, Japan, Nov. 16-19, 2004).
- [14] S. Murakawa, H. Akisato, Y. Matsumoto, D. Tsuji, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: NMR Measurements on Novel Quantum Phases in 2D ^3He , Quantum Condensed System ISSP-9, Todai International Symposium 2004 (ISSP, University of Tokyo, Kashiwa, Japan, Nov. 16-19, 2004).
- [15] D. Tsuji, Y. Matsumoto, S. Murakawa, H. Akisato, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: Heat Capacity Measurements of Novel Quantum Phases in 2D ^3He Adsorbed on Graphite, The 2nd COE Workshop "New Horizons in Condensed-Matter Physics" (Yayoi Lecture Hall, University of Tokyo, Japan, Nov. 29-30, 2004).
- [16] Y. Niimi, H. Kambara, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Applications of an Ultra-Low Temperature Scanning Tunneling Microscope to Low Temperature Physics, The 2nd COE Workshop "New Horizons in Condensed-Matter Physics" (Yayoi Lecture Hall, University of Tokyo, Japan, Nov. 29-30, 2004).

招待講演

- [17] Hiroshi Fukuyama: An experimental review on 3D solid ^3He magnetism, International conference on ring-exchange and correlated fermions (Cargèse, France, 12 - 17 April 2004).
- [18] Hiroshi Fukuyama: Low density solid ^3He films as a hole doped Mott localized phase, International conference on ring-exchange and correlated fermions (Cargèse, France, April 12 - 17, 2004).
- [19] Hiroshi Fukuyama: A Possible New Quantum Phase in 2D ^3He , International Symposium on Quantum Fluids and Solids: QFS2004 (Trento, Italy, Jul. 5-9, 2004).
- [20] Hiroshi Fukuyama: Zero-point vacancies in two-dimensional crystalline helium, Fifth International Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals (Wroclaw, Poland, August 29 - September 4, 2004).
- [21] Hiroshi Fukuyama: Possible New Quantum States in 2D ^3He near the Quantum Critical Point, Quantum Condensed System ISSP-9, Todai International Symposium 2004 (ISSP, University of Tokyo, Kashiwa, Japan, Nov. 16-19, 2004).
- [22] H. Kambara, T. Matsui, Y. Niimi, and Hiroshi Fukuyama: Development of an Ultra-Low Temperature Scanning Tunneling Microscope and Applications for Low Temperature Physics, Quantum Condensed System ISSP-9, Todai International Symposium 2004 (ISSP, University of Tokyo, Kashiwa, Japan, Nov. 16-19, 2004).
- [23] Hiroshi Fukuyama: Quantum Phases in Two Dimensional Helium Three, The 2nd COE Workshop "New Horizons in Condensed-Matter Physics" (Yayoi Lecture Hall, University of Tokyo, Japan, Nov. 29-30, 2004).
- [24] Hiroshi Fukuyama: STS studies of surface two-dimensional electrons at ultra-low temperatures below 100 mK, The 10th International Symposium on Advanced Physical Fields (Tsukuba, Japan, March 7-10, 2005).

(国内会議)

一般講演

- [25] 松井朋裕, 神原 浩, 新見康洋, 福山 寛: 不純物に束縛された表面2次元電子の磁場中空間分布、日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学、2004 年 9 月)
- [26] 松井朋裕, 飯田貴敏, 山口 明, 石本英彦, 福山 寛: 超低温/高磁場における高配向熱分解グラファイトの磁気抵抗、日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学、2004 年 9 月)
- [27] 新見康洋, 松井朋裕, 神原 浩, 田上勝規, 塚田 捷, 福山 寛: グラファイト端の走査トンネル分光、日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学、2004 年 9 月)

- [28] 辻 太輔, 松本洋介, 村川 智, 秋里英寿, 神原 浩, 福山 寛: グラファイト上の 2 次元 ^3He の熱容量測定、日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学、2004 年 9 月)
- [29] 村川 智, 秋里英寿, 松本洋介, 辻 太輔, 神原 浩, 福山 寛: NMR 測定による 2 次元 ^3He の量子相の研究、日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学、2004 年 9 月)
- [30] 新見康洋, 神原 浩, 福山 寛: 不純物に束縛された表面 2 次元電子系の磁場中 STS 観測、日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス、2005 年 3 月)
- [31] 村川 智, 秋里英寿, 松本洋介, 辻 太輔, 神原 浩, 福山 寛: 熱容量測定による 2 次元ヘリウム 3 の強相関効果の研究、日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス、2005 年 3 月)

招待講演

- [32] 福山 寛: 2 次元ヘリウム 3 の強相関効果、日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学、2004 年 9 月)
- [33] 福山 寛: 2 次元ヘリウム 3 の強相関量子現象、日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス、2005 年 3 月)

(セミナー)

- [34] 福山 寛: ホールドープした 2 次元ヘリウム 3 の強相関物性、京都大学物理学教室第 1 分野談話会 (京都大学、2004 年 6 月)
- [35] 福山 寛: グラファイトの磁場中電子物性とエッジ状態、京都大学低温物質科学研究センターセミナー (京都大学、2004 年 6 月)

(集中講義)

- [36] 福山 寛: 量子流体・固体における強相関効果と次元性、京都大学大学院理学研究科特別講義 (京都大学、2004 年 6 月)

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 強相関2次元電子系

半導体2次元系の研究は量子ホール効果などの強磁場中の研究を中心に発展してきたが、近年、シリコンの電子系やGaAsの正孔系などのような電子（正孔）間の相互作用が強い系でのゼロ磁場、あるいはスピンのみに作用する面内磁場下での振る舞いが注目されている。これらの系では、電子（正孔）濃度などをパラメータとして、金属・絶縁体転移が観測され、また岡本らの研究（PRL **82**, 3875 (1999))を皮切りに、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。

シリコン電子系の絶縁体領域におけるスピン状態

高移動度シリコンMOS試料を用いて、抵抗率が活性化型の温度依存性を示す絶縁体領域において磁気抵抗効果を測定した。軌道効果をゼーマン効果と独立に抽出するために、一定磁場下での試料回転を希釈冷凍機中で行った。磁気抵抗に見られた特異な構造の解析から、絶縁体領域における完全スピン偏極磁場を電子濃度の関数として求めることができた。これまで、シリコンMOSにおいて金属相から電子濃度を下げていくと、絶縁体転移点に向かってスピン帯磁率の発散が起こる可能性が他グループの実験から指摘され、大きく注目されていたが、今回の実験によりその可能性は完全に否定された。

シリコンヘテロ接合電子系での電子スピン共鳴

Si/SiGe量子井戸に形成された2次元系の電子スピン共鳴を電気抵抗の変化として観測した。シリコン2次元電子系においてはスピン軌道相互作用が小さいために緩和時間が長く、量子ビットなどへの応用面でも期待されている。2次元面に対して平行に磁場をかけた場合において、負の抵抗変化が観測された。電子温度の上昇による抵抗変化は正であるので、共鳴によるスピン偏極率低下によるものだと結論づけた。今回の実験により平行磁場印加による抵抗増加の原因がスピン偏極率の増加であることが明らかになった。また、2次元面に対して斜めに磁場をかけた状況下で、量子ホール系におけるキャリアが電子スピン共鳴により減少し得ることを実証した。このことが電子格子緩和時間に比べて電子スピンの縦緩和時間が長いことに起因すると考え、熱の流れに関するモデルを提唱した。

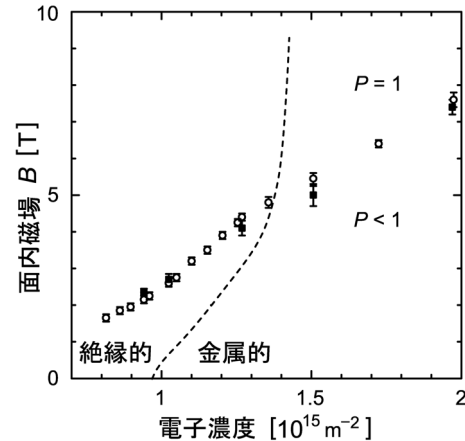


図 4.5 a: シリコンMOS 2次元電子系の磁気相図。絶縁体領域においても低磁場では完全スピン偏極しないことがわかった。

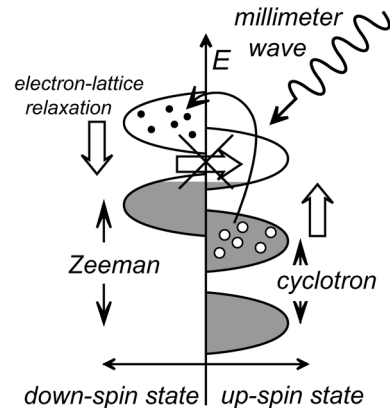


図 4.5 b: ミリ波照射によるスピン反転により励起された電子の緩和過程。励起直後はランダウ準位内にキャリアが生成されるが、短時間ですでに存在していたキャリアと対消滅するため、最終的に全キャリア数は減少する。

GaAs 正孔系の絶縁体領域における正の磁気抵抗

GaAs 正孔系の絶縁体領域において磁場中での試料回転実験を行ったところ、磁場の垂直成分による非常に大きな抵抗増加を観測した。シリコンMOSでは軌道効果による磁気抵抗は常に負であったので、GaAs 正孔系の特徴である非常に強いスピン軌道相互作用が原因ではないかと考えている。実際、スピンが完全偏極する高磁場中では正の磁気抵抗は見られない。低抵抗領域においては、スピン軌道相互作用は反局在効果による正の磁気抵抗を引き起こすことが知られているが、強局在領域の伝導に対するス

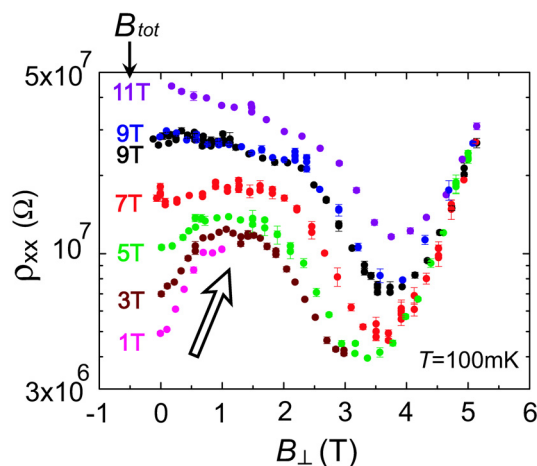


図 4.5 c: GaAs 2 次元正孔系の絶縁体領域における磁場中試料回転実験。低磁場中の回転では、軌道効果をもたらす垂直磁場成分の増加に伴い、抵抗の大きな増加が観測された。スピン軌道相互作用による反局在効果が関与している可能性が考えられる。

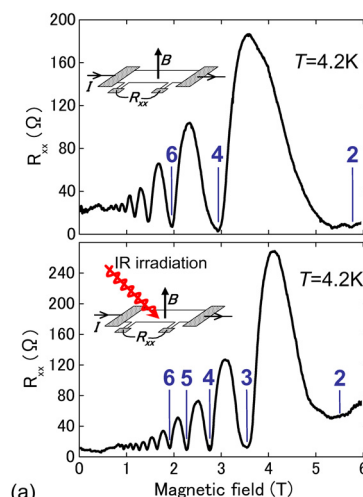
ピン軌道相互作用の効果については理論的に良くわかっていない。

4.5.2 半導体 2 次元系における新物性の開拓と新機能デバイスの開発

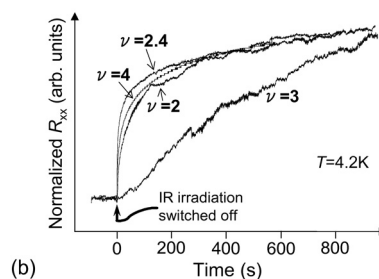
半導体 2 次元系は、非常に豊かな物理を内包しており、加工の自由度の高さからバラエティに富んだ実験研究が行われている。この半導体 2 次元系に強磁場を印加した量子ホール系の電子物性について、輸送現象測定、光学（特にテラヘルツ光）測定の両面から探求している。具体的な研究成果は、以下の通りである。

赤外光照射による奇数占有数量子ホール効果の発現

半導体 2 次元電子系試料の母体結晶である GaAs のバンドギャップ程度に相当する波長（赤外）の光を照射することにより、4.2K において奇数占有数の量子ホール効果が発現することを見出した。これまで、通常の GaAs/AlGaAs ヘテロ構造では、4.2K という高い温度では熱攪乱によりゼーマン分離の効果がほとんど観測されなかった。今回の観測は、赤外光照射によって、何らかの機構により電子スピンの秩序化されたことを意味している。その詳細は現在のところ不明であるが、理解への手がかりとして、光照射を切った後抵抗が元の値に戻るまでの時間が、奇数占有数において著しく長くなる（10 分以上）ことを見出した。この結果は、非常にゆっくりとしたスピン緩和過程（例えば核スピンとの超微細相互作用



(a)



(b)

図 4.5 d: (a) 赤外光照射前（上図）と照射中（下図）のシュブニコフ・ド・ハース振動。 (b) 赤外光照射遮断後の縦抵抗の時間発展。

用）の関与を示唆している。今後は、機構解明に向けて、(i) 照射する赤外光に円偏光性を持たせることにより、特定方向のスピンを選択的に励起した場合の影響について調べる、(ii) 光ポンプ-プローブによる測定から、スピン緩和時間を見積もる、等の実験を計画している。将来は、光制御によるスピンメモリという新しい機能素子の開発を目指す。

1/f 雑音分布のマッピング

雑音は、精密な測定の邪魔者という認識が一般的に強いが、電子の挙動に関して重要な情報を含んでいる場合も多い。以前に開発した量子ホール素子による走査型電位計を応用することにより、量子ホール系における 1/f 雑音分布のマッピングに初めて成功した。周波数スペクトルの解析や得られた空間分布画像から、ランダウ準位占有数 (ν) の違いにより、発生機構の異なる 2 種類の 1/f 雑音が存在することを明らかにした。

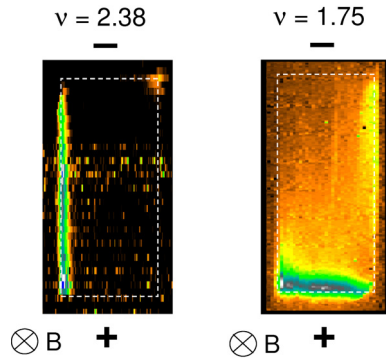


図 4.5 e: 雑音電圧分布の2次元画像。

テラヘルツ光応答の時間分解測定

量子ホール系においてサイクロトロン共鳴に相当する周波数の光（テラヘルツ光）をパルス状にして照射することにより、励起キャリアの時間的なダイナミクスの直接的な観測を行った。この探求は、未開拓に止まっているテラヘルツ光検出器の性能向上への知見を与えるという目的も含んでいる。今回の測定から、非指数関数型の減衰曲線を観測し、その時間的な遅れがランダウ準位占有数とともに系統的に変化することを見出した。複数の時定数は、ランダムネスのある系に特有の現象である。このことから、強磁場中での不純物による強い電子局在と非局在への再励起を繰り返すこと（いわゆる multiple-trapping process）がテラヘルツ光応答の微視的背景になっていると解釈した。

4.5.3 量子ホール系におけるエネルギー流

Ettingshausen 効果の観測

電子温度計としてチャネル両端に極微なホールバーを取り付けた試料を用いることで、電流と垂直方向に温度差が生じる現象、すなわち Ettingshausen 効果を量子ホール効果のブレイクダウン領域において観測した。2次元電子系においては初めての測定である。同時に熱電子の緩和過程に関する重要な知見も得られた。

Peltier 効果による電子冷却現象の探索

Peltier 効果による電子冷却現象の研究に着手した。ランダウ準位と半導体バンド構造との類比からわかるように、整数ランダウ準位充填率の前後においてはキャリアが「正孔」の状態と「電子」の状態をそれぞれ実現することができる。ゲート電極により局所的にランダウ準位充填率を変化させることにより、両者の接合部を比較的容易に作製することができる。そこに電流を流すと、電流方向に依存した Peltier 効

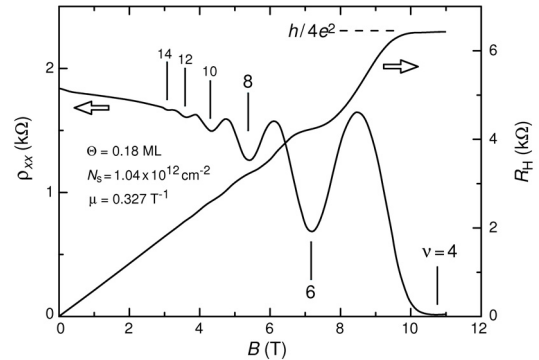


図 4.5 f: ”表面” 2次元系で初めて観測された整数量子ホール効果。

果による吸熱現象または放熱現象が期待できる。

4.5.4 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。最近、我々は、ヘリウム冷凍機の真空チャンバー内で結晶を劈開して清浄表面を作り、金属をその場蒸着して2次元電子系を誘起して、さらに強磁場下での電気伝導を測定するための一連のプロセスを確立した。

InAs 表面2次元電子系と整数量子ホール効果

InAs 劈開表面に銀を少しずつ堆積させていくと、はじめ電子密度は蒸着量に対して比例して増加するが、やがて飽和した。電子密度と銀蒸着量との関係は表面ドナーモデルに基づく計算により良く再現され、飽和電子濃度から表面ドナー準位のエネルギーが求められた。また、強磁場下の測定では整数量子ホール効果が観測され、表面に蓄積された電子系の完全な2次元性が実証された。今後は、堆積物質を磁性体に変えて、磁性体の局在スピンと2次元電子との相互作用がもたらす新奇な現象を探索する。

InSb 表面2次元電子系と多サブバンド状態

有効質量の違いから、InSb 劈開表面2次元電子系においてはInAs表面の場合 ($\mu \approx 3,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)

よりもさらに高い移動度 ($\mu > 10,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) が観測された。銀を堆積させた予備実験では、平坦な劈開面が得られなかったが、量子ホール効果に近い磁気抵抗効果の振る舞いが観測された。また、セシウムを堆積させた場合にはより高密度の2次元電子系が形成され、5番目のサブバンドまで電子が収容されていることが磁気抵抗振動の解析よりわかった。多サブバンド状態においては、プラズモン機構による超伝導が期待されるので、今後は希釈冷凍機を用いた極低温に測定を拡張する。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Kawano and T. Okamoto: Imaging of intra- and inter-Landau-level scattering in quantum Hall systems, *Physical Review B* **70**, 081308R-1 - 081308R-4 (2004).
- [2] Y. Tsuji and T. Okamoto: Magnetotransport measurements on a damaged surface of p-type InAs and the annealing effect, *Physical Review B* **70**, 245316-1 - 245316-5 (2004).
- [3] Y. Kawano and T. Okamoto: Macroscopic size effect of inter-Landau-level scattering in quantum Hall systems, *International Journal of Modern Physics B* **18**, 3789-3796 (2004).
- [4] Y. Komori and T. Okamoto: Observation of the Ettingshausen effect in quantum Hall systems, *Physical Review B* **71**, 113306-1 - 113306-4 (2005).
- [5] K. Takase, Y. Kawano, and T. Okamoto: Time response of a highly sensitive and tunable THz detector using the quantum Hall effect, *Microelectronics Journal* **36**, 269-271 (2005).
- [6] Y. Kawano and T. Okamoto: A new type of scanning probe microscope: Combination between an electrometer and a THz microscope, *Microelectronics Journal* **36**, 592-595 (2005).

(会議抄録)

- [7] 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* (July 26-30, 2004, Flagstaff, Arizona), in press.
- [8] Yosuke Komori and Tohru Okamoto: Ettingshausen effect in integer quantum Hall systems, *Proceedings of the 27th International Conference on the Physics of Semiconductors* (July 26-30, 2004, Flagstaff, Arizona), in press.
- [9] 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* (July 26-30, 2004, Flagstaff, Arizona), in press.

(国内雑誌)

- [10] 河野 行雄: 量子ホール効果の素子応用－走査型電位計とTHz光顕微鏡－, *固体物理* **39**, 919-931 (2004).

(学位論文)

- [11] 當山清彦: 「半導体2次元系の絶縁体領域における磁気輸送現象と電子相関」 (修士論文)
- [12] 増田智: 「InSb の FET および劈開表面の電気伝導」 (修士論文)
- [13] 松並絢也: 「シリコン2次元電子系における電子スピン共鳴」 (修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [14] Yukio Kawano and Tohru Okamoto: Imaging of intra and inter Landau level scattering in quantum Hall devices, *27th International Conference on the Physics of Semiconductors* (Flagstaff, USA), 26-30 July 2004.
- [15] Yosuke Komori and Tohru Okamoto: Ettingshausen effect in integer quantum Hall systems, *27th International Conference on the Physics of Semiconductors* (Flagstaff, USA), 26-30 July 2004.
- [16] Yukihide Tsuji, Tohru Okamoto: Magnetotransport measurements on the defect-induced conduction electrons near InAs(111) surface, *27th International Conference on the Physics of Semiconductors* (Flagstaff, USA), 26-30 July 2004.
- [17] Y. Kawano and T. Okamoto: A new type of scanning probe microscope: Combination between an electrometer and a THz microscope, *5th International Conference on Low Dimensional Structures and Devices* (Cancun, Mexico), December 2004.
- [18] K. Takase, Y. Kawano and T. Okamoto: Time response of a highly sensitive and tunable THz detector using the quantum Hall effect, *5th International Conference on Low Dimensional Structures and Devices* (Cancun, Mexico), December 2004.

招待講演

- [19] Tohru Okamoto: Possible ring-exchange and Aharonov-Bohm effect in Wigner solids in semiconductor 2D systems, *International Conference on Ring-exchange and correlated Fermions* (Corsica, France), 12-17 April 2004.
- [20] Y. Kawano and T. Okamoto: Macroscopic size effect of inter-Landau-level scattering in quantum Hall systems *16th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics* (Florida, USA), August 2004.

(国内会議)

一般講演

- [21] 松並絢也、大屋満明、岡本徹: シリコン二次元電子系における電子スピン共鳴, 日本物理学会2004年秋季大会(青森大学) 2004年9月12日-15日.
- [22] 河野行雄、岡本徹: 2次元電子系における非平衡雑音の空間分解測定, 日本物理学会2004年秋季大会(青森大学) 2004年9月12日-15日.
- [23] 高瀬恵子、河野行雄、岡本徹: 光パルス励起による量子ホール系非平衡キャリアダイナミクスの観測, 日本物理学会2004年秋季大会(青森大学) 2004年9月12日-15日.
- [24] 當山清彦、大屋満明、岡本徹、橋本義昭、勝本信吾、家泰弘: GaAs 2次元正孔系における強相関電子固体相の磁気抵抗振動, 日本物理学会2004年秋季大会(青森大学) 2004年9月12日-15日.
- [25] 高瀬恵子、河野行雄、岡本徹、上田剛慈、小宮山進: 光パルス励起による量子ホール系非平衡キャリアダイナミクスの観測 II, 日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学) 2005年3月24日-27日.
- [26] 望月敏光、辻幸秀、岡本徹:
銀をその場蒸着させた InAs 劈開表面における整数量子ホール効果の観測, 日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学) 2005年3月24日-27日.
- [27] 辻幸秀、望月敏光、岡本徹: 銀原子蒸着により誘起された InAs 劈開表面2次元電子系の電子密度と Hall 移動度, 日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学) 2005年3月24日-27日.

(セミナー)

- [28] 岡本徹: 2次元系における金属・絶縁体転移、東邦大学物理学科コロキウム(東邦大学) 2004年5月19日.
- [29] 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研究-テラヘルツ光顕微鏡と走査型電位計-, 東京大学物理学教室物性セミナー(東京大学) 2004年11月1日.

4.6 島野研究室

島野研究室では、レーザー分光の手法を用いて、凝縮系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索に取り組んでいる。特に、多体の電子相関によって生じる量子物性、秩序変化をプローブする新しい手法として、テラヘルツ電磁波による分光に注目し、分光手法の開拓を進めている。

本研究室は、2004年3月に島野が着任して発足した。本年度は、立ち上げに際して、実験室環境の整備とレーザー設備の構築に注力した。超短パルスレーザー設備の導入、立ち上げを完了し、ようやくテラヘルツ周波数帯の線形分光システムの構築にこぎつけた。8月には渡邊紳一助手が着任し、また2005年度より大学院生を迎え、本格的に研究を開始する段階となった。今後、低次元電子系を中心として、その光電応答、光励起ダイナミクスの解明に取り組む。

4.6.1 テラヘルツ分光法の開拓

テラヘルツ周波数帯の誘電関数、電気伝導度スペクトルを高感度かつ高精度に計測するために以下の手法の開発を進めた。

高速掃引テラヘルツ時間領域分光法の開発

本年度は、まずテラヘルツ (THz) 分光系の基盤となるフェムト秒レーザーシステムの整備を行った。パルス幅 100 フェムト秒のモード同期チタンサファイアレーザーの立ち上げを行い、これを用いて THz 電磁波の発生、検出系の構築を進めた。THz 発生には、二次的非線形光学過程である光整流効果を利用し、検出には電気光学 (EO) サンプリング法を用いた。非線形光学結晶には II-VI 族半導体 ZnTe を使用し、0.5THz-2.5THz (光子エネルギー 2meV-10meV) の範囲での分光測定が可能となった。複素透過率の実測値から、複素誘電関数、あるいは複素電気伝導度スペクトルを導出する数値計算アルゴリズムを構築した。THz 時間領域分光法では、1 ピコ秒程度で振動する電場の時間波形を、EO サンプリングの手法により直接時間軸上で計測する。光サンプリング用のゲート光パルスを高速で掃引する計測アルゴリズム (ラピッドスキャン法) を開発し、THz 時間波形を約 0.2 秒で計測することが可能となった。THz 時間波形をオシロスコープ上でリアルタイムで観測することができる。このラピッドスキャン法により、データ取得効率、S/N 比を大幅に改善することが可能となった。

非接触ホール効果計測

磁場中あるいは磁化を持つ物質に直線偏光の光を入射すると、その反射波や透過波の偏光面は回転する (磁気光学カー効果、ファラデー効果)。これら磁気光学効果は、光学的にホール伝導度を決定する手段として光領域では有用に利用されている。さて、

ホール伝導度は外部磁場あるいは自発磁化のもとでの、キャリアの電気伝導特性を特徴づける。通常の直流ホール効果の測定ではその起源となるキャリアの動的散乱過程は平均化されてしまう。交流、すなわちダイナミックなホール効果の測定はキャリアの微視的な散乱過程を顕在化してくれると期待されるが、光領域での測定では、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。そこで電気伝導度評価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。テラヘルツ時間領域分光法の特徴のひとつは、電場の振幅と位相の同時計測を行う点にある。島野らは先行研究によって、この特徴を利用すると、強度測定では得られない高感度の偏光回転計測が可能であることを見出した。そこで、テラヘルツ非接触ホール測定を有意な物性計測手法として確立するべく、高感度偏光回転計測法の開発を進めている。

本年度は、高感度化を実現する一つの手法として円偏光変調法を検討した。テラヘルツパルスの偏光変調系を試作し、原理検証実験を行った。偏光の異なる二つの THz パルスを発生させ両者の相対位相制御を行うことで、合成テラヘルツ波の偏光変調が可能であることを実証した。結果を図に示す。位相差を変化させることで、任意の波長に対する円偏光発生器として動作することを確認した。左右円偏光に対する媒質の屈折率の差、吸収係数の差からホール伝導度を決定することが可能となる。さらには、磁場/非磁場下での電子の軌道回転運動あるいは分子の回転振動を共鳴的に励起することも可能であり、そのエネルギー散逸のダイナミクスを調べることができると期待される。

4.6.2 低次元電子系のテラヘルツ分光

カーボンナノチューブ

カーボンナノチューブは、理想的な 1 次元電子系として多くの関心を集めている。半導体ナノチューブでは、1 次元性を反映して van Hove 特異点における状態密度の発散や、励起子束縛エネルギーの増大が予想され、ごく最近その実験的検証もなされるようになってきた。一方金属ナノチューブでは、後方散乱の消失、バリスティック伝導など特異な振舞いが示され、光電子分光の測定からは朝永ラッティンジャー流体的な性質を示す結果も報告されている。我々は、このナノチューブの 1 次元的な伝導を分光学的手法により明らかにすべく、そのテラヘルツ分光に着手した。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開始した。今後、線形応答で得られる知見に基づいて、ナノチューブの光励起状態、光伝導ダイナミクスの計測へと研究を展開する。

< 報文 >

(原著論文)

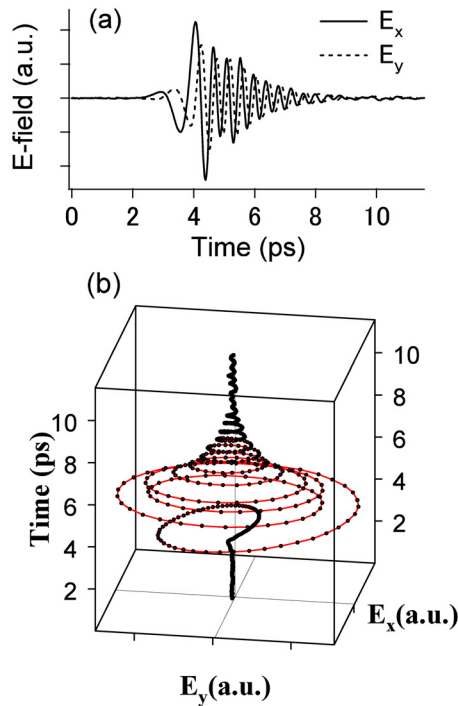


図 4.6 a: (a) 円偏光テラヘルツ波の時間波形、直交する二方位間に約 $1/4$ 波長の位相差がついている。(b) 電場の軌跡。

- [1] R. Shimano, H. Nishimura, and T. Sato, "Frequency Tunable Circular Polarization Control of Terahertz Radiation", Japanese Journal of Applied Physics, Part 2, in press.

<学術講演>

(国内会議)

一般講演

- [2] 島野 亮、井野雄介、五神 真：テラヘルツ偏光分光法によるサブミリラジアン磁気光学信号検出，日本物理学会 2004 年秋季大会 於 青森大学（2004 年 9 月 13 日）

招待講演

- [3] 島野 亮：テラヘルツエリプソメトリーの開発，第 52 回応用物理学関係連合講演会，シンポジウム「テラヘルツ波による化学・バイオ・電子材料評価の最前線」於 埼玉大学（2005 年 3 月 29 日）

(セミナー)

- [4] 島野 亮：半導体の高密度光励起現象，東京大学理学部物理学教室 教室談話会，2004 年 6 月 25 日

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 150 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るれば、「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・キューサー分布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ォ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

ゴースト場凝縮と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。現在の宇宙の大部分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、ゴースト場凝縮という新しいシナリオを提唱した [15, 54, 125, 196, 178, 197, 142, 226, 227]。このシナリオは、重力におけるヒッグス機構に対応するものである。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、このシナリオは、他の理論 (massive gravity や Dvali-Gabadadze-Porrati ブレーンモデル等) が抱えていた問題 (巨視的スケールで生じる強結合) を回避する方法を初めて与えた。また、このシナリオに基づくインフレーションのモデルを提唱した [16, 210, 228, 229, 230, 231]。

高次元ブラックホール (BH) と時空コンパクト化

高次元 BH は数多く知られており、その殆どは漸近的平坦のものである。一方、我々の宇宙である 4 次元時空との関係付けを行うには時空コンパクト化が不可欠であり、こうした時空では BH に興味深い現象が見られる [17]。この種の BH を取り扱うには、現在のところ、本研究 [18] で開発された数値的アプローチ以外には知られていない。本研究 [19] では、コンパクト化された時空における BH を具体的に構成しその性質を解明した。とりわけ、ブラックストリングと呼ばれるクラスのブラック「オブジェクト」が持つ不安定性 — Gregory-Laflamme 不安定性 — との関係を相空間上で導き、異なるトポロジーを持つ 2 つのブラックオブジェクトが相空間上でどのように (経路) 変化していき、合体するかを解明した。

宇宙再加熱と PBH 生成について

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) の生成について議論した。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 3 次元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、揺らぎの急激な成長にもかかわらず、PBH の生成量は観測値を超えることがないことが分かり、preheating モデルの妥当性を評価した。

ブレーンワールドにおける宇宙論的摂動

ブレーンワールドにおける初期密度揺らぎの生成、宇宙論的摂動の進化を調べた。特に余剰次元が無限に広がっているモデルに注目し、宇宙のホライズン半径が、余剰次元の有効的な大きさよりも大きいときは、四次元 Einstein 理論が再現されることを解析的、数値的に示した。一方、インフレーション中の宇宙のホライズン半径が余剰次元の有効的な大きさよりも小さいときは初期密度揺らぎに余剰次元の重力場の影響が大きく効く可能性を示唆した [21, 22, 105, 106, 107]。

self-accelerating 宇宙

現在の宇宙の加速度膨張を、宇宙定数を仮定することなく説明するモデルがブレーン宇宙のモデルに基づいて提唱されている。このモデルが、非対称なワープ・コンパクト化によって実現できることを示した。また de Sitter 時空における重力場の摂動を調べ、self-accelerating 宇宙にはゴーストが存在しないことを示した。しかしブレーンに宇宙定数を導入すると、ゴーストが存在し、ブレーンが量子論的に不安定になることを見つけた [237, 238]。

RS D-braneworld

D ブレーンの性質を考慮に入れた、より現実的なブレーンワールドモデルの構築を行った [33, 34, 35]。D ブレーン上にはゲージ場が存在し、これは我々が知っている電磁場と解釈されるが、このゲージ場と重力の結合を解析した。その結果ブレーン上のゲージ場は重力の源としては機能しないことがわかった。これは D ブレーンを我々の世界としてモデル化する際に深刻な問題となる可能性があり、何らかのメカニズムを導入する必要があることを指摘した。

ブレーンワールドインフレーションでのスカラー摂動の量子化

ブレーンワールドインフレーションで生成される密度揺らぎを計算することは、このモデルに観測的制限をつける上で重要である。しかし、ブレーン上のインフラトンの揺らぎはバルクの重力場と相互作用するため、量子論的に密度揺らぎを求めるためにはインフラトンのみならずバルクの重力についても量子論を展開する必要がある。そこで、我々はランドール・サンドラムが提唱したブレーンモデルにおいて、この問題を考えた。このモデルでは、バルク重力場のスカラー成分の自由度は一つであり、それはあるマスター変数を用いて表される。我々はまずブレーンに物質がない場合でそのマスター変数の二次作用を導出した。次に、ブレーン上にインフラトンがある場合を考え、それとバルク重力の結合した作用を計算した。この作用は、ブレーンインフレーションでの密度揺らぎを定量的に計算する際に有用

である。[42, 115]

ブレーンワールドにおけるバルクの重力場と暗黒輻射

バルクの重力場によって励起される暗黒輻射は宇宙論的摂動を考える際に重要な役割を果たす。暗黒輻射はバルクに存在するブラックホールによってもたらされることが知られている。しかし暗黒輻射の摂動とバルクの重力場の摂動の関係は明確になっていなかった。そこで、我々は宇宙論的摂動が解析的に解ける唯一のブレーンワールドモデルにおいて、両者の関係を調べた。結果として、暗黒輻射の摂動はバルク摂動の規格化不可能モードに対応し、長波長極限でバルク中の微小な質量を持つブラックホールと関連していることを明らかにした。さらに、このモードによるブレーン上での非等方ストレスを決定し、宇宙背景放射の非等方性観測への影響について議論した。[43, 97, 134]

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 の提案したブレーン宇宙モデルの検証を進める研究を行なった。

まず、始原的ブラックホールが蒸発し放出される反陽子の流束量をブレーン宇宙の性質を取り込んで計算し、BESS 実験による地球大気上層での反陽子流束の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ーン宇宙を特徴付けるパラメーターへの制限が得られた [45]。

また、初期宇宙における宇宙の膨張速度が膜宇宙と通常とで異なることに着目し、始原的ブラックホール生成量がブレーン宇宙におけるインフレーション起源密度揺らぎスペクトルにどのように依存するかを示す表式を得た [135]。

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存在と唯一性、および 5 次元 Schwarzschild 解におけるスライスの非存在を見出した [146]。

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、コンパクトな余剰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、ランドールとサンドラムによる 5 次元ブレーン宇宙モデルを用いて、そこでの背景重力波の発展方程式を数値的に解くことで、その振る舞いを調べた。昨年度は Gaussian normal 座標系を用いたが [255]、より高エネルギー宇宙のシミュレーションを可能にするために、Poincare 座標系を用いた数値計算コードを開発した。このような高次元宇宙では、通常とは異なる宇宙膨張則による効果と、Kaluza-Klein モードの励起による効果で、背景重力波のスペクトルが変更を受けると考えられる。しかし、輻射優勢期に宇宙の地平線に再突入してくる比較的短波長 (mHz 以上) の背景重力波については、これらの効果がちょうど打ち消しあって、スペクトルが 4 次元の標準的な理論から予言されるものと同じになることが分かった。[46, 65, 66, 92, 96, 136] 一方、極めて初期の宇宙において状態方程式が輻射的でない場合は、このような打ち消し合いが見られず、スペクトルが変わる可能性があることを示した。[147, 188]

ブレーンワールドにおける動的現象からの重力波

ブレーン宇宙をはじめとする高次元宇宙で重力崩壊などの動的な天体現象が起こった場合、4 次元一般相対論の予言する通常の重力波 (ゼロモード) に加えてバルク方向へ伝播する重力波 (Kaluza-Klein (KK) モード) が生成される。そこで Randall-Sundrum 5 次元ブレーンモデルにおいて動的な重力波源により生成される KK モードに対する四重極公式を導出し、KK モードの励起によりブレーン上に誘導される暗黒輻射のエネルギー変化率を求めた。それにより、通常の重力波とは異なり、重力波源の球対称成分が KK モードを励起させ、暗黒輻射のエネルギー変化率もその球対称成分のみに依存することを示した。[82, 137, 148, 177, 179]

ビッグバン元素合成

最近の観測から物質の進化がこれまで知られていたより早くから始まっている事が明らかになって来た。これをうけバリオン密度が非常に高い領域でのビッグバン元素合成を研究した [50]。その結果、ビッグバン元素合成は反応経路が非常に特殊である事がわかった [85]。

5.1.2 観測的宇宙論

宇宙背景重力波の非等方性の検出

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 つが、背景重力波と呼ばれる、位相がランダムな重力波である。背景重力波は、天体起源と宇宙

論的起源のものに大別され、最近の研究によると、幅広い周波数帯にわたって、様々な種類の背景重力波が重なりあって存在していると考えられている。本研究では、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、将来のスペース干渉計の検出特性に応じて、どのくらいの角度分解能のマップが構築できるか、アンテナパターンの解析を行った [12]。その結果、LISA のような場合、多重極モーメントで $l \sim 8-10$ 程度まで感度を持ち、銀河系内・系外から来る背景重力波の区別が十分可能であることがわかった。[130, 141, 165]

銀河団の非重力的加熱

銀河団から放射されている X 線はダークマターハロー中に閉じ込められている高温ガスに由来すると考えられている。これまでの研究により、銀河団内の高温ガスは、断熱圧縮などのダークマターハロー形成に由来する重力的な加熱だけでなく、星形成などに由来する非重力的な加熱を受けているとの示唆が得られている。

我々は、非重力的加熱機構を探るために、ダークマターハローの合体史、星形成に伴うガスの重元素汚染、重元素量に依存したガスの冷却、そして、超新星爆発と電波銀河のジェットによる加熱を考慮したモデルを構築した。それを用いて、近傍銀河団におけるガスの重元素量および光度・温度関係を再現するために必要な加熱効率を求めた結果、二通りの可能性が考えられることが分かった。一つは、「標準」的な量の超新星爆発からの加熱に加えて、「標準」的な量の電波銀河のジェットによる加熱を行なうものであり、もう一つは、「標準」値の数倍の量の超新星爆発からのみの加熱を行なうものである。後者に関しては、加熱の強さが高赤方偏移到偏っている場合でも観測されている相関関係が再現できることを示した。[153]

近傍宇宙からの WHIM 酸素輝線の検出可能性

我々の宇宙に存在するバリオンで、これまでに実際に観測されているバリオンの量は、宇宙マイクロ波背景放射の観測やビッグバン元素合成理論から推定される量の半分以下であることが分かっている。このように存在することが分かっているにも関わらずこれまでに検出できていないバリオンは、ミッシングバリオンまたはダークバリオンとよばれており、観測的宇宙論の重要な問題の一つである。理論的研究からは、現在のバリオンの約 40% は Warm-Hot Intergalactic Medium (WHIM) と呼ばれる温度が $10^5 - 10^7 \text{K}$ の希薄な銀河間プラズマであることが予想されており、WHIM がミッシングバリオンの有力な候補となっている。この為、我々は東京都立大学や宇宙航空研究開発機構の研究者と共同で Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor (DIOS) という WHIM を検出するための専用 X 線観測衛星を計画している。

我々は、宇宙論的流体シミュレーションを用いて我々の銀河系から約 100Mpc 以内の近傍宇宙での WHIM の分布を求め、DIOS 衛星を用いた場合の検出可能性を調べた。その結果、近傍宇宙に存在するフィラメント構造や超銀河団に付随する WHIM が DIOS で観測可能であることが分かった。また、昨年の XMM-Newton 衛星による観測で、髪の毛座銀河団と我々の銀河系の間に大量の WHIM が存在する可能性が指摘されたが、我々のシミュレーションでも同様の結果が示唆され、DIOS 衛星を用いればより明確に WHIM の存在を証明することができることも示した。[8]

WHIM の電離状態の非平衡進化

WHIM の典型的な密度は水素原子数密度に換算して $10^{-6} - 10^{-5} \text{cm}^{-3}$ であり、銀河団ガスの密度と比較して遥かに小さいものである。その為、WHIM 中の水素やヘリウムはもちろん、その他の重元素イオンは電離平衡状態からずれている可能性がある。これは、WHIM のような物理状態では、一般的に電離のタイムスケールに比べて再結合のタイムスケールが遥かに長く、宇宙年齢に匹敵するからである。

WHIM を観測的に検出する際には、酸素やネオンなどの重元素の輝線や吸収線を手掛かりにするため、これらのイオンの電離状態を調べるのは極めて重要である。これまでの研究では暗黙の内に電離平衡状態にあると仮定されてきたが、電離平衡に無い場合は観測結果の解釈に重要な変更を迫ることになる。我々は宇宙論的流体シミュレーションで得られたバリオンの温度・密度の時間発展を使って、現在の宇宙におけるバリオンの電離状態を計算した。その結果、温度が $10^{6.5} \text{K}$ 以下のバリオンは電離平衡から有意にずれていることが分かった。

ガンマ線バーストを背景光とした WHIM 吸収線系の検出可能性

我々は 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 (Mkn 421 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。もし、吸収線と輝線が同じ赤方偏移に見つかれば、WHIM 検出の信頼性が片方みの検出より大きく上がることになる。この GRB 残光による WHIM 探索は 2000 年に Fiore らによって最初に提案されたが、あくまで

定性的な議論であり、その後、あまり研究が進んでいなかった。そのため、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、WHIM 内部の不均一性のため、輝線と吸収線を同時に用いて、物理量を求めることは難しいことがわかった。[174, 182]

重力レンズ統計におけるレンズ天体の非対称性

大分離角重力レンズクエーサーの確率分布は、ダークハローの質量分布と密度から計算されるが、その密度分布として球対称のものが仮定されてきた。我々は 3 軸不等楕円体ハローモデルを用いて、初めて非球対称性を系統的に取り込んだ解析計算を行い、重力レンズ確率が非球対称性により数倍増えることを指摘した。また、新たな統計として、像の個数の統計を提案した [23]。

大分離角重力レンズクエーサー SDSS J1004+4112

これまでで最大の分離角をもつ重力レンズクエーサー SDSS J1004+4112 の追観測をおこなった。まずスペクトルのモニタリング観測により、広輝線領域のマイクロレンズ効果を発見した [24]。また、ハッブル望遠鏡の撮像から中心の 5 番目の重力レンズ像を発見し、銀河団中心の密度分布に対する新しい制限を得た [27]。

SDSS のデータを用いた重力レンズクエーサーの探索

現在進行中の日米独の共同プロジェクトであるスローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) を用いて大規模の重力レンズクエーサー探索を行い、新たに二つの重力レンズクエーサーをみつけることに成功した [26]。

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 2.3 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ータ及び宇宙定数に対して制限を与えた。[119, 163]

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。[173]

暗黒物質ハローサブストラクチャの解析的モデル

暗黒物質ハローサブストラクチャが暗黒物質ハロー内で受ける二つの主要な物理プロセス (潮汐力、力学的摩擦) を考慮したサブストラクチャの質量関数を初めて構築した。また、同時にサブストラクチャの空間分布も計算した。さらに、この解析計算の結果を数値シミュレーションの結果と比較したところ、両者が良く一致することがわかった [25]。

崩壊する暗黒物質

崩壊する暗黒物質は現在の冷たい暗黒物質の諸問題を解決する可能性のある重要なテーマである。特に宇宙年齢程度の寿命を持つ暗黒物質をターゲットにし、将来のスニャエフ-ゼルドビッチ効果の観測によってどの程度情報を得られるかを調べ [31]、また WMAP による宇宙背景放射によってどの程度の制限が与えられるかを調べた [32]。その結果、暗黒物質の寿命に宇宙年齢の 10 倍程度という強い制限を与え、暗黒物質の崩壊によって諸問題を解決することは難しいという結論を得た。

太陽系外トランジット惑星のロシター効果

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ついては、古くから知られ、研究されてきた。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。

これまでは、Rossiter 効果による見かけの速度変化を見積もるためには、数値積分を含む複雑な式を用いて計算する必要があった。この計算方法は恒星同士の連星の場合にも使える一般的なものである。しかし、惑星は恒星に比べて遥かに小さく暗いので、

様々な近似を用いれば、より単純でわかりやすい式を得ることができる。そこで我々は、この速度変化を計算する解析的な近似公式を求めた [10]。また、この解析的公式によって、Rossiter 効果のパラメータ依存性を理解しやすくなった。

太陽系外惑星 HD209458b の大気組成への観測的制限

本研究の観測対象である系外惑星系 HD209458 では、惑星による「食」が起こることが知られており、そのため食の内外でのスペクトルを比較することで惑星の外層大気元素に由来する吸収を探すことができる。この方法により、ハッブル宇宙望遠鏡による観測では既にこの惑星大気中にナトリウムなどの元素が存在することが明らかになっている。我々はすばる望遠鏡 HDS(High Dispersion Spectrograph) を用いて、この HD209458 の食の時間を含む分光観測を行い、そのスペクトル解析を行った。この結果、我々は外層大気元素によるものと思われる吸収量の変化は検出することができなかった。しかしその吸収量の変化への制限については、これまで他の地上大型望遠鏡で行われた同様の研究に比べ、著しく強めることができた。この非常に強い観測的制限は、現在の地上観測機器による系外惑星大気の検出の困難さを顕著に表している。我々は引き続きすばる望遠鏡によるデータから、系外惑星大気の検出への試みとして残された方法を網羅して解析を行い、今回の成果を超えるより強い制限、あるいはハッブル宇宙望遠鏡での検出の確認を目指している。[7, 162, 184, 171, 49, 84]

5.1.3 天体核・素粒子物理

強磁場超新星における非対称ニュートリノ放射

昨今、中性子星の持つ典型的な磁場の 3 桁ほど大きな磁場をもつ強磁場中性子星が観測され、その生成メカニズム、物理的性質を巡り大きな話題を呼んでいる。一方、QED によれば、 10^{15} ガウスを越えるような強磁場中では、ニュートリノの反応断面積が磁場の影響を受けることが知られている。これを適応して、自転による非球対称なニュートリノ放射と磁場の相互作用により、強磁場中性子星が爆発後に北極方向に飛ばされやすいことを示した [28, 30, 80, 60, 111, 156, 245, 247]。

強磁場超新星からの重力波

強磁場中性子星の生成に伴う重力波については、従来大きな問題であった。その為に鍵となっていた磁場を取り込んだ重力波の四重極公式を導出して、強磁場下での重力波波形を求めた。その結果、コアのエネルギー密度と等分配になるぐらいの超強磁場 ($\sim 10^{17}$ G) 下では、重力波の振幅が最大で 10 % ぐ

らいの変更を受けることが分かった [29, 80, 59, 60, 111, 112, 167, 186, 199, 176, 214, 205, 246, 247]。

質量・自転・磁場で決定される星の最期

大質量星が重力崩壊したすえにおこる超新星爆発は非常に明るく、古来から観測されてきた現象であるが、様々な物理と結びつき、その重要性は高まるばかりである。たとえばその中で元素合成は宇宙の組成比を決定し、地上では達成できない高温高密度が達成されるので高エネルギー物理の実験場としても優れ、またその強重力場は重力波などを通して一般相対論の理解、検証にも深く結びついている。

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超新星の結果とわかってきた。超新星爆発の後には中性子星からブラックホールなどのコンパクトオブジェクトが残されるが、その自転や磁場によっていろいろな天体現象と結びつく。

我々は超新星爆発のメカニズムの解明を通してそのような様々な天体現象を統一的に理解しようと考えている。具体的には元の星の質量、自転、磁場というパラメータが超新星という非常に複雑で非線形な過程を通して多様性に結びつくと思予想している。

我々は昨年詳細なシミュレーションをしカンマ線バーストに関連するジェットとマグネターの生成に関する新たなシナリオを提案したが、シミュレーションの結果には何点か不満足な点があった。今年度はその不満点を解決しより信頼できる結果を提供できたと考えている。最大の改善点としては流体コードを完全に特殊相対論化して発生するジェットの特性をより精密に追うことができるようになったことが挙げられる。

さまざまな質量、自転、磁場の初期条件化をこの計算コードを使って発展させることにより、高エネルギー天体現象の理解はより深まると考えられる。

このとき我々はこのジェット時に発生する重力波にも注目して計算しており、各国で建築、改善が急がれる重力波検出器が重力波を観測すれば、その結果との比較からいまままで直接観測できなかった強重力系での物理の理解に貢献できると考えている。

[48, 83, 116, 161, 139, 200, 170]

流体不安定性と超新星

超新星爆発は核密度になったコアからのバウンスを用いた即時爆発機構のほかニュートリノ加熱を考慮した遅延爆発機構なども考えられてきたが、近年の球対称を仮定した詳細なシミュレーションの結果、そのままでは爆発は難しいと考えられている。

このような現状を打破するためには球対称の仮定をやめより低い対称性の中での計算をする必要があると考えられる。

中でも流体不安定性の解析は球対称なモデルでは十分に解析することができない。このような機構の

中でも磁気流体不安定性や定常降着衝撃波に関する不安定性、対流によるニュートリノ加熱の増幅などは爆発を促進させる効果として着目されている。

このような研究は始まったばかりで、まだまだ手探りでさまざまな状況設定でどのようなことが起こるのか明らかにする必要がある。

我々は今回対流による元素合成の不均一性から生じる密度揺らぎを系統的に初期条件として与え、その結果を解析した。

その結果このような不均一性は重力崩壊時にはそれほど影響を与えないがバウンス後の衝撃波の伝播には大きく影響を与えることがわかった。また、自転をさせたときには衝撃波が非常に不安定で複雑な振る舞いを見せることも明らかにした。

このような過程における重力波波形も計算した。重力波の位相は自転をさせているときにはこのような摂動に対しても安定で、むしろ自転をしていないときには複雑な振る舞いになることを明らかにした。[98, 67, 83, 180, 187]

超新星背景ニュートリノ

過去の全ての超新星爆発から放出されたニュートリノは、diffuse なバックグラウンドを形成していると考えられている。この超新星背景ニュートリノ (Supernova Relic Neutrinos; 以下 SRN) の検出可能性を、現実的なニュートリノ振動モデル、超新星モデルを適用して考察した [62, 63, 64]。超新星爆発は、短寿命の大質量星の死に伴う現象であるため、SRN は銀河進化および星形成史の良いプローブとして用いることが期待できる。さらにニュートリノは途中の星間空間中にある塵からの吸収を受けないという特徴がある。我々は、将来観測からどの程度まで星形成率の情報を引き出せるかという議論をモンテカルロシミュレーションを用いて行った。この結果、Super-Kamiokande くらいの大きさの検出器で 5 年程度観測を行えば、30% 程度の精度で星形成率のモデル化が可能であることを示した。現在計画中の Hyper-Kamiokande や UNO といったさらに大型の検出器を用いれば、より精度の良い情報が得られることが期待できる [36, 113]。

さらに我々は、SRN に関する、理論観測両面からの包括的なレビュー論文の執筆を行なっている [39, 128, 129, 250, 252, 253, 254]。なお、この論文 [39] は、出版元 Institute of Physics の selected paper として選出されたことを付記しておく。

崩壊する超新星ニュートリノ

ニュートリノが、Majoron などの非常に軽いスカラー粒子と相互作用をする場合、超新星からの伝搬中にある質量固有状態から、より軽い質量固有状態へと崩壊するという現象が起こり得る。これにより、銀河内で起こった超新星爆発からのニュートリノバーストの信号が、通常期待されるものから大きくことなる可能性がある。とくに、電子ニュートリノに固

有の、中性子化バーストと呼ばれる鋭い時間変動が、崩壊の効果によって電子反ニュートリノに見られることが考えられ、これを実際にとらえれば、ニュートリノの崩壊という標準模型を超える新たな性質の動かし難い証拠となるであろう。我々は、そのための定式化を新たに提示し、それを用いることで、地上で期待されるシグナルの評価を行ない、それが十分に検出可能であることを示した [38, 145]。

連星中性子星衝突とガンマ線バースト

ガンマ線バーストのうち継続時間が 2 秒以下と短いもの (short GRB) に関してはその起源が明らかになっていない。我々はその有力な候補と考えられている、中性子星-中性子星、あるいは中性子星-ブラックホールの衝突現象が short GRB と関連していると仮定して、BATSE のデータ解析を行なった。この結果、GRB の生成率の時間進化は連星コンパクト天体の衝突を仮定することにより、非常にコンシステントに説明可能であることを示した [37, 159]。さらに、ジェットの開き角に関しても平均でおよそ 10 度程度であるという示唆を得たが、これは long GRB の残光観測から示唆されているものと良く一致していることも示した。

ガンマ線バースト残光からの TeV 光子と銀河間吸収

ガンマ線バースト残光の機構は、磁場で加速された電子によるシンクロトロン放射でうまく説明でき、また観測されている GeV 領域のガンマ線は、逆コンプトン散乱によるものであると考えられている。さらに、いまだ観測はされていないものの、同じ機構で TeV 領域にも放射があることが理論的に示唆されている。我々は TeV 領域の光子が、銀河間空間で赤外光子と相互作用し、電子・反電子ペアをつくるということに着目した。これらのペアは、非常に高エネルギーでつくられるため、宇宙マイクロ波背景放射と逆コンプトン散乱を通じて相互作用し、GeV 領域の光子を生成する。我々は、これらの仮定でつくられた GeV 光子は、もともと残光から直接我々の元に到達する GeV 光子に比べて、いかなる条件の元でも、無視できる程度の寄与しか与えないということを示した。このため、将来の GLAST 衛星による観測から、ガンマ線バーストの情報を、途中の伝搬過程に邪魔されることなく、直接引き出せることができる [39]。

宇宙背景ガンマ線に於ける暗黒物質対消滅の寄与

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。これは、仮に背景ガンマ線の多くが暗黒物質起源であると仮定すると、銀河中心の暗黒物質対消滅起源のガンマ線のフラックスが、実際の観測よりも大幅に大きくなってしまおうという理由による [41]。

相対論的アウトフローにおける因果律

近年、ガンマ線バーストの観測により大角度の偏光の存在が報告され議論を呼んでいる。これのためには領域内での磁場のコヒーレンスが必要であり因果律が保たれていなければならない。ガンマ線バーストをはじめとする相対論的アウトフローを伴うような天体現象においては、圧力などの物理的情報は音速で伝わるため音速が系の因果律を定める特徴的なスピードとなる。そこで、このような流体中を伝播する音波は effective に曲がった時空上の波動として記述されるという effective geometry の手法を用い、Lorentz factor が半径の power law となる場合の球対称アウトフローについて、音速による因果律を解析した。この結果、加速膨張の場合は因果律の保たれる領域が Lorentz factor の逆数に比例した角度で制限され、減速膨張の場合はこのような制限がないことを示した。[47, 138]

超高エネルギー宇宙線到来方向分布における二点相関の統計的有意性

最近の HiRes 観測により、超高エネルギー宇宙線到来方向分布に有意な二点相関がみられないとの結果が報告された。しかし、この結果は AGASA 観測によるものと相反している。そこで、我々はこの違いが統計的に有意なものかどうかを調べた。具体的には、ORS 銀河サンプルを用いて宇宙線のソースモデルを構築して宇宙線の到来方向分布を計算し、HiRes と AGASA それぞれの観測からソースの個数密度に制限をつけた。結果としては、 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ Mpc}^{-3}$ 程度の個数密度で両観測を統計揺らぎの範囲内で説明できることがわかった。したがって、現時点ではまだデータ数が少なく、両観測の違いは有意ではないと結論された。[44, 133]

超高エネルギー宇宙線の伝搬シミュレーションを用いたソース数密度の決定

近年、観測の発達により超高エネルギー宇宙線の性質が徐々に明らかになりつつある。しかし、その源となる天体（現象）が何なのかは未だに理解されていない。それはこの宇宙線が電荷を持っており、磁場のある銀河内及び銀河間空間を曲がりながら伝搬してくるためである。そこで我々は IRAS 銀河カタ

ログを用いて宇宙線のソースモデルとともに、観測を再現するような現実的な銀河間磁場のモデルを構築し、さらに銀河内磁場のモデルを作成して宇宙線の伝搬過程を計算することで到来方向分布を計算し、AGASA の観測結果と比較することによりソースの個数密度について制限をつけた。この結果 $5 \times 10^{-6} \text{ Mpc}^{-3}$ 程度の個数密度が最も観測をよく説明することを示した。また、このソースモデルを用いて現在稼働中の Auger 観測でどのような到来方向が観測されるかについて予言した。[152, 175]

「パスタ相」の相図および動的転移

超新星や中性子星などの高密度天体の内部は地上の実験室よりも遥かに高密度であり、核物質は我々の想像を絶するような構造を取っている可能性がある。特に標準核密度以下の密度領域では原子核が球形から一様な核物質に相転移していく過程において、特異な形状の原子核の相（パスタ相）が現れるということが静的なモデルによって提唱されていた。我々は量子分子動力学（QMD）という動的な手法を用いてパスタ相が動的に形成されるか否かという問題に取り組んでいる。以前の研究で高温の一様な核物質を冷却することによって動的にパスタ相が再現されることは確認された。我々はそこからさらに原子核パラメータに付随する様々な不定性を考慮し、その不定性の範囲内でパスタ相が再現されるか否か、不定性の相図に与える影響は如何なるものかについて研究した。[150] また同時に、超新星を意識したパスタ相の圧縮を行ない、パスタ相間の動的転移を再現した。これによって超新星爆発のコアの崩壊の過程でパスタ相が形成されていく可能性に強い示唆を与えた。[4, 51, 151]

5.1.4 その他

向山信治が 2004 年 10 月 1 日付けで助手に着任した。

<受賞>

- [1] 大栗真宗: 平成 16 年度第 2 回 東京大学総長賞、東京大学、2005 年 3 月 24 日
- [2] 須藤靖、第 9 回日本天文学会 林忠四郎賞、2005 年 3 月 29 日

<報文>

(原著論文)

- [3] Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka, Toshikazu Ebisuzaki, Phases of hot nuclear matter at subnuclear densities, Phys. Rev. C69 (2004) 055805.
- [4] Gentaro Watanabe, Toshiki Maruyama, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka, Toshikazu Ebisuzaki, Simulation of Transitions between “Pasta” Phases in Dense Matter, Phys. Rev. Lett. 94, 031101 (2005).

- [5] Issha Kayo, Yasushi Suto, Robert C. Nichol, Jun Pan, István Szapudi, Andy Connolly, Jeff Gardner, Bhuvnesh Jain, Gauri Kulkarni, Takahiko Matsubara, Ravi Sheth, Alex Szalay, and Jon Brinkmann: Three-point correlation functions of SDSS galaxies in redshift space: morphology, color and luminosity dependence; Publications of the Astronomical Society of Japan, **56**(2004) 415-423 (astro-ph/0403638)
- [6] Ofer Lahav and Yasushi Suto: Measuring our universe with redshift surveys; Living Reviews in Relativity (invited review article), **7** (2004) 8(1-81) (astro-ph/0310642)
- [7] Joshua N. Winn, Yasushi Suto, Edwin L. Turner, Norio Narita, Brenda L. Frye, Wako Aoki, Bun'ei Sato, and Toru Yamada: A Search for H α Absorption in the Exosphere of the Transiting Extrasolar Planet HD 209458b; Publications of the Astronomical Society of Japan, **56**(2004) 655-662 (astro-ph/0404469)
- [8] Kohji Yoshikawa, Klaus Dolag, Yasushi Suto, Shin Sasaki, Noriko Y. Yamasaki, Takaya Ohashi, Kazuhisa Mitsuda, Yuzuru Tawara, Ryuichi Fujimoto, Tae Furusho, Akihiro Furuzawa Manabu Ishida, Yoshitaka Ishisaki, and Yoh Takei: Locating the Warm-Hot Intergalactic Medium in the Simulated Local Universe; Publications of the Astronomical Society of Japan, **56**(2004) 939-957 (astro-ph/0408140)
- [9] Akihito Shirata, Tetsuya Shiromizu, Naoki Yoshida and Yasushi Suto: Galaxy clustering constraints on deviations from Newtonian gravity at cosmological scale, Physical Review **D71**(2005)064030 (astro-ph/0501366)
- [10] Yasuhiro Ohta, Atsushi Taruya and Yasushi Suto: The Rossiter – McLaughlin effect and analytic radial velocity curves for transiting extrasolar planetary systems; The Astrophysical Journal, **622**(2005)1118-1135(astro-ph/0410499)
- [11] Tadayuki Kodama, Masayuki Tanaka, Hideki Yahagi, Masahiro Nagashima, Ichi Tanaka, Nobuo Arimoto, Toshifumi Futamase, Masanori Iye, Yoshikazu Karasawa, Nobunari Kashikawa, Wataru Kawasaki, Tetsu Kitayama, Hideo Matsuhara, Fumiaki Nakata, Takaya Ohashi, Kouji Ohta, Takashi Okamoto, Sadanori Okamura, Kazuhiro Shimasaku, Yasushi Suto, Naoyuki Tamura, Keiichi Umetsu & Toru Yamada: Panoramic Views of Cluster-Scale Assembly Provided by Subaru Wide-Field Imaging; Publications of the Astronomical Society of Japan, **57**(2005)309-323 (astro-ph/0502444)
- [12] Hideaki Kudoh, Atsushi Taruya; Probing anisotropies of gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer: Geometric properties of antenna patterns and their angular power; Physical Review **D71**(2005)024025 (gr-qc/0411017)
- [13] Atsushi Taruya, Masa-aki Sakagami; Fokker-Planck study of stellar self-gravitating system away from the thermal equilibrium: connection with non-extensive statistics; Physica A340 (2004) 453-458.
- [14] Masa-aki Sakagami, Atsushi Taruya; Description of quasi-equilibrium states of self-gravitating systems based on non-extensive thermostatics; Physica A340 (2004) 444-452.
- [15] Nima Arkani-Hamed, Hsin-Chia Cheng, Markus A. Luty and Shinji Mukohyama, Ghost Condensation and a Consistent Infrared Modification of Gravity, JHEP **0405**, 074 (2004)
- [16] Nima Arkani-Hamed, Paolo Creminelli, Shinji Mukohyama and Matias Zaldarriaga, Ghost Inflation, JCAP **0404**, 001 (2004)
- [17] H. Kudoh and Y. Kurita, Phys. Rev. D **70**, 084029 (2004)
- [18] H. Kudoh, Phys. Rev. D **69**, 104019 (2004)
- [19] H. Kudoh and T. Wiseman, Phys. Rev. Lett. **94**, 161102 (2005)
- [20] T. Suyama, T. Tanaka, B. Bassett and H. Kudoh, Phys. Rev. D **71**, 063507 (2005)
- [21] K. Koyama, "Late time behavior of cosmological perturbations in a single brane model," JCAP **0409**, 010 (2004).
- [22] K. Koyama, D. Langlois, R. Maartens and D. Wands, "Scalar perturbations from brane-world inflation," JCAP **0411**, 002 (2004).
- [23] Masamune Oguri and Charles R. Keeton: Effects of Triaxiality on the Statistics of Large-Separation Gravitational Lenses; The Astrophysical Journal, **610**, 663-672 (2004) (astro-ph/0403633)
- [24] Gordon T. Richards, Charles R. Keeton, Bartosz Pindor, Joseph F. Hennawi, Patrick B. Hall, Edwin L. Turner, Naohisa Inada, Masamune Oguri, Shin-Ichi Ichikawa, Robert H. Becker, Michael D. Gregg, Richard L. White, Stuart Wyithe, Donald P. Schneider, David E. Johnston, Joshua A. Frieman and J. Brinkmann: Microlensing of the Broad Emission Line Region in the Quadruple Lens SDSS J1004+4112; The Astrophysical Journal, **610**, 679-685 (2004) (astro-ph/0402345)
- [25] Masamune Oguri and Jounghun Lee: Realistic Model for Spatial and Mass Distributions of Dark Halo Substructures: An Analytic Approach; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **355**, 120-128 (2004) (astro-ph/0401628)
- [26] Masamune Oguri, Naohisa Inada, Joseph F. Hennawi, Gordon T. Richards, David E. Johnston, Joshua A. Frieman, Bartosz Pindor, Michael A. Strauss, Robert J. Brunner, Robert H. Becker, Francisco J. Castander, Michael D. Gregg, Patrick B. Hall, Hans-Walter Rix, Donald P.

- Schneider, Neta A. Bahcall, Jonathan Brinkmann and Donald G. York: Discovery of Two Gravitationally Lensed Quasars with Image Separations of 3" from the Sloan Digital Sky Survey; *The Astrophysical Journal*, **622**, 106-115 (2005) (astro-ph/0411250)
- [27] Naohisa Inada, Masamune Oguri, Charles R. Keeton, Daniel J. Eisenstein, Francisco J. Castander, Kuenley Chiu, Joshua A. Frieman, Joseph F. Hennawi, David E. Johnston, Bartosz Pindor, Gordon T. Richards, Hans-Walter Rix, Donald P. Schneider and Wei Zheng: Discovery of a Fifth Image of the Large Separation Gravitationally Lensed Quasar SDSS J1004+4112; *Publications of the Astronomical Society of Japan*, in press (astro-ph/0503310)
- [28] Kei Kotake, Shoichi Yamada and Katsuhiko Sato: North-South Neutrino Heating Asymmetry in Strongly Magnetized and Rotating Stellar Cores, *Astrophysical Journal* 618 (2005) 474.
- [29] Kei Kotake, Shoichi Yamada, Katsuhiko Sato, Kohsuke Sumiyoshi, Hiroyuki Ono, and Hideyuki Suzuki: Gravitational Radiation from Rotational Core Collapse: Effects of Magnetic Fields and Realistic Equation of States, *Physical Rev D* 69 (2004) 124004.
- [30] Shoichi Yamada, Kei Kotake and Tatsuya Yamasaki: The Role of Neutrinos, Rotations, and Magnetic Fields in Collapse-Driven Supernovae, *New Journal of Physics*, 6 (2004) 79.
- [31] "Sunyaev-Zel'dovich power spectrum with decaying cold dark matter" K. Takahashi, M. Oguri and K. Ichiki, *MNRAS* 352 (2004) 311, astro-ph/0312358.
- [32] "WMAP Constraints on Decaying Cold Dark Matter" K. Ichiki, M. Oguri and K. Takahashi, *Phys. Rev. Lett.* 93 (2004) 071302.
- [33] "Randall-Sundrum two D-brane model" T. Shiromizu, Y. Himemoto and K. Takahashi, *Phys. Rev. D* 70 (2004) 107303, hep-th/0405071.
- [34] "Gravity in Randall-Sundrum two D-brane model" T. Shiromizu, K. Takahashi, Y. Himemoto and S. Yamamoto *Phys. Rev. D* 70 (2004) 123524, hep-th/0407268.
- [35] "Asymmetric D-braneworld" K. Takahashi and T. Shiromizu, *Phys. Rev. D* 70 (2004) 103507, hep-th/0408043.
- [36] Shin'ichiro Ando: "Cosmic Star Formation History and the Future Observation of Supernova Relic Neutrinos"; *Astrophys. J.* **607** (2004) 20-31
- [37] Shin'ichiro Ando: "Short gamma-ray bursts as a possible probe of binary neutron star mergers"; *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **0406** (2004) 007
- [38] Shin'ichiro Ando: "Appearance of neutronization peak and decaying supernova neutrinos"; *Phys. Rev. D* **70** (2004) 033004
- [39] Shin'ichiro Ando: "Does regenerated emission change the high-energy signal from gamma-ray burst afterglows?"; *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **354** (2004) 414-418
- [40] Shin'ichiro Ando and Katsuhiko Sato: "Relic neutrino background from cosmological supernovae"; *New J. Phys.* **6** (2004) 170
- [41] Shin'ichiro Ando: "Can Dark Matter Annihilation Dominate the Extragalactic Gamma-Ray Background?"; *Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 171303
- [42] H. Yoshiguchi and K. Koyama; Bulk gravitational field and dark radiation on the brane in dilatonic brane world; *Physical Review D*, **70**, 043513, 2004.
- [43] H. Yoshiguchi and K. Koyama; Quantization of scalar perturbations in brane-world inflation; *Physical Review D*, **71**, 043519, 2005.
- [44] H. Yoshiguchi, S. Nagataki and K. Sato; Statistical significance of small scale anisotropy in arrival directions of ultra-high energy cosmic rays; *Astrophysical Journal*, 614, 43, 2004.
- [45] Yuuiti Sendouda, Kazunori Kohri, Shigehiro Nagataki, Katsuhiko Sato: Sub-GeV galactic cosmic-ray antiprotons from primordial black holes in the Randall-Sundrum braneworld, *Phys. Rev. D* 71 (2005) 063512.
- [46] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama and Atsushi Taruya: "Evolution of gravitational waves in the high-energy regime of brane-world cosmology", *Phys. Lett. B* **609**(2005)133
- [47] Shunichiro Kinoshita, Yuuiti Sendouda, and Keitaro Takahashi: Acoustic causality in relativistic shells and its implication for gamma-ray bursts, *Phys. Rev. D* 70 (2004) 123006.
- [48] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Shigehiro Nagataki and Katsuhiko Sato: Magneto-driven Shock Waves in Core-Collapse Supernova; *Astrophysical Journal* Vol.616 pp. 1086-1094(astro-ph/0408388)
- [49] 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 HD 209458b (PASJ in press:astro-ph/0504540)
- [50] S. Matsuura, A. D. Dolgov, S. Nagataki, K. Sato : Affleck-Dine Baryogenesis and heavy elements production from Inhomogeneous Big Bang Nucleosynthesis, *Prog. Theor. Phys.* **112** (2004) 971.
- [51] Gentaro Watanabe and Hidetaka Sonoda: Dynamical simulation of nuclear "pasta": soft condensed matter in dense stars; to appear in "Soft Condensed Matter: New Research", edited by F. Columbus (Nova Science Publishers, New York, 2005)

(会議抄録)

- [52] Yasushi Suto, Kohji Yoshikawa, Noriko Y. Yamasaki, Kazuhisa Mitsuda, Ryuichi Fujimoto, Tae Furusho, Takaya Ohashi, Manabu Ishida, Shin Sasaki, Yoshitaka Ishisaki, Yuzuru Tawara, and Akihiro Furuzawa: Searching for cosmic missing baryons with DIOS – Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor –, Journal of the Korean Physical Society (Proceedings of the VI International Conference on Gravitation and Astrophysics of Asian-Pacific Countries), **45**(2004) S110-S117 (astro-ph/0402389)
 - [53] Yasushi Suto, Kohji Yoshikawa, Klaus Dolag, Shin Sasaki, Noriko Y. Yamasaki, Takaya Ohashi, Kazuhisa Mitsuda, Yuzuru Tawara, Ryuichi Fujimoto, Tae Furusho, Akihiro Furuzawa Manabu Ishida, Yoshitaka Ishisaki, and Yoh Takei: Tracing the bright and dark sides of the universe with X-ray observations; Journal of The Korean Astronomical Society (Proceedings of the 3rd Korean astrophysics workshop “Cosmic rays and magnetic fields in large scale structure”) **37**(2004) 387-392
 - [54] Shinji Mukohyama: Ghost Condensation and Gravity in Higgs Phase; Proceedings of the 14th Workshop on General Relativity and Gravitation
 - [55] H. Kudoh and A. Taruya, “Probing gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer I” ;Proceedings of 14th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan.
 - [56] H. Kudoh, “Black holes with and without wrapped compactification” ; Proceedings of The 9th Asia Pacific Physics Conference (2004 年 10 月 25, ベトナム (ハノイ)), in press.
 - [57] Masamune Oguri, Naohisa Inada, and the SDSS collaboration: “Discovery of a Gravitationally Lensed Quasar System with 14.6 Arcsec Splitting” Proceedings of the 6th RESCEU symposium “Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology” eds. K. Sato and S. Nagataki, p.343 (2004)
 - [58] Masamune Oguri, Keitaro Takahashi, Kei Kotake, Kiyotomo Ichiki, and Hiroshi Ohno “Decaying Cold Dark Matter and the High Redshift Cluster Abundance” Proceedings of the 13th Workshop of General Relativity and Gravitation, eds., H. Ishihara and K. Nakao, p.194 (2004)
 - [59] Kei Kotake, Shoichi Yamada, and Katsuhiko Sato, “Gravitational Radiation from Magnetorotational Core-Collapse of Massive Stars”, The 14th Workshop on General Relativity and Gravitation, (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Nov, 2004) in press
 - [60] Kei Kotake, Shoichi Yamada, and Katsuhiko Sato, “Rotation and Magnetic Field in Core-Collapse Supernovae”, Twelfth Workshop on ‘Nuclear Astrophysics’, (Rindberg castle, Germany, March, 2004) in press
 - [61] Shin’ichiro Ando and Katsuhiko Sato: “Supernova Neutrino Oscillations and the Neutrino Magnetic Moment”; Proceedings of the 6th RESCEU International Symposium on Frontiers in Astroparticle Physics and Cosmology, ed. by K. Sato and S. Nagataki, Universal Academy Press, 2004, pp.95–98
 - [62] Shin’ichiro Ando and Katsuhiko Sato: “Supernova Relic Neutrinos and Implications for the Neutrino Properties”; Proceedings of the 6th RESCEU International Symposium on Frontiers in Astroparticle Physics and Cosmology, ed. by K. Sato and S. Nagataki, Universal Academy Press, 2004, pp.355–356
 - [63] Shin’ichiro Ando and Katsuhiko Sato: “Supernova Relic Neutrinos and Observational Implications for Neutrino Oscillation”; Proceedings of the Fourth International Conference on Particle Physics Beyond the Standard Model (BEYOND 2003), ed. by H.-V. Klapdor-Kleingrothaus, Springer, 2004, pp.717–728
 - [64] Shin’ichiro Ando and Katsuhiko Sato: “Supernova Relic Neutrinos and Neutrino Oscillation”; Proceedings of the Fourth International Workshop on Neutrino Oscillation and their Origin (NOON 2003), ed. by Y. Suzuki, M. Nakahata, Y. Itow, M. Shiozawa and Y. Obayashi, World Scientific, 2004, pp.57–64
 - [65] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama and Atsushi Taruya: “Evolution of Gravitational Waves from Inflationary Braneworld”, GR17, July 2004, Ireland
 - [66] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama and Atsushi Taruya: “Evolution of gravitational waves in the high-energy regime of brane-world cosmology”, The 14th Workshop on General Relativity and Gravitation, November 2004, Kyoto
 - [67] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Shoichi Yamada and Katsuhiko Sato: Gravitational Radiation From Inhomogeneous Core-Collapse; JGRG, Kyoto (December 2004)
- (国内雑誌)
- ・日経サイエンス
 - [68] 佐藤勝彦:新たな物理学の扉を開く、日経サイエンス (2004) 5 月号
 - [69] 須藤 靖: “背景放射に聴く宇宙の響き” (監訳)、(W.Hu and M.White “The Cosmic Symphony”, Scientific American, February 2004) 日経サイエンス (2004) 5 月号, pp.30–41.
 - [70] 須藤 靖: “大規模構造の進化をたどる” (監訳)、(M.A.Strauss “Reading the Blueprints of Creation”, Scientific American, February 2004) 日経サイエンス (2004) 5 月号, pp.42–50.

- [71] 須藤 靖: “残された謎 宇宙定数の正体を追え” (監訳)、(L.M.Krauss and M.S. Turner “A Cosmic Conundrum”, Scientific American, September 2004) 日経サイエンス (2004) 12 月号, pp.48–56.

・その他

- [72] 佐藤勝彦: 最新宇宙論、ゼット クラブ (増進会出版) 2004 年 12 月号 6 頁
- [73] 佐藤勝彦: アインシュタイン人生最大の不覚とインフレーション、科学 (岩波書店) 2005 年 75 巻 2 号 205
- [74] 佐藤勝彦: インフレーションがもたらす宇宙像、月刊天文ガイド、2005 年 1 月号 14 頁
- [75] 佐藤勝彦: 一般相対性理論が描き出した宇宙像、月刊天文ガイド、2005 年 3 月号 8 頁
- [76] 伊藤直紀、須藤 靖、北山哲: “銀河団をスニャーエフ・ゼルドビッチ効果で見る”、日本物理学会誌 **59** (2004) 6 月号 pp.349–357.
- [77] 須藤 靖: “夜空の向こう - 銀河宇宙から宇宙背景放射へ -”、第 18 回「大学と科学」公開シンポジウム講演収録集 (2004) , pp.50–59.
- [78] 稲田直久、大栗真宗: “大分離角重力レンズクエーサーの発見” 天文月報 7 月号 (2004) 415–424

(学位論文)

- [79] Masamune Oguri: Strong Gravitational Lenses in a Cold Dark Matter Universe (博士論文)
- [80] Kei Kotake: Effect of Rotation and Magnetic Field on the Explosion Mechanism and Gravitational Wave in Core-Collapse Supernovae (博士論文)
- [81] 高橋慶太郎: “Bulk Fields in Braneworld” (博士論文)
- [82] 木下俊一郎: “Gravitational collapse and gravitational wave in the brane-world” (修士論文)
- [83] Tomoya Takiwaki: Magnetohydrodynamical Simulation of Core-Collapse Supernovae (修士論文)
- [84] Norio Narita: A Search for the Atmospheric Absorption in the Transiting Extrasolar Planet HD209458b with Subaru HDS (修士論文)
- [85] S. Matsuura: Baryogenesis and Inhomogeneous Big Bang Nucleosynthesis (修士論文)
- [86] Kazuhiro Yahata: The large-scale structure of SDSS quasars and its cosmological implication (修士論文)

(著書)

- [87] 佐藤勝彦: 宇宙はこうして誕生した (編著)、ウエッジ選書、(株) ウエッジ、2004 年 9 月
- [88] 佐藤勝彦: 宇宙の誕生と未来、第 18 回「大学と科学」公開シンポジウム「ビッグバン宇宙の誕生と未来」講演収録集、佐藤勝彦編著、クバプロ、2005 年 1 月

- [89] 須藤 靖: 一般相対論入門、日本評論社 (2005 年 3 月刊行)

- [90] 米原厚憲: 「最新 宇宙学 - 研究者たちの夢と戦い -」 9 章 宇宙に漂う望遠鏡 - もう一つのレンズと宇宙の蜃気楼 -、(福江 純、栗野 論美 共編)、裳華房 (2004 年 5 月出版)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- ・ 17th International Conference on General Relativity and Gravitation (July 18–24, 2004, RDS convention centre in Dublin, Ireland)
- [91] Atsushi Taruya, Masa-aki Sakagami: Two-body relaxation and quasi-equilibrium state in N-body systems
- [92] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama and Atsushi Taruya: “Evolution of Gravitational Waves from Inflationary Braneworld”
- ・ The IAU Symposium 225 “Impact of Gravitational Lensing on Cosmology”, (Lausanne, 2004 年 7 月)
- [93] Atsunori Yonehara: “Quasar Mesolensing as a probe to substructures around galaxies”,
- [94] Masamune Oguri: “Large-Separation Lensed Quasars in the SDSS”,
- ・ The 14th Workshop on General Relativity and Gravitation (京大, 2004 年 11 月)
- [95] 工藤秀明: “Probing gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer 研究会”
- [96] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama and Atsushi Taruya: “Evolution of gravitational waves in the high-energy regime of brane-world cosmology”
- ・ 14th JGRG (Kyoto, December 2004)
- [97] H. Yoshiguchi and K. Koyama: Quantization of scalar perturbations in brane-world inflation
- [98] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Shoichi Yamada and Katsuhiko Sato: Gravitational Radiation From Inhomogeneous Core-Collapse;
- ・ その他
- [99] Katsuhiko Sato, Hiroyuki Yoshiguchi, Sigehiro Nagataki: Small Scale Anisotropy in Arrival Directions of UHECRs above 1019eV with Modifications by the Galactic Magnetic Field, Cosmic Ray International Seminar “GZK and Surroundings” Catania, June 2005
- [100] Yasushi Suto: Searching for cosmic missing baryons with DIOS, Cosmology lunch seminar on July 13, 2004 at University of Durham

- [101] Yasushi Suto: Locating missing baryons from oxygen line emissions with DIOS, Cosmology seminar on July 19, 2004 at University College London
- [102] Yasushi Suto: Searching for the atmospheric signature of transiting extrasolar planets, Planetary science seminar on July 23, 2004 at University College London
- [103] Yasushi Suto: Searching for the atmospheric signature of transiting extrasolar planets, Institute of Theoretical Astronomy colloquium on July 28, 2004 at University of Heidelberg
- [104] 工藤秀明: "Black holes with and without wrapped compactification" 研究会:The 9th Asia Pacific Physics Conference -9 th APPC (2004 年 10 月 25, ベトナム (ハノイ))
- [105] K. Koyama: Cosmological perturbations in Randall-Sundrum brane worlds, Workshop on string cosmology, France, 2004 年 6 月
- [106] K. Koyama: The primordial density perturbations in the Randall-Sundrum brane world, UK cosmology workshop, 2004 年 9 月
- [107] K. Koyama: The primordial density perturbations in the Randall-Sundrum brane world, COSMO-04 International Workshop on Particle Physics and the Early Universe, 2004 年 9 月
- [108] Atsunori Yonehara: "On the origin of color anomaly between multiple images of lensed quasars," 25 Years After the Discovery: Some Current Topics on Lensed QSOs, Santander (2004 年 12 月)
- [109] Masamune Oguri: "Lensed Quasars in the SDSS", IAS Workshop on Gravitational Lensing, Princeton (2004 年 11 月)
- [110] Masamune Oguri: "SDSS J1004+4112: The Largest Separation Gravitationally Lensed Quasar", 3rd Oxford-Princeton Workshop on Astrophysics and Cosmology, Princeton (2005 年 3 月)
- [111] Kei Kotake: "Magnetic Fields and Jets in Core-Collapse Supernovae": International Workshop on Magnetohydrodynamic (MHD) Accretion Flows and Jets, Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP), Kyoto 2005, January
- [112] Kei Kotake: "Gravitational Radiation from Magnetorotational Core-Collapse of Massive Stars" General Relativity and Gravity, YITP, Kyoto, 2004, October
- [113] Shin'ichiro Ando: "Cosmic star formation history and supernova relic neutrinos"; DESY Theory Workshop on Particle Cosmology (DESY, Hamburg, Germany; September 2004)
- [114] Yasuhiro Ohta: The Rossiter effect and analytic radial velocity curves for transiting extrasolar planetary systems, Post-Nishinomiya-Yukawa Symposium, Yukawa Institute for Theoretical Physics, November, 2004
- [115] H. Yoshiguchi and K. Koyama: Bulk gravitational field and dark radiation on the brane in dilatonic brane world; String and Brane Cosmology, Paris (June 2004)
- [116] Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Shoichi Yamada and Katsuhiko Sato: Magneto-driven Shock Waves in Core-Collapse Supernova; MHD workshop 2005, Kyoto (January 2005)
- 招待講演
- The 1st KIAS international workshop on cosmology and structure formation, (October, 2004, Korea Institute for Advanced Study)
- [117] Yasushi Suto: Highlights of Recent SDSS Sciences by JPG,
- [118] Yasushi Suto: Pursuing signatures of the cosmological light-cone effect or something else
- [119] Kazuhiro Yahata: Baryonic Signature in the Large-scale Clustering of SDSS Quasars
- その他
- [120] Katsuhiko Sato : BasicScience Research in The University of Tokyo, UT Forum 2004: Basic Science Session (August, 2004)
- [121] Katsuhiko Sato : Exploring the Early Universe through Particle Physics, UT Forum 2004: Basic Science Session, August, 2004, UT Forum 2004: Basic Science Session (August, 2004)
- [122] Yasushi Suto: Tracing the bright and dark sides of the universe with X-ray observations, International conference on cosmic rays and magnetic fields in large scale structure on August 17, 2004 at Pusan National University
- [123] Yasushi Suto: Spectroscopic search for atmospheric signature of transiting extrasolar planets, post Nishinomiya-Yukawa symposium "Origins: from first objects to extra-solar planets" on November 5, 2004 at Yukawa Institute for Theoretical Physics
- [124] Atsushi Taruya: Quasi-equilibrium evolution in self-gravitating N-body systems, International workshop on Complexity and Nonextensivity, on March 14-18, 2005 at Yukawa Institute for Theoretical Physics in Kyoto, Japan
- [125] Shinji Mukohyama: "Ghost condensation", Tamura Symposium on Particle and Astrophysical Cosmology, Austin, TX, USA, November, 2004
- [126] Hideaki Kudoh; Black holes with extra dimensions: the black-hole black-string transition;Grand Challenge Problems in Computational Astrophysics : Relativistic Astrophysics (USA,UCLA;May,2005)

- [127] Masamune Oguri: “Strong Lenses in the SDSS” SDSS collaboration Meeting 2004 fall, Pittsburgh (2004 年 10 月)
- [128] Shin’ichiro Ando: “Relic supernova neutrino background: Current status and prospects of future detectors”; 3rd BNL/UCLA Workshop on Multipurpose Detectors for Proton Decay and VLBL Neutrino Physics (UCLA; February, 2005)
- [129] 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)
- (国内会議)
- 一般講演
- ・日本物理学会 2004 年秋季大会 (高知大学、2004 年 9 月)
- [130] 樽家 篤史, 工藤秀明, 姫本宣朗, 平松尚志: Probing the anisotropy of gravitational-wave background with space interferometer
- [131] 工藤秀明, 栗田泰生: Thermodynamics, uniqueness of slicings and stability of brane-black objects
- [132] 固武 慶, 山田章一, 佐藤勝彦: 自転超新星におけるニュートリノ起源の重力波
- [133] 吉口 寛之, 長滝 重博, 佐藤 勝彦: 超高エネルギー宇宙線到来方向分布における二点相関の統計的有意性
- [134] 吉口 寛之, 小山和哉: ブレーンワールドにおける宇宙論的摂動の量子化
- [135] 仙洞田雄一, 長滝重博, 佐藤勝彦: Randall-Sundrum 宇宙論における密度揺らぎ起源の始原的ブラックホール質量関数
- [136] 平松尚志, 小山和哉, 樽家篤史: “Cosmic Gravitational Wave Background from Inflationary Braneworld”
- [137] 木下俊一郎, 工藤秀明, 仙洞田雄一, 佐藤勝彦: 高次元時空における重力波生成
- [138] 木下俊一郎, 仙洞田雄一, 高橋慶太郎: 相対論的アウトフローにおける因果律
- [139] 滝脇知也, 固武慶, 長滝重博, 佐藤勝彦: 強磁場超新星からの重力波
- [140] 松浦俊司, 藤本信一郎, 橋本正章, 佐藤勝彦: 非一様バリオン数生成とビッグバン重元素合成
- ・日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス、2005 年 3 月)
- [141] 樽家 篤史, 工藤秀明, 姫本宣朗, 平松尚志: Probing anisotropies of gravitational-wave backgrounds with a space interferometer 2
- [142] 向山信治: “Ghost Condensation and Gravity in Higgs Phase”
- [143] 工藤秀明, Toby Wiseman: Connecting black holes and black strings
- [144] 高橋慶太郎: “不安定 D ブレーンと 3 パラメータ解”
- [145] 安藤 真一郎: 「崩壊する超新星ニュートリノ」
- [146] 仙洞田雄一, 木下俊一郎, 工藤秀明: DGP モデルにおけるブレーン上のブラックホール解構成へのアプローチ
- [147] 平松尚志, 小山和哉, 樽家篤史: “Evolution of gravitational waves in the high-energy regime of brane-world”
- [148] 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動的プロセスによる Kaluza-Klein モード
- [149] 松浦俊司, 藤本信一郎, 西村直, 橋本正章, 佐藤勝彦: 非一様バリオン数生成と重元素合成
- [150] 園田英貴, 渡邊元太郎, 佐藤勝彦, 泰岡顕治, 戎崎俊一: QMD シミュレーションによる原子核パスタの相図のモデル依存性
- [151] 渡邊元太郎, 丸山敏毅, 園田英貴, 佐藤勝彦, 泰岡顕治, 戎崎俊一: 原子核パスタ相の動的移り変わり
- [152] 高見 一, 吉口寛之, 長滝重博, 佐藤勝彦: 大規模構造中における超高エネルギー宇宙線の伝搬
- ・日本天文学会 2005 年秋季年会 (岩手大学、2004 年 9 月)
- [153] 清水 守, 北山 哲, 佐々木 伸, 須藤 靖: 階層的宇宙における銀河団ガスの非重力的加熱
- [154] 吉川 耕司: 宇宙の大規模構造形成におけるクーリングフロー問題
- [155] 米原厚憲: “重力レンズ方程式の妥当性”
- [156] 固武 慶, 山田章一, 佐藤勝彦: 強磁場超新星における非対称ニュートリノ放射とパルサーキック
- [157] 高橋慶太郎: “An analytic model of superclusters”
- [158] 安藤 真一郎: 「強磁場中での弱い相互作用とパルサーの固有速度」
- [159] 安藤 真一郎: 「連成中性子星合体に対するガンマ線バースト観測からの示唆」
- [160] 太田泰弘: Rossiter 効果を考慮した太陽系外惑星系の視線速度曲線の解析的表式
- [161] 滝脇知也, 固武慶, 長滝重博, 佐藤勝彦: 強磁場超新星における衝撃波
- [162] 成田 憲保: “すばる /HDS による系外惑星 HD209458b の精密分光観測 II”
- [163] 矢幡 和浩: SDSS クエーサーで探る宇宙の大規模構造
- ・日本天文学会 2005 年春季年会 (明星大学、2005 年 3 月)
- [164] 佐藤勝彦: 宇宙の誕生、宇宙の未来、天文学会公開講演会
- [165] 樽家 篤史, 工藤秀明: スペース干渉計による宇宙背景重力波の全天マッピング
- [166] 米原厚憲: “狭輝線アークから探る放射領域のサイズと銀河密度のプロファイル”

- [167] 固武 慶、山田 章一、佐藤勝彦: “非対称超新星爆発と相対論”
- [168] 高橋慶太郎: “Seed magnetic field generation by Biermann mechanism in primordial supernova remnant”
- [169] 安藤 真一郎, John F. Beacom: 「超新星からの高エネルギーニュートリノ」
- [170] 滝脇知也, 固武慶, 山田章一, 佐藤勝彦: 強磁場超新星の非対称爆発とパルサーキック
- [171] 成田 憲保: “系外惑星系 TrES-1 における Rossiter 効果の検出可能性とその観測意義 “
- [172] 松浦俊司, 藤本信一郎, 西村直, 橋本正章, 佐藤勝彦: 非一様バリオン数生成と重元素合成
- [173] 矢幡 和浩: 及びクエーサーから探るダスト吸収の空間分布
- [174] 河原 創: GRB を背景光源としたダークバリオン吸収線系: DIOS による観測可能性
- [175] 高見 一、吉口寛之、長滝重博、佐藤勝彦: 大規模構造における超高エネルギー宇宙線の伝搬
- ・ RESCEU 研究会 (油壺、2004 年 8 月)
- [176] 固武 慶: 自転、磁場超新星からのニュートリノ及び重力波
- [177] 木下俊一郎, 工藤秀明, 仙洞田雄一, 佐藤勝彦: 高次元時空における重力波生成
- ・ RESCEU 研究会 (館山、2005 年 2 月)
- [178] 向山信治: “Ghost Condensation and Gravity in Higgs Phase”
- [179] 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動的プロセスによる Kaluza-Klein モード,
- [180] 滝脇知也, 固武慶, 山田章一, 佐藤勝彦: 非一様重力崩壊の系統的シミュレーション; 宇宙における時空、物質、構造の進化
- ・ DIOS 研究会 (強羅静雲荘、2004 年 11 月)
- [181] 須藤 靖: 宇宙論的ダークバリオン探索の意義
- [182] 河原 創: Photoionization and WHIM
- ・ 特定領域研究「太陽系外惑星科学の展開」研究会「太陽系外惑星の新展開」(国立天文台、2005 年 1 月)
- [183] 太田泰弘: 太陽系外惑星系における Rossiter 効果の解析的表式
- [184] 成田 憲保: “系外惑星系 TrES-1 における Rossiter 効果の検出可能性とその観測意義 “
- ・ 研究会「重力崩壊型超新星を舞台とする様々な高エネルギー物理現象」(東京大学、2005 年 2 月 2-4 日)
- [185] 佐藤勝彦: 超新星ニュートリノとニュートリノ振動
- [186] 固武 慶: “Asymmetric Supernovae”
- [187] 滝脇知也, 固武慶, 山田章一, 佐藤勝彦: 非一様重力崩壊における重力波
- ・ 第 4 回 TAMA シンポジウム・重力波物理冬の学校 (大阪市立大学、2005 年 2 月 16-19 日)
- [188] 平松尚志: “Evolution of gravitational waves in the high-energy regime of brane-world cosmology”
- [189] 平松尚志: “ガンマ線バースト起源の背景重力波”
- ・ その他
- [190] 佐藤勝彦: 宇宙はいかににはじまったか?、日本大学理工学部物理学科講演、軽井沢 5 月 17 日
- [191] 佐藤勝彦: 重力崩壊型超新星爆発: 一素粒子・原子核課程と流体の統合シミュレーション、筑波大学計算科学センター: 素粒子過程と流体の統合シミュレーション研究会、2004 年 6 月 11 日
- [192] 佐藤勝彦: 宇宙は我々の宇宙だけではなく、異能の会、東京大学情報学環、6 月 14 日
- [193] 佐藤勝彦: 宇宙の誕生、栃木県立石橋高等学校創立記念講演、2004 年 11 月 18 日
- [194] 佐藤勝彦: 宇宙の誕生と未来、理学部公開講演会 2004 年 12 月 3 日
- [195] 須藤 靖: 広視野 X 線分光小型衛星計画 DIOS - Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor -, 第 5 回宇宙科学シンポジウム、宇宙科学研究所 (2005 年 1 月 7 日)
- [196] Shinji Mukohyama: “Ghost Condensation and Gravity in Higgs Phase”; The 14th Workshop on General Relativity and Gravitation, November 29 - December 3, 2004, Kyoto
- [197] 向山信治: “Ghost Condensation and Gravity in Higgs Phase”, 京都大学基礎物理学研究所 研究会「場の量子論の基礎的諸問題と応用」(2004 年 12 月 19 日~21 日)
- [198] 吉川耕司: 小型専用 X 線ミッションによるダークバリオン探索: 「次世代天文学 - 大型装置とサイエンス -」シンポジウム 東京大学
- [199] 固武 慶: “Gravitational Waves from Core-Collapse Supernovae: Views on Recent Research Trends in 2004” 「次世代天文学 - 大型観測装置とサイエンス -」シンポジウム 国立天文台研究会 (東京大学 2004 年 12 月)
- [200] 滝脇知也, 固武慶, 山田章一, 佐藤勝彦: MHD Simulations of Collapsar; GRB 2004 Kyoto (December 2004)
- 招待講演
- ・ 天文・天体物理 若手の会 夏の学校 (国立オリンピック記念青少年総合センター、2004 年 8 月 14-18 日)
- [201] 佐藤勝彦: 研究者として成功するには?、天文学の舞台裏分科会
- [202] 須藤 靖: 天文学と宇宙物理学は違うのか?、事務局企画「天文学と物理学の接点」
- [203] 樽家 篤史: “宇宙背景重力波 ~ Beyond the Dawn of the Universe ~”, 相対論・宇宙論分科会

- ・第4回 TAMA シンポジウム (大阪市立大学 学術情報センター、2005年2月16-19日)
- [204] 樽家 篤史: “TDI 入門”
- [205] 固武 慶: ”重力波で探る超新星の物理”
 - ・その他
- [206] 須藤 靖: 宇宙の果てから太陽系外惑星へ、日本物理学会高知市民科学講演会 (2004年9月27日)
- [207] 須藤 靖: 宇宙のダークエネルギー、高エネルギー天文学研究会、東京都立大学 (2004年10月1日)
- [208] 須藤 靖: 観測的宇宙論の進化論、第5回森羅万象学校 (2005年3月9日~10日)
- [209] 須藤 靖: 銀河および銀河団を用いた観測的宇宙論の研究第9回 日本天文学会林忠四郎賞 受賞講演、明星大学 (2005年3月29日)
- [210] Shinji Mukohyama, “Cosmology and Black Holes with the Ghost Condensate”, Windows to new paradigm in particle physics, Sendai, February, 2005
- [211] 米原厚憲: ”重力レンズ現象による構造診断” 日本物理学会 2004年 秋季大会 宇宙線分科会 特別講演
- [212] 高橋慶太郎: 「見えてきた宇宙の始まり」、天塾@国立天文台
- [213] 高橋慶太郎: 「見えてきた宇宙の始まり」、ユニバーサイブショー@科学技術館
- [214] 固武 慶: ”超新星からの重力波一爆発メカニズムの謎に迫りながら” 文部科学省科学研究費補助金・特定領域研究 ”重力波研究の新しい展開” 「技術検討会」 (東京大学 坪野研 2004年4月)
 - (集中講義)
- [215] 佐藤勝彦: 明星大学理工学部 7月13 - 15日
 - (セミナー)
- [216] 佐藤勝彦: Explosion Mechanism of Collapse-Driven Supernovae -Effects of rotation and magnetic Field-, Nordita, Copenhagen, June, 2004.
- [217] 佐藤勝彦: Explosion Mechanism of Collapse-Driven Supernovae -Effects of rotation and magnetic Field-, Stockholm University, June, 2004,
- [218] 須藤 靖: ものの大きさ~素粒子と宇宙~, 春日部共栄中学校 講演会 (2004年5月29日)
- [219] 須藤 靖: 太陽系外惑星の分光観測と transiting planet HD209458b、国立天文台 HDS セミナー (2004年6月17日)
- [220] 須藤 靖: 太陽系外惑星大気の分光観測、東京大学天文センター談話会 (2004年9月30日)
- [221] 須藤 靖: 太陽系外惑星探査: 過去の10年 今後の10年、東京大学物理学教室談話会 (2004年11月19日)
- [222] 須藤 靖: 多重宇宙と人間原理、KEK 加速器系セミナー 新聞記者勉強会 (2005年2月16日)
- [223] 樽家 篤史: “Antonov problem and quasi-equilibrium state in self-gravitating N-body systems”, 東京大学工学部物理工学科 宮下・藤堂・伊藤研合同セミナー (2004年5月17日)
- [224] 樽家 篤史: “Probing anisotropies of gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer”, 東京工業大学 理学部物理学科細谷・白水研セミナー (2004年11月26日)
- [225] 樽家 篤史: “宇宙背景重力波 ~ sources & detection ~”, 京都大学人間環境学研究科宇宙論グループセミナー (2005年3月5日)
- [226] 向山信治: “Ghost Condensation and Gravity in Higgs Phase”, 京都大学基礎物理学研究所 セミナー (2004年11月26日)
- [227] 向山信治: “Ghost Condensation and Gravity in Higgs Phase”, 理研 Theory Seminar (2005年1月14日)
- [228] 向山信治: “Cosmology and Black Holes with the Ghost Condensate”, University of Victoria, Departmental Seminar (2005年1月20日)
- [229] 向山信治: “Cosmology and Black Holes with the Ghost Condensate”, University of Alberta, Gravity Seminar (2005年1月21日)
- [230] 向山信治: “Cosmology and Black Holes with the Ghost Condensate”, 大阪大学素粒子理論研究室 セミナー (2005年2月22日)
- [231] 向山信治: “Cosmology and Black Holes with the Ghost Condensate”, 東京大学宇宙線研究所 セミナー (2005年3月1日)
- [232] 工藤秀明; Blackholes with extra dimension、KIAS セミナ (2004年6月1日, KIAS, 韓国)
- [233] 工藤秀明; Kaluza-Klein black holes、東大 駒場 GR セミナー (2004年7月)
- [234] 工藤秀明; Kaluza-Klein black holes、大阪市大 コロキウム (2004年6月)
- [235] 工藤秀明; Probing anisotropies of GW backgrounds with a space-based interferometer、早稲田大学 コロキウム (2004年11月)
- [236] 工藤秀明; ”Connecting black holes and black strings” バルセロナ大学セミナ (2005年2月17日, スペイン)
- [237] 小山 和哉: ”Self-accelerating universe from brane worlds”, Institut d'Astrophysique de Paris セミナー (2005年2月17日)
- [238] 小山 和哉: ”Self-accelerating universe from brane worlds”, 東京工業大学 コロキウム (2005年3月17日)
- [239] 吉川耕司: Hunt for the cosmic missing baryon through its soft X-ray emission: 京都大学 基礎物理学研究所 2004年10月21日
- [240] 米原厚憲: ”Gravitational lens studies of galactic structures through multiple quasars” 東京大学 天文学教室 セミナー (2004年7月)

- [241] 米原厚憲: “多重像を持つクエーサーを利用した重力レンズ現象による銀河の構造の研究”、京都大学 基礎物理学研究所 セミナー (2005 年 2 月)
- [242] 大栗真宗: “Strong Gravitational Lenses in a Cold Dark Matter Universe” 東京大学教養学部地球宇宙部会 セミナー (2004 年 6 月)
- [243] 大栗真宗: “大分離角重力レンズクエーサー: 理論と観測” 東京工業大学宇宙物理学理論グループ コロキウム (2004 年 9 月)
- [244] 大栗真宗: “Substructures of Dark Matter Halos” Wunch, Department of Astrophysical Sciences, Princeton University (2004 年 11 月)
- [245] 固武 慶: “Asymmetric Supernovae and Their Astrophysical Relevance”, 東大宇宙線研究所セミナー (2005 年 2 月)
- [246] 固武 慶: 超新星からの重力波、東工大宇宙物理学理論グループコロキウム (2004 年 10 月)
- [247] 固武 慶: 自転、磁場超新星におけるニュートリノ及び重力波、慶應義塾大学日吉物理学教室談話会 (2004 年 7 月)
- [248] 高橋慶太郎, “Bulk Fields in Braneworld”, @東京大学駒場キャンパス
- [249] 高橋慶太郎, “Origins of Cosmic Magnetic Fields”, @東京工業大学
- [250] 安藤 真一郎: “Relic Neutrino Background from Cosmological Supernovae”; 早稲田大学 前田・山田研究室 (2004 年 10 月 29 日)
- [251] 安藤 真一郎: “Revealing the Supernova Gamma-Ray Burst Connection with TeV Neutrinos”; Theoretical Astrophysics Group, Ohio State University (2005 年 2 月 22 日)
- [252] 安藤 真一郎: “Neutrino Probes of Extragalactic Supernovae”; Astrophysics Seminar, University of California, Irvine (2005 年 3 月 8 日)
- [253] 安藤 真一郎: “Neutrino Probes of Extragalactic Supernovae”; Theoretical Astrophysics Group, Fermi National Accelerator Laboratory (2005 年 3 月 14 日)
- [254] 安藤 真一郎: “Neutrino Probes of Extragalactic Supernovae”; Astroparticle Physics Group, Max-Planck-Institut für Physik (2005 年 4 月 4 日)
- [255] 平松尚志: “インフレーション起源の背景重力波による余剰次元の探求”, 東京大学, 重力波グループ技術討論会 (2004 年 4 月 22 日)

5.2 村尾研究室

本研究室では、物理学の中でも最も新しい研究分野の一つである量子情報の理論的研究を行っている。量子情報とは、0と1からなる2進数の「ビット」を基本単位とするような古典力学的な状態で表される従来の情報（古典的情報）に対して、0と1のみならず0と1の任意の重ね合わせ状態を取ることができるような量子力学的な状態で表される情報を指し、量子2準位系の状態で記述される「量子ビット (qubit)」を基本単位とする。量子情報を用いると古典情報とはクラスの違う情報処理が可能となるため、古典情報処理の限界を超えるブレークスルーの候補として注目を集めている。

量子情報を活用したシステムとしては、多量子ビットの重ね合わせ状態を利用した量子コンピューティング（因数分解アルゴリズム・データベースサーチアルゴリズム）、未知量子ビット状態の測定における不確定性を利用した量子暗号、2量子ビットの重ね合わせ状態に現われる非局所的量子相関である「エンタングルメント (entanglement)」を利用した量子テレポーションなどが提案されている。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た初めて、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、村尾美緒助教授と Damian Markham 助手のスタッフ、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海老澤竜氏、大畑琢哉氏、佐々木大輔氏のメンバーで、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 無限準位系のエンタングルメント

スピン系等の有限準位系に対して、ボゾン系等の無限準位系を用いた量子情報処理を考えることもできる。特に、ボゾンである光子の連続変数状態では、共役変数のスクイーズド状態から作られる無限準位系のエンタングルメントを用いた量子テレポーションの実験にも既に成功しており、実験操作性の良さから量子情報通信の鍵となる系である。無限準位系はある意味で有限多準位系の一般化とも考えることができ、量子情報の基盤理論の構築には、無限準位系をもふくめたエンタングルメントの考察が必要不可欠となる。

しかしながら、無限準位系におけるエンタングルメントの性質を解析する場合には無限大の取り扱いについて困難な問題が生じるため未解明な点が多く、無限次元系を用いた量子情報処理のポテンシャルの全貌が未だ明らかになっていない。そこで我々は、無限準位系を用いた新たな量子情報処理システムを提案することを目指して、次のような研究を進めた。

無限準位系に特有なエンタングルメントの性質の発見

従来、エネルギーが有限で有限情報のやりとりしか含まないような物理的に可能な条件下においては、無限準位系においても有限準位系のエンタングルメントと性質には大きな違いがないと考えられてきた。我々は、有限・無限の次元性の違いによる量子物理

の基盤的なエンタングルメント構造（全順序・半順序構造の違い）に相違が生じることを示した。更に、無限準位系においては、物理的に可能な状況下においても相互に変換不可能な状態が無限に存在することを示した。この予想外の性質は、数学的性質の違いによる量子物理の基盤的な構造の違いを示し、量子情報処理への応用も期待されている。この研究は、国立情報学研究所の松本啓史助教授との共同研究である。

有限準位系から無限準位系への遷移

どのような場合に、多準位スピン系が準位の増加に伴ってボソンの無限準位系に近づくかということを群論における縮約を用いて考察した。ホモダイン測定などの無限準位ボソン系においてよく知られている演算に対応する、多準位スピン系の測定や演算を解析することによって、多準位スピン系（有限準位系）から無限準位系への遷移によって演算の性質がどのように変化するかを調べている。

5.2.2 LOCC の下での量子系の解析

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 のもとでの量子系の解析を行った。

混合状態を用いた非対称量子情報分配

多量子ビットエンタングルメントを用いて 2 量子ビットに符号化した量子情報を、LOCC の演算のみを用いて量子情報の抽出が可能であるための必要十分条件を、作用素代数的な方法を用いて求めた。この条件を用いて、どちらか一方には局所的操作と古典的通信のみで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、というような量子情報の二者間での非対称な共有方法を見出した。そして、このような遠隔量子情報抽出を行うために測定の満たすべき条件を求めることにより、異なった基底を用いて符号化した 2 量子ビット状態の混合状態での非対称量子情報分配を提案した。この研究は、東京大学大学院数理科学研究科およびマルセイユ Centre de Physique Théorique の緒方芳子博士との共同研究で

ある。

LOCC 状態複製可能性と LOCC 識別可能性の関係

状態集合全体に対する量子操作を考える場合には、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、素数次元の最大エンタングル状態の集合に対して、(決定論的に) LOCC 状態複製が可能な状態集合であることの必要十分条件を求めた。そして、この集合が、同時 Schmidt 対角化可能な正準 Bell 状態基底の部分集合であることを証明した。このことにより、LOCC 状態複製は LOCC 状態識別よりも困難であることを示した。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。

LOCC 状態識別とエンタングルメント量の関係

量子計算や量子通信は量子情報の演算や操作を扱うものであるが、情報処理の最終段階 (出力過程) においては、我々が扱うことのできる古典情報に変換する必要がある。出力過程は、量子情報から古典情報への変換過程となっており、量子状態に符号化された古典情報をいかにうまく引き出すか、すなわち、異なる古典情報が符号化された量子状態をいかに識別するか、という問題が非常に重要となる。この状態識別のタスクを LOCC で行うことができる場合はどのような場合であるかを解析する LOCC 状態識別可能性の研究は、近年盛んに行われてきたが、多くの研究が特殊な場合にしか成り立たないプロトコルの発見に苦悶して、一般的な識別可能性の限界が得られていなかった。

我々は LOCC 変換よりひとつ大きな量子操作の集合である Separable 変換に着目し、状態のエンタングルメント量のみで定まる識別性の限界を求めた。そして、一般的な多粒子状態の空間において、Global robustness of entanglement、Relative entropy of entanglement や Geometric measure of entanglement などの幾何学的なエンタングルメント量が LOCC で識別可能な状態の数に上限を与えることを証明した。また、N 粒子の W 状態が N 粒子の GHZ 状態よりも LOCC 状態識別の視点では非局所性が高いことを示した。我々の研究成果は、これまでにほとんど知られていなかった、操作的な観点からの多粒子エン

タングルメントの定量化を与えるものであり、量子暗号等への応用が期待される。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 Shashank Virmani 博士との共同研究である。

5.2.3 量子情報処理への応用研究

量子情報のための量子鍵プロトコル

量子鍵配布に代表される従来の量子暗号のプロトコルは、量子状態を用いることで古典的な暗号鍵を配布することにより、古典情報の安全な通信を可能とするものであった。一方、量子情報科学技術が進めば、量子情報そのものの安全な通信のために「量子情報のための暗号」が必要となる。そこで我々は、量子暗号の新しい方向性として、エンタングルメントを量子情報のための暗号鍵として用いる「量子鍵」の概念を提唱してきた。

今年度は、混合状態の量子鍵を考察することにより、さらに安全性を高めた量子鍵プロトコルを提案した。このプロトコルの安全性は、局所操作と古典通信による分散した量子情報の遠隔抽出に対応する多体間テレポーテーションのモデルを考察することで評価することが可能となった。この研究は、東京大学大学院数理科学研究科およびマルセイユ Centre de Physique Théorique の緒方芳子博士との共同研究である。

一方向量子計算とグラフ状態

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ず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ユニバーサル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、グラフとグラフ状態が計算し得る量子演算との関連について考察し、対応するグラフ状態がユニタリー演算を表すためのグラフの必要条件を求めた。また、この結果を用いて、量子暗号への応用や、量子計算の回路モデルとの相違についての研究を進めている。この研究は、英国オックスフォード大学の Elham Kashefi 博士、フランス CNS の Vincent Danos 博士との共同研究である。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Owari Masaki, Keiji Matsumoto and Mio Murao, *Entanglement convertibility for infinite dimensional pure bipartite states*, Phys. Rev. A **70**, R050301 (2004)
- [2] D. Markham, M. Murao, V. Vedral, *Entanglement Generation from Thermal Spin States via Unitary Beam Splitters*, Phys. Rev. A **70**, 062312 (2004)

(国内雑誌)

- [3] 村尾美緒, エンタングルメント-量子の世界のみちしるべ, 数理科学 2 月号, サイエンス社 (2005)

(学位論文)

- [4] 海老沢 竜, *Cryptographic protocols for quantum messages*, (修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [5] Yoshiko Ogata, Ryu Ebisawa and Mio Murao, *Asymmetric quantum information sharing between two parties*, a poster presentation at The 7-th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing, July 2004 (Glasgow, UK)
- [6] Masaki Owari, Kenji Matsumoto and Mio Murao, *Entanglement convertibility for infinite-dimensional pure bipartite states*, a poster presentation at ERATO conference on Quantum Information Science, August 2004 (Tokyo, Japan).
- [7] Yoshiko Ogata, Ryu Ebisawa and Mio Murao, *Asymmetric quantum information sharing between two parties*, a poster presentation at ERATO conference on Quantum Information Science, August 2004 (Tokyo, Japan)
- [8] Masaki Owari, Masahito Hayashi, *Local copying of orthogonal maximally entangled states and its relationship to local discrimination*, an oral presentation at Quantum statistics - Quantum Measurement Estimation and Related Topics, Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences, November 2004, (Cambridge UK)
- [9] Mio Murao, *Quantum key for quantum messages*, a poster presentation at JAFoS (Japan-American Frontier of Science) meeting, December 2004 (Irvine, USA)

(国内会議)

一般講演

- [10] 尾張正樹, 松本啓史, 村尾美緒, 無限次元空間におけるエンタングルメントの変換性について, 沖縄量子情報未来テーマ開拓研究会, 2004 年 8 月, 沖縄

- [11] 尾張正樹, 林正人, 素数次元における最大エンタングル状態の *LOCC* コピーについて, 第 11 回量子情報技術研究会 (QIT11), 2004 年 12 月 京都
- [12] 尾張正樹, 林正人, *Local copying of othogonal maximally entangled states and its relationship to local discrimination*, JST 量子情報シンポジウム (第一回公開シンポジウム 2004 年 12 月, 東京

招待講演

- [13] 村尾美緒, エンタングルメントと量子鍵,JST 量子情報処理シンポジウム (第一回公開シンポジウム) 2004 年 12 月, 東京

(集中講義・セミナー)

- [14] M. Owari, *Entanglement convertibility for infinite dimensional pure bipartite states*, a poster presentation at The Fourth Canadian Summer School on Quantum Information, 2004 年 6 月 カナダ
- [15] R. Ebisawa, *Asymmetric information sharing between two parties*, poster presentation at The Fourth Canadian Summer School on Quantum Information, 2004 年 6 月 カナダ
- [16] D. Markham, *Contraction - the transition to infinity*, ウィーン大学, 2005 年 11 月 オーストリア
- [17] D. Markham, *Entanglement Bounds on Local State Discrimination*, 国立情報学研究所 Qulink school, 2005 年 2 月 東京

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な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。

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。

本年度は、1997年度から世界をリードして開発してきた非共直線型光パラメトリック増幅器 (NOPA) のアイドラー光の絶対位相制御を扱った。アイドラー光の 800nm 付近のスペクトル成分と、NOPA の機構で副次的に発生したアイドラー光の第二高調波の同じく 800nm 付近のスペクトル成分を干渉させるこ

とにより、「f-to-2f スペクトル干渉」を行う。ここで得られたスペクトル干渉パターンを元に、フーリエ変換フィルタ法によりスペクトル位相を再構成する。その結果を、NOPA のポンプ光の経路に挿入されたフッ化カルシウム板の角度を制御する回転ステージにフィードバックすると、フッ化カルシウムの物質分散によりポンプ光の絶対位相は影響を受ける。更にその変化が NOPA においてアイドラー光に受け渡されることで、その差周波であるアイドラー光の絶対位相制御は位相ゆらぎの相殺効果により実現されている。以上の機構を用いた系に関して、絶対位相の長時間安定性が評価され、引き続いて行われるべき、絶対位相に依存した物理現象を解明する実験に堪えることが示された。現在は、この装置を用い、光ポーリング過程の絶対位相依存性についての実験研究をおこなっている。

6.1.2 超広帯域光の発生

チタンサファイアレーザーの第二高調波、第三高調波を励起光源を励起光源とする非共直線型光パラメトリック増幅器により、より広帯域なパラメトリック光を発生し、それをパルス圧縮する事により更に短いパルス光を発生する試みを行っている。

6.1.3 超高速分光

オリゴチオフェン

チオフェンのオリゴマー（縮合体）は、一次元共役電子系としてその緩和過程が基礎的な物理の観点から興味深いだけでなく、最近では光分子デバイスの可能性が示唆され、非常に多くの研究がなされる様になってきた。しかしながらその興味有る線形・非線形型光学特性を発現する機構は未だ明らかにされていない。本研究では特にその動特性について、明らかにするため、世界最短可視光パルスレーザー (NOPA) を用いて励起状態の超高速緩和過程を研究した。試料分子としては、オリゴチオフェン 13 量体を取り上げサブ 5 フェムト秒時間分解超高速吸収分光を行った。1ps 以内の高速な動的トークスシフトを観測するとともに、過渡吸収変化スペクトルの振動成分をフランク・コンドン重なりに基づく基底状態、励起状態の振動波束のシミュレーションにより再現することができた。その結果観測した分子振動による電子遷移スペクトルとその強度の変調の材料が解明された。

アゾベンゼン

アゾベンゼン及びその置換体は、色素として古くから使用されてきた典型的な色素としてのみならず、最近では、レリーフホログラム、光メモリー、分子デバイスなど応用の面から多くの研究者が研究してい

る。光デバイス関連の国際会議では、丸一日のセッションが開かれる程、広く研究されている系である。アゾベンゼン誘導体として最もよく研究されている。Disperse Red 1(DR1) において二次元過渡吸収変化データを Singular Value Decomposition (SVD) 法により解析し、三種の過渡状態のスペクトル及び緩和時間を決定した。また過渡吸収変化スペクトルにおける分子振動による変調はその瞬時周波数が周期的に変調を受けている可能性があり、アゾ色素における異性化過程が、 $n-\pi^*$ 励起の場合には反転過程により、 $\pi-\pi^*$ 励起の場合には回転過程によるという従来から提案されていた単純なモデルでは説明出来ないことを示唆し、これに代わる新しいモデルを提案した。

擬イソシアニン

高濃度などの条件下で、分子会合体の一種である J 会合体を形成することで知られる、擬イソシアニン (PIC) J 会合体の超高速時間分解分光を行った。試料形態は数十 μm 以下の薄膜であり、100 $^{\circ}\text{C}$ 程度に熱した精製水に PIC と、ポリビニルアルコール (PVA) をマトリックスとして溶かし、回転しているカバーガラス板上に垂らしてスピンコーティング法によって乾燥させ作成した。光源は NOPA により 500-750nm まで広帯域に増幅したサブ 5 フェムト秒パルスを用いており、ピーク波長 575nm の J バンドを含む、共鳴励起となっている。また、検出系としては、128 チャンネルの多チャンネルロックイン検出器を用いて、高い SN の効率的な検出を行った。

実験結果として、電子-格子相互作用が小さいといわれてきた PIC においても、ラマン散乱の結果と一致するモードを含む、およそ 10 個の振動モードを検出した。振動振幅とともに振動位相も計算し、位相のプロープ波長依存性を明らかにした。これは励起子系の励起状態における振動のダイナミクスを探る有用な手がかりである。また、振動振幅に実時間の吸収変化スペクトルをフィットすることで、各モードの遷移双極子モーメントの変化分を、定量的に見積もった。この量を説明するために、基底状態のクリスタルシフトや分子の会合形態、分子間の距離・角度の分子振動による変調などを考慮に入れたモデルにより解析している。また、それらから分子振動による変調量を定量的に算出した。

ポルフィリン誘導体

ポルフィリン誘導体は生体内で重要な役割を担う物質であり、その生命活動における活動の核心を担う、ポルフィリン中の Q 帯やソーレー帯を励起してこれらの電子状態を解明することは学術的に極めて有意義である。超短パルスレーザーを用いることで、その電子状態の超高速動力学が解明される。また、この光源がもつ広い周波数帯を同時に測定できる多チャンネル・ロックイン検出器を用いて、測定時間の桁違いの短縮を図ることで、各波長において

測定を繰り返す従来の方法では測定困難であった微弱な信号の変化が測定可能となる。ソーレー帯を励起する紫外励起パルスと白色プローブパルスを用いて、これらの電子緩和時間の測定を行った。

励起波束によるポンプフリーエプローブ信号の解析

変位調和振動子で表される振動モードと結合した電子三準位系を用いたモデル計算により、過渡吸収スペクトルのフリーエパワースペクトルにおける励起パルス幅に依存した変化の様子をシミュレートした。モード周波数と励起パルス幅との関係を示すパラメータを定義し (衝撃因子)、ポテンシャル上の波束運動が、古典的調和振動子から乖離する条件を定量的に議論した。理想的調和振動子ポテンシャルにおいても、一般に遅延時間に依存したシグナルのフリーエパワースペクトルは高次成分を有するが、この高次成分の比率が衝撃因子によって大きく変化することを示し、その比率を最大化する衝撃因子の条件を求めた。この条件が、波束のスクイズした状態の生成する条件とほぼ一致することを示し、従来困難とされて来た分子振動スクイーミングの検出法あるいは実験的証拠として応用できることを示した。

励起状態 Huang - Rhys 因子の決定

従来、二つの励起状態間の遷移に関与する Huang - Rhys 因子を実験的に求めることは困難とされてきた。本研究では波束計算に基づくポンププローブシグナルの計算により、過渡吸収スペクトルに対する不均一広がり効果における、プローブパルス中心波長依存性について考察した。広がり効果が、Huang - Rhys 因子によって大きく依存することを示した。このことを応用して、二つの励起状態間の遷移に伴う Huang - Rhys 因子決定スキームを提案した。

6.1.4 電場変調分光

ポルフィリン J 会合体・分子結晶・光合成蛋白質

ポリマー中にドーブしたポルフィリン J 会合体・分子結晶・光合成蛋白質について、多チャンネルロックイン検出器を用いて電場変調分光を行った。昨年度 T P P S (tetraphenylporphyrin sulfonic acid) J 会合体について、光励起に伴う分極率変化 (電場の 2 次に比例する信号) から励起子のコヒーレントサイズを評価したの続き、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。有機非線形光電子材料として注目されているペリレンについて、その分子微結晶 (サイズ~数 100nm) ではあたかも量子サイズ効果のように見えるフレンケル励起子エネルギーの結晶サイズ依存性が報告されている。この系について電場変調分光を行い、フレンケル励起子吸収の高エネルギー側に電荷移動励起子による信号を観測し、そのエネルギー

がサイズによらないことを見出した。また、これらの電荷移動励起子はフレンケル励起子にカップルすることで試料の分極率変化を増大させている可能性がある。また、奈良先端大の小夫家研究室より提供された人工光捕集アンテナであるポルフィリンマクロリングについても、複雑な電荷移動吸収構造を観測した。これらはすべて線形吸収スペクトルの微分形でフィットできない信号成分として現れることにより電荷移動励起であると同定した。さらに、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を抽出してポリマー分散膜として電場変調分光を行い、信号を得ることに成功した。この信号においても構成色素分子の吸収スペクトルの微分のみではフィットできない成分が観測された。これは電荷移動吸収の可能性があり、検討を進めている。また、従来電場変調分光は固体や有機溶媒などの絶縁体媒質中でしか行うことができなかったが、透明電極界面のナノスケールの厚さの電気二重層を利用した水溶液の電場変調分光法を開発し、J会合体に適用し初めて電場による2次の信号を観測した。同時に干渉縞のシフトとして現れる水の1次の電場変調信号から、初めて水のポッケルス係数を評価した。その値は $r_{13} = 7.2$ 、 $r_{33} = 37.0[\text{pm/V}]$ で、非線形光学結晶 LiNbO_3 の $r_{33} = 31[\text{pm/V}]$ に匹敵するものであることがわかった。

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個の量子点中に形成することが可能である。従って1個の量子点の分光観測ができれば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ことが期待される。興味深い系である。しかし従来、単一分子力量子点の観測はほとんどゼロメソッドである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。昨年度はサイズが約10nmのGaInP中の自己生成型InP単一量子点の1励起子の有無の差による吸収スペクトル変化を測定することに成功した。しかしながらこれまで用いていた超半球レンズは屈折率のマッチングの要求精度が高いため、特定の波長領域のみをフィルターする傾向があり、高エネルギー側の吸収変化の信号を観測しにくくしていた。そこで集光効率は悪いがフィルター効果のない半球レンズで白色光プローブを集光して実験を行ったところ、高いエネルギー側に明瞭な構造を初めて観測した。これにより、発光で現れる多励起子基底状態だけでなく、多励起子励起状態の情報を得ることができる。現在さらに白色光の集光効率を高めるために実験系を改善中である。

6.1.5 量子情報

多体絡み合い状態の生成とその応用

量子情報科学の分野において、空間的に離れた粒子間の間の非局所的な相関をもった状態（エンタングルメント）が非常に重要な役割を担っている。これまでは主に二体間の絡み合い状態の研究が行われてきたが、近年は多体間の絡み合い状態が注目されており、理論・実験ともに活発に研究が行われている。しかし多体絡み合い状態を実験的に生成することは難しく、まだ数例が報告されているに過ぎない。我々は、典型的な多体絡み合い状態である四体W状態をはじめとする様々な種類の絡み合い状態を同一の実験系で生成する実現可能な方法を世界に先駆けて提案した。この方法は任意の粒子数に対して適用可能であり、拡張性に優れているという特徴も有している。また、ごく最近、多体絡み合い状態のひとつである三体W状態の高効率な生成方法を提案し、実験的に実現することに成功した。更にこの業績の中で、他のグループとほぼ同時期に、光子の多体絡み合い状態に関して初めて量子状態を完全に特定することに成功した。この実験は、多体絡み合い状態を量子秘密共有等の量子情報処理プロトコルに応用するための重要なステップと言える。これらの研究は量子力学、量子情報理論の基礎研究にとって非常に重要であり、さらに様々な量子情報処理プロトコルへの応用も可能であるため、極めて重要であり将来性に富んだテーマである。今後の目標は、得られた多体絡み合い状態を利用して量子情報処理を実験的に実現することである。

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

量子力学の原理により、盗聴不可能な情報伝送方法：量子鍵配布（量子暗号）の研究が多くの物理学者、情報学者等の下で進められている。しかし現実環境下での、不完全な信号源、雑音等による影響で実際には安全性が必ずしも保証されない事が実用化への妨げになっている状況である。

安全性を保証するには、信頼性の高い1光子源を用いる必要があり、幾つかの発生法が提案されているが、いずれも実用レベルには未だ至っていない。そこで本研究では、現在多くのグループで行われているレーザー光を用いた量子鍵配布に対してよりも高い安全性とビットレートを実現できる系の提案を行い、かつ実験的に実現する事を目的とした。

1. (計算) 本研究で用いる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光子源は、すで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（ポアソン分布）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と考えられるが、トリガー側で光子数識別を行えば複数光子の場合には鍵として採用せずすみ、より長距離での安全性を確保できかつレーザー光を

用いた場合に比べ高いビットレートを得られることを示した。

解析の結果検出器が不完全な効率であっても、より長距離での鍵配布が可能であることがわかった。光子数識別器は、通常的光子検出器と光ファイバーを用いて構成できる。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伴う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いという欠点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ことを示した。

2. (実験) 秘密共有鍵生成を達成するために、まず送信者側では SPDC 光のビット情報を付加する片側 (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。情報を付加されたシグナルは空气中を伝播し、受信者側へと送られた。

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。その後古典通信 (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、そのデータを PC に送り受信者側 PC との通信を行った。

測定結果として、1kbits/s の最終的な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、10% の場合 (10dB) 光ファイバー通信波長帯 1550nm において 50km に相当)100bits/s のビットレートが得られた。

ハイゼンベルグ限界における位相測定

ハイゼンベルグ限界の $1/3$ の精密さで位相測定出来る新しい干渉計の提案をした。3 光子を用いる提案された干渉計は $2/3$ の反射率をもつビームスプリッター 2 つと全反射鏡 2 つから構成される。量子干渉の振動周期が古典的な場合と比較して 3 倍短く、可視度は 100% であることを示した。よって 1 光子の波長 λ に対して、 $\lambda/3$ であらわされるド・ブロイ波長がこの方法によって観測できる。類似の位相測定法 (Mitchell et al., Nature (London) 429, 161 (2004); Walter et al., ibid. 429, 158 (2004)) は複数光子の最大絡み合い状態を利用しているのと比較して、我々の提案では 3 光子最大絡み合い状態を用いる必要はない。

受動的線形光学素子のみから構成される量子フィルター

受動的線形光学素子のみから構成される量子高周波透過・低周波透過フィルターを初めて提案し、その出力特性を分析した。量子高周波透過および低周

波透過フィルターと古典的フィルターの違いは、量子フィルターの応答が入力光子数状態の確率分布を与えるという点にある。

さらに高周波透過・低周波透過から構成されるバンドパスフィルターを用いてコヒーレント光からサブポアソン光を生成できることを示した。我々の提案と以前に提案された方法との差は、従来の方法による非線形過程でなく測定に起因する非線形性がコヒーレント光の光子数分布を変えるのに採用されている点である。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] P. Rizo and T. Kobayashi, Chirp characterization of ultrashort pulses utilizing molecular vibrations, Appl. Phys. Lett., 85, 28-30, 2004
- [2] N. Ishii, E. Tokunaga, S. Adachi, T. Kimura, H. Matsuda, and T. Kobayashi, Optical frequency and vibrational time-resolved two-dimensional spectroscopy by real-time impulsive resonant coherent Raman scattering in polydiacetylene, Phys. Rev. A, 70, 023811, 2004
- [3] Y. M. Li and T. Kobayashi, Four-photon entanglement from two-crystal geometry, Phys. Rev. A, 69, 020302, 2004
- [4] A. Yabushita and T. Kobayashi, Spectroscopy by frequency-entangled photon pairs, Phys. Rev. A, 69, 013806, 2004
- [5] H. Wang, T. Horikiri, and T. Kobayashi, Polarization-entangled mode-locked photons from cavity-enhanced spontaneous parametric down-conversion, Phys. Rev. A, 70, 043804, 2004
- [6] S. Adachi, P. Kumbhakar, and T. Kobayashi, Quasi-monocycle near-infrared pulses with stabilized carrier-envelope phase characterized by non-collinear cross-correlation frequency-resolved optical gating, Opt. Lett., 29, 1150-1152, 2004
- [7] K. Nishimura, F. S. Rondonuwu, R. Fujii, J. Aka-hane, Y. Koyama, and T. Kobayashi, Sequential singlet internal conversion of 1Bu $\rightarrow$ 3Ag $\rightarrow$ 1Bu $\rightarrow$ 2Ag $\rightarrow$ (1Ag-ground) in all-trans-spirilloxanthin revealed by two-dimensional sub-5-fs spectroscopy, Chem. Phys. Lett., 392, 68-73, 2004
- [8] T. Taneichi, T. Fuji, Y. Yuasa, and T. Kobayashi, Vibrational phase characterization in femtosecond-pumped molecules by path-length modulation pump-probe spectroscopy, Chem. Phys. Lett., 394, 377-382, 2004
- [9] H. Wang and T. Kobayashi, Quantum interference of a mode-locked two-photon state, Phys. Rev. A, 70, 053816, 2004
- [10] Y. M. Li and T. Kobayashi, Multi-photon entangled states from two-crystal parametric down-conversion and their application in quantum teleportation, Opt. Commun., 244, 285-289, 2005

-
- [11] K. Nishimura, E. Tokunaga, and T. Kobayashi, Sub-5-fs two-dimensional spectroscopy of pseudoisocyanine J-aggregates, *Chem. Phys. Lett.*, 395, 114-119, 2004
- [12] T. Kobayashi and M. Hirasawa, Real-time charge oscillation between monomers in a dimeric system associated with intermolecular vibration induced by an ultrashort pulse, *J. Phys. Chem. B*, 109, 1, 74-79, 2005
- [13] A. Yabushita, T. Fuji, and T. Kobayashi, Nonlinear propagation of ultrashort pulses in cyanine dye solution investigated by SHG FROG, *Chem. Phys. Lett.*, 398, 495-499, 2004
- [14] T. Kobayashi, M. Hirasawa, Y. Sakazaki, and H. Hane, Vibrational amplitude profile of molecular vibrational modes for mode assignment, *Chem. Phys. Lett.*, 400, 301-307, 2004
- [15] M. Ikuta, Y. Yuasa, T. Kimura, H. Matsuda, and T. Kobayashi, Phase analysis of vibrational wavepackets in the ground and the excited states in polydiacetylene, *Phys. Rev. B*, 70, 214301, 2004
- [16] T. Kobayashi, K. Nishimura, and E. Tokunaga, Real-time spectroscopy of pseudoisocyanine J-aggregates with sub-5fs lasers, *J. Mol. Struct.*, 735-736, 179-187, 2005
- [17] L. Xiao, H. Shimotani, N. Dragoe, A. Sugita, K. Saigo, Y. Iwasa, T. Kobayashi, and K. Kitazawa, Photoinduced electron transfer and enhanced fluorescence of C60 pearl-necklace polymers, *Chem. Phys. Lett.*, 368, 738-744, 2004
- [18] T. Kobayashi, K. Nishimura, F.S. Rondonuwu, Y. Koyama, Excited-state dynamics of the 1Bu⁺, 3Ag⁻, and 1Bu⁻ states in a carotenoid molecule by 5-fs absorption spectroscopy, *J. Lumin.*, 112, 391-394, 2005
- [19] T. Kobayashi and H. Kano, Wave-packet dynamics of Herzberg-Teller-type in porphyrin J-aggregates studied by sub-5-fs spectroscopy, *Nonlin. Opt. Quant. Opt.*, 31, 1-4, 115-135, 2005
- [20] H. Wang and T. Kobayashi, Phase measurement at the Heisenberg limit with three photons, *Phys. Rev. A*, 71, 021802, 2005
- [21] P. J. Rizo and T. Kobayashi, Direct measurement of the group delay dispersion of ultrashort pulses utilizing molecular vibrations, *Appl. Phys. Lett.*, 85, 1, 28-30, 2004
- [22] 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*, accepted, 2005
- [23] T. Ogawa, E. Tokunaga, and T. Kobayashi, Giant electrooptic response of excitons in porphyrin J-aggregates, *Chem. Phys. Lett.*, 408, 186-191, 2005
- [24] Y. Li, H. Mikami, H. Wang, and T. Kobayashi, Single mode approximation of parametric down-conversion, *Phys. Rev. A*, accepted, 2005
- [25] A. Ozawa, K. Takimiya, T. Otsubo, and T. Kobayashi, Sub-5fs time-resolved dynamic Frank-Condon overlaps associated with the S₁ → S₀ stimulated transition in oligothiophene 13-mer, *Chem. Phys. Lett.*, accepted, 2005
- (会議抄録)
- [26] T. Kobayashi and H. Kano, Wave-packet dynamics of Herzberg-Teller-type in porphyrin J-aggregates studied by sub-5-fs spectroscopy, *Proceedings of NATO Advanced Research Workshop, Nonlin. Opt., Quant. Opt., Special Issue*, 31, 1-4, 2004
- [27] T. Kobayashi, Y. Yuasa, M. Ikuta, T. Kimura, and H. Matsuda, Sub-5-fs spectroscopy of a polydiacetylene, *Abstracts of PCC'04, Physical Chemistry Colloquium on Ultrafast and Intense-field Phenomena*, 17-19, 2004
- [28] T. Kobayashi, Sub-5-fs spectroscopy of polydiacetylenes, *Abstracts of ISMOA'04, The 4th International Symposium on Modern Optics and Its Applications*, 34, 2004
- [29] S. Adachi and T. Kobayashi, Long-term stabilization and control of CEP of idler from NOPA, *Ultrafast Phenomena XIV, Proceedings of the 14th International Conference*, ed. By T. Kobayashi, T. Okada, T. Kobayashi, K. A. Nelson and S. De Silvestri, Niigata, Japan, Jul.25-30, 2004, Springer, 64-66, 2005
- [30] X. Fang and T. Kobayashi, Experimental and theoretical study of a visible noncollinear optical parametric amplified pulse with 200 THz bandwidth, *Ultrafast Phenomena XIV, Proceedings of the 14th International Conference*, 67-69, 2005
- [31] P. Kumbhakar and T. Kobayashi, Ultrabroad-band noncollinear optical parametric amplification in some new nonlinear optical crystals, *Ultrafast Phenomena XIV, Proceedings of the 14th International Conference*, 82-84, 2005
- [32] P. J. Rizo and T. Kobayashi, Direct measurement of the group delay dispersion of ultrashort pulses utilizing molecular vibrations, *Ultrafast Phenomena XIV, Proceedings of the 14th International Conference*, 121-123, 2005
- [33] T. Kobayashi, M. Hirasawa, Y. Sakazaki, and H. Hane, Amplitude spectra of molecular vibration modes in phthalocyanine: comparison with Raman excitation profile, *Ultrafast Phenomena XIV, Proceedings of the 14th International Conference*, 371-373, 2005
- [34] Y. Yuasa, M. Ikura, T. Kumura, and H. Matsuda, and T. Kobayashi, Real time tracking of the peaks in transition difference spectra during vibrational

- periods in PDA, Ultrafast Phenomena XIV, Proceedings of the 14th International Conference, 374-376, 2005
- [35] T. Taneichi, T. Fuji, Y. Yuasa, and T. Kobayashi, Vibrational phase characterization in femtosecond-pumped molecules by path-length modulation, Ultrafast Phenomena XIV, Proceedings of the 14th International Conference, 383-385, 2005
- [36] M. Hirasawa, Y. Sakzaki, H. Hane, and T. Kobayashi, Realtime spectroscopy of charge-transfer excitation in phthalocyanine tin dichloride, Ultrafast Phenomena XIV, Proceedings of the 14th International Conference, 471-473, 2005
- [37] M. Ikuta, Y. Yuasa, T. Kimura, H. Matsuda, and T. Kobayashi, Phase analysis of vibrational wavepackets in the ground and the excited states in polydiacetylene, Ultrafast Phenomena XIV, Proceedings of the 14th International Conference, 520-522, 2005
- [38] N. Ishii, E. Tokunaga, S. Adachi, T. Kimura, H. Matsuda, and T. Kobayashi, Two-dimensional spectroscopy by spectrally resolved real-time resonant coherent Raman scattering in polydiacetylene, Ultrafast Phenomena XIV, Proceedings of the 14th International Conference, 563-565, 2005
- [39] T. Kobayashi, K. Nishimura, F. S. Rondonuwu, and Y. Koyama, Excited-state dynamics of the 1Bu⁺, 3Ag⁻, 2Ag⁻ and 1Bu⁻ states in all-trans-spirilloxanthin as revealed by sub-5-fs time-resolved absorption spectroscopy, Ultrafast Phenomena XIV, Proceedings of the 14th International Conference, 619-621, 2005
- [40] M. I. Stockman, D. J. Bergman, and T. Kobayashi, Coherent control of ultrafast linear and nonlinear optical phenomena in nanostructures, Ultrafast Phenomena XIV, Proceedings of the 14th International Conference, 673-675, 2005
- [41] T. Kobayashi, Real-time spectroscopy to clarify the mechanism of ultrafast nonlinearity, Technical Program of Photonics West, Optoelectronics '05, the 7th Organic Photonic Materials and Devices, 156, 2005
- [42] T. Kobayashi, Excited-state dynamics of the 1Bu⁺, 3Ag⁻, and 1Bu⁻ states in a carotenoid molecule by 5-fs absorption spectroscopy, J. Lumin. 6th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (EXCON '04)(ed. By P. Petelenz and M. Schreiber), 2005
- [43] T. Kobayashi, Carrier-envelope phase dependent optical nonlinearity in optical poling, Extended Abstracts of ICONO'05, The 8th International Conference on Organic Nonlinear Optics, 19, 2005
- [44] T. Kobayashi and Y. Yuasa, Real-time molecular vibrational frequency and amplitude probing to resolve instantaneous structure, Extended Abstracts of ICONO'05, 19, 2005
- [45] T. Kobayashi, Ultrafast optical nonlinearity in polydiacetylenes studied by sub-5-fs laser, Abstracts of 8th ICFPAM, International Conference on Frontiers of Polymers and Advanced Materials, Cancun, Mexico, (Apr.22-28, 2005), 45, 2005
- [46] T. Kobayashi and Y. Yuasa, Real-time molecular vibrational frequency and amplitude probing to resolve instantaneous structure, Abstracts of 12th international Conference on Time-Resolved Vibrational Spectroscopy(TRVS 12), Gaithersburg, MD, USA, (May 23-27, 2005) 71, 2005
- [47] T. Kobayashi and M. Ikuta, Phase analysis of vibrational wavepackets in the ground and the excited states in polydiacetylene, Proceedings of 8th International Conference on Organic Nonlinear Optics(ICONO'8), Matsushima, Japan, Mar. 7-11, 2005, Nonlin. Opt. Quant. Opt., 2005
- (総説)
- [48] 小林孝嘉, 第14回超高速現象国際会議報告、応用物理、73, 10, 1455-1456, 2004
- [49] 中西八郎、小林孝嘉, 第1章概説一非線形光学材料開発の現状と展望1. 有機材料, 編中西八郎、小林孝嘉、中村新男、梅垣真祐、有機非線形光学材料の開発と応用, CMC Press., 1-4, 2001
- [50] 中村新男、小林孝嘉, 1章概説一非線形光学材料開発の現状と展望2. 無機・半導体材料, 編中西八郎、小林孝嘉、中村新男、梅垣真祐、有機非線形光学材料の開発と応用, CMC Press., 5-8, 2001
- [51] 小林孝嘉, 基礎編: 第1章概説, 編中西八郎、小林孝嘉、中村新男、梅垣真祐、有機非線形光学材料の開発と応用, CMC Press., 307-316, 2001
- [52] 小林孝嘉、服部利明、美濃島薫、泰地真弘人、徳永英司、寺寄亭, 第3章測定: 1. 非線形光学効果測定法, 編中西八郎、小林孝嘉、中村新男、梅垣真祐、有機非線形光学材料の開発と応用, CMC Press., 339-351, 2001
- [53] 吉澤雅幸、小林孝嘉, 第4章機構: 1. 共役高分子の超高速光学応答, 編中西八郎、小林孝嘉、中村新男、梅垣真祐、有機非線形光学材料の開発と応用, CMC Press., 388-394, 2001
- [54] T. Kobayashi, Chapter 6:Femtosecond non-collinear parametric amplification and carrier-envelope phase control, Femtosecond Optical Frequency Comb Technology, Springer, ed. by J. Ye and S. T. Cundiff, 133-175, 2005
- (学位論文)
- [55] 足立 俊輔, 搬送波位相制御非共直線光パラメトリック増幅器による分子の配向. (Molecular orientation by a noncollinear optical parametric amplifier with a controlled carrier-envelope phase) (博士論文), 2005
- [56] 湯浅吉晴、ポリフェニレンビニレン (PPV) のフェムト秒時間分光, Femtosecond time-resolved spectroscopy of poly-paraphenylene vinylene(PPV) (修士論文)、2005

- [57] 井久田光弘、カロテノイドのフェムト秒時間分光 (修士論文)、2005
- [58] Pedro Julian Rizo, Generation and control of oscillatory optical nonlinearities and its applications to pulse characterization and all-optical information processing (修士論文)、2005

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [59] T. Kobayashi, K. Nishimura, F. S. Rondonuwu, and Y. Koyama, Full spectra and dynamics of excited state(1Bu+, 3 Ag-, 1Bu-, and 2Ag-states) in a polyene by two-dimensional sub-5-fs spectroscopy, EXCON'04, The 6th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, Cracow, Poland, Jul. 6-9, 2004
- [60] T. Kobayashi, Ultrabroad-band noncollinear optical parametric amplification in some new nonlinear optical crystals, 2004 International Conference on Ultrafast Phenomena, OSA Topical Meetings, Niigata, Japan, Jul.25-30, 2004
- [61] T. Kobayashi, M. Hirasawa, Y. Sakazaki, and H. Hane, Amplitude spectra of molecular vibration modes in phthalocyanine: comparison with Raman excitation profile, UP'04, Niigata, Japan, Jul. 25-30, 2004
- [62] T. Kobayashi, K. Nishimura, F. S. Rondonuwu, and Y. Koyama Excited-state dynamics of the 1Bu+, 3Ag-, 2Ag- and 1Bu- states in all-trans-spirilloxanthin as revealed by sub-5-fs time-resolved absorption spectroscopy, UP'04, Niigata, Japan, Jul. 25-30, 2004
- [63] Y. Yuasa, M. Ikuta, T. Kobayashi, T. Kimura, and H. Matsuda, Real time tracking of the peaks in transition difference spectra during vibrational periods in PDA, UP'04, Niigata, Japan, Jul. 25-30, 2004
- [64] M. Ikuta, Y. Yuasa, T. Kobayashi, T. Kimura, and H. Matsuda, Phase analysis of vibrational wavepackets in the ground and the excited states in polydiacetylene, UP'04, Niigata, Japan, Jul. 25-30, 2004
- [65] P. J. Rizo and T. Kobayashi, Direct measurement of the group delay of ultrashort pulses utilizing molecular vibrations, UP'04, Niigata, Japan, Jul. 25-30, 2004
- [66] X. Fang and T. Kobayashi, Experimental and theoretical study of a visible noncollinear optical parametric amplified pulse with 200 THz bandwidth, UP'04, Niigata, Japan, Jul. 25-30, 2004
- [67] T. Taneichi, T. Fuji, Y. Yuasa, and T. Kobayashi, Vibrational phase characterization in femtosecond-pumped molecules by path-length modulation, UP'04, Niigata, Japan, Jul. 25-30, 2004
- [68] N. Ishii, S. Adachi, T. Kobayashi, E. Tokunaga, T. Kimura, and H. Matsuda, Two-dimensional spectroscopy by spectrally resolved real-time resonant coherent Raman scattering in polydiacetylene, UP'04, Niigata, Japan Jul. 25-30, 2004
- [69] M. I. Stockman, D. J. Bergman, and T. Kobayashi, Coherent control of ultrafast linear and nonlinear phenomena in nanostructures, UP'04, Niigata, Japan, Jul. 25-30, 2004
- [70] M. Hirasawa, Y. Sakazaki, H. Hane, and T. Kobayashi, Realtime spectroscopy of charge-transfer excitation in phthalocyanine tin dichloride, UP'04, Niigata, Japan, Jul. 25-30, 2004
- [71] T. Kobayashi, P. Kumbhakar, and G. C. Bhar, Phase-matching in ZnGeP2 for the generation of terahertz radiation by difference-frequency mixing, NLO'04, Nonlinear Optics Topical Meeting of OSA, HI, USA, Aug. 2-6, 2004
- [72] T. Kobayashi, Real-time molecular vibrational frequency and amplitude probing to resolve instantaneous structure, International Conference on Transient Chemical Structures in Dense Media, Paris, France, Mar. 14-16, 2005
- [73] S. Adachi and T. Kobayashi, Carrier-envelope-phase-controlled optical poling, CLEO/QLS '05, Conference on Lasers and Electro-Optics, International Quantum Electronics Conference, Baltimore, MA, USA, May 22-27, 2005
- [74] H. Mikami, Y. Li, K. Fukuoda and T. Kobayashi, Efficient generation of a three-photon w state, CLEO/QLS '05, Baltimore, MA, USA, May 22-27, 2005
- 招待講演
- [75] T. Kobayashi, Y. Yuasa, M. Ikuta, T. Kimura, and H. Matsuda, Sub-5-fs spectroscopy of a polydiacetylene, PCC'04, Physical Chemistry Colloquium on Ultrafast and Intense-field Phenomena, Sendai, Miyagi, Japan, Aug. 2-3, 2004
- [76] T. Kobayashi, Sub-5-fs spectroscopy of polydiacetylenes, ISMOA'04, The 4th International Symposium on Modern Optics and Its Applications, Bandung, Indonesia, Aug. 9-13, 2004
- [77] T. Kobayashi, S. Adachi, and X. Fang, Stabilization and control of CEP of idler from two types of NOPA, ICUIL'04, The International Conference on Ultrahigh Intensity Lasers North Lake Tahoe, CA, USA, Oct. 3-7, 2004
- [78] T. Kobayashi, Y. Yuasa, and M. Ikuta, Sub-5-fs resolved nonlinear processes in PDA, Photonics Asia Conference on Nonlinear Optical Phenomena and Applications 2004, Beijing, China, Nov. 8-12, 2004
- [79] T. Kobayashi Real-time spectroscopy to clarify the mechanism of ultrafast nonlinearity, Photonics West, Optoelectronics '05, the 7th Organic Photonic Materials and Devices, San Jose, CA, USA, Jan. 24-26, 2004

- [80] T. Kobayashi, Carrier-envelope phase dependent optical nonlinearity in optical poling, ICONO'05, The 8th International Conference on Organic Non-linear Optics, Matsushima, Miyagi, Japan, Mar.7-11, 2005
- [81] T. Kobayashi, Real-time molecular vibrational frequency and amplitude proving to resolve instantaneous structure, International Conference on Transient Chemical Structures in Dense Media, Paris, France, Mar. 14-16, 2005
- [82] T. Kobayashi, Generation, and control of extremely short optical pulses, NOPA and application to the study of ultrafast processes, Photon Forum in National Chiao Tung University, Taipei, Taiwan, Mar. 29, 2005
- [83] T. Kobayashi Ultrafast optical nonlinearity in polydiacetylenes studied by sub-5-fs laser, 8th ICF-PAM, International Conference on Frontiers of Polymers and Advanced Materials, Cancun, Mexico, Apr. 22-28, 2005
- [84] T. Kobayashi, Real-time molecular frequency and amplitude probing to resolve instantaneous structure, TRVS'05, The 12th International Conference on Time-Resolved Vibrational Spectroscopy, Washington DC, USA, May 23-27, 2005
- (国内会議)
- 一般講演
- [85] 湯浅吉晴、井久田光弘、斎藤敬、小林孝嘉、木村龍実、松田宏雄、ポリジアセチレンのフェムト秒時間分光、物性研究所短期研究会、東京大学物性研究所、Feb. 16-17, 2004
- [86] Tomoyuki Horikiri, Hideki Sasaki, Haibo Wang, Takayoshi Kobayashi, Security and gain improvement of practical quantum key distribution using a gated SPDC photon source and probabilistic photon-number resolution, ERATO conference on Quantum Information Science 2004, 東京一橋メモリアルホール、Sep.1-5, 2004
- [87] 堀切智之、佐々木秀貴、王海波、小林孝嘉、パラメトリック下方変換光を用いたゲート1光子源光子数識別による量子鍵配布の安全性およびビットレートの向上、日本物理学会2004年秋季大会、青森大学、Sep. 12-15, 2004
- [88] 平林正史、小川高史、徳永英司、小林孝嘉、J会合体水溶液の電場変調分光、日本物理学会2004年秋季大会、青森大学、Sep. 12-15, 2004
- [89] 小川高史、徳永英司、小林孝嘉、ポルフィリンJ会合体の電場変調吸収分光、日本物理学会2004年秋季大会、青森大学、Sep. 12-15, 2004
- [90] 西本智一、徳永英司、小林孝嘉、マルチチャンネルロックインによるペリレンの電場変調分光II、日本物理学会2004年秋季大会、青森大学、Sep. 12-15, 2004
- [91] 中田和明、柴田和幸、徳永英司、小林孝嘉、ホウレン草の光化学系II (PS II) の非線形吸収分光、日本物理学会2004年秋季大会、青森大学、Sep. 12-15, 2004 物理学会 2004 年秋:「秋季大会」(高知大、青森大)
- [92] 簗下篤史、小林孝嘉、波長多重量子暗号鍵配布光源の開発及びその評価、日本物理学会2004年秋季大会、青森大学、Sep. 12-15, 2004
- [93] 三上秀治、李永民、小林孝嘉パラメトリック下方変換を用いた四光子、日本物理学会2004年秋季大会、青森大学、Sep. 12-15, 2004
- [94] 足立俊輔、小林孝嘉、非平行光パラメトリック増幅器による搬送波包絡振幅位相制御光パルスの発生、日本物理学会2004年秋季大会、青森大学、Sep. 12-15, 2004
- [95] A. Yabushita, T. Horikiri, H. Mikami, and T. Kobayashi, Quantum communication experiments implemented by spontaneous parametric down-conversion photon pairs, The 2004 CREST Symposium on "Function Evolution of Materials and Devices based on Electron /Photon Related Phenomena" Kokuyo Hall(Shinagawa, Tokyo), Sep. 29-30, 2004
- [96] 小澤陽、坂本勝洋、大坪徹夫、小林孝嘉、チオフェンオリゴマーの超高速分光、日本物理学会第60回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、Mar. 24-27, 2005
- [97] 三上秀治、李永民、福岡郷介、小林孝嘉、効率的な三光子W状態の生成、日本物理学会第60回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、Mar. 24-27, 2005
- [98] 浅野 敏之、徳永 英司、倉持悠輔、小夫家芳明、小林孝嘉、人工環状光捕集機能体の電場変調分光, Electroabsorption spectroscopy of light-harvesting macrorings, 日本物理学会第60回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、Mar. 24-27, 2005
- [99] 足立俊輔、小林孝嘉、搬送波位相制御下での光ポーリング、2005年春季応用物理学関係連合講演会、埼玉大学、Mar. 29-Apr. 1. 2005
- [100] 大館暁、王海波、小林孝嘉、3光子を用いた量子限界での位相測、2005年春季応用物理学関係連合講演会、埼玉大学、Mar. 29-Apr. 1. 2005
- [101] 堀切智之、竹野唯志、佐々木秀貴、簗下篤史、王海波、小林孝嘉、SPDC ゲート1光子源を用いた量子鍵配布、量子情報技術研究会、NTT 厚木研究開発センター、May 12-13, 2005
- 集中講義
- [102] T. Kobayashi, Application of short pulse to ultrashort processes and quantum information, The Seminar, Electro Physics Department, National Chiao Tung University, Xin Chu, Taiwan, Mar. 31, 2005
- [103] T. Kobayashi, Application of sub-5fs NOPA to the vibrational dynamics in polymers, The Seminar, The Atomic Physical Research of Taiwan Science Institute, Taipei, Taiwan, Apr. 1, 2005

-
- [104] 小林孝嘉、化学特別講義、光の魅力、慶応義塾大学、
Apr. 16, 2005

6.2 牧島研究室

6.2.1 太陽と星のフレアの研究

○ 太陽フレアにおける粒子加速

昨年に続き、「ようこう」衛星のデータを用い、太陽フレアにおける粒子加速の研究を続けた。その結果、フレアに伴うガンマ線の強度は、必ずしも硬X線のスペクトルの延長に乗らないことを見出した[5]。これには、降下する相対論的電子の発する制動放射ガンマ線が、太陽光球でコンプトン散乱され、エネルギーを失う効果[56]などが関与しているらしい。

○ 惑星状星雲からのX線放射

惑星状星雲とは、小質量の星が赤色巨星を経て進化の最終段階に達し、外層部を宇宙空間に放出し、中心部は白色矮星に近づいた天体である。中心星からの星風が、放出物質に衝突するなどして、X線が放射される場合がある。村島らは、*Chandra*などで観測された、数個の惑星状天体のX線データ解析し、輝線スペクトルから酸素、ネオン、マグネシウムなどの元素組成を推定できることを示した[67][96]。

○ 若い大質量星からのX線放射

昨年度の星形成領域 NGC 2068[3]に続き、柳田らはCygnus OB2 アソシエーションの*Chandra*データを用い、若い星からのX線放射を研究している。多数の点源のうち、温度3 keVを超える天体や、非熱的な硬いスペクトルを示すものが発見された。

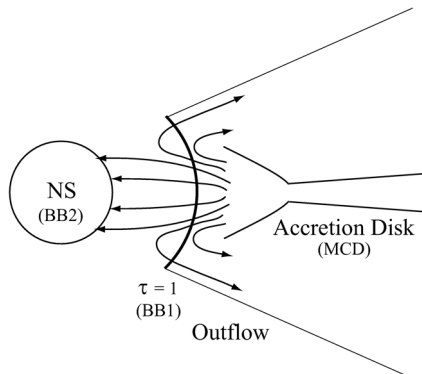


図 6.2 a: A schematic view of accretion flows onto a weakly magnetized neutron star, based on the analysis of a large amount of *RXTE* data [36].

6.2.2 コンパクト天体の観測的研究

○ 弱磁場の中性子星への質量降着 [36] [78] [94] [107] [115] [117] [118] [120]

高橋(弘)は博士論文で、*RXTE*衛星による弱磁場中性子星連星の公開データを統一的に解析した。天体数は約20、総観測時間は150日に及ぶ。質量降着

率 $\dot{M}$ が Eddington 限界値 $\dot{M}_c$ より低いとき、X線スペクトルは、標準降着円盤からの多温度黒体放射と中性子星の表面からの温度 ~ 2.5 keV の黒体放射の和で表われ、日本が20年かけて築いてきた描像を強化した。 $\dot{M}$ が $\dot{M}_c$ に近づくと、黒体成分は飽和し、円盤内縁からアウトフローが始まる。 $\dot{M}$ がさらに増えると、円盤の内縁は放射圧で膨れ、物質の一部はほぼ球対称に中性子星の表面に降着し、残りは図 6.2 a のように、低緯度方向へ飛び出す。このアウトフローは光学的に厚くなるため、そこからの低温 (~ 1.5 keV) の黒体放射がスペクトルに加わり、角度によっては、それが中性子星表面からの放射を隠すことを突き止めた。これは、質量降着する弱磁場中性子星からの放射を、 $\dot{M}$ と観測する緯度という2つのパラメータのみで記述する快挙である。

○ 降着率の高いブラックホール [100] [40] [114]

広島大、理研などと協力し、降着率が高い銀河系内ブラックホール連星を研究している。降着率が上がるにつれ、まず標準降着円盤ができていない状態、ついで円盤がコンプトン雲に包まれた状態、そして「スリム円盤」と呼ばれる状態が実現することを確認した[19][65][95]。スリム円盤では、物質の降着率は臨界値を大きく超えるが、放射効率が低いため、光度はほぼ Eddington 限界で飽和する。

伊藤は、ブラックホール連星 XTE J1650–500 がアウトバーストを起こした直後の *RXTE* データを用い、標準降着円盤の発達を探っている[52][62]。

村島らは昨年に続き、狭輝線1型セイファート銀河のX線スペクトルを解析した結果、その軟X線側の超過成分は、降着率の高い銀河系内のブラックホール天体のスペクトルと、共通した特徴をもつことを突き止めた[6][20][50]。

○ 超大光度コンパクトX線源 (ULX) [100] [40]

近傍の銀河に見られる超大光度コンパクトX線源 (ULX) は、中質量ブラックホールの有力な候補天体である[2][19][21][41][44][45][64][100]。理研の久保田らと協力し、代表的なULXであるM81 X-6の光学対応天体(たぶん大質量星)を「すばる」望遠鏡で観測した結果、対応天体が変光している徴候がえられた。これは、X-6と大質量星とが連星をなしているという、有力な証拠である。

諸外国では対立する説として、ULXは通常のブラックホールの放射が強くビーミングしたものとする考えが提唱されている。しかし可視光ではULXの周辺に、しばしば巨大な星雲が観測され、その励起には、ULXがほぼ等方的に放射している必要があるため、官協らは、*Chandra*の公開データを用いて、可視星雲からの蛍光X線を探索した[81][93]。まだ検出に至ってはいないが、*Astro-E2*に期待される。

SS433と呼ばれる天体は、物質を速度 $v = 0.26c$ (c は光速)で、細いジェットとして噴出している。平栗らは「あすか」などによるSS433のX線データを再解析した。ジェットの歳差運動に伴い、X線強度は速度 v のドップラーブーストは検出できたが、放射が異方性をもつという徴候は、得られなかった[63]。これはULXのビーミング説に対する反証である。

○ X線パルサーのサイクロトロン共鳴

昨年度に続き理研と協力して、*RXTE* 衛星で観測したトランジェント X 線パルサー X0115+63 のデータを解析し、X 線光度が下がると電子サイクロトロン吸収線のエネルギーが、11 keV から 17 keV に上昇すること、よって磁場が双極子型とすると、降着率が高いときは降着円筒の高さが約 1 km に達することを明らかにした [7][83]。2004 年 11 月にアウトバーストした別のトランジェント X 線パルサー X0331+53 でも、同様な傾向が見られる。岡田らは、*INTEGRAL* 衛星 (欧) で獲得したマシンタイム [9] を使い、X 線パルサー GX301-2 のサイクロトロン吸収線を研究した [32]。*Astro-E2* による観測で、さらなる進展が期待される。

6.2.3 星間・銀河間での高エネルギー現象

○ 球状星団と銀河系ハローの相互作用 [35] [69] [97] [101] [105] [108] [116] [119] [121] [122] [123]

岡田は博士論文で、*Chandra* 衛星による 12 個の球状星団の公開データを解析した結果、4 天体から広がった X 線放射を検出することに成功した。うち 2 例では、X 線は温度 ~ 0.05 keV の熱的スペクトルを示した。残る 2 例 (47 Tuc および NGC 6752) では、X 線は図 6.2 b に示すように硬い非熱的なスペクトルを示し、同じ位置に 840 MHz の電波源もカタログされていることが判明した。これらの球状星団は、いずれも銀河ハローに対して大きな速度をもち、かつ銀河面を通過してから長時間を経ている (よって十分なガスを蓄積している) ものなので、X 線放射は、星団ガスと銀河ハローの相互作用によるものと考えられる。熱的な X 線は衝撃波により、ハロープラズマが加熱される結果であろう。相互作用に伴う電場により生成される超熱的な電子が、制動放射により硬 X 線を、また逃走電子がシンクロトロン電波を発生している可能性がある [79]。

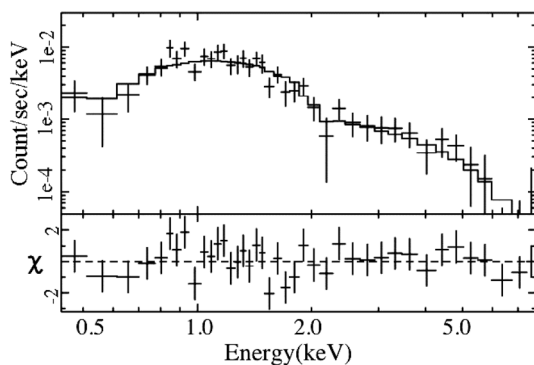


図 6.2 b: An X-ray spectrum of the diffuse X-ray emission associated with the globular cluster 47 Tucanae, acquired with *Chandra* [35].

○ アンドロメダ大星雲の高エネルギー現象

高橋 (弘) らは昨年に引き続き、M31 (アンドロメダ大星雲) や M33 の中心部に、複数の熱的なディフューズ X 線放射と、より硬い放射 (高温の熱的成分、もしくは非熱的成分) の存在を確立した [8] [48]。より詳しい知見は、*Astro-E2* で得られるだろう。

○ 銀河の合体と落下の証拠

昨年に引き続き川原田らは、*XMM-Newton* のデータを用い、銀河群 NGC 1550 および NGC 5044 の研究を続けた。その結果どちらの天体でも、星はプラズマよりずっと中心に集中し、またプラズマ中では、酸素が鉄より外側まで分布することを突き止めた。これは銀河群の形成初期には銀河が現在より外側まで分布し、その状態で II 型超新星を起源とする酸素がばらまかれたこと、銀河は濃いプラズマ中を運動することで、次第に重力ポテンシャルの底に落下し、その過程で長い年月をかけ、Ia 型超新星が鉄を生産したことを示唆する。落下した銀河は合体し、中心の巨大楕円銀河になったのであろう [51] [84] [106]。

銀河がプラズマから抵抗を受けて銀河団ポテンシャルの底に沈むという仮説を検証するには、X 線分布に対する可視光 (銀河分布) の広がり比が、遠方銀河団から近傍銀河団にかけ、減少していることを実証すれば良い。北口らは、X 線の公開データと論文の可視光データを用い、近傍 ($z=0.0183$) のペルセウス銀河団と、 $z=0.328$ の CL1358 銀河団を選び、それらの可視光と X 線の広がり比を比較した [70]。両者の間で、X 線と可視光の広がり比は良く一致し、進化の形跡は見られなかった。今後は遠方銀河団の可視光データを解析する必要がある。

○ 銀河団プラズマの温度構造

昨年に続き高橋 (勲) らは、*XMM-Newton* 衛星によるケンタウルス銀河団および A1795 の観測を用い、これらの銀河団の中心部の 100 kpc 以内に、高温と低温 (温度にして $\sim 1/3$) のプラズマが共存し、2 温度構造を作っていることを示した [43] [53] [61] [111]。これは「あすか」で得られた描像を、より高い精度で追認する。

○ 新しい銀河団進化のシナリオ

牧島らは前 2 項の成果などを踏まえ、銀河とプラズマの相互作用を考慮した、銀河団進化の新しいシナリオを提唱している [34] [60] [79] [80] [82] [92]。これは cD 銀河が太陽コロナと同様、閉じた磁気ループ群と開いた磁場部分をもつと考え、前者の中に低温プラズマが閉じ込められ、高温成分がその外側を満たすと仮定する。後者の中を他の銀河が遷音速で運動するさい、磁気乱流、音波、過渡電場、磁気リコネクションなどの電磁相作用を起こすことで、プラズマを加熱し、粒子を加速する。銀河はその反作用で運動エネルギーを失い、宇宙年齢かけてポテンシャルの底へ落下する。我々は *Astro-E2* に搭載される装置群をフルに使い、この仮説の検証を目指す。

こうしたテーマに、研究者の間で関心が高まりつつある。2005 年春の物理学年会では、天文学会および地球電磁気学会との共催で、プラズマ宇宙物理に関する大々的な共催セッションが行われた。

6.2.4 *Astro-E2*衛星 硬X線検出器 (HXD-II) の開発製作

○ *Astro-E2*衛星と HXD-II 装置 [11] [31] [47] [104]

我々は、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、日本5機目の宇宙X線衛星 *Astro-E2* に搭載される、硬X線検出器 (HXD-II) の開発を続けて来た。HXD-II は 10–600 keV の広いエネルギー域と極低バックグラウンドを特徴とし、硬X線領域での宇宙観測に革新的な威力をもつ。

2005 年 2 月に予定されていた *Astro-E2* の打上げは、HII-A ロケットによる多目的衛星 (MTSAT) の打上げ (2005 年 2 月 26 日に成功) との干渉を避けるため、延期された。2006 年初夏に、三段固体式の M 5 ロケットを用い、鹿児島県内之浦から打ち上げ予定。

○ HXD-II の単体試験 [57] [58] [71] [72] [75] [76]

HXD-II は、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、個別の実証試験や振動試験を経て、2004 年 4 月末の時点ではほぼ完成に漕ぎ着けていた。

本年度も国分を中心に、打ち上げに向けた作業に取り組み、5 月初旬には、HXD-S の振動試験 (フォトチューブ破損に伴い組み直したため再試験) および HXD-AE の温度試験を行った。低温で HXD-AE に電源投入するさい、FPGA の引き込み電流が過大になるため、急ぎヒーターを追加した。ついで宇宙研にて全コンポーネントを組み合わせた end-to-end 試験や HXD-S アラインメント測定を行い、6 月前半には、HXD-S の熱真空試験を実施した。

6 月後半には大型恒温槽を用い、HXD-S を大気中で -20 °C に冷却した状態で、さまざまなアイソトープを照射し、詳しい較正データを取得した。この低温での較正試験で得られた HXD-II の地上バックグラウンド (村島、国分ら) を、図 6.2 c に示す。

○ 衛星総合試験 [75] [76]

7 月初め、HXD の全コンポーネントは衛星に搭載され、衛星総合試験に供された。8 月前半までは衛星上での電気試験、8 月後半には山場である、衛星全体の熱真空試験が行われた。衛星電源部から HXD-S への電氣的干渉が発覚したため、電源部のシールドを強化し、また HXD-S と HXD-AE のグラウンド配線を強化した。10 月下旬から 11 月初旬にかけて、第 2 の山場である、衛星全体の振動・衝撃試験が無事に行われた。

総合試験の間に、HXD-DE のデータ受信部に微妙なタイミングの不備が発覚した。ハードウェア改修はせず、11~12 月に搭載ソフトウェアの書き換えと検証を行うことで、対処した。

ほぼ 1 年に及ぶ試験の間、ゲイン履歴の追跡 (村島ら) を行うとともに、大量の試験データを用いて、ADC 微分リニアリティの評価 (平栗ら)、時刻づけの検証 (宮脇ら) などを続けた。北口、川原田らは [87]、

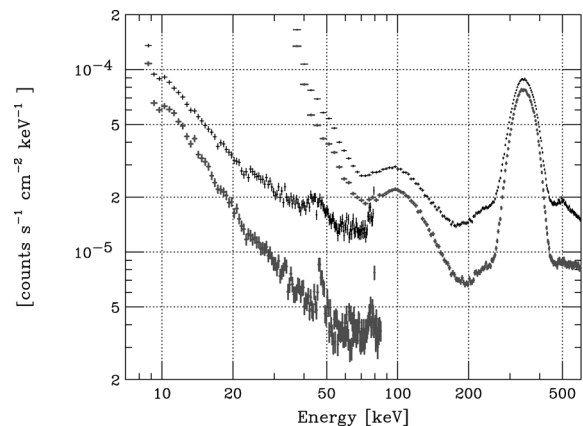


図 6.2 c: The final room background of the HXD-II, measured in 2004 June at -20 °C. The lower-energy sector is from PIN diodes, while that in higher energies refer to GSO scintillators. The upper and lower traces differ in the anti-coincidence condition. Except the intrinsic ^{152}Gd peak at ~ 340 keV, the background level and the GSO lower energy limit are both low enough to meet the design goal.

HXD-AE に誤動作がないか、10 億イベントに達する試験データを精査し、AE の地上残置モデルを用いて確認実験を繰り返した。二河らは HXD-S フォトチューブの雑音の履歴を追跡し、地上で確認実験を行った [38] [86]。こうした作業の結果、HXD-II を含め、衛星は打ち上げ前の試験をすべて完了し、まもなく陸路で鹿児島県内之浦町へ搬送される。

○ ソフトウェアの開発 [13] [77] [98]

寺田 (理研) の主導で、HXD-II 関連のソフトウェア開発を行っている。その第 1 群は、イベント選別、ゲイン履歴の作成、デッドタイム補正など、基本的なデータ処理を行うソフトウェアである。宮脇らは、イベント時刻づけを责任担当している。第 2 群のソフトウェアは、装置のエネルギー応答や角度応答を記述する応答関数である。

HXD-II はオフセット視野をもたないため、そのバックグラウンドは、衛星の場所、反同時計数のカウント数などをもとに、推定して差し引く必要がある。このため第 3 群のソフトとして、ビーム照射試験や原子核反応の計算結果を参照しつつ [27] [28]、荷電粒子による即発および遅発 (放射化) バックグラウンドをモデル化しつつある [89]。これを補強するため第 4 群として、軌道上での荷電粒子の分布と、衛星全体や HXD-II の質量分布を数値化し、GEANT4 などのツールを用い、モンテカルロ法で HXD-II のバックグラウンドを推定する [49] [102]。

○ 観測の立案と提案

Astro-E2 打ち上げから半年間は、較正観測および性能実証 (Performance Verification; PV) 観測を行

う。打ち上げ延期に伴い、打ち上げ直後に観測できる天球上の領域（太陽から $90^\circ \pm 25^\circ$ ）が変わったため、校正観測の計画を練り直した。また第1回の公募観測（半年後から開始）に応募し、A ランク 3 件、B ランク 1 件、C ランク 2 件が採択された。

6.2.5 将来に向けての技術開発

○ 観測装置の放射化と放射線耐性

HXD-II 開発と併せて、X 線・ガンマ線検出器の放射化、軌道上での荷電粒子の分布、電子部品の放射線耐性などの知見を深めた [15] [27] [28] [46] [49] [89] [102]。

○ 多結晶シンチレータの開発

柳田、高橋 (弘) らは企業と共同し、単結晶の微粒子を焼結した、多結晶シンチレータの開発を続けた。昨年に続き、Ce をドープした YAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) 多結晶の、シンチレータとしての特性を評価した [25] [26] [54] [99]。今年度は新たに、Ce と Nd を共ドープした YAG [103]、Y の一部を Gd に置き換えた製品 [109] などを評価している。

○ *Swift* 衛星 BAT 検出器

ガンマ線バーストの即時位置決めと、可視光・X 線での追跡観測を目的とした *Swift* 衛星は、*HETE-2* (理研などが運用中) の後継機として、アメリカを中心に開発された。*Swift* は 2004 年 11 月 20 日、デルタロケットにより無事に打ち上げられ、順調に観測を開始している。日本からは、宇宙研、埼玉大、および東大が参加している。岡田、高橋 (弘) らは BAT 検出器の校正データ解析に貢献した [17] [18]。

○ 撮像型の硬 X 線検出器の開発

将来の硬 X 線～軟ガンマ線検出器として、1 次元あるいは 2 次元の撮像型装置を開発している。宮脇らは昨年に続き、フーリエ合成撮像系で用いる検出器として、 $150\mu\text{m}$ の細かいピッチをもつ、CdTe ストリップ素子を開発した [12] [55]。

より高いエネルギーまで撮像するため、伊藤らは 10 mm 角で厚み 0.3 mm の極薄 CsI 結晶を、30 枚ほど重ねたものを開発した。その発光を、JAXA などと共同で開発した、 15 mm 角で厚さ 0.3 mm とピッチ 0.4 mm をもつ片面シリコンストリップ検出器で読むことにより、図 6.2 d に示すように、 $\sim 0.5\text{ mm}$ の位置分解能を達成した [37] [88]。

平栗らは、 3 mm 角の CsI 結晶を 2 次元に並べ、それらの発光を 2 次元の位置感度をもつフラットパッケージ型フォトチューブで読み出す方式の、2 次元の硬 X 線検出器を開発し、良好な結果を得つつある [85]。これを HXD と同様なシールド結晶井戸の中に置き、2 次元アクティブコードドマスクと組み合わせることで、HXD に撮像機能をもたせた装置が実現できると期待される。

○ *NeXT* 衛星計画 [16] [22] [29] [33] [73] [74]

Astro-E2 に続く X 線・ガンマ線ミッションとして、2010 年頃の打ち上げを目ざし、全日本の協力体制の

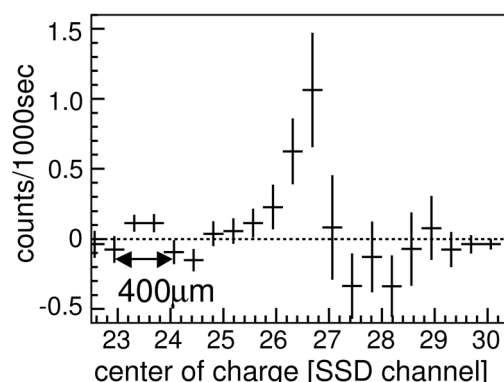


図 6.2 d: A position distribution of 662 keV gamma-rays from ^{137}Cs , measured with stacked thin CsI plates of which the scintillation is read out by a single-sided silicon strip detector [37] .

下、*NeXT* (New X-ray Telescope) 計画が立ち上がった (昨年度の年次報告を参照)。今年度は、JAXA に対し全日本の体制で提案を行い、宇宙理学委員会において、次期の理学ミッションとして最高位の評価を受けることができた。また JAXA、Stanford 大、東工大、広島大などと協力して、搭載装置の 1 つである軟ガンマ線検出器 (SGD) の基礎開発を続行した。

< 報文 >

(原著論文 (査読つき))

- [1] Terada, Y., Ishida, M. & Makishima, K.: “The Anisotropic Transfer of Resonance Photons in Hot Plasmas on Magnetized White Dwarfs”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **56**, 533–546 (2004)
- [2] Miyawaki, R., Sugiho, M., Kokubun, M. & Makishima, K.: “*Chandra* Observation of Luminous Sources in the Nearby Irregular Galaxy NGC 4449”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **56** 591–595 (2004)
- [3] Yanagida, T., Ezoe, Y. & Makishima, K.: “X-ray Flares from a B-Type Star HD38563S in NGC 2068 Observed with *Chandra*” *Publ. Astr. Soc. Japan* **56**, 813–818 (2004)
- [4] Fukazawa, Y., Makishima, K. & Ohashi, T.: “ASCA Compilation of X-Ray Properties of Hot Gas in Elliptical Galaxies and Galaxy Clusters: Two Breaks in the Temperature Dependences”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **56**, 965–1009 (2004)
- [5] Matsumoto, Y., Makishima, K., Kotoku, J., Yoshimori, M., Suga, K., Kosugi, T., Masuda, S. & Morimoto, K.: “A Statistical Study of Gamma-Ray Emitting Solar Flares Observed with *Yohkoh*”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **57**, 211–210 (2005)

- [6] Murashima, M., Kubota, A., Makishima, K., Kokubun, M., Hong, S. & Negoro, H.: “X-Ray Spectra of the Narrow-Line Seyfert 1 Galaxy Ton S180 in Comparison with Galactic Black Holes”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **57**, 279–285 (2005)
- [7] Mihara, T., Makishima, K. & Nagase, F.: “Luminosity-Related Changes in the Cyclotron Resonance Structure of the Binary X-Ray Pulsar 4U 0115+63”, *Astrophys. J.* **610**, 390–401 (2004).
- [8] Takahashi, H., Okada, Y., Kokubun, M. & Makishima, K.: “*XMM-Newton* and *Chandra* Observations of the Central Region of M31”, *Astrophys. J.* **615**, 242–252 (2005)
- [9] Teegarden, J.B., (18 authors), Makishima, K. *et al.*: “*INTEGRAL* SPI Limits on Electron-Positron Annihilation Radiation from the Galactic Plane”, *Astrophys. J.* **621**, 296–300 (2005)
- [10] Young, A., Rudnick, L., Katz, D., DeLaney, T., Kassim, N.E. & Makishima, K.: “Canonical Particle Acceleration in FRI Radio Galaxies”, *Astrophys. J.*, in press (astro-ph/0502557)
- [11] 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)
- [12] Miyawaki, R., Niko, H., Okada, Y., Kokubun, M., Makishima, K. *al.*: “High Resolution Fourier Synthesis Hard X-Ray Imaging Based on CdTe Strip Detectors”, *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, in press (2005)
- [13] Terada Y., Ohno, M., Murashima, M. *et al.*: “Development of a Monte Carlo Simulator for the *Astro-E2* Hard X-ray Detector (HXD-II)”, *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, in press (2005)
- [14] Ikagawa, T., Kataoka, J., Yatsu, Y., Saito, T., Kuramoto Y., Kawai N., Kokubun, M., Kamae T., Ishikawa Y. & Kawabata, N.: “Study of Large Area Hamamatsu Avalanche Photodiode in a γ -ray Scintillation Detector”, *Nucl. Instr. Meth. A* **538**, 640–650 (2005)
- [15] Itoh, T., Niko, H., Kokubun, M., Makishima, K., Kawaharada, M., Takahashi, I. & Miyasaka, H.: “Evaluation of Radiation Tolerance of FETs Used for *Astro-E2* Hard X-ray Detector (HXD-II)”, *Nucl. Instr. Meth. A* **541**, 241–247 (2005)
- [16] Takahashi, T., Nakazawa, K., Watanabe, S., Sato, G., Mitani, T., Tanaka, T., Oonuki, K., Tamura, K., Tajima, H., Kamae, T., Madejski, G., Nomachi, M., Fukazawa, Y., Makishima, K., Kokubun, M., Terada, Y., Kataoka, J. & Tashiro, M.: “Application of CdTe for the *NeXT* Mission”, *Nucl. Instr. Meth. A* **541**, 332–341 (2005)
- [17] Sato, G., Parsons, A., Hullinger, D., Suzuki, M., Takahashi, T., Tashiro, M., Nakazawa, K., Okada, Y., Takahashi, H., Watanabe, S. *et al.*: “Development of a Spectral Model Based on Charge Transport for the Swift/BAT 32K CdZnTe Detector Array” *Nucl. Instr. Meth. A* **541**, 372 (2005)
- [18] Suzuki, M., Tashiro, M., Sato, G., Watanabe, S., Nakazawa, K., Takahashi, T., Okada, Y., Takahashi, H. *et al.*: “Hard X-ray Response of CdZnTe Detectors in the Swift Burst Alert Telescope” *Nucl. Instr. Meth. A*, in press (2005)
- [19] Kubota, A., Makishima, K. & Done, C.: “Understanding of X-Ray Spectra of Black Hole Binaries and Its Application to ULXs”, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **155**, 19–26 (2004)
- [20] Murashima, M.M., Kubota, A. & Makishima, K.: “X-Ray Spectra of Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies in Comparison with Galactic Black Holes”, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **155**, 389–390 (2004)
- [21] Tanaka, T., Sugiho, M., Kubota, A., Makishima, K. & Takahashi, T.: “Spectral Evolution of an Ultraluminous Compact X-Ray Source in NGC 253”, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **155**, 427–428 (2004)
- [22] Takahashi, T., Makishima, K., Fukazawa, Y., Kokubun, M., Nakazawa, K., Nomachi, M., Tajima H., Tashiro, M. & Terada, Y.: “Hard X-ray and Gamma-Ray Detectors for the *NeXT* Mission”, *New Astronomy Reviews*, **48**, 269–273 (2004)
- [23] Parmar, A., Hasinger, G., (14 authors), Kawai, N., Koyama, K., Makishima, K. *et al.*: “Studying the Evolution of the Hot Universe with the X-ray Evolving Universe Spectroscopy Mission — *XEUS*”, *Adv. Space Res.* **34**, 2623–2627 (2004)
- [24] Urata, Y., (10 authors), Tamagawa, T. & Makishima, K.: “Multiband Optical Follow-Up Observations of GRB 020813 at KISO and Bisei Observatories”, *Baltic Astronomy* **13**, 261–265 (2004)
- [25] Takahashi, H., Yanagida, T., Kasama, D., Itoh, T., Niko, H., Kokubun, M., Makishima, K., Yanagitani, T., Yagi, H., Shigeta, T., Ito, T.: “Comparative Studies of YAG:Ce Single/Poly-Crystal Scintillators”, *KEK Proc.* **2004-4**, 105 (2004)
- [26] Yanagida, T., Takahashi, H., Kasama, D., Ito, T., Niko, H., Kokubun, M., Makishima, K., Yanagitani, T., Yagi, H., Shigeta, T. & Ito, T.: “Evaluation of properties of YAG (Ce) Poly-Crystal Scintillator with APD”, *KEK Proc.* **2004-4**, 111 (2004)
- [27] Kawaharada, M., Kokubun, M., Makishima, K., Hong, S., Terada, Y. *et al.*, “Response of the HXD-II Detector to Cosmic Heavy Ions”, *RIKEN Accel. Prog. Rep.* **37**, 88 (2004)
- [28] 村島未生、川原田円、国分紀秀、岡田祐、牧島一夫、井上北斗、小林謙仁、三谷烈史、中澤和洋、高橋忠幸、洪秀徹、寺田幸功、宮坂浩正、山岡和貴、川添哲志、他 HXD チーム：「*Astro-E2* 衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD-II) の放射化バックグラウンド特性」、宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-04-004 (2004)

(会議抄録)

- [29] Takahashi, T., Awaki, A., Dotani, T., Fukazawa, Y., Hayashida, K., Kamae, T., Kataoka, J., Kawai, N., Kitamoto, S., Kohmura, T., Kokubun, M., Koyama, K., Makishima, K. *et al.*: “Wide band X-ray Imager (WXI) and Soft Gamma-ray Detector (SGD) for the *NeXT* Mission”, *Proc. SPIE* **5488**, 549–560 (2004)
- [30] Tajima, H., Madejski, G., Mitani, T., Tanaka, T., Nakamura, H., Nakazawa, K., Takahashi, T., Fukazawa, Y., Kamae, T., Kokubun, M., Marlow, D., Nomachi, M. & Silva, E. C.: “Gamma-ray Polarimetry with Compton Telescope”, *Proc. SPIE* **5488**, 561–571 (2004)
- [31] Kawaharada, M., Hong, S., Murashima, M., Kokubun, M., Itoh, T., Makishima, K., Miyawaki, R., Niko, H., Yanagida, T. *et al.*: “Development and Qualification of the HXD-II onboard *Astro-E2*”, *Proc. SPIE* **5501**, 286–295 (2004)
- [32] 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”*, in press
- [33] 五十川知子、片岡 淳、谷津陽一、倉本祐輔、齊藤孝男、河合誠之、深沢泰司、三谷烈史、高橋忠幸、国分紀秀、柳田健之「宇宙用アバランシェフォトダイオードの開発と *NeXT* 衛星への応用」第4回宇宙科学シンポジウム (宇宙科学研究所)、p.81 (2004)

(国内雑誌)

- [34] 牧島一夫:「銀河団のガスは冷えていなかった」、*パリティ* 2005 年 1 月号 (丸善)

(学位論文)

- [35] Okada, Yuu: “Observational Study of Diffuse X-ray Emission from Globular Clusters and their Interaction with the Galactic Halo”, 博士論文
- [36] Takahashi, Hiromitsu: “X-ray Study of Mass-Accretion Flows onto Weakly-Magnetized Neutron Stars”, 博士論文
- [37] 伊藤健:「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」、修士論文
- [38] 二河久子:「*Astro-E2* 搭載硬 X 線検出器フォトチューブの信頼性評価」、修士論文

(著書)

- [39] 牧島一夫:「電磁波と粒子線の観測から探る宇宙の進化」、第18回「大学と科学」公開シンポジウム『ビッグバン宇宙と未来』より (佐藤勝彦編、クパプロ; 2005 年 1 月)
- [40] 牧島一夫:「ブラックホールを見る」,『アインシュタインと 21 世紀の物理学』第 8 章 (日本物理学会編、日本評論者; 2005 年 3 月)

< 学術講演 >

(国際会議)

● 招待講演

- [41] Makishima, K., Ebisuzaki, S., Kubota, A., Miyawaki, R., Mizuno, T., Namiki, M., Sugiho, M., Tanaka, T. & Tsunoda, N.: “Spectral Classifications and Transitions of ULXs in Comparison with Galactic Black-Hole Binaries”, *The 204th Amer. Astr. Soc. Meeting* (Denver), May 30–June 3 (2004)
- [42] Makishima, K.: “The Physics of Particle Acceleration Probed with Hard X-rays– Importance of the Energy Band above 10 keV”, *Constellation-X/XEUS Scientific Meeting* (Cambridge, Massachusetts), Feb. 23–25 (2005)

● 一般講演 (含ポスター)

- [43] Takahashi, I., Makishima, K., Kawaharada, M., Ikebe, Y. & Tamura, T.: “Two-Phase Nature of the ICM of the Centaurus Cluster”, *X-ray Studies of Galaxy Clusters and Deep X-ray Surveys* (Rinberg, Germany), May 2–5, (2005); <http://www.mpe.mpg.de/ringberg04/> → Program and Proceedings
- [44] Miyawaki, R., Sugiho, M., Kubota, A., Makishima, K., Namiki, M., Tanaka, T. & Tsunoda, N.: “*Chandra* and *XMM-Newton* Survey of Luminous X-ray Point Sources in Nearby Galaxies” (poster), *The 204th Amer. Astr. Soc. Meeting* (Denver), May 30–June 3 (2004)
- [45] Ebisuzaki, T., Makino, J., Yamazaki, R., Baumgardt, H., Matsubayashi, T. & Makishima, K.: “Runaway Merger in a Dense Stellar Cluster as a Progenitor of Gamma-ray Burst”, *ibid.*
- [46] Itoh, T., Niko, H., Kokubun, M., Makishima, K., Kawaharada, M., Takahashi, I. & Miyasaka, H.: “Evaluation of Radiation Tolerance of FETs Used for *Astro-E2* Hard X-ray Detector (HXD-II)” (poster), *5th Int’l Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors* (Hiroshima), June 14–17 (2004)
- [47] Kawaharada, M., Murashima, M., Itoh, T., Niko, H., Miyawaki, R., Yanagida, T., Makishima, K., Kokubun, M. *et al.*, “Development and Calibration of HXD-II Onboard *Astro-E2*”, *SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation* (Glasgow), June 21–25 (2004)
- [48] Takahashi, H., Okada, Y., Kokubun, M. & Makishima, K.: “Diffuse X-ray Emission in the Central Regions of M31 and M33” (poster), *Galaxies Viewed with Chandra* (Boston), July 7–9 (2004)
- [49] Kokubun, M., Murashima, M., Kawaharada, M., Takahashi, I., & Makishima, K.: “Measurement and Estimation of Activation Effect onto Hard X-ray Detector at LEO”, *the 35th COSPAR Scientific Assembly* (Paris), July 18–25 (2004)

- [50] Murashima, M. M., Kubota, A., & Makishima, K.: “X-ray Spectra of Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies: Black Holes under High Accretion Rates” (poster), *ibid.*
- [51] Kawaharada, M., Takahashi, I., Shimasaku, K., Makishima, K., Nakazawa, K., Fukazawa, Y. & Matsushita, K.: “The Merged Group of Galaxies RX J0419+0225” (poster), *ibid.*
- [52] Itoh, T., Kokubun, M., Makishima, K. & Kubota, A.: “Spectral Analysis of a Transition from the Low/Hard State Into the High/Soft State of the Galactic BHC, XTE J1650-500”, *ibid.*
- [53] Takahashi, I., Makishima, K., Kawaharada, M., Ikebe, Y. & Tamura, T.: “Two-phase Nature of the ICM of the Centaurus Cluster” (poster), *ibid.*
- [54] Yanagida, T., Takahashi, H., Ito, T., Kasama, D., Kokubun, M., Makishima, K., Yanagitani, T., Yagi, H., Shigeta, T. & Ito, T.: “Evaluation of Properties of YAG (Ce) Ceramic Crystal Scintillators”, *IEEE Nuclear Science Symposium* (Rome), October 18-22 (2004)
- [55] Miyawaki, R., Niko, H., Okada, Y., Kokubun, M., Makishima, K., Negoro, H., Kotoku, J. *et al.*: “High Resolution Fourier Synthesis Hard X-Ray Imaging Based on CdTe Strip Detectors”, *ibid.*
- (国内会議)
- 日本物理学会・秋の分科会 (高知大学、2004 年 9 月 17 ~ 30 日)
- [56] 古徳純一, 牧島一夫, 小浜光洋, 寺田幸功, 玉川徹: 「太陽フレアのガンマ線スペクトルに与えるコンプトン散乱の効果」、27aSD-11
- [57] 大野雅功, 深沢泰司, 山岡和貴, 牧島一夫, 国分紀秀, 寺田幸功, 古徳純一, 田代信, 洪秀徴, 森正統, 村上敏夫, 高橋忠幸, 中澤知洋: 「Astro-E2 衛星搭載硬 X 線全天モニタの地上較正試験」、28aSD-8
- [58] 川原田円, 村島未生, 伊藤健, 二河久子, 宮脇良平, 柳田健之, 北口貴雄, 平栗慎也, 高橋勲, 国分紀秀, 牧島一夫ほか: 「Astro-E2 衛星搭載 硬 X 線検出器 (HXD-II) 主検出部の打ち上げ前較正試験」、28aSD-9
- [59] 歳藤利行, 丹羽公雄, (15 名), 尾崎正伸, 国分紀秀ほか: 「エマルジョン技術を使った医療用重イオンビームの核破砕反応の研究-核破砕粒子の電荷決定の信頼性について-」、29pSA-9
- 日本天文学会・秋の年会 (岩手大学、2004 年 9 月 21 ~ 23 日)
- [60] 牧島 一夫: 「クーリングフロー問題とその磁気流体的な意味」、C01a
- [61] 高橋勲, 牧島一夫, 川原田円, 池辺靖: 「『クーリングフロー』銀河団のプラズマの温度構造」、C03a
- [62] 伊藤健, 牧島一夫, 久保田あや: 「XTE J1650-500 アウトバースト初期の標準降着円盤の発達」、H02a
- [63] 平栗慎也, 国分紀秀, 牧島一夫: 「SS433 による放射の異方性についての検証」、H03a
- [64] 久保田あや, 牧島一夫, 水野恒史, 田中孝明, 高橋弘充, C. Done, M.C.Urry: 「近傍渦巻銀河 IC342 中の超光度天体の XMM-Newton による観測」、H04a
- [65] 阿部由紀子, 永江修, 深沢泰司, 久保田あや, 笠間太介, 牧島一夫: 「4U1630-47 の high state における降着円盤の 3 状態と QPO」、H06a
- [66] 浦田裕次, 玉川徹, 牧島 一夫, 中田 好一ほか: 「ガンマ線バースト統一モデルの観測からの検証」、H67a
- [67] 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」、N10b
- [68] 江副祐一郎, 内山泰伸, 大島泰, 関本裕太郎, 辻本匡弘, 牧島一夫, 松崎恵一: 「星形成領域 Cepheus B における広がった X 線放射の検証」、P29a
- [69] 岡田 祐, 国分 紀秀, 牧島 一夫: 「球状星団に付随する広がった X 線放射の検出 (2) ~ 銀河ハローとの相互作用による加熱/加速現象の検出 ~」、Q21a
- [70] 北口 貴雄, 川原田 円, 高橋 勲, 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」、T17a
- [71] 村島未生, 川原田円, 二河久子, 宮脇良平, 高橋勲, 国分紀秀, 牧島一夫, 三谷烈史, 渡辺伸ほか: 「Astro-E2 衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD-II) 主検出部の打ち上げ前較正試験」、W01a
- [72] 洪秀徴, 寺田幸功, 筒井章仁, 山岡和貴, 大野雅功, 深沢泰司, 森正統, 田代信, 牧島一夫ほか: 「Astro-E2 衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD-II) シールド部の打ち上げ前較正試験」、W02a
- 第 5 回宇宙科学シンポジウム (JAXA 宇宙科学研究本部、2005 年 1 月 6 ~ 7 日)
- [73] 寺田幸功, 玉川徹, 望月優子, 馬場彩, 牧島一夫, 高橋忠幸, 中澤知洋ほか: 「NeXT で探る元素合成の起源」、P1-09
- [74] 田島宏康, G. Madejski, 三谷烈史, 田中孝明, 中村秀仁, 中澤知洋, 高橋忠幸, 深沢泰司, 釜江常好, 国分紀秀, 能町正治ほか: 「NeXT・軟ガンマ線検出器の偏光観測性能」、P1-14
- [75] 国分紀秀ほか: 「Astro-E2 衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD-II) の現状; (1) 主検出部」、P4-7
- [76] 山岡和貴ほか: 「Astro-E2 衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD-II) の現状; (2) 全天モニター部」、P4-8
- [77] 寺田幸功ほか: 「Astro-E2 衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD-II) の現状; (3) ソフトウェア部」、P4-9
- Astro-E2 でひらく X 線分光天文学 (京都テルサ、2004 年 3 月 18-19 日)
- [78] 高橋弘充: 「Astro-E2 による弱磁場中性子星への質量降着流の研究」
- [79] 牧島一夫: 「宇宙における長距離相互作用の果たす役割」
- [80] 川原田 円: 「Astro-E2 で探る銀河に引きずられた銀河団プラズマの運動」
- [81] 宮脇良平: 「Astro-E2 による大光度 X 線源に付随する星雲からの蛍光輝線の探査」 (ポスター)

- 日本物理学会・春の年会（理科大野田、2004 年 3 月 24～27 日）
 - [82] 牧島一夫、国分紀秀、高橋勲、川原田円、北口貴雄、大橋隆哉、深沢泰司、松下恭子、田村隆幸、中澤知洋、太田直美、池辺靖：「X線診断で探る銀河団プラズマの熱的および力学的な進化」、24pXA-1
 - [83] 中島基樹、三原建弘、牧島一夫、二河久子：「X線連星パルサー 4U0115+63 の X 線光度とサイクロトロン共鳴エネルギーの変化」、24pXA-2
 - [84] 川原田円、高橋勲、牧島一夫、中澤知洋、松下恭子、深沢泰司：「重元素の輝線をプローブとした銀河団の進化」、24pXG-12
 - [85] 平栗慎也、国分紀秀、高橋勲、宮脇良平、伊藤健、牧島一夫：「井戸型アクティブシールドとアクティブマスクを用いた低バックグラウンド撮像型硬 X 線検出器の開発」、24pXK-1
 - [86] 二河久子、川原田円、高橋勲、国分紀秀、牧島一夫、洪秀徴、阿部圭一、寺田幸功ほか：「*Astro-E2* 衛星搭載 硬 X 線検出器 (HXD-II) フォトチューブ部の信頼性評価」、24pXK-10
 - [87] 北口貴雄、牧島一夫、国分紀秀、高橋勲、川原田円、村島未生、宮脇良平、柳田健之、伊藤健、二河久子、平栗慎也、高橋忠幸、中澤知洋、深沢泰司、寺田幸功ほか：「*Astro-E2* 衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD-II) のデータ取得系の地上最終検証」、25pWJ-12
 - [88] 伊藤健、宮脇良平、高橋勲、国分紀秀、牧島一夫、高島健、田中孝明、高橋忠幸：「結晶シンチレータと半導体ストリップ検出器を用いた宇宙 γ 線位置検出器の開発」、27aWH-4
 - [89] 国分紀秀、村島未生、高橋勲、寺田幸功、渡辺伸、高橋忠幸、牧島一夫：「宇宙線陽子によるガンマ線検出器素子の放射化バックグラウンドの検証」、27aWH-5
 - [90] 柴崎昌紀、渋谷寛、(16 名)、尾崎正伸、国分紀秀ほか：「エマルジョン技術を使った医療用重イオンビームの核破砕反応の研究—エマルジョンスペクトロメータ用超薄型エマルジョンフィルムの製作—」、27aWH-6
 - [91] 歳藤利行、丹羽公雄、(17 名)、尾崎正伸、国分紀秀ほか：「医療用炭素ビームの入射核破砕反応」、27aWH-9
- 日本天文学会・春の年会（明星大学、2005 年 3 月 28～30 日）
 - [92] 牧島一夫：「宇宙大規模プラズマと太陽コロナの比較研究」、B05r
 - [93] 宮脇良平、久保田あや、牧島一夫、田中孝明、角田奈緒子：「近傍銀河の大光度 X 線源に附随する星雲からの蛍光輝線の探査」、H36b
 - [94] 高橋 O 充、牧島一夫：「X線を用いた弱磁場中性子星への質量降着流の研究」、H68a
 - [95] 阿部由紀子、永江修、深沢泰司、久保田あや、牧島一夫：「ブラックホール Very High State に対するコンプトン散乱を考慮した解釈の普遍性」、H34b
 - [96] 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 (2)」、N20a
 - [97] 岡田祐、国分紀秀、牧島一夫：「球状星団と銀河ハローの相互作用による広がった X 線放射の検出」、Q33a
 - [98] 寺田幸功、渡辺伸、(3 名)、伊藤健、(3 名)、川原田円、高橋勲、村島未生、宮脇良平、柳田健之、国分紀秀、牧島一夫ほか：「*Astro-E2* 衛星硬 X 線検出器 (HXD-II) のソフトウェア開発の現状」、W54a
- その他
 - [99] 柳田健之、国分紀秀、高橋 弘充、伊藤健、牧島一夫、柳谷高公、八木秀喜、繁田岳志、伊東孝之：「多結晶 $Y_3Al_5O_{12}$ シンチレータの基礎特性評価」、応用物理学会 年次大会（東北学院大学、2004 年 9 月 3 日）
 - [100] 牧島一夫：「ブラックホール観測の現状」高宇連 第 5 回研究会『高エネルギー天体物理学の新展開』（東京都立大学、2004 年 10 月 1～2 日）
 - [101] 岡田 祐：「球状星団で見えてきた粒子加速現象」、同上
 - [102] 国分紀秀：「HXD on *Astro-E2* バックグラウンドとの戦い」、高エネルギー宇宙・原子核交流促進 γ 線検出器ワークショップ（埼玉大学、2004 年 12 月 27 日）
 - [103] 柳田健之、高橋弘充、伊藤健、国分紀秀、牧島一夫、柳谷高公、八木秀喜、繁田岳志、伊東孝之： γ 線検出用 Ce-Nd 共ドーブ多結晶 YAG シンチレータの基礎特性評価（ポスター）、第 19 回「放射線検出器とその応用」研究会（KEK、2005 年 2 月 2 日）
 - [104] 国分紀秀：「*Astro-E2* 衛星搭載硬 X 線検出器の現状」、東大 RESCEU 主催・第 3 回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会（館山市、2005 年 2 月 17 日）
 - [105] 岡田 祐：「球状星団での粒子加速現象」CANGAROO 研究会（東大宇宙線研、2005 年 2 月 24 日）
 - [106] 川原田 円：「宇宙に広がる元素～誕生と拡散～」、理学系 21 世紀 COE 合同シンポジウム『萌芽-理学の森へ』（理学部 1 号館小柴ホール、2005 年 3 月 7 日）
 - [107] 高橋弘充：「X線を用いた弱磁場中性子星への質量降着流の研究」、高宇連第 3 回博士論文発表会（JAXA 宇宙科学研究本部、2004 年 3 月 22 日）
 - [108] 岡田祐：「球状星団からの広がった X 線放射および銀河ハローとの相互作用の観測的研究」、同上
 - [109] 柳田 健之、高橋弘充、伊藤健、国分紀秀、牧島一夫、柳谷高公、八木秀喜、繁田岳志、伊東孝之：「多結晶 $(Y,Gd)_3Al_5O_{12}$ シンチレータの基礎特性評価」、応用物理学会 年次大会（埼玉大学、2005 年 3 月 31 日）
- (セミナー、講演会、談話会)
 - [110] 牧島一夫：「宇宙における物理現象」、文科省サイエンス・パートナーシップ・プログラム『物理学最前線』（埼玉県立川越高校、2004 年 7 月 10 日）
 - [111] 高橋 勲：「X-ray Diagnostics of Thermal Condition of the Hot Plasmas in Clusters of Galaxies」、宇宙研談話会（JAXA 宇宙科学研究本部、2004 年 7 月 16 日）
 - [112] 牧島一夫：「X線・ガンマ線で探る高エネルギー宇宙」、集中講義（大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻、2004 年 7 月 13～15 日）

- [113] 牧島一夫：「ブラックホールを見る」、日本物理学会 2004 年度科学セミナー『アインシュタインと 21 世紀の物理学』（新宿区牛込筆筒公民ホール、2004 年 8 月 6 日）
- [114] 牧島一夫：「ロケット、人工衛星、ブラックホール」、理学系研究科第 6 回公開講演会『宇宙への情熱～基礎科学と宇宙開発のハーモニー』（安田講堂、2004 年 12 月 3 日）
- [115] 高橋弘充：「X線を用いた弱磁場中性子星への質量降着流の研究」、宇宙研談話会（JAXA 宇宙科学研究本部、2005 年 2 月 10 日）
- [116] 岡田 祐： “Observational Study of Diffuse X-ray Emission from Globular Clusters and their Interaction with the Galactic Halo”, GSFC Colloquium (Goddard Space Flight Center, USA, 2005 年 2 月 16 日)
- [117] 高橋弘充： “X-ray Study of Mass-Accretion Flows onto Weakly-Magnetized Neutron Stars”, 同上
- [118] 高橋弘充： “X-ray Study of Mass-Accretion Flows onto Weakly-Magnetized Neutron Stars”, SLAC Colloquium (Stanford University, 2005 年 2 月 18 日)
- [119] 岡田 祐： “Observational Study of Diffuse X-ray Emission from Globular Clusters and their Interaction with the Galactic Halo”, 同上
- [120] 高橋弘充：「X線を用いた弱磁場中性子星への質量降着流の研究」、談話会（広島大学理学研究科、2005 年 2 月 28 日）
- [121] 岡田 祐：「球状星団からの広がった X線放射および銀河ハローとの相互作用の観測的研究」、談話会（広島大学理学研究科、2005 年 2 月 28 日）
- [122] 岡田 祐：「球状星団からの広がった X線放射および銀河ハローとの相互作用の観測的研究」、談話会（大阪大学理学研究科、2005 年 3 月 2 日）
- [123] 岡田 祐：「球状星団からの広がった X線放射および銀河ハローとの相互作用の観測的研究」、談話会（京都大学理学研究科、2005 年 3 月 7 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。これは特に、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、如何に高 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 15 年度には一時的に九州大学に移設され、九大の所有するマイクロ波発振器（8.2 GHz, 200 kW）を用いて実験が行われ、年度末には柏キャンパスに再度移設された（図 6.3 a）。平成 16 年度には、前年度取得したデータの解析を進めたほか、装置の改良を含め、柏キャンパスでの本格的な実験開始に向けた準備を行った。



図 6.3 a: TST-2 in the new experimental hall at Kashiwa Campus.

マイクロ波によるプラズマ立ち上げと維持

平成 15 年度の実験では、大電力マイクロ波を用いた I_p 立ち上げ及びその維持を行った。定常的なトロイダル磁場（0.15 T）と弱い垂直磁場（1 mT）のかかった状態で 100 kW のマイクロ波を弱磁場側か

ら入射したところ、約 0.3 秒の間、 $I_p = 4$ kA のプラズマ電流が、線積分密度 $n_e l = 0.3 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$ で維持された。軟 X 線のエネルギースペクトルから導出された電子温度は 160 eV であった。測定された電子温度、電子密度は非常に高いポロイダルベータ β_p を意味しており、どのような平衡配位が実現されているかを調べることは重要である。この時のプラズマ電流分布および磁場配位の再構成を以下に行った。真空容器内に多数の電流フィラメントを配置し、その電流値をフリーパラメータとして磁気計測にフィットさせる。ただし、滑らかな分布を得るために、曲率を組み込んだ最小自乗法を用いた。図 6.3 b は、外部磁場と電流フィラメントの作る磁気面の様子を示したものである。トラス内側のリミターで決まる最外郭磁気面に対して、プラズマ電流はより広い領域まで広がっており、通常の最外郭磁気面外の電流は無視できる平衡配位とは異なっている可能性があり、今後より詳しく調べる必要がある。

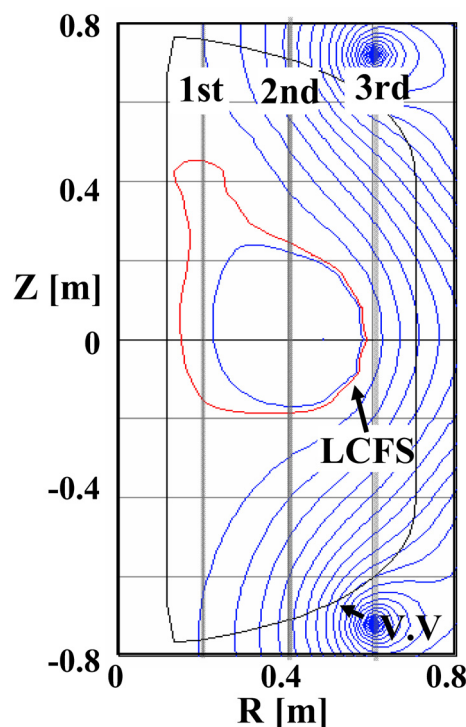


図 6.3 b: Reconstructed flux surfaces. Vertical lines show the locations of electron cyclotron harmonic resonance layers.

電子バーンシュタイン波を用いたプラズマ加熱実験

高 β で誘電率の高い ST プラズマを加熱する有力な方法のひとつが電子バーンシュタイン波（EBW）を用いるものである。EBW はプラズマ中で存在し得る短波長の静電波であり、サイクロトロン減衰によりプラズマ中の電子に吸収される。平成 15 年に TST-2 を九州大学に移設して行った EBW によるプ

ラズマ加熱実験では、世界で初めて X-B モード変換シナリオを用いた。このシナリオでは、X モードの電磁波をプラズマに垂直に入射し、弱磁場側周辺部で EBW にモード変換させる。X モードを EBW に効率よく変換させるためには、R および L 遮断層と高域混成共鳴層より成る三重層が存在する周辺領域で急峻な密度勾配を形成する必要がある。これを実現させるために、マイクロ波入射アンテナの周囲に可動リミッターを設置した。この実験は電磁波の伝播可能な密度限界（カットオフ密度）を約 1 桁上回る密度で行われたので、プラズマ中心部の加熱は EBW による加熱を示唆する。図 6.3 c に示すように、90 kW のマイクロ波パワー入射により、(c) 1–10 keV の軟 X 線、(d) 電子密度、(e) H_{α} 線の発光、(f) 放射パワー、(g) プラズマの蓄積エネルギーの増加が観測された。この実験では電子温度は直接は計測されなかったが、軟 X 線の増加は高エネルギー電子の増加を示し、蓄積エネルギーの増加はプラズマの加熱を示している。また (a) プラズマ電流および (h) 全エネルギー（プラズマエネルギー + ポロイダル磁場エネルギー）の増加は電流駆動を示唆している。しかし、蓄積エネルギーの時間変化から推定された吸収パワーは入射パワーの 10–20% 程度であった。今後その原因をつきとめ、吸収効率（従って加熱効率）の向上を目指す必要がある。

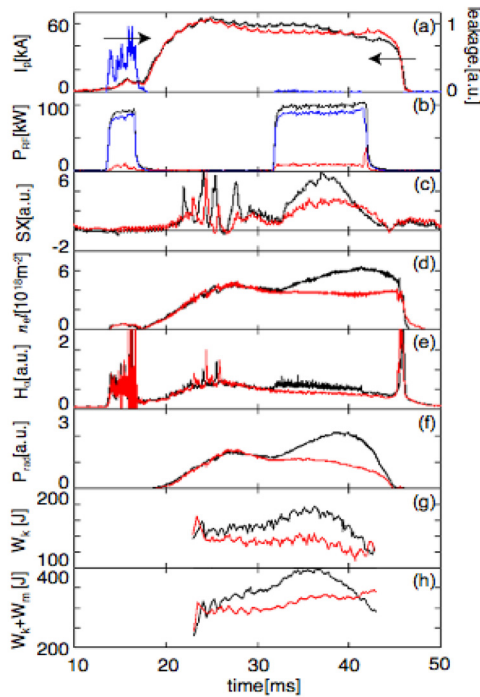


図 6.3 c: Comparison of plasma parameters with (black) and without (grey) RF power injection.

6.3.2 JT-60U トカマクにおけるプラズマ電流立ち上げ・維持実験

日本原子力研究所の JT-60U において、様々な手法を使って I_p 立ち上げ実験を行っている。平成 16 年度の実験ではトーラス内側に位置する CS を全く使わずに、100 kA を超える I_p 立ち上げに成功した。この I_p 立ち上げシナリオは、平成 15 年度に我々のグループが TST-2 で実現させたものである。 I_p 立ち上げにはトーラス外側に位置するコイルによる誘導電場を用いるが、従来 I_p 立ち上げの必要条件とされていたポロイダル磁場がゼロとなる「ヌル点」の存在は必ずしも必要でないことが実証された。但しその場合、1 MW 以上の電子サイクロトロン (EC) 周波数帯の高周波パワーによるプラズマの供給が必要であることもわかった。

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 I_{BS} を流すようになる。これが全プラズマ電流を上回ること ($I_{BS}/I_p > 1$) 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、 $I_p = 260$ kA を 1 秒間維持することに成功した。また、NBI および EC 波による電流駆動とブートストラップ電流により、 I_p を 215 kA から 310 kA まで増加させることに成功している。更に、NBI や EC 波による電流駆動の寄与が無視でき、ブートストラップ電流が支配的となる条件で、トーラスの周回電圧が負となり、トーラス中央部の CS が再充電される (図 6.3 d の I_F の時間微分が正になる) という、BSOD の実現を示唆する画期的な成果が得られている。

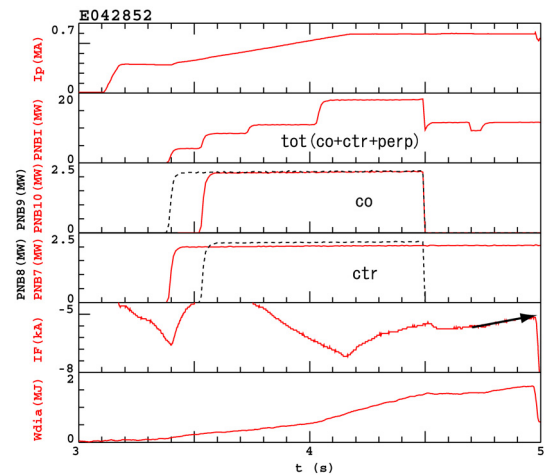


図 6.3 d: Bootstrap overdrive on JT-60U.

6.3.3 JFT-2M トカマク周辺部の乱流-帯状流システムの非線形過程の研究

高温不均一磁化プラズマ中の乱流の研究は、従来の乱流自体の非線形過程の研究から乱流-帯状流の非線形相互干渉状態を研究する段階に質的変換を遂げつつある。近年極低周波帯状流やその亜種である geodesic acoustic mode (GAM) の存在が実験的に同定され、バイスペクトル解析を通じて低周波電場揺動と乱流揺動の非線形過程の研究が世界的に進捗している。しかし、バイコヒーレンスのような非線形結合係数の定量的解釈や物理的意味を論じた研究はまだ行われていない。昨年度報告した、JFT-2M トカマクプラズマで発見されたコヒーレントなポテンシャル揺動 (約 10 kHz) は、その後 GAM と同定された。乱流と帯状流 (GAM) の非線形結合係数の意味を解明すべく、高速駆動プローブで取得した静電ポテンシャルデータの詳細な解析を行った結果、ポテンシャルのバイコヒーレンス値自体が帯状流の振幅の二乗に比例することが判明した (図 6.3 e)。ポ

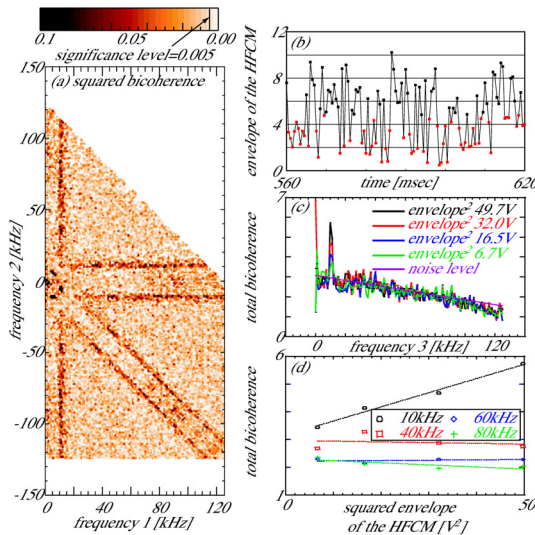


図 6.3 e: (a) Bicoherence, (b) envelope of potential GAM fluctuation, (c) spectra of sum of squared bicoherence, (d) relationship between the sum of bicoherence and the squared envelope of GAM fluctuation.

テンシャルの GAM 揺動の包絡線は、時間的に振動していることが明らかになっている。包絡線の大小の時間帯で分割してバイコヒーレンス値を算出した結果、GAM 振幅の二乗値と GAM 周波数のバイコヒーレンス値間に明らかな線形関係が得られた。他方、背景乱流のバイコヒーレンス値間には際立った依存性は見られなかった。この結果は、乱流-帯状流システムの非線形結合強度に対して実験観測を行い、理論検証を行った世界で初めての結果である。また、ポテンシャルデータの詳細な解析によって、極低周

波のポテンシャル揺動 (約 1 kHz) の存在も明らかにされた。極低周波揺動と乱流との非線形結合係数は統計的に有意な数値を示し、80 kHz より高周波の背景揺動と非線形結合を持つことが判明した。ポテンシャル GAM 揺動の包絡線のスペクトルは極低周波揺動と同周波数でスペクトルのピークを持ち、有意な相関も観測された。極低周波揺動が極低周波帯状流に起因するかどうかの十分な検証が必要である。

6.3.4 LHD ヘリカルプラズマにおける電子加熱実験

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) において、通常 2.5 T の磁場を 1.5 T 以下に下げ、既存の ICH 加熱系を用いて高次高調波速 (HHFW) による電子加熱実験を行った。HHFW はイオンサイクロトロン周波数の高次高調波帯の波であり、誘電率の高い高 β プラズマ中でも良好な伝搬特性をもつ。波の位相速度と電子の速度が同程度であるというランダウ条件を満足した場合に波のエネルギーは粒子に吸収される。図 6.3 f はトムソン散乱による電子温

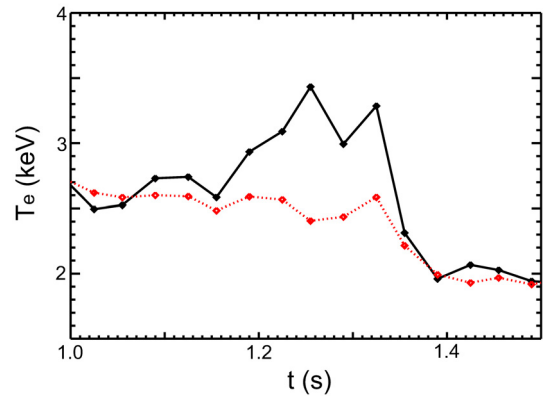


図 6.3 f: Electron heating by HHFW.

度計測による結果で、プラズマ中心付近 ($R = 3.5 - 3.7$ m) の平均電子温度の変化を表す。点線は SN5088 (HHFW 無し)、実線は SN5090 (HHFW 1.2 MW, 1.0-1.5 s) である。プラズマを維持するため、NBI 加熱が行われており、0.8-1.3 s には電子温度を高めるために ECH が行われている。SN50490 では HHFW が入射されることにより、中心付近の平均電子温度が 2.5 keV から 3.3 keV に上昇しているが、ECH の停止とともに電子温度は低下し、HHFW による電子加熱は起こらなくなっている。実験で得られた電子温度および電子密度分布を用いて、吸収を計算すると、波のエネルギーは主にプラズマ中心部に吸収されることがわかる。LHD のアンテナは 1 本のループのみで構成されているので、トロイダルモード数にして 0 にピークをもち、 ± 50 程度まで広がった幅広い波数スペクトルを励起する。波の減衰はランダウ条件が満たされた場合に起こるので、0 付近の波数をもつ波は位相速度が速すぎて電子に吸収されない。今回の実験で、ECH により $T_e = 2.5$ keV のプラズマが生成されているときに加熱が起こり、ECH

なしの $T_e = 2 \text{ keV}$ の場合は加熱が起こらなかったことは、アンテナの励起する波数スペクトルが適切でなかったことを表す。複数のアンテナをトロイダル方向に離して設置し、その相対位相を 180° にすると有限の波数にピークを持つスペクトルを励起することができるので、より有効な加熱ができると考えられる。TST-2 ではそのようなアンテナを用いて実験を行う予定である。

6.3.5 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

近年進展が目覚ましい 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 g）の開発、および HFW（高次速波）などの先進的 RF 手法による超高ベータ ST の維持を目指す。プラズマ合体による超

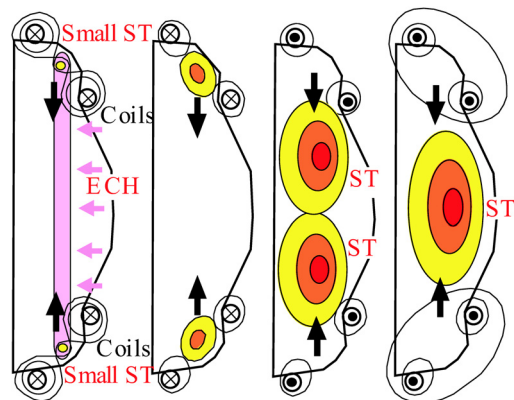


図 6.3 g: Merging start-up scenario for UTST.

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場合、生成した超高ベータ ST 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 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 16 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一部を製作した。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] N. Kasuya, K. Itoh, Y. Takase: Structural formation induced by electrode biasing in tokamaks: accessibility to a double-peaked E_r shear layer, *Plasma Phys. Control. Fusion* **46** (5A), A235–A240 (2004).
- [2] Y. Nagashima, K. Shinohara, K. Hoshino, A. Ejiri, K. Tsuzuki, T. Ido, K. Uehara, H. Kawashima, K. Kamiya, H. Ogawa, T. Yamada, S. Shiraiwa, S. Ohara, Y. Takase, N. Asakura, N. Oyama, T. Fujita, S. Ide, H. Takenaga, Y. Kusama, Y. Miura, JFT-2M group: Coherent edge fluctuation measurements in H-mode discharges on JFT-2M, *Plasma Phys. Control. Fusion* **46** (5A), A381–A386 (2004).
- [3] H. Nozato, S. Morita, M. Goto, Y. Takase, A. Ejiri, T. Amano, K. Tanaka, S. Inagaki, LHD Experimental Group: A study of charge dependence of particle transport using impurity pellet injection and high-spatial resolution bremsstrahlung measurement on the Large Helical Device, *Phys. Plasmas* **11** (5), 1920–1930 (2004).
- [4] S. Ishida, JT-60 Team, JFT-2M Group: High-beta steady-state research and future directions on the Japan Atomic Energy Research Institute Tokamak-60 Upgrade and the Japan Atomic Energy Research Institute Fusion Torus-2 Modified, *Phys. Plasmas* **11** (5), 2532–2542 (2004).
- [5] O. Motojima, H. Yamada, A. Komori, K.Y. Wataabe, T. Mutoh, Y. Takeiri, K. Ida, T. Akiyama, N. Asakura, N. Ashikawa, H. Chikaraishi, W.A. Cooper, M. Emoto, T. Fujita, M. Fujiwara, H. Funaba, P. Goncharov, M. Goto, Y. Hamada, S. Higashijima, T. Hino, M. Hoshino, M. Ichimura, H. Idei, T. Ido, K. Ikeda, S. Imagawa, S. Inagaki, A. Isayama, M. Isobe, T. Itoh, K. Itoh, S. Kado, D. Kalinina, T. Kaneba, O. Kaneko, D. Kato, K. Kawahata, H. Kawashima, H. Kawazome, T. Kobuchi, K. Kondo, S. Kubo, R. Kumazawa, J.F. Lyon, R. Maekawa, A. Mase, S. Masuzaki, T. Mito, K. Matsuoka, Y. Miura, J. Miyazawa, R. More, T. Morisaki, S. Morita, I. Murakami, S. Murakami, S. Muto, K. Nagaoka, K. Nagasaki, Y. Nagayama, Y. Nakamura, H. Nakanishi, K. Narishara, Y. Narushima, H. Nishimura, K. Nishimura, M. Mishiura, A. Nishizawa, N. Noda, T. Notake,

- H. Nozato, S. Ohdachi, K. Ohkubo, N. Ohyabu, N. Oyama, Y. Oka, H. Okada, M. Osakabe, T. Ozaki, B.J. Peterson, A. Sagara, T. Saida, K. Saito, S. Sakakibara, M. Sakamoto, R. Sakamoto, K. Sato, T. Seki, T. Shimozuma, M. Shoji, S. Sudo, S. Takagi, Y. Takahashi, Y. Takase, H. Takenaga, N. Takeuchi, N. Tamura, K. Tanaka, M. Tanaka, K. Toi, K. Takahata, T. Tokuzawa, Y. Torii, K. Tsumori, F. Watanabe, M. Watanabe, T. Watari, I. Yamada, S. Yamada, T. Yamaguchi, S. Yamamoto, K. Yamazaki, N. Yanagi, M. Yokoyama, N. Yoshida, S. Yoshimura, Y. Yoshimura, M. Yoshinuma: Review on the progress of the LHD experiment, *Fusion Sci. Technol.* **43** (1), 1–12 (2004).
- [6] T. Mutoh, R. Kumazawa, T. Seki, K. Saito, T. Watari, Y. Torii, N. Takeuchi, F. Shimpō, G. Nomura, M. Yokota, T. Watanabe, M. Osakabe, M. Sasao, S. Murakami, T. Saida, H. Okada, Y. Takase, A. Fukuyama, N. Ashikawa, M. Emoto, H. Funaba, P. Goncharov, M. Goto, Y. Hamada, K. Ida, H. Idei, K. Ikeda, S. Imagawa, S. Inagaki, M. Isobe, T. Kobuchi, S. Kubo, S. Masuzaki, K. Matsuoka, T. Minami, T. Mito, J. Miyazawa, T. Morisaki, S. Morita, S. Muto, Y. Nagayama, Y. Nakamura, H. Nakanishi, K. Narahara, Y. Narushima, K. Nishimura, N. Noda, T. Notake, S. Ohdachi, Y. Oka, T. Ozaki, B.J. Peterson, A. Sagara, S. Sakakibara, R. Sakamoto, K. Sato, M. Sato, T. Shimozuma, M. Shoji, H. Suzuki, Y. Takeiri, N. Tamura, K. Tanaka, K. Toi, T. Tokuzawa, K. Tsumori, K.Y. Watanabe, H. Yamada, I. Yamada, K. Yamazaki, M. Yokoyama, Y. Yoshimura, M. Yoshinuma, O. Kaneko, K. Kawahata, N. Ohyabu, K. Ohkubo, A. Komori, S. Sudo, O. Motojima: Long-pulse operation and high-energy particle confinement study in ICRF heating of LHD, *Fusion Sci. Technol.* **46** (1), 175–183 (2004).
- (会議抄録)
- [7] H. Kasahara, Y. Kamada, K. Sasaki, A. Ejiri, K. Hanada, M. Hasegawa, H. Hoshika, A. Iyomasa, K. Nakamura, H. Nozato, S. Ohara, S. Shiraiwa, Y. Takase, T. Yamada and H. Zushi: Preliminary EBW heating experiments on the TST-2 Spherical Tokamak, *Proc. 31st European Physical Society Conference on Plasma Physics*, London, June 28–July 2, 2004, *ECA* **28G** (CD ROM) paper P2-128.
- [8] Y. Takase, JT-60 Team: Profile Control and Plasma Start-up by RF Waves Towards Advanced Tokamak Operation in JT-60U (Invited paper), *Radio Frequency Power in Plasmas* (Proc. 15th Topical Conference, Moran, Wyoming, May 19–21, 2003), *AIP Conference Proceedings* 694, pp. 235–242.
- [9] Y. Takase, S. Ide, S. Itoh, E. Jotaki, L. Lao, O. Mitarai, S. Shiraiwa, T. Suzuki, S. Tanaka, M. Ushigome, T. Fujita, P. Gohil, Y. Kamada, T. Luce, Y. Miura, T. Ozeki, P. Politzer, Y. Sakamoto, JT-60 Team: Development of a Completely CS-less Tokamak Operation in JT-60U, *Proc. 20th IAEA Fusion Energy Conference 2004*, Villamoura, Portugal, Nov. 1–6, 2004 (IAEA-CSP-25/CD) paper EX/P4-34.
- [10] S. M. Kaye, M.G. Bell, R.E. Bell, S. Bernabei, J. Bialek, T. Biewer, W. Blanchard, J. Boedo, C. Bush, M.D. Carter, W. Choe, N. Crocker, D.S. Darrow, W. Davis, L. Delgado-Aparicio, S. Diem, J. Ferron, A. Field, J. Foley, E.D. Fredrickson, D.A. Gates, T. Gibney, R. Harvey, R.E. Hatcher, W. Heidbrink, K. Hill, J.C. Hosea, T.R. Jarboe, D.W. Johnson, R. Kaita, C. Kessel, S. Kubota, H.W. Kugel, J. Lawson, B.P. LeBlanc, K.C. Lee, F. Levinton, R. Maingi, J. Manickam, R. Maqueda, R. Marsala, D. Mastrovito, T.K. Mau, S.S. Medley, J. Menard, H. Meyer, D.R. Mikkelsen, D. Mueller, T. Munsat, B.A. Nelson, C. Neumeyer, N. Nishino, M. Ono, H. Park, W. Park, S. Paul, T. Peebles, M. Peng, C. Phillips, A. Pigarov, R. Pinsker, A. Ram, S. Ramakrishnan, R. Raman, D. Rasmussen, M. Redi, M. Rensink, G. Rewoldt, J. Robinson, P. Roney, L. Roquemore, E. Ruskov, P. Ryan, S.A. Sabbagh, H. Schneider, C. Skinner, A. Sontag, V. Soukhanovskii, T. Stevenson, D. Stotler, B. Stratton, D. Stutman, D. Swain, E. Synakowski, Y. Takase, G. Taylor, K. Tritz, A. von Halle, M. Wade, R. White, J. Wilgen, M. Williams, J.R. Wilson, W. Zhu, S.J. Zweben, R. Akers, P. Beiersdorfer, R. Betti, T. Bigelow, M. Bitter, P. Bonoli, C. Bourdelle, C.S. Chang, J. Chrzanowski, C. Domier, L. Dudek, P.C. Efthimion, M. Finkenthal, E. Fredd, G.Y. Fu, A. Glasser, R.J. Goldston, N.L. Greenough, L.R. Grisham, N. Gorelenkov, L. Guazzotto, R.J. Hawryluk, J. Hogan, W. Houlberg, F. Jaeger, M. Kalish, S. Krasheninnikov, J. Lawrence, D. Liu1, N.C. Luhmann1, E. Mazzucato, G. Oliaro, D. Pacella, R. Parsells, M. Schaffer, I. Semenov, K.C. Shaing, M.A. Shapiro, P. Sichta, D. Smith, X. Tang, R. Vero, W. Wampler: Progress Towards High Performance Plasmas in the National Spherical Torus Experiment (NSTX), *Proc. 20th IAEA Fusion Energy Conference 2004*, Villamoura, Portugal, Nov. 1–6, 2004 (IAEA-CSP-25/CD) paper OV/2-3.
- [11] H. Zushi, K. Nakamura, K. Hanada, K.N. Sato, M. Sakamoto, H. Idei, M. Hasegawa, A. Iyomasa, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, T. Kuramoto, A. Tanaka, Y. Matsuo, K. Esaki, H. Akanishi, H. Ayatsuka, S. Imada, T. Sugata, H. Hoshika, K. Sasaki, N. Maezono, M. Kitaguchi, N. Imamura, T. Hayasaki, K. Ichizono, S. Kugimiya, N. Yoshida, K. Tokunaga, T. Fujiwara, M. Miyamoto, M. Tokitani, K. Uehara, Y. Sadamoto, Y. Nakashima, Y. Kubota, Y. Higashizono, Y. Takase, A. Ejiri, S. Shiraiwa, S. Kado, T. Sikama, S. Tsuji-Iio, T. Takeda, Y. Hirooka,

K. Ida, Y. Nakamura, T. Fujimoto, A. Iwamae, T. Maekawa, O. Mitarai: Overview of steady-state tokamak operation in TRIAM-1M, Proc. 20th IAEA Fusion Energy Conference 2004, Vilamoura, Portugal, Nov. 1–6, 2004 (IAEA-CSP-25/CD) paper OV/5-2.

(国内雑誌)

- [12] O. Mitarai, Y. Takase, A. Ejiri, S. Shiraiwa, H. Kasahara, T. Yamada, S. Ohara, TST-2 Team, K. Nakamura, A. Iyomasa, M. Hasegawa, H. Idei, M. Sakamoto, K. Hanada, K.N. Sato, H. Zushi, TRIAM Group, N. Nishino: Plasma current start-up by ECW and vertical field in the TST-2 spherical tokamak, J. Plasma Fusion Res. **80** (7), 549–550 (2004).
- [13] S. Shiraiwa, A. Ejiri, K. Hanada, M. Hasegawa, H. Hoshika, H. Idei, A. Iyomasa, Y. Kamada, H. Kasahara, O. Mitarai, K. Nakamura, N. Nishino, S. Ohara, K. Sasaki, M. Sakamoto, K.N. Sato, Y. Takase, Y. Takagi, T. Yamada, H. Zushi: Evidence of Electron Bernstein Wave Heating on the TST-2 Spheridcal Tokamak, J. Plasma Fusion Res. **81** (1), 3–4 (2005).

(学位論文)

- [14] 鎌田悠介:「TST-2 球状トカマクにおけるフロー計測」(修士論文)
- [15] 高木康伸:「TST-2 球状トカマクの位置制御と平衡解析」(修士論文)

<著書>

- [16] 堀内克明, 蟹江幸博他編: プロフェッショナル英和辞典スピードテラ (小学館 2004)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [17] Y. Takase: “RF-assisted CS-less Start-up in JT-60U” US-Japan Workshop on Applications of RF Physics for Plasma Heating and Current Drive, Tsukuba, July 14–16, 2004.
- [18] A. Ejiri: “RF Start-up Experiments on TST-2@K” US-Japan Workshop on Start-up and Sustainment of Plasma Current in Spherical Tori, Kyoto, Sept. 29–Oct. 1, 2004.
- [19] S. Shiraiwa: “Evidence of EBW Heating on the TST-2 Spherical Tokamak” US-Japan Workshop on Start-up and Sustainment of Plasma Current in Spherical Tori, Kyoto, Sept. 29–Oct. 1, 2004.
- [20] Y. Takase: “Development of a completely CS-less Tokamak Operation in JT-60U” 20th IAEA Fusion Energy Conference 2004, Vilamoura, Portugal, Nov. 1–6, 2004.

- [21] Y. Takase: “ECW/EBW Heating and Current Drive Experiments on the TST-2 Spherical Tokamak” 46th Annual Meeting of American Physical Society Division of Plasma Physics, Savannah, Nov. 15–19, 2004.

(国内会議)

一般講演

- [22] 高瀬雄一:「球状トカマクの非誘導電流駆動」RIAM フォーラム 2004 (九州大学) 2004 年 6 月 3–4 日
- [23] 江尻晶:「TST-2 球状トカマクにおける高周波入射実験」日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学) 2004 年 9 月 12–15 日
- [24] 糟谷直宏:「トカマクにおけるシア流存在下でのポロイダルショック構造」日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学) 2004 年 9 月 12–15 日
- [25] 高瀬雄一:「全日本 ST 研究プログラム」第 18 回トライアム研究会 (九州大学) 2004 年 10 月 14–15 日
- [26] 江尻晶:「TST-2 球状トカマク装置の電源系改造と新キャンパスにおける初期実験結果」プラズマ・核融合学会第 21 回年会 (静岡) 2004 年 11 月 23–26 日
- [27] 笠原寛史:「TST-2 球状トカマクにおける HHFW 加熱実験計画」プラズマ・核融合学会第 21 回年会 (静岡) 2004 年 11 月 23–26 日
- [28] 永島芳彦:「JFT-2M 周辺プラズマにおける広帯域乱流とコヒーレント揺動の非線形結合の観測」プラズマ・核融合学会第 21 回年会 (静岡) 2004 年 11 月 23–26 日
- [29] 高瀬雄一:「低 A プラズマの解明: 世界の小型装置に何ができるか?」第 1 回電気学会球状トカマク調査専門委員会 (核融合科学研究所) 2004 年 12 月 2–3 日
- [30] 高瀬雄一:「次期日米共同プロジェクト提案」第 2 回電気学会球状トカマク調査専門委員会 (東京大学) 2005 年 2 月 24–25 日
- [31] 高瀬雄一:「全日本 ST 研究計画」第 2 回電気学会球状トカマク調査専門委員会 (東京大学) 2005 年 2 月 24–25 日

招待講演

- [32] 高瀬雄一: シンポジウム「核融合共同研究の新たな展開」第 5 回核融合エネルギー連合講演会 (仙台) 2004 年 6 月 17–18 日
- [33] 高瀬雄一: シンポジウム「ITER における物理研究の進め方」第 21 回プラズマ核融合学会年会 (静岡) 2004 年 11 月 23–26 日
- [34] 高瀬雄一:「TST-2 における球状トカマク研究」東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究「学際的新領域プラズマの基礎と応用」研究会 (東北大学) 2005 年 2 月 21 日

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。[9, 43]

2001 年度より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）が 5 年の計画で始まっている。この研究では、三鷹に設置された TAMA300 を用いた重力波探査と、次世代レーザー干渉計の開発が 2 つの主軸となっている。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。同様の計画は、アメリカ合衆国の LIGO、イタリア・フランスの VIRGO、ドイツ・イギリスの GEO など世界各国でも進められている。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。また現在は、散乱光の対策をするなどによって干渉計の感度を向上するための作業が続けられている。TAMA SAS とよばれる次世代の防振装置を TAMA に組み込むための準備も進んでいる。[3, 12, 14, 17, 18, 20, 22, 24, 31, 32]

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の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 $2 \times 10^3 \text{ event/sec}$ 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ている。[1, 2, 6, 3, 15, 21, 28, 29, 36, 37, 38, 39, 42]

TAMA300 データを用いた連続重力波解析

TAMA DT9 のうち 11 日間分のデータを使い、SN1987A 残骸にあると考えられているパルサーから放出されている連続重力波をターゲットにして解析を行った。その結果、有意な重力波信号は見つからなかった。そこで、放出されている重力波振幅に対する上限値 (upper limit) を求めた。

今までの解析方法には、大きな SN ロス (信号対雑音比のロス)、雑音の仮定など、問題点があった。今回の解析では、これらの問題点を改善し、より高い信頼度でよりよい上限値を求めることができた。また、今までより多くのデータが集まったことによる計算時間の増大に対処するために効率よく計算を行った。さらに、干渉計の雑音により作られた重力波信号と似たイベント (偽イベント) を取り除くために、相関 (coincidence) 解析を行った。[13, 26, 30]

非定常雑音の除去

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。結果として干渉計出力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、TAMA300 のメイン信号が大きく動いた場合に、本当に重力波の影響か非定常雑音の影響かを区別できない。そこで、非定常雑音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は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、干渉計の不安定による非定常雑音の影響と考えることができる。我々はこの方法でバースト重力波候補に紛れ込んだ非定常雑音の除去を行っている。[21]

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働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 桁以上高い感度を実現する。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こと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。[10, 11, 19, 27, 35]

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 $1\text{mHz} \sim 10\text{mHz}$ 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、

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 と地上干渉計の観測周波数の間にあり、重力波源として、(1) LISA と地上干渉計の周波数帯域の間にある連星 (MBH など) の合体、(2) 初期宇宙起源の重力波などが挙げられる。[40]

FP-DECIGO

宇宙空間でレーザー干渉計型重力波検出器は、スペースクラフト間の距離を、レーザー光によって精密に計測する事で実現される。当研究室では DECIGO における精密測距方式として、ファブリー・ペロー共振器を用いたデザイン (FP-DECIGO) を提案し、そのための基礎研究を行なっている。

FP-DECIGO では、30 km (もしくは 500 km) 離れた 3 台のスペースクラフトでファブリー・ペロー共振器を構成し、共振器内にレーザー光を蓄える事で、これまでに提案されているものより 1-2 桁高い感度を実現できることが期待できる。

ただ、その実現のためには、鏡間の距離を光の波長 (約 $1\mu\text{m}$) よりも十分小さい変動に抑える必要がある。そこで、当研究室では、スペースクラフトの軌道計算や、制御用のアクチュエータの開発、また、宇宙環境で利用できる安定化レーザー光源システムの開発等に取り組んでいる。[41]

6.4.3 熱雑音の研究

熱雑音の直接測定

干渉計型重力波検出器の観測帯域の感度を制限するのは、鏡や懸架系の熱雑音である。それらの熱雑音は、その振幅の小ささゆえ、幅広い周波数帯域で直接測定することは通常非常に難しい。それゆえ、熱雑音の振幅は推定により考慮されることが多かった。本研究室では、実際の検出器に近い系における熱雑音を直接測定するための、短基線長光共振器を用いたシステムを開発し、実験を行っている [16]。

基本的な構成は、固定光共振器に対して周波数安定化されたレーザ光を、二つの短基線長光共振器に入射し、その変位雑音を測定するものである。地面振動、散射雑音、周波数雑音、強度雑音、電気雑音などの各種雑音は効率的に抑えられるように、かつ、熱雑音の効果が大きくなるようにシステムはデザインされている。これまで、BK7 の鏡基材による熱雑音、および熔融石英上のコーティングによる熱雑音を測定した。今年度は、LIGO との協力の下、次世代干渉計の基材の候補の一つであった、サファイア基材における熱雑音を測定した。

この実験のためのサファイア鏡基材は、LIGO により準備され、本実験室のシステムに導入された後、変位雑音が測定された。図 6.4 a に測定された変位雑音を示す。太い実線は理論的に予言される熱雑音レベルである。この理論レベルには、サファイア基材

における thermoelastic noise の効果が一番の寄与を持っており、特有の周波数依存性がある。ほぼ 3 桁の周波数に渡り実験値が理論値とよく一致していることが分かる。この測定は、熱統計力学により理論的に予言されていた thermoelastic noise の広帯域での最初の直接測定の一つとなった。この結果は理論の検証という意味で物理的にも重要であり、次世代重力波検出器にとっても大きな意味を持つ。

また、これまで行われてきた、低損失熔融石英に関する結果をまとめ、発表を行った [2]。これらの結果を受け、次世代 LIGO ではサファイアを採用せず、熔融石英を採用することが決定されている。[16]

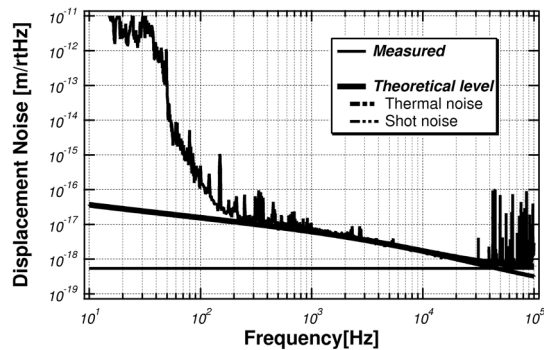


図 6.4 a: サファイア基材を用いた鏡の熱雑音の測定結果。点線はおおのこの理論値を示す。低周波の変位雑音は地面振動により制限されている。

非一様な散逸による熱雑音の研究

懸架系や鏡の熱雑音は、干渉計型重力波検出器の観測帯域の感度を最終的に制限すると、考えられている。このため熱雑音の大きさを推定し、低減することは重要な課題である。従来はモード展開という方法を用いて熱雑音の推定が行われてきた。しかし様々な実験（当グループで行われたものも含む）によるとモード展開は系内部の散逸が非一様に分布しているときは正しい答えを与えない。そこでモード展開を散逸が非一様な場合にも適用できるように改良した。

従来のモード展開においては、まず散逸がない系の運動方程式を振動モードの運動方程式に分解する。そして各々のモードの運動方程式に散逸項を導入し、揺動散逸定理を運動方程式に適用して熱雑音を計算する。結果として系の熱雑音は振動モードの熱雑音の和（但し各モードの熱雑音は相関を持たない）となる。我々は最初から散逸のある系の運動方程式を分解した。分解された運動方程式から非一様な散逸が振動モードの間に coupling を生成させることがわかった。揺動散逸定理を適用するとこの coupling によって、各振動モードの熱雑音の間に相関が生じることがわかった。この相関を無視していたことが、非一様な散逸を持つ系でモード展開が破綻する理由で

ある。逆にいうと散逸分布を考慮して、モード間の相関まできちんと見積もれば、モード展開でも正しい結果を得ることができるはずである。以上の考察の妥当性と調べるため、我々の行った非一様な散逸を持つ系の熱雑音の計測結果と改良したモード展開の見積もりの結果を比較した。両者は一致した。

改良したモード展開は非一様な散逸による熱雑音の物理に関して、明快な見通しを与えてくれる。一例として、どのような場合に熱雑音が従来のモード展開と大きくずれるかを考えてみる。もちろん散逸が狭い領域に集中していることが必要条件となる。しかし十分条件ではない。実際の熱雑音とモード展開との不一致はモード間の相関であるため、系の熱雑音がある一つのモードからの寄与で占められている場合には、散逸が集中していて相関が強くても、モード展開との差は小さい。熱雑音が多数のモードからの寄与からなり、散逸が狭い領域に集中しているときに、差は大きくなる。

6.4.4 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。これは非常に低雑音であることと、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う特徴がある。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。

現在懸架点干渉計の実証研究を行うためのプロトタイプ干渉計を構築している。本年度は、干渉計全体の組み立てが終わり、3Hz 以下の周波数帯において懸架点干渉計の防振効果を確認した。現在、さらに高い防振効果を得るために、ノイズハンティングを行っている。[1, 23, 34]

低周波防振装置 SAS の開発

本研究室では次世代の重力波検出器のために、低周波防振装置 TAMA SAS (Seismic Attenuation System) の研究開発を行ってきた。この研究は 1999 年から米国の LIGO をはじめ、海外のグループと共同で行っているものである。次世代検出器では、観測可能帯域の拡大と検出器の安定性向上が最重要課題であるが、これらは、SAS を用いて低周波での機械的外乱（地面振動）を抑制することで達成できる。SAS で用いられている技術は、低周波（数百 mHz 以下）に共振をもつ受動防振機構と、受動防振特性を損なわずに、機械系の共振による検出器の振動増幅のみを抑制する能動ダンピングである。特に、従来困難とされてきた鉛直方向の低周波防振用に、非常に単純な機構である MGAS (Monolithic Geometric Anti-Spring) を開発、採用しているのが特徴である。前年

度までに、2 台のプロトタイプ TAMA SAS を完成させ、それらによって構成される 3m の Fabry-Perot 光共振器を実際に動作させる実験を行い、SAS に吊られた鏡に制御を加えることによって光共振器を安定に動作させることが可能であることを実証した。

上記の結果を受けて、本年度から、三鷹の国立天文台構内にある重力波検出器 TAMA300 に TAMA SAS を組み込み、アップグレードするための準備を行っている。TAMA SAS を導入することによって、数十 Hz 以下の地面振動ノイズを大幅に改善し、検出器の動作安定度を高めることが目標である。TAMA300 に組み込む TAMA SAS 実機では、鏡の回転の DC 成分を制御するためのアクチュエータの追加など、3m Fabry-Perot 共振器を用いた実験で明らかとなった細かな問題点を解決している。その他、大きな変更点としては、能動ダンピングに用いる信号処理を、3m Fabry-Perot 実験で用いたカスタムメイドのシステムから、市販の組み込み型コントローラに置き換えた点である。これによって、システムの保守が容易になると同時に、TAMA300 で用いられている他の制御系との親和性を高めることができる。2005 年中ごろから、4 台の TAMA SAS を順次組み込む計画である。[7, 33]

磁気浮上を利用した防振システム

ここで開発した加速度計 (maglev) の原理は、慣性系に静止した試験質量と測定対象物との相対変位の変動から加速度の情報を得るものである。実際には試験質量を機械的なバネで懸架し、防振することで擬似的に実現している。しかし、このように機械的に懸架するとその構成要素でのクリープ現象や静摩擦が問題となりうる。そこで、このような欠点を克服するために、試験質量を磁気浮上で非接触懸架する方式の加速度計を提案した。この方式では、試験質量に固定した磁石と加速度計本体に固定した磁石との間の位置と試験質量の荷重を調整することによって、支持系の固有周波数をゼロにすることが原理的に可能である。これは、加速度計として理想的な状態である。また、試験質量の剛体 6 自由度にサーボ型フィードバック制御を施すことにより、1 つの試験質量から、6 自由度すべての加速度情報を得ることができる。

現在までに、試作品の開発を行い、鉛直方向地面変位スペクトルの測定で市販加速度計 (Rion) との比較を行った。その結果、およそ 0.2Hz から 100Hz の範囲で Rion と一致した結果 (それ以外の帯域は Rion の測定保証範囲外) を得ている。また、低周波帯域 (1Hz 以下) での感度に関しては、世界最高感度を持つ STS-2 にあと 1 桁というところまで迫っている。そして、maglev を能動防振装置に組み込み、能動防振の実験を始めている。これは、アクチュエータ付の台に maglev を乗せ、その加速度信号を除去するようにアクチュエータにフィードバックし、台を防振するものである。台の実際の振動レベルを測るために Rion も乗せている。現在までのところ、防振された台の鉛直方向変位の RMS 値として、地面振動

のそれのおよそ 1/10 に低減化することに成功している。[25]

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、このような方式でも安定化が実現できる事が示された。さらに、現在、より高い安定度を実現するための実験が進行中である。

極小距離における重力法則の検証

もし余剰次元があるならば、その距離スケールで重力の逆二乗則に破れが見られるはずである。そこで、当研究室では、レーザー干渉計による精密計測技術を利用して、100 μ m スケールでの重力の逆二乗則の検証実験が進められている。

振れ型の板バネの形状と、その支持法を工夫する事で、高い機械的 Q 値を実現し、重力変動の影響を効果的に増幅することが期待できる。それによって、これまでに得られた逆二乗則検証実験の上限値を更新する事を目標に実験が進められている。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] M. Ando, K. Arai, S. Nagano, R. Takahashi, S. Sato, D. Tatsumi, Y. Tsunesada, N. Kanda, S. Kawamura, P. Beyersdorf, Z. Zhu, K. Numata, Y. Iida, Y. Aso, N. Mio, S. Moriwaki, K. Somiya, S. Miyoki, K. Kondo, H. Takahashi, K. Hayama, H. Tagoshi, M.-K. Fujimoto, K. Tsubono, K. Kuroda and the TAMA Collaboration : Analysis methods for burst gravitational waves with TAMA data, *Class. Quantum Grav.* **21** (2004) S1679.
- [2] P.J. Sutton, M. Ando, P. Brady, L. Cadonati, A. Di Credi, S. Fairhurst, L.S. Finn, N. Kanda, E. Katsavounidis, S. Klimenko, A. Lazzarini, S. Marka, J.W. VMcNabb, S.R. Majumder, P.R. Saulson, H. Tagoshi, H. Takabashi, R. Takahashi, D. Tatsumi, Y. Tsunesada, and S.E. Whitcomb, Plans for the LIGO-TAMA joint search for gravitational wave bursts, *Class. Quantum Grav.* **21** (2004) S1801.

- [3] R. Takahashi and the TAMA Collaboration: Status of TAMA300, *Class. Quantum Grav.* **21** (2004) S403.
- [4] Y. Aso, M. Ando, K. Kawabe, S. Otsuka and K. Tsubono: Stabilization of a Fabry Perot interferometer using a suspension-point interferometer, *Phys. Lett. A* **327** (2004) 1.
- [5] K. Numata, K. Yamamoto, H. Ishimoto, S. Otsuka, K. Kawabe, M. Ando, and K. Tsubono: Systematic measurement of the intrinsic losses in various kinds of bulk fused silica, *Phys. Lett. A* **327** (2004) 263.
- [6] H. Takahashi, H. Tagoshi, M. Ando, K. Arai, P. Beyersdorf, N. Kanda, S. Kawamura, N. Mio, S. Miyoki, S. Moriwaki, K. Numata, M. Ohashi, M. Sasaki, S. Sato, R. Takahashi, D. Tatsumi, Y. Tsunesada, A. Araya, H. Asada, Y. Aso, M. A. Barton, M.-K. Fujimoto, M. Fukushima, T. Futamase, T. Haruyama, K. Hayama, G. Heinzl, G. Horikoshi, Y. Iida, K. Ioka, H. Ishitsuka, N. Kamikubota, K. Kasahara, K. Kawabe, N. Kawashima, Y. Kojima, K. Kondo, Y. Kozai, K. Kuroda, N. Matsuda, K. Miura, O. Miyakawa, S. Miyama, M. Musha, S. Nagano, K. Nakagawa, T. Nakamura, H. Nakano, K. Nakao, Y. Nishi, Y. Ogawa, N. Ohishi, A. Okutomi, K. Oohara, S. Otsuka, Y. Saito, N. Sato, H. Seki, N. Seto, M. Shibata, T. Shintomi, K. Soida, K. Somiya, T. Suzuki, A. Takamori, S. Takemoto, K. Takeno, T. Tanaka, T. Tanji, S. T., C. T. Taylor, S. Telada, K. Tochikubo, T. Tomaru, Y. Totsuka, K. Tsubono, N. Tsuda, T. Uchiyama, A. Ueda, K. Ueda, F. Usui, K. Waseda, Y. Watanabe, H. Yakura, K. Yamamoto, A. Yamamoto, T. Yamazaki, T. Yoda, and Z. Zhu: Coincidence analysis to search for inspiraling compact binaries using TAMA300 and LISM data, *Phys. Rev. D* (2004) **70** 042003.
- [7] R. Desalvo, Sz. Mårka, K. Numata, V. Sannibale, A. Takamori, H. Tariq, E.J. Ugas, T. Yoda, Y. Aso and A. Bertolini, Study of quality factor and hysteresis associated with the state-of-the-art passive seismic isolation system for Gravitational Wave Interferometric Detectors interferometer, *Nucl. Instr. and Meth. A*, **538** (2005) 526.
- [8] M. Ando, K. Arai, Y. Aso, P. Beyersdorf, K. Hayama, Y. Iida, N. Kanda, S. Kawamura, K. Kondo, N. Mio, S. Miyoki, S. Moriwaki, S. Nagano, K. Numata, S. Sato, K. Somiya, H. Tagoshi, H. Takahashi, R. Takahashi, D. Tatsumi, Y. Tsunesada, Z. Zhu, T. Akutsu, T. Akutsu, A. Araya, H. Asada, M. A. Barton, Y. Fujiki, M.-K. Fujimoto, R. Fujita, M. Fukushima, T. Futamase, Y. Hamuro, T. Haruyama, H. Hayakawa, G. Heinzl, G. Horikoshi, H. Iguchi, K. Ioka, H. Ishitsuka, N. Kamikubota, T. Kaneyama, Y. Karasawa, K. Kasahara, T. Kasai, M. Katsuki, K. Kawabe, M. Kawamura, N. Kawashima, F. Kawazoe, Y. Kojima, K. Kokeyama, Y. Kozai, H. Kudoh, K. Kuroda, T. Kuwabara, N. Matsuda, K. Miura, O. Miyakawa, S. Miyama, H. Mizusawa, M. Musha, Y. Nagayama, K. Nakagawa, T. Nakamura, H. Nakano, K. Nakao, Y. Nishi, Y. Ogawa, M. Ohashi, N. Ohishi, A. Okutomi, K. Oohara, S. Otsuka, Y. Saito, S. Sakata, M. Sasaki, K. Sato, N. Sato, Y. Sato, H. Seki, A. Sekido, N. Seto, M. Shibata, H. Shinkai, T. Shintomi, K. Soida, T. Suzuki, A. Takamori, S. Takemoto, K. Takeno, T. Tanaka, K. Taniguchi, S. Taniguchi, T. Tanji, C. T. Taylor, S. Telada, K. Tochikubo, M. Tokunari, T. Tomaru, K. Tsubono, N. Tsuda, T. Uchiyama, A. Ueda, K. Ueda, F. Usui, K. Waseda, Y. Watanabe, H. Yakura, A. Yamamoto, K. Yamamoto, T. Yamazaki, Y. Yanagi, T. Yoda, J. Yokoyama, and T. Yoshida: Observation results by the TAMA300 detector on gravitational wave bursts from stellar-core collapses, *Phys. Rev. D* **71** (2005) 082002.
- (会議抄録)
- [9] M. Ando, Recent Results from Gravitational Wave Detectors, in: *Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology* pp.279-286, eds.: K. Sato and S. Nagataki (2004 Universal Academy Press Inc. Tokyo).
- [10] M. Ando and the LCGT collaboration, Large-scale Cryogenic Gravitational-wave Telescope: LCGT, *Proceedings in: the 14th General Relativity and Gravitation* (2004).
- [11] K. Kuroda, M. Ohashi, S. Miyoki, T. Uchiyama, H. Ishitsuka, K. Yamamoto, H. Hayakawa, K. Kasahara, M.-K. Fujimoto, S. Kawamura, R. Takahashi, T. Yamazaki, K. Arai, D. Tatsumi, A. Ueda, M. Fukushima, S. Sato, S. Nagano, Y. Tsunesada, Zong-Hong Zhu, T. Shintomi, A. Yamamoto, T. Suzuki, Y. Saito, T. Haruyama, N. Sato, Y. Higashi, T. Tomaru, K. Tsubono, M. Ando, A. Takamori, K. Numata, Y. Aso, K.-I. Ueda, H. Yoneda, K. Nakagawa, M. Musha, N. Mio, S. Moriwaki, K. Somiya, A. Araya, N. Kanda, S. Telada, H. Tagoshi, T. Nakamura, M. Sasaki, T. Tanaka, K. Ohara, H. Takahashi, O. Miyakawa, and M.E.Tobar: LCGT Project Observing Gravitational Wave Events at 240 Mpc, *Proceedings of 28th International Cosmic Ray Conference*, (Universal Academy Press, 2003) p.3103-p.3106.
- [12] K. Tsubono: Current Status of TAMA300 interferometer, *Proceedings of CLEO/QELS Joint Symposium: Gravitational Wave Detection* (in press).
- (学位論文)
- [13] 梶村幸: TAMA300 データを用いた連続重力波解析、修士論文、2005 年 1 月。
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演

- [14] K. Tsubono: TAMA Project, GWIC meeting, (July 2004, Dublin, Ireland).
- [15] M. Ando and the TAMA collaboration, Results of the search for burst gravitational waves with the TAMA300 detector, The 9th Gravitational Wave Data Analysis Workshop (December 15-18, 2004, Annecy, France)
- [16] K. Numata: *Thermal noise in sapphire mirrors* (Aspen center for physics — 2005 winter conference on gravitational waves, Aspen, Jan. 21, 2005)
- 招待講演
- [17] K. Tsubono: Current Status of TAMA300 interferometer, CLEO/QELS Joint Symposium: Gravitational Wave Detection (May 2005, Baltimore Convention Center, Baltimore, USA).
- [18] M. Ando and the TAMA collaboration, Status of TAMA, The 9th Gravitational Wave Data Analysis Workshop (December 15-18, 2004, Annecy, France)
- [19] M. Ando and the LCGT collaboration, Large-scale Cryogenic Gravitational-wave Telescope: LCGT, the 14th workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG14, November 30, 2004, YITP, Kyoto)
- [20] M. Ando and the TAMA collaboration, Status of TAMA300, an interferometric gravitational wave detector in Japan, Vth Rencontres du Vietnam, Particle physics and astrophysics (August 5 - 11, 2004, Hanoi, Vietnam)
- (国内会議)
- 一般講演
- [21] 石徹白晃治, 安東正樹, 坪野公夫, 2 台の干渉計によるバースト重力波の相関解析, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (2004 年 9 月、高知大学朝倉キャンパス) .
- [22] 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, 長野重夫, 安東正樹, 森脇成典, 武者満, 神田展行, 三尾典克, 川村静児, 藤本眞克, 坪野公夫, 大橋正健, 黒田和明, レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 のパワーリサイクリング XIV (散乱光雑音), 日本物理学会 2004 年秋季大会 (2004 年 9 月、高知大学朝倉キャンパス) .
- [23] 麻生洋一, 安東正樹, Riccardo DeSalvo, 大塚茂巳, 南城良勝, 坪野公夫, Suspension Point Interferometer による低周波防振 IV, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (2004 年 9 月、高知大学朝倉キャンパス) .
- [24] 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, 長野重夫, 安東正樹, 森脇成典, 武者満, 神田展行, 三尾典克, 川村静児, 藤本眞克, 坪野公夫, 大橋正健, 黒田和明, レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 のパワーリサイクリング XV (変調・復調系雑音), 日本物理学会 2004 年秋季大会 (2004 年 9 月、高知大学朝倉キャンパス) .
- [25] 飯田幸美, 高森昭光, 安東正樹, 坪野公夫, 磁気浮上型加速度計の開発 II, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (2004 年 9 月、高知大学朝倉キャンパス) .
- [26] 梶村幸, 安東正樹, 副田憲志, 坪野公夫, TAMA300 データを用いた連続重力波解析, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (2004 年 9 月、高知大学朝倉キャンパス) .
- [27] 黒田和明, 大橋正健, 三代木伸二, 内山隆, 石塚秀喜, 山元一広, 早河秀章, 岡田淳, 近藤寿浩, 奥富聡, 笠原邦彦, 徳成正雄, 阿久津朋美, 中川憲保, 鎌ヶ迫将悟, 藤本眞克, 川村静児, 高橋竜太郎, 山崎利孝, 辰巳大輔, 新井宏二, 上田暁俊, 福嶋美津広, 佐藤修一, 常定芳基, 新富孝和, 斉藤芳男, 春山富義, 鈴木敏一, 佐藤伸明, 都丸隆行, 坪野公夫, 安東正樹, 沼田健司, 飯田幸美, 麻生洋一, 高城毅, 梶村, 石徹白晃治, 米田仁紀, 中川賢一, 武者満, 三尾典克, 森脇成典, 宗宮健太郎, 竹野耕平, 丹治亮, 尾関孝文, 新谷昌人, 高森昭光, 神田展行, 中野寛之, 寺田聡一, 長野重夫, 田越秀行, 左合紀親, 中村卓史, 高橋弘毅, 関戸文, 阪田紫帆里, 川添史子, 苔山圭以子, 柳由里子, 宮川治, M. E. Tobar, 大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) 計画 VIII, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (2004 年 9 月、高知大学朝倉キャンパス) .
- [28] 安東正樹, 高橋竜太郎, 新井宏二, 佐藤修一, 辰巳大輔, 神田展行, 常定芳基, 山崎利孝, 福嶋美津広, 三尾典克, 森脇成典, 三代木伸二, 近藤寿浩, 麻生洋一, 長野重夫, 阿久津智忠, 他 TAMA Collaboration, TAMA300 データを用いたバースト重力波解析 III, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (2004 年 9 月、高知大学朝倉キャンパス) .
- [29] 阿久津朋美, 岡田淳, 早河秀章, 山元一広, 三代木伸二, 大橋正健, 黒田和明, 安東正樹, 神田展行, 辰巳大輔, 寺田聡一, 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 II, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (2004 年 9 月、高知大学朝倉キャンパス) .
- [30] 梶村幸, 安東正樹, 副田憲志, 坪野公夫, TAMA300 データを用いた連続重力波解析 III, 日本物理学会 2004 年第 60 回年次大会 (2005 年 3 月、東京理科大野田キャンパス) .
- [31] 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, 三代木伸二, 長野重夫, 安東正樹, 森脇成典, 武者満, 神田展行, 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, レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 のパワーリサイクリング XVIII (変調・復調系雑音), 日本物理学会 2004 年第 60 回年次大会 (2005 年 3 月、東京理科大野田キャンパス) .
- [32] 中川憲保, 新井宏二, 佐藤修一, 高橋竜太郎, 阿久津智忠, 辰巳大輔, 常定芳基, 福嶋美津広, 山崎利孝, 三代木伸二, 長野重夫, 安東正樹, 森脇成典, 武者満, 神田展行, 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, レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 のパワーリサイクリング XIX (信号取得・制御系), 日本物理学会 2004 年第 60 回年次大会 (2005 年 3 月、東京理科大野田キャンパス) .

- [33] 高橋竜太郎, 高森昭光, 福嶋美津広, 川村静児, 藤本眞克, 新井宏二, 坪野公夫, 安東正樹, 飯田幸美, A. Bertolini, R. DeSalvo, TAMA300 用低周波防振装置 (SAS) の開発 I, 日本物理学会 2004 年第 60 回年次大会 (2005 年 3 月、東京理科大野田キャンパス) .
- [34] 麻生洋一, 安東正樹, Riccardo DeSalvo, 大塚茂巳, 南城良勝, 坪野公夫, Suspension Point Interferometer による低周波防振, 日本物理学会 2004 年第 60 回年次大会 (2005 年 3 月、東京理科大野田キャンパス) .
- [35] 黒田和明, 大橋正健, 三代木伸二, 内山隆, 石塚秀喜, 山元一広, 早河秀章, 岡田淳, 近藤寿浩, 奥富聡, 笠原邦彦, 徳成正雄, 阿久津朋美, 中川憲保, 鎌ヶ迫将悟, 藤本眞克, 川村静児, 高橋竜太郎, 山崎利孝, 辰巳大輔, 新井宏二, 上田暁俊, 福嶋美津広, 佐藤修一, 常定芳基, 新富孝和, 斉藤芳男, 春山富義, 鈴木敏一, 佐藤伸明, 都丸隆行, 坪野公夫, 安東正樹, 沼田健司, 飯田幸美, 麻生洋一, 高城毅, 桝村, 石徹白晃治, 米田仁紀, 中川賢一, 武者満, 三尾典克, 森脇成典, 宗宮健太郎, 竹野耕平, 丹治亮, 尾関孝文, 新谷昌人, 高森昭光, 神田展行, 中野寛之, 寺田聡一, 長野重夫, 田越秀行, 左合紀親, 中村卓史, 高橋弘毅, 関戸文, 阪田紫帆里, 川添史子, 苔山圭以子, 柳由里子, 宮川治, M. E. Tobar, 大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) 計画 IX, 日本物理学会 2004 年第 60 回年次大会 (2005 年 3 月、東京理科大野田キャンパス) .
- [36] 阿久津朋美, 岡田淳, 早河秀章, 山元一広, 三代木伸二, 大橋正健, 黒田和明, 安東正樹, 神田展行, 辰巳大輔, 寺田聡一, 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 III, 日本物理学会 2004 年第 60 回年次大会 (2005 年 3 月、東京理科大野田キャンパス) .
- [37] 安東正樹, 高橋竜太郎, 新井宏二, 佐藤修一, 辰巳大輔, 神田展行, 常定芳基, 山崎利孝, 福嶋美津広, 三尾典克, 森脇成典, 三代木伸二, 近藤寿浩, 麻生洋一, 長野重夫, 阿久津智忠, 他 TAMA Collaboration, TAMA300 データを用いたバースト重力波解析 IV, 日本物理学会 2004 年第 60 回年次大会 (2005 年 3 月、東京理科大野田キャンパス) .
- [38] 常定芳基, 神田展行, 中野寛之, 辰巳大輔, 安東正樹, 田越秀行, 高橋弘毅, 佐々木節, 他 The TAMA Collaboration, TAMA300 でのブラックホール準固有振動重力波探査結果, 日本物理学会 2004 年第 60 回年次大会 (2005 年 3 月、東京理科大野田キャンパス) .
- [39] 神田展行, 高橋弘毅, 田越秀行, 佐合紀親, 辰巳大輔, 常定芳基, 安東正樹, 他 LCGT Collaboration, 2 台の LCGT 干渉計信号のクロストークと相関解析, 日本物理学会 2004 年第 60 回年次大会 (2005 年 3 月、東京理科大野田キャンパス) .
- [40] 坪野公夫, 測距技術の開発, 第 3 回 DECIGO ミーティング (2005 年 5 月、国立天文台) .
- [41] 安東正樹, 光共振型 DECIGO, 第 3 回 DECIGO ミーティング (2005 年 5 月、国立天文台) .

(セミナー)

- [43] 安東 正樹, 干渉計型重力波検出器の現状と将来計画, 東京大学宇宙理論グループセミナー (2004 年 6 月 10 日 東京大学 本郷, 東京)

招待講演

- [42] 安東 正樹, TAMA300 データを用いた重力崩壊型超新星爆発からの重力波探査, 「重力崩壊型超新星を舞台とする様々な高エネルギー物理現象」 研究会 (2005 年 2 月 3 日 東京大学 本郷キャンパス, 東京)

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、普遍性だけではな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

散逸系の局在パターン形成のモデル

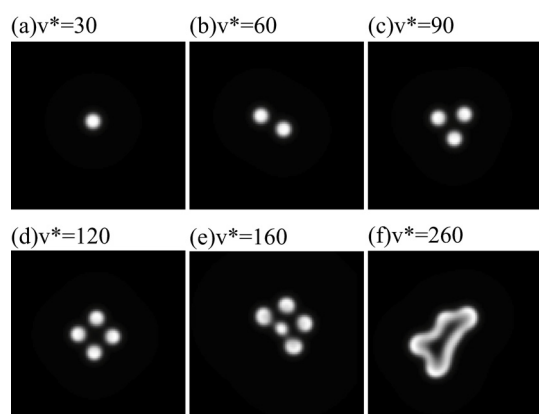


図 6.5 a: 数値計算によって得られた、電圧 v^* の上昇によるパターンの遷移。

非平衡開放系において自発的に形成されるパター

ンは、系全体に広がったパターンと、空間の一部に局在したパターンに大別される。後者は近年、流体、粉体、液晶、非線形光学など多くの系で報告されており、特に気体放電の実験では、スポットを基本単位とする分子状の構造や、これらが合体したループ状の構造など、これまでにないクラスのパターンが見出されている。本研究ではこの新しいパターンを記述するモデルとして、移流項を持つ2成分の反応拡散方程式を導いた。数値計算の結果は実験で観測されたパターンをよく再現する (図 6.5 a)。スポット解のクラスター化とループへの転移は、化学反応による斥力と流体力学的な引力の競合として理解できることを示した。[28, 40]

発達した熱乱流の研究

熱乱流は、非平衡系の典型例として様々な点で優れた系であり、活発な研究が続けられているが、特にその速度場の振る舞いを把握することが非常に重要なアプローチとなっている。本研究では前年度に引き続き、低プラントル数流体で世界最高のレイリー数領域 ($10^9 < Ra < 10^{11}$) の発達熱乱流を実現し、超音波流速測定法 (USV) を用いてその速度場を調べている。本年度は、垂直方向流速分布 $w(z)$ に加え、上側の境界層における水平方向流速分布 $u(x)$ および $v(y)$ の測定を行えるよう装置を改良し、3方向の流速分布の測定を行った結果、以下のような知見が得られた。

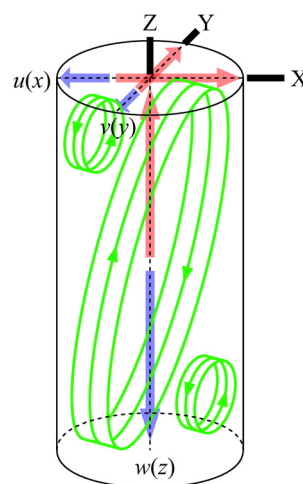


図 6.5 b: 3方向の速度分布測定: X, Y, Z は超音波センサー。測定軸上の矢印は典型的な時間平均分布 $\langle u(x) \rangle$, $\langle v(y) \rangle$, $\langle w(z) \rangle$ を示す。

まず、近年の熱乱流研究の主要テーマとなっている巨視的平均流について調べた。3方向の測定により、前年度の研究で挙げた2候補のうち、平均流の形状が一つに絞られた (図 6.5 b)。さらに主成分分析や、同時測定された $u(x)$ と $v(y)$ の相関などの解

析により、この平均流が z 軸方向に不規則に振動すること、 z 軸周りにはかなり複雑な振る舞いを示すことなどがわかった。また、瞬時の流速分布から、乱流を特徴付けるエネルギースペクトル $E(k)$ の計算を行った。テイラー仮説を用いずに直接的に $E(k)$ を計算したのは本研究が最初の例であるが、熱乱流に関して古くから提唱されていた $E(k) \sim k^{-11/5}$ と良く合う指数が得られ、またこのスケール関係の成立範囲も理論予測と合うなど、新しい成果が得られた。さらに、境界近傍の速度場の振る舞いに関して、平均分布 $\langle w(z) \rangle$ の反転現象や、境界プレートに沿ったほぼ等速の流体運動の存在が見出された。これらの現象は境界プレートから発生する熱的構造物の振る舞い、特に上述の平均流との相互作用に起因するものであると考えられ、解析の結果、より高い Ra 領域 ($10^{12} < Ra < 10^{13}$) において新しい熱乱流状態が出現する可能性が示唆されるなど、興味深い知見が得られた。[4, 13, 25, 42]

粉体上の転がり摩擦における周期運動

摩擦現象は、その身近さにも関わらず、非常に困難な問題を数多く含み、未だに重要な問題の1つである。このような摩擦現象において、特にすべり摩擦のケースに置いて、普遍的に Stick-Slip と呼ばれる規則的な周期運動が存在することが知られている。本研究において、このような Stick-Slip 現象が転がり摩擦においても観察されうること、そしてそのダイナミクスが系を支配するスケールに従い、規則-不規則転移を起こすことを明らかにした (図 6.5 c)。一般的に摩擦に関わるスケールの決定は試験体の摩擦による微粒子や、吸着分子が強く効くと考えられるため困難である。しかし、本研究においてはその困難を介在物として粉体 (ガラスビーズ) を使用することによって回避し、さらに粉体の大きさを変えることで問題としているスケールを容易に変化させることを可能にした。本研究において観察された規則-

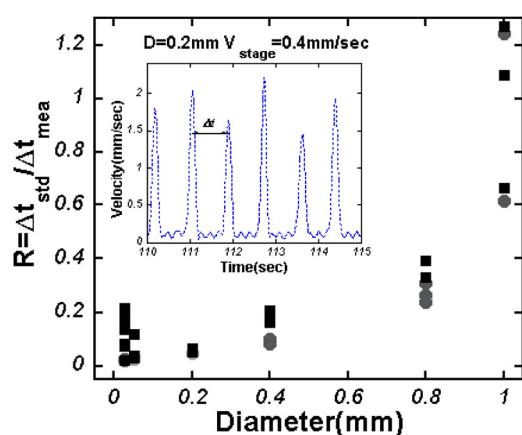


図 6.5 c: Stick-Slip の時間間隔のゆらぎの粒径による違い。粒径が大きくなるほどゆらぎが大きくなるのがわかる。

不規則転移は粉体のスケールと、対象物の形が必然的に生み出すスケールとの競合として理解することが出来、この事実は取りも直さず、摩擦現象にスケールというものが非常に重要な役割を果たしていることの証左であり、一般に摩擦現象を理解する上で重要な示唆となることが期待される。現在、この事実をその微視的構造がどのように摩擦と結びつくのか理論面からもサポートすべく、研究を継続中である。[16, 36, 41, 49, 54]

6.5.2 非平衡ソフトマターの物理学

希薄強電解液の非線形レオロジー

古典的電気化学の歴史は古く、電気伝導度を始めとする電解質溶液の輸送現象には膨大な研究例がある。他方、非線形輸送に関する理解は今日まで乏しい。我々は二成分の希薄強電解液の fluctuating hydrodynamics による定式化を行い、電解質の溶解にともなう溶液の粘性係数の上昇を表す Falkenhagen-Onsager-Fuoss の古典的極限式を整備された形で再導出した。さらに極限式を任意強さのシアに対する表式へと拡張し、著しい shear-thinning を見出した。ここでの効果そのものは実験的にしばしば小さいが、メカニズムは希薄 (電解) 高分子溶液、コロイド溶液を含め、大変一般的であると期待する。[6, 14]

高分子電解質のクーロン凝縮と力学特性

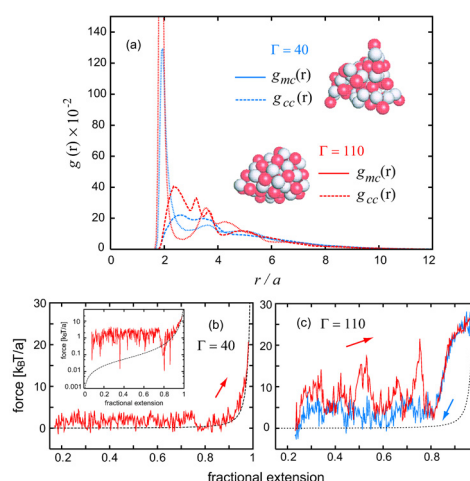


図 6.5 d: (a) 高分子・対イオン凝縮体内部におけるモノマーと対イオンの二体分布関数 $g_{mc}(r)$ および対イオン同士の分布関数 $g_{cc}(r)$. Γ は熱ゆらぎ $k_B T$ に対するクーロンエネルギーの大きさを示す結合定数。(b) $\Gamma = 40$ における高分子の引き伸ばしによって得られる張力曲線: plateau を示す。(c) $\Gamma = 110$ における張力曲線: 特徴的なこぎり状の応答を示す。

生体中で重要な高分子の多くは水への可溶性から電解質である。多価イオンによる DNA の凝縮転移は静電効果が引き起こすユニークな現象のひとつであるが、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。我々是对イオンの効果をあらわに取り入れた Brownian dynamics simulation を行い、実験事実のミクロからの理解を目指した。シミュレーションによる張力曲線の振る舞いは実験結果と見事に対応する (図 6.5 d)。さらにミクロからの知見として、plateau および stick-release は各々、対イオンの液体的および結晶的状态を反映していることを指摘した。[14, 20, 30, 57]

DNA 凝縮転移と対イオン交換

高分子電解質の凝縮転移現象では、高分子鎖の電荷を遮蔽する対イオンの振舞いが鍵となる。多価陽イオンが引き起こす DNA 凝縮転移において、DNA に結合した色素の蛍光強度変化から対イオン交換の様子を観測した。測定結果は、DNA 上で色素-多価陽イオンの対イオン交換が生じていることを示すとともに、凝縮・非凝縮状態における DNA の形状に依存して色素の親和性が変化することを示している。さらに、対イオン凝縮と対イオン競合下での化学平衡を考慮することで、色素の電荷に依らず DNA の電荷が一定の中性化率に達することで凝縮転移が生ずることを示した。また光ピンセットを用いた一分子計測の手法により、DNA の全長変化から一分子 DNA 上における対イオン交換を観測することに成功した (図 6.5 e)。[7, 15, 23, 27, 45, 53]

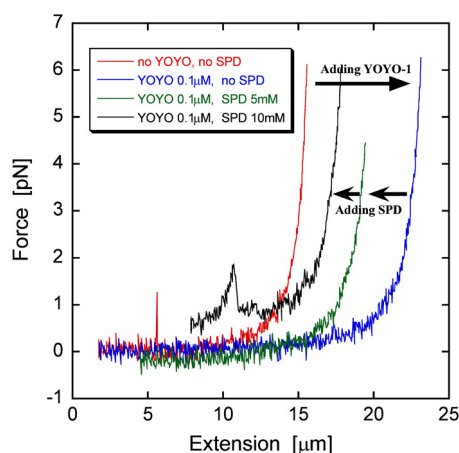


図 6.5 e: 蛍光色素 (YOYO-1⁴⁺)-スぺルミジン (SPD³⁺) の対イオン交換に伴う DNA の全長変化。

6.5.3 生命現象の物理学

遺伝子ネットワーク設計原理の研究

生命は、分子によって構成された「システム」であり、本質はシステムの構造と振る舞いにある。発生は一方的に進み、生命に不可逆性を与える。この原理の解明を目指し、発生過程に頻出する正の制御を備えたネットワーク再構築・ダイナミクス解析を行った。その結果、正の制御を備えた細胞は外部からの化学シグナルに対する活性状態にヒステリシス記憶を備えることが明らかとなった (図 6.5 f)。更に、このような性質は分子種によらずネットワークシステムによって生じることが示唆された。本研究にあるように、構成要素を限定し、そのシステムの原理を明らかにする手法は物理に通ずるものがある。今後、構成的方法によって「記憶」「適応」といった生命に特有な現象の設計原理を解明してゆく。[17, 24, 46]

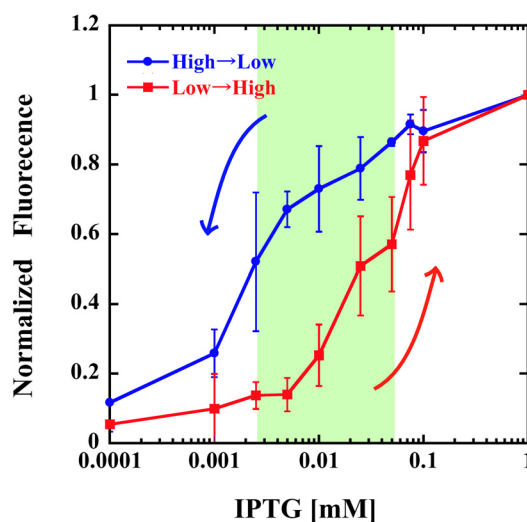


図 6.5 f: 正の制御による遺伝子発現の履歴依存性 $0.0025\text{mM} \leq [\text{IPTG}] \leq 0.05\text{mM}$ の範囲でヒステリシスがみられる。

適応現象におけるゆらぎと適応能との関係の解明

大腸菌のような微生物は、外部環境からの刺激に対して速い応答をした後に、ゆっくりと刺激を受ける前の状態に落ち着くという適応現象を示す。適応現象は生命系の維持に直結する現象であり、本研究ではこの基本的機能が生物内部の情報伝達系からいかにして生成されるかを理解することを目指している。特に今回我々は、大腸菌の受容体を少数自由度力学系でモデル化し、このモデルにおいて生成されるゆらぎが、受容体の適応能力といかなる関係にあるかを理論的に解析した。そこで我々は、受容体の適応能力 p と、受容体の 2 種類のゆらぎ、標準的ゆらぎ σ_{XA} と

不可逆循環 α_{XA} の間に、 $p = 1 - \sigma_{XA}/\alpha_{XA}$ の関係が成り立つことを示した (図 6.5 g)。この定理は、大腸菌に直接刺激を与えることがなくとも、その受容体の状態のゆらぎを観測することによって、その大腸菌が刺激に対してどれほど適応できるかを予言することができることを示すものである。[11, 29, 43, 47]

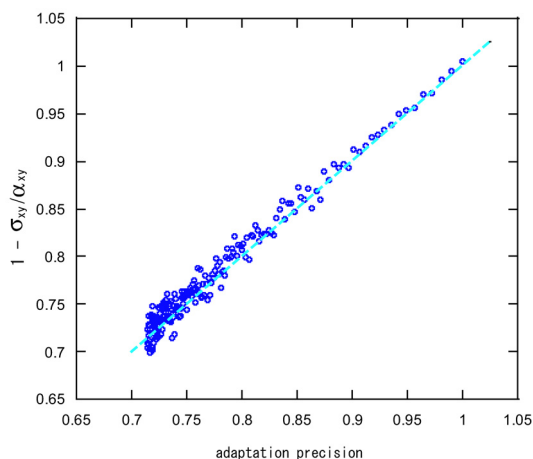


図 6.5 g: 適応揺動関係。受容体モデルに実際に刺激を加えた時にどれほど適応するかを横軸に、刺激なしでゆらぎを計算したものを縦軸にとったもの。

成長パターンにおけるエラーカタストロフィー

しばしば、進化は物理的空間を伴う。しかし、空間の進化に対して果たす役割は明らかではない。そこで、空間構造と進化の間の相互作用を理解することを目指してセルラーオートマトンを用いた数値計算を行った。ここで想定しているのは、変異を伴いながら要素が空間上で複製していく系である。空間構造 (パターン) は、要素の取捨選択に拘束条件を与え、また、選択された要素が空間構造を形成する。この時、仮に要素同士の相互作用が陽に存在しなくとも、Darwin 的な適者生存の概念を超える高次の選択が創発するのではないかと考え、その検証を行った。まず、複製系における成長パターンにおいて、Eigen のエラーカタストロフィー理論が受ける修正について調べた。その結果、以前に知られていた結果とは異なり、2次元成長パターンにおいては、エラーカタストロフィーの生じる臨界変異率 P_c は開放系における場合よりも常に高い値となり、かつ、拡散係数無限小の極限においても、 P_c が有限の値に留まることを発見した。これは、野生型の成長速度が変異型よりも速いために、変異型が現れてもこれを空間的に抑制するためであることが分かった。

現在、配列情報を持った複製分子が空間上で複製を繰り返す系をセルラーオートマトンにより構成している。このような系においては、線型成長が実現するために変異蓄積が容易となり、かつ、先の研究から得られた空間的な抑制効果が、複製粒子の環境への急速な適応を促すと期待できる。[8, 18]

ER 膜上 Ca^{2+} チャネルのダイナミクス

Ca^{2+} シグナルは生体内で働く 2 次メッセンジャー系のうち主要なものの一つであり、遺伝子発現、神経系のシナプス可塑性、化学走性など多くの生命現象において中心的な役割を果たす。多くの細胞において、 Ca^{2+} 放出の経路は細胞内 Ca^{2+} プールの実体である小胞体 (ER) から、ER 膜上のイノシトール 3 リン酸受容体 (IP3R) チャネルを通じて作動する。IP3R チャネルは細胞内において ER 膜上に平均 20 個のクラスターとして存在すると考えられているが、細胞内において実際にどのような活性をもつかという点が十分理解されているとは言い難い。ことに神経細胞の可塑性において、IP3R を介した細胞内 Ca^{2+} プールからの Ca^{2+} 放出が重要な役割を果たしていることがわかっているが、IP3R チャネルが神経細胞内でどのように制御されているのかについては報告が少ない。神経系、とくにシナプスではネットワーク結合度の変化の機構として、AMPA 受容体などのチャネルの局在が動的に制御されていることがあげられる。そこで ER 膜上の IP3R チャネルのダイナミクスがどのように制御されるのかを検証した。具体的には、神経軸索において蛍光タグをつけた IP3R を発現し、FRAP (Fluorescence Recovery After Photobleaching) という手法でタグ付 IP3R の拡散係数を算出した。細胞骨格アクチンと微小管のネットワークをそれぞれ破壊してみると、アクチン細胞骨格を破壊した細胞で有意に拡散係数が上昇した。そこで、今回の研究では IP3R 結合タンパクのうち、アクチン細胞骨格に対する結合能を有する 4.1N の発現の有無による IP3R の拡散係数の変化を検出した。4.1N が発現していない細胞では IP3R の拡散係数が低下することがわかり、4.1N が IP3R をアクチンネットワークに繋ぎ止める”糊”の役割をして、IP3R のダイナミクスを制御しているというモデルを提唱した。[3]

培養神経ネットワークにおける同期発火現象の解析

我々は、ガラス基盤上で培養されたニューロン・グリア共培養系において各細胞の Ca^{2+} 濃度の時間変化が同期振動を起こす現象を観測し、その解析とメカニズムの解明を目指して、同期発火が生成する条件や同期周波数の決定要因の詳細な検討を行った。同期発火の周波数が培養日数や Mg^{2+} イオン濃度変化に対してある規則を持って変化することから、ネットワークの結合度と発火周波数の間に一対一の関係があるとの仮説を立て、現象を説明する簡単なモデルを構築した。また、これを検証するため、細胞間の結合を人為的に切断する実験を行い、周波数が減少することを確認した。[2]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Kobayashi and M. Sano: Anomalous Collective Diffusion in One-dimensional Driven Granular Media, J. Phys. Soc. Jpn, 73, 2697-2700 (2004).

- [2] L.C. Jia, M. Sano, Pik-Yin Lai, and C.K. Chan: Connectivities and Synchronous Firing of Cortical Neural Networks, *Phys. Rev. Lett.* 93, 088101 (2004).
- [3] Fukatsu, K., Bannai, H., Zhang, S., Nakamura, H., Inoue, . and Mikoshiba, K.: Lateral diffusion of inositol 1,4,5-triphosphate receptor type 1 is regulated by actin filaments and 4.1N in neuronal dendrites, *J. Biol.Chem.* 279 ,48976-48982 (2004).
- [4] T. Mashiko, Y. Tsuji, T. Mizuno, and M. Sano: Measurement of Velocity Field in Thermal Turbulence in Mercury by Ultrasonic Doppler Method, *Theor. Appl. Mech. Jpn.* 53, 207-214 (2004).
- [5] Y. Tsuji, T. Mizuno, T. Mashiko, and M. Sano: Mean Wind in Convective Turbulence of Merccury, *Phys. Rev. Lett.* 94, 034501 (2005).
- [6] H. Wada: Electroviscous effects of simple electrolytes under shear, *J. Stat. Mech. -Theor. & Exp.* P01001 (2005).
- [7] Y. Murayama and M. Sano: Exchange of Counterions in DNA Condensation, *Biopolymers* 77, 354-360 (2005).
- [8] S. Toyabe and M. Sano: Spatial Suppression of Error Catastrophe in a Growing Pattern, *Physica D* 203,1 (2005).
- (会議抄録)
- [9] 益子岳史、瀬川武彦、辻義之、佐野雅己:「熱乱流速度場の USV と PIV による同時測定」、九州大学応用力学研究所研究集会報告 16ME-S4、乱流研究の異分野融合と新たな創成、47-54 (2004 年 6 月)。
- [10] Y. Murayama and M. Sano: Force measurements of single DNA molecules in reentrant collapsing transition, *WSEAS Int. Conf. on Mathematical Biology and Ecology*, August 17-19, 2004, Corfu, Greece. (CD-ROM), 488-181.
- [11] 松尾美希: 不可逆循環と適応, 統計数理研究所共同研究リポート vol.181, p27-30 (2004).
- (国内雑誌)
- [12] 松尾美希: ガラスのなかの記憶構造, *物性研究.* 83(1) 79-84 (2004)
- (学位論文)
- [13] 益子岳史: A study of the spatiotemporal structure of the velocity field in thermal turbulence (博士論文)。
- [14] 和田浩史: Dynamics of Single Polymers and Fluctuation Properties of Fluids Far From Equilibrium (博士論文)。
- [15] 石田良: DNA の凝縮転移における力学応答とその可視化 (修士論文)。
- [16] 辰己創一: 粉体上の転がり摩擦に関する研究 (修士論文)。
- [17] 前多裕介: 人工遺伝子ネットワークによる遺伝子発現ダイナミクスの定量的解析 (修士論文)。
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [18] S. Toyabe and M. Sano: Error Catastrophe Theory in a Growing Pattern, 22nd International conference on statistical physics (STATPHYS 22), Jul. 4-9, 2004, Bangalore, India.
- [19] M. Matsuo: Fluctuation response relation in a disordered system driven by chaotic external forces, 22nd International conference on statistical physics (STATPHYS 22), July. 4-9, 2004, Bangalore, India.
- [20] H. Wada, Y. Murayama, and M. Sano: Nonlinear mechanical responses of a collapsed polyelectrolyte, 22nd International conference on statistical physics (STATPHYS 22), Jul. 4-9, 2004, Bangalore, India.
- [21] Y. Murayama and M. Sano: Force measurements of single DNA molecules in reentrant collapsing transition, *WSEAS Int. Conf. on Mathematical Biology and Ecology*, Aug. 17-19, 2004, Corfu, Greece.
- [22] A. Awazu : Can relaxation to equilibrium be hindered by transient dissipative structures?, 5th Int. Conf. on Biological Physics, Aug. 23-27, 2004, Gothenburg, Sweden.
- [23] Y. Murayama and M. Sano: Observation of Counterion Exchange in DNA Condensation using Fluorescent Dyes, 5th Int. Conf. on Biological Physics, Aug. 23-27, 2004, Gothenburg, Sweden.
- [24] Y. T. Maeda and M. Sano: Quantitative Experimental Analysis of a synthetic genetic network - Response Delay in a positive feedback module-, 5th International Conference on Systems Biology, Oct. 9-13, 2004, Heidelberg, Germany.
- [25] T. Mashiko, Y. Tsuji, and M. Sano: Dynamics of Velocity Field in Developed Thermal Turbulence, IUTAM symposium "Elementary Vortices and Coherent Structures— Significance in Turbulence Dynamics —", Oct. 26-28, 2004, Kyoto, Japan.
- [26] T. Ishii, M. Matsuo, and M. Sano: The Mechanical Model of Molecular Motor with Load Dependent Hydrolysis, *Int. Symp. on Oscillation, Chaos and Network Dynamics in Nonlinear Science*, Nov. 25-28, 2004, Kyoto, Japan.
- [27] R. Ishida, Y. Murayama, and M. Sano: Visualization during stick-release and plateau responses of collapsed DNA, *Int. Symp. on Oscillation, Chaos and Network Dynamics in Nonlinear Science*, Nov. 25-28, 2004, Kyoto, Japan.

- [28] Y. Kobayashi and M. Sano: Clusters and Loops in a Reaction-Advection-Diffusion System with a Global Feedback, Int. Symp. on Oscillation, Chaos and Network Dynamics in Nonlinear Science, Nov. 25-28, 2004, Kyoto, Japan.
- [29] M. Matsuo: Robust adaptation and Fluctuation in a simple bacterial chemotaxis network, Int. Symp. on Oscillation, Chaos and Network Dynamics in Nonlinear Science, Nov. 25-28, 2004, Kyoto, Japan.
- [30] H. Wada, Y. Murayama, and M. Sano: Dynamics and rheology of highly charged fluids and polymers, International workshop on Physics of Soft Matter Complexes, Nov.29 - Dec.02, 2004, Tokyo, Japan.
- [31] M. Sano, A. Katano, and Y. Murayama: Mechanical Response of Protein and DNA By Single Molecule Force Spectroscopy, The 2nd Open Workshop "Chemistry of Biological Processes Created by Water and Biomolecules", Mar. 17-18, 2005, Tokyo, Japan.
- [32] Y. Murayama, Ryo Ishida, and M. Sano: Intramolecular Collapsing of Single DNA Molecules, The 2nd Open Workshop "Chemistry of Biological Processes Created by Water and Biomolecules", Mar. 17-18, 2005, Tokyo, Japan.
- [40] 小林康明, 佐野雅己: 気体放電のモデルとしての移流反応拡散系のパターンダイナミクス, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学) 2004 年 9 月 12-15 日.
- [41] 辰己創一, 佐野雅己: 粉体上の転がり摩擦, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学) 2004 年 9 月 12-15 日.
- [42] 益子岳史, 辻義之, 佐野雅己: 発達熱乱流の速度場の時空間構造, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学) 2004 年 9 月 12-15 日.
- [43] 松尾美希: 適応現象における不可逆循環の役割, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学) 2004 年 9 月 12-15 日.
- [44] 松尾美希: LABS model において生成される履歴構造, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学) 2004 年 9 月 12-15 日.
- [45] 村山能宏, 佐野雅己: DNA 凝縮転移下における対イオン交換, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学) 2004 年 9 月 12-15 日.
- [46] 前多裕介, 佐野雅己: Quantitative Experimental Analysis of a synthetic genetic network with positive feedback, 第 77 回日本生化学会年会 (横浜パシフィコ), 2004 年 10 月 13-16 日.
- [47] 松尾美希: 不可逆循環と適応, 統計数理研究所研究会 動的システムの情報論 4, 2004 年 10 月 24 日.
- [48] 栗津暁紀: 3 体歯車系の運動, 数理解析研究会「複雑流体の構造形成と崩壊の数理」(京都大学数理解析研究所), 2004 年 11 月 17-19 日.
- [49] 辰己創一, 佐野雅己: 粉体上の転がりと摩擦, 複雑流体の構造形成と崩壊の数理, 数理解析研究会「複雑流体の構造形成と崩壊の数理」(京都大学数理解析研究所), 2004 年 11 月 17-19 日.
- [50] 栗津暁紀: 柔らかい機械 (歯車) による伝達、変換、記憶, 日本生物物理学会年会 (京都国際会館) 2004 年 12 月 13-15 日.

招待講演

- [33] M. Sano: High Rayleigh Number Thermal Convection; An Overview and a New Approach by Ultrasonic Measurements, International Symposium on Ultrasonic Doppler Method for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, Sep. 6-8, 2004, Sapporo, Japan.

(国内会議)

一般講演

- [34] 佐野雅己, 村山能宏: 1 分子力学・蛍光測定によるフォールディング・ダイナミクスの研究, 特定領域研究「水と生体分子」研究会 (いこいの村琵琶湖) 6 月 1-3 日.
- [35] 栗津暁紀: 3 体歯車系の運動と滑り, 基研研究会「ソフトマターの物理学 2004」(京都大学基礎物理学研究所) 2004 年 7 月 26-28 日.
- [36] 辰己創一, 佐野雅己: 粉体系における転がり摩擦, 非線形問題研究会 (鳥取大学) 2004 年 6 月 17 日.
- [37] 栗津暁紀: 3 体の歯車からなる系の運動、滑り, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学) 2004 年 9 月 12-15 日.
- [38] 栗津暁紀: Coupled Asymmetric CA の動力学とシグナル伝達, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学) 2004 年 9 月 12-15 日.
- [39] 栗津暁紀: 多近傍多状態総和型 CA の分岐の変化, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (青森大学) 2004 年 9 月 12-15 日.
- [51] 佐野雅己, 石井孝明, 松尾美希: Chemomechanical Coupling を考慮した分子モーターモデル, 基研研究会「ナノバイオダイナミクス」(京都大学基礎物理学研究所) 2005 年 3 月 4 日.
- [52] 石井孝明, 松尾美希, 佐野雅己: 加水分解の負荷依存性をもつ分子モーターの力学モデル, 日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス) 2005 年 3 月 24-27 日.
- [53] 石田良, 村山能宏, 佐野雅己: 分子内凝縮した 1 分子 DNA の張力応答とその可視化, 日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス) 2005 年 3 月 24-27 日.
- [54] 辰己創一, 松尾美希, 佐野雅己: 粉体上の転がり一素過程と現象論一, 日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス) 2005 年 3 月 24-27 日.
- [55] 松尾美希: 自己回避により駆動されるネットワークと農村構造, 日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス) 2005 年 3 月 24-27 日.
- [56] 村山能宏, 佐野雅己: 制限酵素反応下における DNA の力学応答, 日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス) 2005 年 3 月 24-27 日.

- [57] 和田浩史, 村山能宏, 佐野雅己: 強結合領域における荷電高分子の非線形弾性, 日本物理学会第 60 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス) 2005 年 3 月 24-27 日.

招待講演

- [58] 佐野雅己: 非線形動力学とその周辺, 蔵本由紀先生退官記念講演会, 2004 年 4 月 17 日.
- [59] 佐野雅己: 生体高分子 1 分子のレオロジー (Rheology of Biological Molecules at a Single Molecular Level), ソフトマターの物理学 2004 -変形と流動-, 2004 年 7 月 26-28 日, 京都大学基礎物理学研究所.
- [60] 佐野雅己: 破壊パターンの科学, 東北工業大学市民講座「寺田虎彦と現代科学」, 2004 年 7 月 31 日, 仙台.
- [61] 村山能宏: 凝縮転移下で DNA を引っ張る, 早稲田 COE ワークショップ 生物の運動メカニズムに関する研究会, 早稲田大学理工学部, 2004 年 8 月 4-5 日.

(セミナー)

- [62] 村山能宏: 凝縮転移下における 1 分子 DNA の力学応答, 東京大学駒場キャンパス, 2004 年 5 月 18 日.
- [63] 石井孝明: 分子モーターの協調現象, 早稲田大学理工学部, 2004 年 5 月 19 日.
- [64] 佐野雅己: 熱乱流の究極状態とは何か -現状と展望-, 東北大学物性コロキウム, 2004 年 7 月 1 日.
- [65] 村山能宏: 凝縮転移下における 1 分子 DNA の力学応答, 東北大学電気通信研究所, 2004 年 10 月 21 日.
- [66] 前多裕介: 人工遺伝子ネットワーク再構成によるシステムバイオロジー, 広島大学数理生命科学研究科, 2004 年 12 月 7 日.
- [67] 益子岳史: Experimental research on thermal turbulence, 東京大学理学部 地球惑星科学セミナー, 2005 年 2 月 28 日.

(その他)

- [68] 佐野雅己: 集中講義, 東北大学大学院理学研究科, 2004 年 6 月 30 日-7 月 1 日.
- [69] 佐野雅己: 集中講義, 早稲田大学, 2004 年 11 月 15-17 日.
- [70] 佐野雅己: 集中講義, お茶ノ水大学大学院理学研究科, 2004 年 12 月 20-21 日.

6.6 山本研究室

6.6.1 はじめに

星と星との間にはガスと塵からなる希薄な雲（星間雲）が漂っている。星間雲の中でも比較的密度が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、天文学における未開拓の波長域である。本研究室では、わが国ではじめてのサブミリ波望遠鏡（口径 1.2 m）を富士山頂に設置して観測を行っている。中性炭素原子の放つ $^3P_1 - ^3P_0$ (周波数 492 GHz; 波長 0.6 mm) と $^3P_2 - ^3P_1$ (周波数 809 GHz; 波長 0.4 mm) の微細構造スペクトル線について、星間分子雲スケールでの広域観測を展開しており、その分布を一酸化炭素の分布などと比較することで、星間分子雲の形成・進化を解明しつつある。また、このような研究を銀河系スケールで展開するために、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、わが国が米欧とともに建設を行っている ALMA (Atacama Large Millimeter and submillimeter Array) プロジェクトにも加わっている。

一方、テラヘルツ帯での観測を実行するために、超伝導ホットエレクトロン・ボロメーター・ミクス素子の開発を行っている。昨年度から、研究室内に素子製造装置を順次導入してミクス素子の開発研究を進めている。この素子を用いて 1.47 THz の窒素イオンのスペクトル線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、プラズマ相から原子相、分子相に至る星間雲の「相変化」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。

6.6.2 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、わが国初めてのサブミリ波望遠鏡である。冬季の富士山頂はサブミリ波帯での天体観測を妨げる水蒸気が少なく、絶好の観測サイトである。その優れた観測条件を生かして、中性炭素原子のサブミリ波微細構造スペクトル線を観測し、星間分子雲の構造、形成、およびそこでの星形成を研究している。

富士山頂サブミリ波望遠鏡は 1995 年度より製作を開始し、1998 年 7 月に富士山頂に設置された。その後、衛星通信回線を利用した遠隔制御によって観測運用を行っている。昨年までに 6 回の観測シーズンで 492 GHz のスペクトル線については約 50 平方度の領域を観測できた。これは、他のグループと比

べて観測領域の広さで 1 桁以上も上回るものであり、近傍星間分子雲における中性炭素原子の分布の全貌を描き出しつつある。また、809 GHz のスペクトル線についても、代表的星間分子雲でのマッピング観測を世界ではじめて実現した。

2004 年 10 月から気象庁富士山測候所の非常駐化がスタートし、富士山測候所への送電が冬季には行われないことになった。富士山頂サブミリ波望遠鏡は富士山測候所から電気の供給を受けて運用してきたので、そのままでは運用を続けられないことになる。そこで、気象庁から送電線および受電設備を借り受けて、遠隔制御による望遠鏡への送電を行った。しかし、10 月から 11 月にかけての台風と秋雨前線による度重なる落雷で、遠隔制御設備や送電線に被害を受け、送電不能となった。その結果、2004 年から 2005 年にかけての観測シーズンにおいては、残念ながら観測を行うことができなかった。そのため、本年度についてはこれまでに取得した観測データの解析を進めることに専念した。

本研究はビッグバン宇宙研究センターの研究プロジェクトの 1 つとして推進しており、国立天文台の立松健一氏、関本裕太郎氏、野口卓氏、前澤裕之氏、大石雅壽氏、福井大学の斎藤修二氏、宇宙開発事業部の尾関博之氏、稲谷順司氏、理化学研究所の池田正史らとの共同研究である。

星間分子雲における中性炭素原子の分布 富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて 5 年にわたって、「おうし座分子雲複合体」、「オリオン座 A 分子雲」の一部である OMC-1 領域および「ふたご座分子雲複合体」の一部である S252 領域における中性炭素原子の分布をこれまでにないスケールで明らかにしてきた。

おうし座分子雲複合体については、未観測領域である L1495 と B18 の 2 つの分子雲の対して CI(492 GHz) 輝線のマッピング観測を遂行した。L1495 において HCL2 に匹敵する C^0/CO 比を見いだした。その一方で、B18 では平均の比が有意に低い (0.1–0.2) ことが確認された。この結果と時間依存性 PDR モデルのシミュレーション結果の比較とから、HCL2 や L1495 では化学的進化段階が早い時期にあり、B18 はより進化の進んだ状態もしくは定常状態にあると考えられる。このような違いは、 C^0/CO 比と M_{VIR}/M_{LTE} 比や星形成率との間に見いだされた相関関係と矛盾しない。以上の結果から、分子雲は必ずしも化学平衡には達していないこと、また、複合体中に存在する分子雲の化学進化段階にはバリエーションがあることがわかった。

OMC-1 においては、初めて CI(809 GHz) 輝線の広域分布を描き出し、温度分布と柱密度分布を明らかにすることができた。導出された C^0 の柱密度の値とモデル計算結果との比較から、OMC-1 でも化学的平衡状態に達していないことが確認された。また、 C^0 と CO の分布の様子を調べた結果、紫外線源に対して CO/C^0 という平行平板構造を仮定した PDR モデルの予測とは矛盾していることも確認された。このような結果は S252 での CI 観測でも見いだされたことから、強い紫外線源をともなった分子雲の基本的性質 (化学進化、密度分布) が関与していると考え

られる。CI と高密度トレーサーの分布を比較したところ、高密度領域が HII 領域に隣接する場所に存在し、その後方に CI が分布するより希薄な領域が広がっていることがわかった。このような密度分布を仮定してモデルシミュレーションした結果、妥当な年齢（紫外線源の推定年齢）において観測結果を再現することができた。

一方、 C^0 と CO の柱密度が紫外線強度や密度分布に対してどう影響されるかを定量的に解釈するために、3次元時間依存性 PDR モデルの構築・シミュレーションを行なった。分子雲の典型的な大きさを仮定し、一様密度、Gaussian 密度分布、クランプ状構造を持つ場合について考えた。その結果、いずれの場合についても、定常状態では C^0 の柱密度に大差はなかった。また、紫外線強度を変えても顕著な違いは見られなかった。むしろ、化学進化の途中段階で C^0 の柱密度および C^0/CO 比は大きく変化し、観測値を十分満足することがわかった。

本観測により、分子雲が必ずしも化学的に平衡状態に達してはいないことを分子雲スケールで初めて明らかにすることができた。また、 C^0/CO 比を分子雲進化の良いトレーサーにできることを観測的・理論的に示すことができた。

Bright-Rimmed Globule 中の中性炭素原子の分布 2002-2004 年にかけて行った観測の結果をもとに、Bright Rimmed Globule における中性炭素原子 (C^0) の分布について総合的に考察を行った。Bright Rimmed Globule は大質量星の近傍に位置する小分子雲であり、典型的に 1 pc 程度の大きさ、1-100 $M_\odot$ の質量を持つ。表面には、可視光のリムとして観測される電離領域の層が形成され、その内側には光解離領域 (PDR) の層が存在する。このような単純な構造を持つグロービュールの観測によって、 C^0 の分布と PDR の分布とを比較し、 C^0 の性質を検証することが可能になる。

観測対象としたのは、IC1396 領域と λ -Orionis 領域に属する合計 18 のグロービュールである。行った観測は、富士山頂サブミリ波望遠鏡による $[CI] \ 3P_1 - 3P_0$ 輝線のマッピング観測、野辺山 45m ミリ波望遠鏡による CO、 ^{13}CO 、 $C^{18}O$ ($J=1-0$) 輝線のマッピング観測と $N_2H^+ \ J=1-0$ 、 $SO \ J_N=3_2-2_1$ 輝線の観測である。観測対象のうち、IC1396 領域に存在するグロービュールについては C^0 は分子雲の表面領域だけでなく、CO 柱密度のピーク方向の分子雲内部領域にまで分布していた。一方、 λ -Orionis に属する 2 つのグロービュール (B30、B35) については、 $[CI]$ 輝線の強い領域が可視光のリムに沿った分子雲の表面領域に分布している様子が観測された。これは化学的な定常状態で理論的に予想される C^0 の分布の特徴に近い。また、内部に赤外線点源や N_2H^+ によってトレースされる高密度コアを含み、すでに星形成活動を行っていると考えられるグロービュール (type 2) と、星形成活動の観測されていないグロービュール (type 1) との間には、分子雲全体の C^0/CO 比に違いが見られた。前者における典型的な C^0/CO 比が 0.1-0.2 程度であるのに対して、後者のグループは 0.4-1.0 という高い比を持っていることがわかった。さらに、化学

的な定常状態に近い C^0 分布を示した B30、B35 分子雲は、観測されたグロービュール中で最も低い C^0/CO 比を持つ。

以上の結果は、分子雲内部の C^0 が分子雲形成直後に C^+ イオンの再結合によって形成され、その後 10^6 年オーダーの時間の間に化学反応によって CO に変化するという描像によってよく説明される。 C^0/CO 比の高いグロービュールほど、ビリアル質量/質量比が高いという傾向が見られることも、この描像と一致する結果である。B30、B35 分子雲はすでに化学平衡に近く、分子雲表面の PDR 層にのみ CO の光解離によって生成された C^0 が豊富に存在すると解釈できる。これらは、 C^0 の分布の特徴や、 C^0/CO 比が分子雲の進化段階を反映していることを裏付ける結果であるといえる。

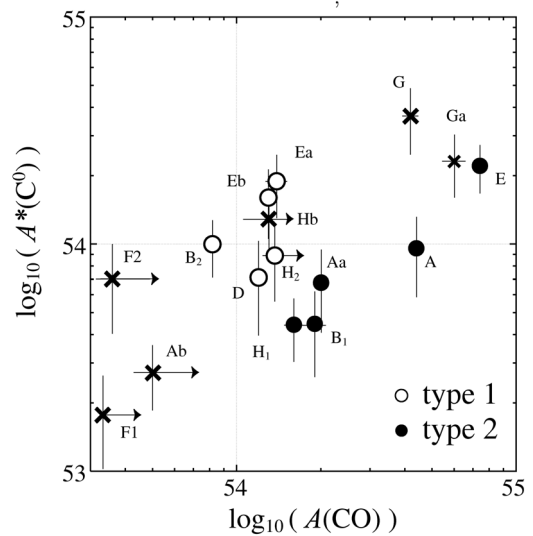


図 6.6 a: 観測したグロービュールの C^0 および CO の総量。黒丸は type 1 (星形成なし)、type 2 (星形成あり) のグロービュールを表す。

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、 $\Delta V \approx 40 \text{ km s}^{-1}$ もの線幅を持つ $[CI]$ 輝線の wing 成分を、可搬型 18cm 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観測で $30' \times 30'$ に及ぶ分布を明らかにしていた。本年度はこの $[CI]$ 輝線のデータを、富士山頂サブミリ波望遠鏡による CO $J=3-2$ のデータ、さらになんてんグループの提供により、なんてん望遠鏡による CO $J=1-0$ のデータと共に解析した。この結果、高速度成分のガス雲は、密度 10^3 cm^{-3} 程度、柱密度 $N(C^0) \sim 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 、 $N(CO) \sim 8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ とわかった。 C^0/CO 比は 3-4 と高く、translucent cloud のような化学状態にある。また、原始星からの双極分子流や、超新星残骸との相互作用によって形成されたとは考えられず、速度幅の起源は観測的に知られていない現象によるものである可能性がある。そのひとつとして、M17 巨大分子雲を含むスーパーシェルの伴う形成が

考えられる。

6.6.3 可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡

本研究室では、小型（口径 18cm）で可搬型のサブミリ波望遠鏡を開発した。この望遠鏡は、中性炭素原子が放射する二本のサブミリ波スペクトル線 ($CI\ ^3P_1-^3P_0$: 492GHz, $^3P_2-^3P_1$: 809GHz) による広域サーベイ観測を行うことによって、銀河系スケールにおける原子ガスの大局的分布・運動・物理状態を調べることが目的としている。この望遠鏡の特長は、可搬型のため世界中のあらゆる優良観測サイトに持ち込むことが出来、しかも主鏡口径が 18cm と小さい ($HPBW=13'@492GHz$) ので広い領域をサーベイするのに適しているところにある。

2003 年 9 月、この望遠鏡を南米チリのパンパラボラ ALMA-J サイトに設置し、 $CI\ 492GHz$ 輝線による銀河面サーベイを開始した。サーベイの初期成果として、以下のような結果を得た。

- 銀河系内域における炭素原子 (C^0) の大局的な分布・運動は、一酸化炭素分子 (CO) のそれに酷似している。
- $CI\ ^3P_1-^3P_0$ スペクトル輝線放射は、熱化が不十分かつ光学的に薄い雲、いわゆる “translucent clouds” と呼ばれる雲が支配的である。
- C^0/CO 存在比が、銀河半径に対して単調に増加していく傾向がある。つまり、銀河系中心に近くなるほど分子の割合が高い。
- CI/CO 輝線放射強度比が高い領域は、銀河系回転に対して渦状腕の上流に位置する。これは、渦状腕上での星間分子雲形成の過程を見ているものと解釈できる。

以上の成果は一本のジャーナル論文として出版された [5]。また、論文の公表に合わせて東大において記者発表を行い、複数の一般紙に掲載された。また本望遠鏡は、観測の効率化を図ると同時に、テラヘルツ帯での観測を実現するために、以下の改良を行っている。

駆動系の更新 望遠鏡の指向精度を向上する為に、仰角駆動モータを更新する。新モータは、ドライバユニット及び制御ソフトウェアとのコンパチビリティを考慮して、旧モータと同じハーモニックドライブ (株) 社製の新型のものを採用した。新モータの採用により、かねてより問題であった仰角方向の指向精度に 3 倍程度の向上が見込まれる。これと併せて、方位角駆動ウォームギア取付部分の改良を進めている。方位角駆動ウォームギアは、運搬時の破損を避けるために本体梱包前に取り外す必要があり、そのためレーザ光を使用したバックラッシュ調整を現地でやり直す必要があった。この現地作業を軽減するために、板バネを使用した無調整加圧機構を考案した。

制御系の改善 高地作業は危険であると同時に人体に深いダメージを与えるリスクがあるので、長時間にわたる高地滞在は出来るだけ避けることが望ましい。そのため、低高度地域からの遠隔操作に対応するよう望遠鏡制御系の改造を進めている。具体的には、制御計算機を従来の Windows 駆動の DOS/V 計算機から UNIX 駆動の VME バス計算機へと変更した。これにより望遠鏡の長時間安定な運用と、信頼性の高い遠隔制御システムの構築が可能になった。また高地での配線作業を容易にするために、メイン・ホストと被制御機器とのコミュニケーションは全て GPIB 回線に統一した。各被制御機器には小型の PC/104 規格ボード計算機 (MS-DOS で駆動) を組み込み、各々の動作に対応する GPIB コマンドを受け付ける 16bit アプリケーションを Turbo C コンパイラによって作成した。

THz 帯受信機デューワーの開発 可搬型 18 cm サブミリ波望遠鏡によって窒素イオンのスペクトル線 ($[NII]: 1.46\ THz$) を観測するため、受信機デューワーを開発した。この受信機デューワーは当研究室で製作した HEB ミクサ素子を搭載するもので、小型 GM 2 段式の機械式冷凍機を用いた冷却により、長期的な安定運用を目指すものである。これを用いて HEB ミクサ素子の性能測定に向け実験を進めている。本年度は 809 GHz 試験用光学系を製作し、これに 809 GHz 用の Nb 拡散冷却型 HEB ミクサ素子を載せ冷却を行なった。この結果、HEB ミクサ素子の理想的な I-V 特性を得ることができ、超伝導特性が現れる素子の転移点付近において I-V 特性の温度依存性が測定できた。これにより、従来 SIS ミクサ素子を搭載する時に用いていた機械式冷凍機による冷却方法が、HEB ミクサ素子を搭載するときにも利用可能なことが示された。

6.6.4 テラヘルツ帯における観測技術の開拓

可搬型 18 cm サブミリ波望遠鏡などを用いて、テラヘルツ帯に存在する窒素イオンの微細構造スペクトル線 ($^3P_1-^3P_0, 1.47\ THz$) の観測を行う目的で、Nb を用いた拡散冷却型ホットエレクトロン・ボロメータ (HEB) ミクサ素子、および NbTiN を用いた格子冷却型 HEB ミクサ素子を開発している。テラヘルツ帯における高感度ヘテロダイン検出技術は世界的にもまだ未確立であり、素子レベルからの開発研究が重要かつ不可欠である。そこで、実験室にクリーンブースを設置し、素子製造装置一式を整備しつつある。昨年度、微細構造の描画のための電子ビーム描画装置を導入したのに引き続き、本年度は複合成膜装置を導入した。この装置はスパッタ装置、蒸着装置、逆スパッタ装置を真空バルブを介して組合わせたもので、HEB 素子の製作に最適化した配置になっている。そのため、素子を大気圧に暴露することなく複数の成膜プロセスを行うことができるので、高品質の HEB 素子の製作が可能になることが期待される。

装置立ち上げ これまで HEB ミクサ素子の製作は国立天文台三鷹・野辺山のクリーンルームにある露光装置や成膜装置を用いて行っていた。しかしこれらの装置の多くは天文台の諸業務に最適化されており、HEB ミクサ素子の製作には必ずしも十分なものではなかった。さらに、三鷹・野辺山間で複数回の搬送が必須であることなどの問題もあった。そこで昨年度末から本郷キャンパス内に新たにクリーンブースを設置して、HEB ミクサ素子に必要な装置を導入した。今年度は電子ビーム露光装置、複合成膜装置などについて、デバイス製作の大部分の工程を集約して進めるための環境整備を集中して行った。

電子ビーム露光装置として用いる電子顕微鏡には、従来不可能であった 100 nm スケールの微細描画を実現するために従来国立天文台で用いていたものより高分解能の装置を選定した。試料を装填、移動させるステージは、試料表面の反りによるフォーカスのずれを補償するために X-Y 方向に加えて Z 方向の駆動機構を実装した。現在これらの新機構を用いて描画作業を行うためのソフトウェアの開発を進めている。あわせて、従来ミクサ素子 1 本ごとに手作業で行っていた描画位置合わせの作業を自動で行うためのソフトウェア改良も行った。これにより描画図形の高精度化および描画作業の大幅な軽減が期待される。複合成膜装置は Nb、Al、NbTiN のスパッタ、Au などの蒸着、および Ar 逆スパッタの工程を共通の真空槽で実現可能な設計となっている。今年度は NbTiN スパッタを除く各項目について成膜工程の確立、および製作した薄膜の物性測定を進め、Nb 拡散冷却型 HEB ミクサの製作に必要な成膜条件を揃えることができた。これらの成果から、HEB ミクサの製作工程において Nb 細線部を含む主要部分の製作にかかる全工程を実験室内で一貫して行う環境が整備された。

Nb 拡散冷却型 HEB 前年度に引き続き Nb 拡散冷却型 HEB ミクサの製作試験を続けた。目標とする IF 周波数帯域および細線部のインピーダンスを実現するために、電子ビーム描画の条件整備が進んだことを踏まえて製作するミクサの設計を $0.2\text{--}0.5\text{ }\mu\text{m}$ スケールまで縮小した。その結果インピーダンスが理想値である $27\text{ }\Omega$ を上回りかつ良好な超伝導特性を示すミクサを製作でき、ミクサに要求される電気特性をクリアするデバイスの製作に目処が立った。一方で本郷キャンパスで整備を進めた諸装置を順次ミクサ製作に運用開始し、製作工程の改善を図った。特に従来三鷹の蒸着装置で悩まされていた Au 薄膜の剥離を、複合成膜装置で蒸着速度を厳しく管理しながら成膜することによって著しく改善させることができ、ミクサ製作の歩留まりが大きく向上した。我々はミクサ製作の目標を可般型 18 cm 望遠鏡への搭載に置いており、従ってミクサの性能評価は最終的には望遠鏡の受信機システムに組み込んで実行する必要がある。そこで従来野辺山観測所にある Joule-Thomson 型機械式冷凍機で行っていた試験に代えて、可般型 18 cm 望遠鏡の冷凍機デューワーを用いての試験を開始した。今後 HEB ミクサの性能評価を繰り返し行っていくに当たり、専用の受信機システムを用いての実験が可能であることは大きなメリットとなる。これ

までに HEB ミクサの超伝導特性が Joule-Thomson 型冷凍機と同等に測定可能であることが確認された。

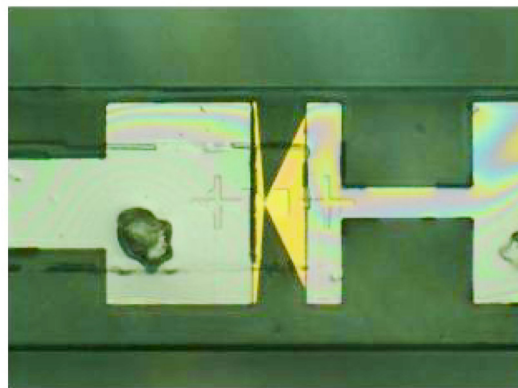


図 6.6 b: 製作した HEB 素子の拡大図。

NbTiN 格子冷却型 HEB HEB ミクサに用いるもうひとつの素材として、NbTiN に着目している。今年度は昨年度に引き続き、国立天文台三鷹の NbTiN 成膜装置を用いて NbTiN 薄膜の成膜条件の検討、そして 1.5 THz 帯の NbTiN 格子冷却型 HEB ミクサの製作を行った。NbTiN 薄膜のスパッタ雰囲気を使用する Ar と N₂ の混合気体の全圧、および N₂ ガスの有無によるカソード電圧の変分量をパラメータとして、N₂ 流量を微調整する手法によってターゲットのエロージョンによる成膜条件の変動に対応しながら再現性良い成膜を行うことが可能となった。これを踏まえて、従来の Nb 拡散冷却型 HEB ミクサ製作の手法を踏襲して NbTiN 格子冷却型 HEB ミクサの試作を行った。ただし細線部には厚さ 5 nm の NbTiN 薄膜を成膜、アンテナ構造は新規に製作した 1.5 THz HEB ミクサ用のレチクルを用いて三鷹の g 線ステッパーによりパターンニングした。このミクサ素子は液体ヘリウムによる冷却試験で HEB ミクサに特徴的な超伝導特性を示すことが確認された。

6.6.5 星間物質の観測的研究

複雑な有機分子による星形成領域の診断 大質量星の形成領域において、HCOOCH₃ や、CH₃OCH₃, C₂H₅CN などの複雑な有機分子は、ホットコアを特徴づける分子として知られてきた。ところが近年、中小質量星形成領域である IRAS16293-2422 においても、これらの複雑な有機分子が初めて検出された (Cazaux et al. 2003)。これにより、中小質量星形成領域にも大質量星形成領域と同様にホットコアが存在し、複雑な有機分子が形成され得ることがわかった。そこで、これらの分子が、その他の中小質量星形成領域においても存在するのかを明らかにするため、NGC1333IRS4B 領域を観測した。その結果、HCOOCH₃ の検出に成功した。NGC1333IRS4A においても検出されているため (Bottinelli et al. 2004)、

わずか3天体ではあるが、形成される星の質量にかかわらずこれらの分子が一般的に形成され得るという可能性が高まった。中小質量星形成領域では一般に惑星系が作られることを考えると、これは、形成された有機分子が惑星系にもたらされる可能性を意味しており、惑星系形成における化学進化の理解に重要な意義がある。

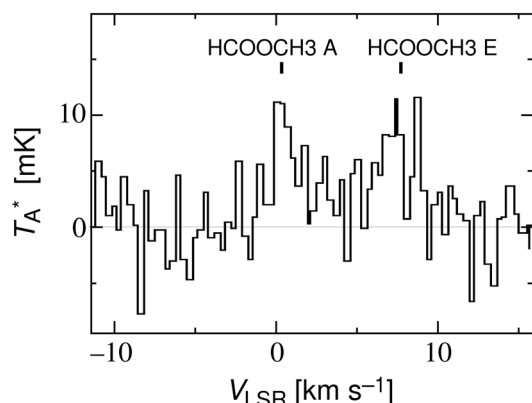


図 6.6 c: 中小質量星形成領域 NGC1333IRS4B において検出した有機分子 HCOOCH_3 E(89.3146GHz) の輝線。

遠方原始銀河候補天体の CI 輝線探索 銀河・銀河団形成初期の原初ガス雲がどのような物理的・化学的状态を有し、それがどのような状況下で如何にして集積し、その中でいかなる星が生まれるのかを明らかにすることは、宇宙の構造形成を論じる上で避けて通る事のできない重要なステップである。今回、野辺山宇宙電波観測所 45m 望遠鏡を用いて、電波銀河 TN J1338-1942 周辺の原始銀河候補天体の $[\text{CI}]^3P_1-^3P_0$ 輝線 (96.5 GHz @ $z=4.1$) を探索する事を計画した。観測は17夜にわたって行われ、 $\Delta T_{\text{MB}} = 3$ mK の良質なスペクトルを得たが、 $[\text{CI}]$ 輝線の有意な検出には至らなかった。予測したスペクトル線強度は $T_{\text{MB}} \leq 1-2$ mK であった為、この結果は想定されたものであり、この原始銀河候補天体のガス総量および物理状態に粗い制限を加える事ができた。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] P.G. Ananthasubramanian, Satoshi Yamamoto, T.P. Prabhu, and Dorje Angchuk, "Measurement of 220 GHz Atmospheric Transparency at IAO, Hanle, during 2000-2003", *Bull. Astr. Soc. India*, **32**, 99-111 (2004).
- [2] Tomoya Hirota, Hiroyuki Maezawa, and Satoshi Yamamoto, "Molecular Line Observations of Carbon-chain-producing Regions L1495B and L1521B", *Astrophys. J.*, **617**, 399-405 (2004).
- [3] H. Ozeki, T. Hirao, S. Saito and S. Yamamoto, "Laboratory Microwave Spectroscopy of the Cyanomethyl Radical, CH_2CN ", *Astrophys. J.*, **617**, 680-684 (2004).

- [4] Eunsook Kim and Satoshi Yamamoto, "Rotational Spectra of the Deuterated Carbon Chain Molecules: C_3D , C_4D , C_3HD , C_4HD ", *J. Mol. Spectrosc.*, in press.
- [5] T. Oka, K. Kamegai, M. Hayashida, M. Nagai, M. Ikeda, N. Kuboi, K. Tanaka, L. Bronfman, & S. Yamamoto, "Atomic Carbon in the Milky Way", *The Astrophysical Journal*, **623**, 889-896 (2005)
- [6] H. Maezawa, T. Sato & T. Noguchi, "Process Simulation of Reactive DC Magnetron Sputtering for Thin Film Deposition of Niobium-Titanium Nitride", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, in press

(国内雑誌)

- [7] 山本 智: 「化学の眼でみる宇宙－星間分子雲の形成と進化」、現代化学、2004 年 7 月、p. 46-49.

(学位論文)

- [8] 久保井信行: "Structure and Evolution of Interstellar Molecular Clouds as Studied by $[\text{CI}]$ Line Observations and Chemical Model Calculations", 博士論文、2005 年 3 月
- [9] 田中邦彦: "Distribution of Neutral Carbon Atom in Bright Rimmed Globules", 博士論文、2005 年 3 月
- [10] 佐藤高之: 「NbTiN 薄膜を用いたテラヘルツ帯 HEB ミクサの開発とおうし座 L1521 領域における $[\text{CI}]$ 輝線広域観測」、修士論文、2005 年 1 月
- [11] 永井 誠: 「M17 領域における中性炭素原子輝線の高速度成分」、修士論文、2005 年 1 月

(著書)

- [12] 山本 智: 「電波望遠鏡による星間分子の探索」、化学測定辞典 (梅澤喜夫編)、朝倉書店 (2005)、p.207-235.

(国際会議)

一般講演

- [13] K. Tanaka, T. Oka & S. Yamamoto, "Observation of the $[\text{CI}]^3P_1-^3P_0$ Emission toward the IC136 Region", American Astronomical Society 204th meeting, Denver, CO (May 30 – June 3, 2004)
- [14] K. Tanaka, T. Oka, and S. Yamamoto, "Observation of the $[\text{CI}]^3P_1-^3P_0$ Emission toward the IC136 Region", American Astronomical Society 204th meeting Denver, USA (May, 2004).
- [15] Takeshi Sakai, Tomoharu Oka, and Satoshi Yamamoto, "Atomic Carbon in the W 3 Giant Molecular Cloud", The 6th East-Asian Meeting on Astronomy, Seoul, Korea, (Oct. 2004).

招待講演

- [16] Takeshi Sakai, Satoshi Yamamoto, and Mount Fuji Submillimeter-wave Telescope Group, “Mount Fuji [CI] survey”, The 6th East-Asian Meeting on Astronomy, Seoul, Korea, (Oct. 2004).

(国内会議)

一般講演

- [17] 岡 朋治、亀谷和久、林田将明、永井 誠、池田正史、久保井信行、田中邦彦、Leonard Bronfman、山本 智: 「可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡による [CI] 輝線銀河面サーベイ」、第 22 回 NRO ユーザーズミーティング (野辺山宇宙電波観測所、2004 年 7 月 27-29 日)
- [18] 久保井 信行、岡 朋治、山本 智、相川祐理: 「多輝線マッピング観測で探るふたご座 S252 領域の物理・化学状態」、日本天文学会 (岩手大学、2004 年 9 月)
- [19] 田中邦彦、岡朋治、山本智: 「 λ -Orionis 領域に対する [CI] $^3P_1 - ^3P_0$ 輝線の観測」、日本天文学会 (岩手大学、2004 年 9 月 21 日-23 日)
- [20] 永井 誠、岡 朋治、山本 智: 「山本研究室近況報告」、第 22 回 NRO ユーザーズミーティング (野辺山宇宙電波観測所、2004 年 7 月 27-29 日)
- [21] 永井 誠、富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ: 「2003 年度富士山頂サブミリ波望遠鏡による観測の現状」、第 22 回 NRO ユーザーズミーティング (野辺山宇宙電波観測所、2004 年 7 月 27-29 日)
- [22] 永井 誠、岡 朋治、山本 智: 「HEB ミクサ素子の受信機デュワーによる冷却実験」、日本天文学会 (岩手大学、2004 年 9 月 21-23 日)

招待講演

- [23] 山本 智: 「星間分子雲の化学組成とその進化」、AMO 研究会、東京、(2004 年 7 月)
- [24] 岡 朋治: 「超新星残骸と分子雲の相互作用」、宇宙線研究所共同利用研究会 (宇宙線研究所、2005 年 2 月 24 日)

(セミナー)

- [25] 山本 智: 「星間分子雲の化学組成とその進化」、コンボン研究所セミナー、(東京、2005 年 2 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 静電場とレーザー電場の併用による分子の配向制御

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。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で利用するためには、配向度をさらに増大させることが不可欠である。

昨年度は、この目的のために有効な静電場強度の増大を可能としつつ安定に動作する装置を新たに設計した。設計に際しては、イオンの電場中での飛行軌道に関する詳細なシミュレーションに基づいて、電極近傍の形状に特に注意を払った。

今年度は実際に装置を試作し、装置がほぼ設計どおりに動作することを確認した後、配向の増大の検証実験を行った。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 1.7×10^{12} W/cm² の条件で、既に原理実証実験で得られたよりも高い配向度を実現することに成功した。今回用いたレーザー光のピーク強度は光学素子のダメージ閾値によって制限され、原理実証実験時の約2/3程度であったが、逆に1桁以上高い静電場が有効に働くことを確認できた。今後、レーザーのピーク強度を 2.6×10^{12} W/cm² 程度まで上げることで配向度の更なる増大を図る。

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の制御

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年ほど前に酒井らによって実験研究が行われ、イオン化ポテンシャルのほぼ等しい姉妹原子 (N₂ 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不可欠であり、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光束を励起し、非断熱的に配列させる手法が有効である。

本研究室では、非断熱的に配列した分子を試料として使い、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。特に、高次高調波の信号だけでなく、同じ実験条件下で不可避免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が初めて可能となった。

これまでに得られている主要な結果は以下のとおりである。(1) 高次高調波の発生特性が、試料分子のHOMOの対称性を反映することを明らかにした。(2) 配列用レーザー光 (ポンプ光) と高次高調波発生用レーザー光 (プローブ光) の間の遅延時間の関数として観測したイオンと高調波の信号の時間発展を独自の手法により定式化することに成功した。(3) 特に顕著な成果として、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電子のド・ブロイ波間の量子干渉効果をCO₂分子中でのdestructive interferenceとして観測することに初めて成功した。すなわち、図6.7 aに示すように、イオン信号が大きい時、高調波信号が小さくなり、イオン信号が小さい時、高調波信号が大きくなった。このことは、CO₂分子中の2つのO原子近傍の価電子軌道からトンネルイオン化した電子が、再結合過程で電子のド・ブロイ波間のdestructive interferenceを起こしていると考えられることにより理解できる。ここでは、イオンと高調波の同時測定が本質的に有効であった。(4) 観測されたdestructive interferenceを、2原子分子に対して提案されたtwo point emittersのモデルを3原子分子に拡張することにより理論的に説明することに成功した。(5) さらに、今回採用したイオンと高調波の同時測定法を瞬間的な分子構造 (特に核間距離) の新しいプローブ法として利用できることを提案した。

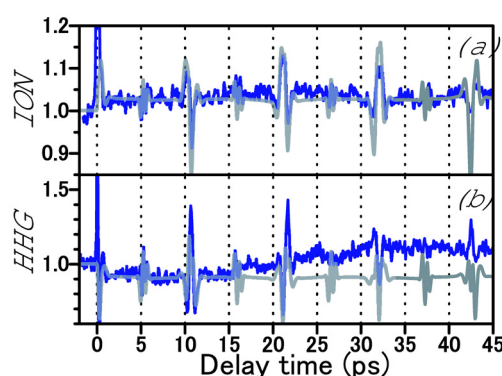


図 6.7 a: CO_2 分子を試料とし、ポンプ光とプローブ光の間の遅延時間の関数として測定した主に CO_2^+ からなる (a) イオン信号と (b) 23 次高調波信号。黒色が実験データ、灰色が理論計算の結果である。 CO_2 分子の回転周期は、42.7 ps である。

この研究 (Nature **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 欄で紹介された (Jonathan P. Marangos, “Molecular structure in an instant,” Nature **435**, 435 (2005))。

6.7.3 配列した分子から発生する高調波強度の楕円率依存性

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わり、ピーク強度付近で一瞬だけ直線偏光となるパルスを用いれば、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。偏光ゲート法が基礎とするのは、高次高調波強度の楕円率依存性であるが、媒質として分子試料を用いた場合、この依存性は分子軸と基本波用レーザー電場の主軸のなす角に依存すると予想される (図 6.7 b)。今回、非断熱的に配列した分子試料を用いることにより、分子軸と楕円偏光の主軸の向きが平行の時と垂直の時で高調波強度の楕円率

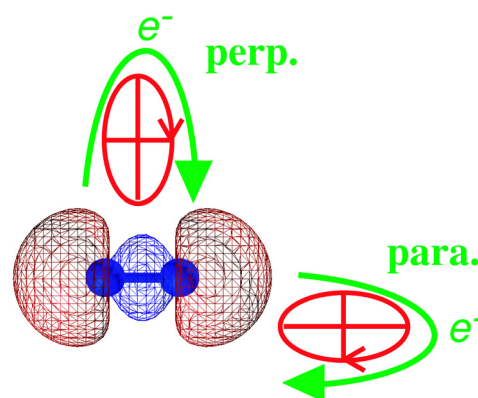


図 6.7 b: 分子軸と楕円偏光の主軸の向きの関係 (perp. と para.) により、高調波強度の楕円率依存性に違いが見られた。

依存性が異なることを世界で初めて明らかにした。

媒質として N_2 分子を用い、基本波用 Ti:sapphire レーザー光の楕円率を変えながら 19 次高調波の強度変化を測定した。分子軸と楕円偏光の主軸が垂直の場合 (図 6.7 b の perp.) よりも平行の場合 (図 6.7 b の para.) の方が、楕円率の増大に伴う高調波強度の減少の仕方が急速であることが分かった。観測された楕円率依存性の違いを説明するために、高次高調波の発生メカニズムを説明する 3 ステップモデルを分子に適用できるように拡張し、試料分子の分子軌道の対称性と空間的な広がり方が楕円率依存性に与える影響を考察した。

6.7.4 時間依存偏光パルスの発生と制御技術の高度化

近年、フェムト秒パルスの波形整形技術の進展が著しい。強度や位相だけでなく偏光状態が時間とともに変化するパルス (時間依存偏光パルス) も生成できるようになって来た。時間依存偏光パルスを分子内量子過程の最適制御に導入することにより、レーザー光の電場ベクトルとしての性質を最大限利用できるようになり、制御性の次元を上げることにより、従来と質的に異なる研究が可能となった。既に本研究室では、時間依存偏光パルスを配列した I_2 分子に照射することにより、多光子イオン化過程の最適制御に成功し、分子のトンネルイオン化に関する新たな知見と理論研究のきっかけが得られた。この研究 (Phys. Rev. Lett. **92**, 133005 (2004)) は、分子制御分野の注目すべき成果として、Nature の News & Views 欄で紹介された (Yaron Silberberg, “Quantum control with a twist,” Nature **430**, 624-625 (2004))。

しかし、従来の技術では、対象とする物理過程を最適制御するような偏光特性を持つパルスを生成することはできても、あらかじめ指定したとおりに偏光状態が時間変化するパルスを整形することは不可

能であり、ある物理過程に対する適切な偏光状態を理論的に予測できても、これを実現し、実証することはできなかった。そこで本研究室では、指定どおりの偏光状態をもつフェムト秒パルスを整形する技術の開発を進めている。

光の偏光は、直交する2つの偏光成分の強度比と位相差によって定義できる。すなわち、2つの偏光成分の強度や位相を独立に制御することにより、任意の偏光状態が実現できる。偏光状態の測定も同様に、2つの偏光成分の強度比と位相差を調べることにより可能である。本研究では、偏光状態の測定結果を直接フィードバックし、パルス整形器における変調量を最適化することにより偏光を制御する手法を採用した。

光源には Ti:sapphire レーザー増幅器の出力（中心波長 ~ 800 nm、パルス幅 ~ 50 fs）を使用し、最適化アルゴリズムとして遺伝的アルゴリズムを採用した。偏光状態の時間変化は、POLLIWOG と呼ばれる解析手法の結果をフィードバックして制御した。今回は、楕円偏光の楕円率 ϵ （楕円偏光の長軸に対する短軸の比）の時間変化率 $d\epsilon/dt$ を指標とした。昨年度は、 $d\epsilon/dt = 3.44 \times 10^{-3} \text{ fs}^{-1}$ となるパルスの最適制御に成功した。本年度は、この技術を高度化し、楕円率の時間変化率がより大きなパルスの整形を試みた。最大 $d\epsilon/dt = 1.72 \times 10^{-2} \text{ fs}^{-1}$ の時間変化率を持つパルスまで、そのピーク強度付近ではほぼ良好な時間依存偏光パルスの整形を実現できた。ただし、楕円率の時間変化率に大きな値を指定した時ほど、パルスの強度波形（パルス幅）が広がることが分かった。これは、パルス整形器の時間分解能と適応度の選び方に起因するものと考えられる。

6.7.5 2次元イオン画像観測の最適制御実験への適応化

本研究室では既に、時間依存偏光パルスを配列した I_2 分子に照射することにより、多光子イオン化過程の最適制御に成功した。この研究では、飛行時間（TOF: Time-Of-Flight）型イオン分析装置の観測結果、すなわち、TOF スペクトルをフィードバックに利用した。これまで、2次元イオン画像観測装置の観測結果をフィードバックに利用した例はなく、その実現により、最適制御実験の応用範囲が大きく広がると期待できる。

本年度は、最適制御実験に適用できるように、先に開発した2次元イオン画像観測システムを改造した。今回、Windows NT 系の OS 上で動作できるようにするとともに、LabVIEW で CCD カメラを制御できるようにした。OS の変更により、最新のパソコンを利用することができ、システムの高速化を実現するとともに、従来の OS 由来の不安定さを解消することができた。LabVIEW の採用により、システムのインターフェイスの構築が容易になった。さらに、C 言語で書いたコードを読み出すようにしたため、通常 LabVIEW で問題となる速度の低下を回避することもできた。新システムへの移行に伴うデータ処理速度の高速化の結果、レーザーパルスの繰り

返し周波数（現状では 10Hz ）に追従する2次元イオン画像の取り込みが可能になった。

また、2次元イオン画像の生データから、イオンの座標を抽出するアルゴリズムの改良も行った。画像中の輝点から座標を抜き出す際、2つのイオンが重なって観測された場合にも、正しく2点の座標を抜き出せるようにした。このことによりデータの取得ロスを減らし、単一ショットあたりのデータ量を増やすこともできた。

今後、改造したシステムを用い、非断熱的な分子配列の配列度の増大実験などを行う予定である。

6.7.6 非断熱的に配列した3原子分子の構造変形の観測

本研究室で精力的に進めている中性分子の配列・配向制御技術を用いて、時間依存偏光パルスによるイオン化のダイナミクスや、分子からの高次高調波発生など、分子の向きと偏光方向のなす角に依存する様々な現象が明らかになって来た。一方、高強度レーザー電場中で起こる現象として、多原子分子の構造変形も知られている。本年度、3原子分子の例として二酸化炭素 (CO_2) 分子を取り上げ、非断熱的に配列した分子試料を用いることにより、高強度レーザー電場中の構造変形の様子と偏光方向との相関を初めて明らかにした。

非断熱的な配列の度合 ($\cos^2 \theta$) を調べるため、まず、 CO_2^{2+} から生成する CO^+ フラグメントイオンの角度分布を測定した。 CO^+ イオンの角度分布は、(解離直前の) 分子の向きを反映していると考えられる。そのポンプ-プローブ間の遅延時間 (τ) 依存性から、 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ は中性 CO_2 分子の回転周期 (42.7 ps) の $1/4$ 周期ごとに大きく変調することが分かった。すなわち、 CO_2 分子はポンプ光によってはほとんど構造変形せず、直線状のまま回転波束が励起されていると考えられる。今回の実験で用いたポンプ光とプローブ光の強度は、それぞれ $7 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ および $8 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ であった。

また、分子軸が最もよくポンプ光の偏光方向に揃っているとき ($\tau = 20.9$ ps) に、 CO_2^{3+} から生成する C^+ フラグメントイオン（同時に2つの O^+ イオンを生成する）の分布を調べた。以下に述べるように、 C^+ の運動エネルギー分布から分子イオンの変形（ここでは屈曲）の様子が分かる。

図 6.7 c 右上に、解離直前の分子の a 軸と屈曲角 σ を示す。C 原子は分子の中心に位置するため、 C^+ イオンの運動エネルギーは分子の屈曲角 σ に依存する。特に、2つの O^+ イオンがほぼ同じ運動エネルギーを持って解離した時、 C^+ イオンは a 軸と垂直方向に放出される。すなわち、 a 軸と垂直方向に放出された C^+ イオンの運動エネルギーから屈曲角 σ を見積ることができる。図 6.7 c にポンプ光の偏光と垂直方向 (90 ± 15 度) に放出された C^+ イオンの運動エネルギー分布を示す。ポンプ光とプローブ光の偏光が平行なとき (a)、運動エネルギーは最大約 6 eV である。このことから σ は最大約 24 度と見積

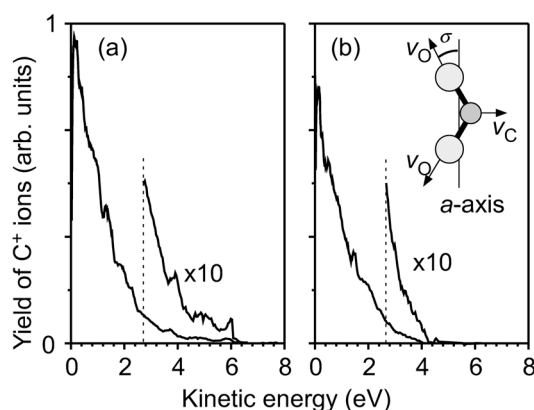


図 6.7 c: ポンプ光の偏光方向から垂直に放出される C^+ イオンの運動エネルギー分布。ポンプ光とプローブ光の間の遅延時間は 20.9 ps である。プローブ光の偏光はポンプ光と (a) 平行および (b) 垂直である。右上に分子の a 軸と屈曲角 σ を示す。

もらえる。一方、偏光が互いに直交する時 (b)、運動エネルギーの最大値は 4.3 eV 程度であり、 $\sigma = 16$ 度に相当する。この偏光と分子軸のなす角による屈曲角の違いは、高強度レーザー電場による励起状態ポテンシャルの変形の仕方や度合いが偏光と分子軸の向きによって大きく異なることを示すものである。

6.7.7 4 年生特別実験

夏学期

中空ファイバーとプリズム対を用いたフェムト秒パルスの圧縮実験の理論解析および最適な実験条件の探索に必要なシミュレーションコードの開発を行った。実験結果との比較検討も行い、有益な知見を得た。

分子の配列・配向制御の実験で使用する電子回路の製作を行った。具体的には、配列・配向用パルス Nd:YAG レーザーの動作を制御するためのパルス発生器、プローブ用 Ti:sapphire レーザーの繰り返し周波数 (1kHz) を必要な周波数に落とす減数カウンタ、および 2 次元イオン検出器用の高電圧分岐回路を製作した。いずれも正常に動作することを確認し、現在実験で使用中である。

冬学期

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、希ガス等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調べるためのシミュレーションコードの開発を行った。

本研究室の多くの実験で使用されているパルス分子線バルブのドライバーの改造を行い、必要な動作

特性が得られるようになった。同じく、多くの実験で使用される干渉計内の一方の反射ミラーの駆動等で必要となるステッピングモータードライバーのコントローラーの製作も行った。

その他

本年度は大学院生 1 名が加入する一方、修士 2 名が誕生した。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中島峻君、櫃本研太郎君 (以上夏学期)、大塚朋廣君、高橋智則君 (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] 鈴木隆行、「偏光状態が指定どおりに時間変化するフェムト秒パルスの発生」(共同研究者：峰本紳一郎、酒井広文)、第 9 回レーザー学会優秀論文発表賞、2004 年 5 月。
- [2] 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。
- [3] 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。
- [4] 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.

<報文>

(原著論文)

- [5] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, Tsuneto Kanai, and Hirofumi Sakai, "Optimal control of multiphoton ionization processes in aligned I_2 molecules with time-dependent polarization pulses," Phys. Rev. Lett. **92**, 133005 (2004).
- [6] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Nontrivial polarization shaping of femtosecond pulses by reference to the results of dual-channel spectral interferometry," Appl. Opt. **43**, 6047-6050 (2004).

- [7] 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).
- [8] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Quantum interference during high-order harmonic generation from aligned molecules," *Nature* **435**, 470–474 (2005).

(会議抄録)

- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).

(学位論文)

- [12] Haruka Tanji, "Three-dimensional orientation of neutral molecules with combined electrostatic and elliptically polarized laser fields," Master's thesis, January 2005.
- [13] 井上徹、「分子の orientation の増大を目指した新装置の開発とその検証」、修士論文、2005 年 1 月。

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [14] Hirofumi Sakai, "Manipulation of molecules and its applications to control experiments," *Physical Chemistry Colloquium*, Sendai, Japan, August 2004.
- [15] Hirofumi Sakai, "New directions in molecular control experiments using a sample of aligned molecules," *International Symposium on Atoms, Molecules, and Clusters in Intense Laser Fields 2*, Tokyo, Japan, January 2005.

- [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, "Title to be announced," *The International Conference on Multiphoton Processes (ICOMP) X*, Quebec, Canada, October 2005.
- [19] Hirofumi Sakai, "Title to be announced," *2005 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies*, Hawaii, U.S.A., December 2005.
- [20] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Quantum interference of electron de Broglie waves within a single molecule," *The First Asian Workshop on Generation and Applications of High-Order Harmonics*, Daejeon, The Republic of Korea, February 2005.
- [21] 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

- [22] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, Tsuneto Kanai, and Hirofumi Sakai, "Optimal control of multiphoton ionization of aligned I_2 molecules with time-dependent polarization pulses," *The 2004 Multiphoton Processes Gordon Research Conference*, New Hampshire, U.S.A., June 2004.
- [23] 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," *The 2004 Multiphoton Processes Gordon Research Conference*, New Hampshire, U.S.A., June 2004.
- [24] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Controlling the tunnel ionization of molecules by intense femtosecond laser pulses with time-dependent polarization," *The 2004 Multiphoton Processes Gordon Research Conference*, New Hampshire, U.S.A., June 2004.
- [25] Shinichirou Minemoto and Hirofumi Sakai, "Multiphoton ionization processes of Xe_2 : diatomic molecules exempted from enhanced ionization," *The 2004 Multiphoton Processes Gordon Research Conference*, New Hampshire, U.S.A., June 2004.
- [26] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, Tsuneto Kanai, and Hirofumi Sakai, "Control of multiphoton ionization of aligned I_2 molecules by op-

- timizing time-dependent polarization of femtosecond pulses,” The Fourteenth International Conference on Ultrafast Phenomena, Niigata, Japan, July 2004.
- [27] Yutaka Nomura, Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Efficient generation of high-order sum and difference frequencies in the XUV region by combining a weak, longer-wavelength field,” The Fourteenth International Conference on Ultrafast Phenomena, Niigata, Japan, July 2004.
- [28] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Control of tunnel ionization in molecules by intense femtosecond laser pulses with time-dependent polarization,” The Fourteenth International Conference on Ultrafast Phenomena, Niigata, Japan, July 2004.
- [29] 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.
- [30] 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.
- (国内会議)
- 一般講演
- [31] 峰本紳一郎、金井恒人、酒井広文、「高強度レーザー電場による三原子分子の非断熱的配向と構造変形」、2004 年秋季第 65 回応用物理学会学術講演会、東北学院大学、2004 年 9 月。
- [32] 金井恒人、峰本紳一郎、酒井広文、「分子からの高次高調波発生における再結合過程の役割」、2004 年秋季第 65 回応用物理学会学術講演会、東北学院大学、2004 年 9 月。
- [33] 鈴木隆行、峰本紳一郎、酒井広文、「2 偏光成分のスペクトル干渉を利用したフェムト秒時間依存偏光パルスの制御」、日本物理学会 2004 年秋季大会、青森大学、2004 年 9 月。
- [34] 峰本紳一郎、金井恒人、酒井広文、「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」、レーザー学会学術講演会第 25 回年次大会、けいはんなプラザ、2005 年 1 月。
- [35] 金井恒人、峰本紳一郎、酒井広文、「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」、レーザー学会学術講演会第 25 回年次大会、けいはんなプラザ、2005 年 1 月。
- [36] 金井恒人、峰本紳一郎、酒井広文、「配向した分子から発生する高調波強度の楕円率依存性」、レーザー学会学術講演会第 25 回年次大会、けいはんなプラザ、2005 年 1 月。
- [37] 金井恒人、峰本紳一郎、酒井広文、「配向した分子から発生する高調波強度の楕円率依存性」、2005 年春季第 52 回春季応用物理学関係連合講演会、埼玉大学、2005 年 3 月。
- [38] 井上徹、峰本紳一郎、深澤正裕、丹治はるか、酒井広文、「中性分子の orientatin の増大を目指した新装置の開発とその検証」、2005 年春季第 52 回応用物理学関係連合講演会、埼玉大学、2005 年 3 月。
- (その他)
- [39] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, Tsuneto Kanai, and Hirofumi Sakai, “Optimal control of multiphoton ionization processes in aligned I₂ molecules with time-dependent polarization pulses,” Virtual Journal of Ultrafast Science, **3**, No. 4 (2004).
- [40] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Nontrivial polarization shaping of femtosecond pulses by reference to the results of dual-channel spectral interferometry,” Virtual Journal of Ultrafast Science **4**, No. 2 (2005).
- [41] 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 16 年度報告書。

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。

平成 15 年度より文部科学省特定領域研究「水と生体分子」が始められており桑島が領域代表を務めている。この特定領域研究の目的は、「分子レベルの生命現象を第一原理より化学と物理学の立場から解き明かす」ことである。平成 17 年 3 月 17-18 日の二日間、東京 JR 品川駅近くにあるコクヨホールにて、第 2 回の特定領域研究公開ワークショップを開催した。国内外より約 270 名の参加者があり、大変盛会であった。また、平成 16 年 9 月 11 日には、東京お台場にある日本科学未来館で「水と生体分子」および「タンパク質一生」（代表：吉田賢右教授（東工大））の二つの特定領域の共同主催シンポジウムが開かれた。

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にするには、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デン・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の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、佐伯、槇、桑島)

α -ラクトアルブミンのフォールディング中間体（モルデン・グロビュール状態）は、天然状態ほど安定ではないが α ドメインが部分的に形成されている。しかし、フォールディングの遷移状態において α ドメインがさらに安定化されるのか否かは最近まで解っていなかった。佐伯らの Ca^{2+} 1 mM 存在下での Φ 値解析によれば、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 ドメイン間の境界を含む領域に局在化していることが示された [1]。しかしながら、 Ca^{2+} 存在下と Ca^{2+} 非存在下で遷移状態の構造が同様であるのかは解かっていない。 Ca^{2+} 結合部位は、遷移状態の構造化領域に含まれており α -ラクトアルブミンのフォールディングに重要な役割を果たす可能性がある。本研究では、 Ca^{2+} 非存在の条件下で、 Ca^{2+} 結合部位近傍および α ドメイン、 β ドメインの各部分に変異を導入した変異体を使用して Φ 値解析を行う予定である。現在、佐伯らの測定で Φ 値が比較的高く、 Ca^{2+} 結合部位の近くで C ヘリックス上にある V90A 変異をプローブとして用いている。実験は CD 装置を使用した平衡論的な転移曲線の測定と蛍光ストップフロー装置を使用した巻き戻り速度およびアンフォールディング速度の測定を行っている。 Ca^{2+} 非存在下でアンフォールディング転移を円二色性 (CD) スペクトルで測定したところ、V90A 変異体は野生型より安定化していることがわかった。

ヒト α -ラクトアルブミン変異体の安定性とフォールディング反応

(佐伯、鎌形、桑島)

ヒトとヤギの α -ラクトアルブミンの天然構造は実質上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両者で異なっている。ヒト α -ラクトアルブミンのフォールディング遷移状態の構造を調べ、既に知られているヤギの α -ラクトアルブミンの遷移状態構造と比較することを目的とする [1]。

そこで、ヒト α -ラクトアルブミンの様々な変異体を作製し、それらのフォールディング挙動を調べる。どの変異体も大腸菌中で封入体として大量発現した。野生型と 3 種類の変異体 (L26W、M90A、W118F) は封入体から巻き戻して、天然状態の蛋白質を精製することができたが、I55V、D87N、I95V は、封入体から天然状態へ巻き戻らなかった。S9F は少量しか天然状態に巻き戻らず、測定に十分な量は得られなかった。M90A と W118F は安定性、フォールディング速度、アンフォールディング速度のいずれも野生型と差が見られなかった。

L26W は野生型よりも安定化してアンフォールディング速度が遅くなったが、フォールディング速度には野生型との差が見られなかった。これらの結果か

ら遷移状態では Leu26 付近の構造はできていないことがわかった。Leu26 は α -ラクトアルブミンの α -ドメインの疎水性コアにあるので、この結果は、ヤギの α -ラクトアルブミンの遷移状態では疎水性コアの構造はできていないとする以前の結果と矛盾しない。

イヌ・ミルク・リゾチームのアンフォールディング反応の測定

(中尾、榎、桑島：新井博士（産総研）、小柴博士（カリフォルニア工科大）、新田教授（北大）との共同研究）

イヌ・ミルク・リゾチームについて、塩酸グアニジンを変性剤として用いたアンフォールディング反応の測定を、220 nm の遠紫外 CD で行った。

ストップ・フロー装置を用いて塩酸グアニジン濃度を 0 M から 7.66 M へと変化させてアンフォールディング反応を開始すると、装置の不感時間 (15 ms) 以内におよそ 20% のシグナル変化が起こった後、1 つの指数関数でフィッティングできる過程が観測されて、その速度定数、 $k = 1.06 \pm 0.09 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ を得ることができた [6]。

イヌ・ミルク・リゾチームフォールディング反応のカルシウムイオン濃度依存性の解析

(仲谷、中尾、榎、佐伯、桑島：相沢博士（北大）、出村助教授（北大）、新田教授（北大）との共同研究）

イヌ・ミルク・リゾチームの大腸菌およびメタノール資化性酵母による発現系の構築および精製法の確立に取り組んだ。昨年度まで採用していた大腸菌による発現系では、発現系からタンパク質を分離した後、巻き戻しとジスルフィド架橋形成の後精製の必要があったため、8L の培地から十数ミリグラム程度のタンパク質を得るのが限界であった [6]。今年度採用したメタノール資化性酵母では培養中に細胞内でジスルフィド結合を形成し、また生成したタンパク質を細胞外液中に分泌させることが可能であるために精製が容易である。そのため、収量は 2 L 程度の培地で数百ミリグラム程度に達し、従来は困難であった大量の試料を用いる実験が可能になった。この利点を活かしてフォールディングの開始部位に関する情報を得ることを目的としたフォールディング反応のカルシウム濃度依存性の実験を行っている。

イヌ・ミルク・リゾチームの高圧 NMR 測定

(仲谷、桑島：前野氏（近畿大）、赤坂教授（近畿大）との共同研究）

高圧 NMR の測定に先立ち、まず 30-4000 気圧で温度、pH を変化させたときの蛍光の波長および強度変化を観察することにより、圧力のみを変化させることで天然状態、モルテン・グロビュール状態、ほどけた状態の 3 つの状態間の遷移を可能にする条件

を探索している。また、高圧 NMR 用の試料として ^{15}N ラベルをしたタンパク質が必要であり、これを得るために大腸菌、メタノール資化性酵母での標識タンパク質の発現にも取り組んでいる。

イヌ・ミルク・リゾチームの変異体の作成とフォールディング反応

(仲谷、佐伯、榎、桑島：相沢博士（北大）、出村助教授（北大）、新田教授（北大）との共同研究）

イヌ・ミルク・リゾチームのフォールディング遷移状態における構造をタンパク質工学的に解析するためにメタノール資化性酵母を用いて 16 種類の変異体を作成中である。現在、変異体のプラスミドについては 16 種類すべて得ることができ、うち 8 種類の変異体についてはメタノール資化性酵母への導入も完了し、大量培養の段階にある。今後は変異体の安定性、フォールディング反応を測定し、いわゆる Φ 値解析や変異体の構造解析を行う予定である。また、大腸菌系で得られたタンパク質の N 末端にメチオン残基が付加した変異体についても、その効果を野生型とのフォールディング・アンフォールディング速度の測定により解析していく予定である。

天然条件下での水素/重水素交換反応及び NMR を用いたスタフィロコッカス・ヌクレアーゼ変異体の中間体の特徴付け

(榎、桑島、遠藤 (4 年生特別実験))

スタフィロコッカス・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り、立体構造・安定性・フォールディング等の物理化学的性質についてよく調べられている。SNase はフォールディング反応において、幾つかの並行な経路を経て天然状態に至り、更にそれらの経路上でフォールディング中間体が蓄積することが知られている。これらの研究においては、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 が重要な役割を果たしてきた。

我々は、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、天然条件下での水素/重水素交換法及び核磁気共鳴 (NMR) 法を用いて研究している。まず、無プロリン SNase の NMR シグナルを帰属するために、安定同位体 ^{15}N 及び ^{13}C 、 ^{15}N でラベルした蛋白質を調製し、NMR スペクトルを測定した。HSQC, HNCACB, CBCA(CO)NH スペクトルを pH* 7.0, 25°C で測定し、連鎖帰属によっておよそ 70% の残基について主鎖の ^{15}N , $^1\text{H}^{\text{N}}$, $^{13}\text{C}\alpha$ 及び $^{13}\text{C}\beta$ の共鳴を帰属することが出来た。

野生型と無プロリン変異体とで NMR スペクトルに殆ど差はなく、プロリン残基への置換による天然構造への影響は無視できる程度に小さいことが示唆された。また、無プロリン変異体では変異によって

導入されたアミノ酸からのシグナルが観測された。

次に無プロリン SNase の安定性を残基レベルで明らかにするために、天然条件下 (pH* 5.1, 25°C, 尿素濃度 = 0~1.0 M) で水素/重水素交換を行い、帰属された各々の残基について反応を NMR によって追跡した。水素/重水素交換反応の速度から、各々の残基の安定性及びアンフォールディング転移の協同性を評価した。残基ごとの安定性及び協同性を二次構造要素ごとにまとめることによって、 β -ストランド II, III 及び V が、 β -ストランド I, IV 及び α -ヘリックス I, II よりも安定であることが示唆された。

緑色蛍光蛋白質変異体 (Cycle3) の酸変性中間体の特徴付け

(榎、佐伯、榎、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。われわれは、GFP の酸変性と巻き戻りのメカニズムについて、発色団の蛍光、トリプトファンの蛍光、遠紫外 CD をプローブとして調べ、少なくとも 2 つのフォールディング中間体、(非特異的な凝縮状態、モルテングロビュール様状態)、があることを明らかにしてきた [2]。新たに、GFP の酸変性による転移を蛋白質全体の構造を反映する X 線小角散乱を用いて調べ、蛍光の結果と合わせて、酸変性状態の特徴付けを行った。その結果、発色団の蛍光が天然状態の半分になっている pH 5 において、分子全体の構造は天然状態とほぼ同じであった。また、pH 4 では、発色団の蛍光が完全になくなるが、GFP は依然として、球状の性質を保っていた。この結果は、発色団の蛍光を持たないが球状の性質を持つ中間体が少なくとも 1 つあ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な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-GroES 複合体の X 線小角散乱による研究

(伊野部、高橋、榎、鎌形、榎、桑島)

生体内で GroEL はコシャペロニン GroES と複合体を形成することにより、蛋白質の効率的なフォールディングを介助する。我々は GroEL-GroES 相互作用の分子メカニズムを明らかにするために、「GroEL 1 個に対して GroES は何個結合するのか？」という問題について研究を行った。

以前の我々の研究では GroEL に結合する GroES の個数を求めるために、さまざまなヌクレオチド (ATP, ADP, ATP γ S, ATP+BeF₃) 存在下での慣性半径と見かけの分子量、分子の最大長を GroEL と GroES のモル比を変えながら X 線小角散乱 (SAXS) 測定により求めた。その結果、ATP と BeF₃ が存在するときには 2 個の GroES が GroEL に結合するものの、ADP や ATP, ATP γ S 存在下では 1 個の GroES しか結合しないことがわかった。この結果はほかの研究グループによって、電子顕微鏡法や化学架橋法により報告された結果と異なっているが、それらが得られた実験条件は生理的環境とは異なっており、我々が用いている溶液環境で測定する SAXS の方が生体内に近い条件での状態を測定しているといえる。

実際の生体内には GroEL の標的蛋白質が存在し、GroEL/ES は標的蛋白質を巻き戻す反応サイクルを起こしている。そこで、生理的条件を再現するために、我々は標的蛋白質であるジスルフィド結合の還元された α -ラクトアルブミンと上と同様のさまざまなヌクレオチドが存在する条件下で SAXS 測定を行った。その結果、標的蛋白質の存在しない場合と同じ結果が得られた。

以上の結果は ATP 加水分解中に 2 個の GroES が過渡的に GroEL に結合する可能性はあるものの、細胞内において、ほとんどの GroEL には 1 個の GroES しか結合しないことを示している。

GroEL の単ーリング変異体 (SR1) のヌクレオチドによる構造転移の速度論的解析

(高橋、伊野部)

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。我々はその詳細な分子メカニズムを明らかにすることを目的として研究を行っている。GroEL は分子量 57 K のサブユニットが 7 つ環状に並んだリングが背中合わせに 2 つ積み重なった 14 量体の二重リング構造をしていて、1 つのリング内での相互作用、さらには 2 つのリング間での相互作用が存在し、複雑な系となっている。そこで、まず 1 つのリング内での挙動を明らかにするために、より簡略化された系である、単ーリングだけからなる GroEL の変異体 (SR1) の構造転移をストップフロー蛍光スペクト

ルを用いて研究している。

GroEL/ES 内部における緑色蛍光蛋白質変異体 (Cycle3) の酸変性中間体の特徴付け

(榎、吉見 (4 年生特別実験)、桑島)

GroEL/ES は生体内で、変性蛋白質を内部に閉じ込めて ATP 依存的に蛋白質の構造形成を介助することがわかっている。GroEL/ES の閉じ込められた空間中での緑色蛍光蛋白質変異体 (Cycle3) の構造形成過程を観測し、GroEL/ES がより効率的な蛋白質の構造形成介助のために、巻き戻りのエネルギー地形を変えうるかどうか検証した。速度論的な解析の結果、少なくとも構造形成後期の過程には、影響を与えないことが明らかとなった。

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、円二色性、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。

蛋白質のサブ構造の配置とフォールディング速度の相関関係の解析

(鎌形、桑島)

どのような構造パラメータが蛋白質のフォールディング速度を決めているのかということを明らかにすることは、フォールディング機構を解明する上で、重要である。昨年度、我々は、球状蛋白質のフォールディング速度といくつかの構造パラメータの関係を統計的に調べた。その結果、非 2 状態蛋白質の中間体形成速度と天然状態形成速度の両方とも、蛋白質

の長さや主鎖トポロジーと強い相関があることを報告した [1]。

今年度は、天然構造内のサブ構造 (主に、2 次構造) の配置が非 2 状態蛋白質のフォールディング速度にどのくらい影響を与えるかを調べた。そのために、天然構造のコンタクト・マップを作成し、一次配列上遠距離のサブ構造間のコンタクト・クラスター (コンタクト・マップ上で、コンタクトしている部位の集合体) の数 N_C とそのクラスター内のコンタクト数の (蛋白質内の) 平均値 n_{ave} を計算した。この 2 つのパラメータとフォールディング速度との関係を調べた結果、非 2 状態蛋白質の中間体形成速度と天然状態形成速度の両方とも、 N_C と強い相関があることが分かった。一方、どちらの形成速度も、 n_{ave} との有意な相関関係を示さなかった。この結果は、サブ構造間の接触部位の大きさよりもむしろ、天然構造上のサブ構造の配置が、非 2 状態蛋白質のフォールディング速度を決めていることを示唆している。

速度論的実験と MD シミュレーションの併用による、 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

(笠口、佐伯、桑島：池口助教授 (横浜市大)、木寺教授 (横浜市大) との共同研究)

昨年度、 α -ラクトアルブミンの真正体と組換え体について、398 K と 498 K の二つの高温での 10 本各 5 ns の MD シミュレーションを行った。今年度はこれらのトラジェクトリーの解析をさらに進めた。

398 K における計算では、変性過程の遷移状態を超えることはできなかったが、組換え体が真正体と比べ変性速度が速くなるという実験結果を再現することができた。トラジェクトリーの原子レベルでの解析から、組換え体の不安定性は付加されたメチオニンが N 末構造内の相互作用を弱めていたためであることが分かった。また、N 末構造は常温における天然状態の揺らぎの過半を占めるヒンジ運動のヒンジ部位にあたり、N 末構造の崩壊はこの運動の大きさを増大させることにより、 α -ラクトアルブミンの変性を引き起こしていた。したがって、N 末構造の安定性差異は変性速度の差異に顕れると結論される。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] K. Kamagata, M. Arai & K. Kuwajima: Unification of the folding mechanisms of non-two-state and two-state proteins. *J. Mol. Biol.* (2004) **339** 951-965.
- [2] K. Saeki, M. Arai, T. Yoda, M. Nakao & K. Kuwajima: Localized nature of the transition-state structure in goat α -lactalbumin folding. *J. Mol. Biol.* (2004) **341** 589-604.
- [3] S. Enoki, K. Saeki, K. Maki & K. Kuwajima: Acid denaturation and refolding of green fluorescent protein. *Biochemistry* (2004) **43** 14238-14248.

- [4] M.W. Akhtar, V. Srinivas, B. Raman, T. Ramakrishna, T. Inobe, K. Maki, M. Arai, K. Kuwajima & C. Rao: Oligomeric Hsp33 with enhanced chaperone activity: gel filtration, cross-linking, and small angle X-ray scattering (SAXS) analysis. *J. Biol. Chem.* (2004) **279** 55760-55769.
- [5] M. Miki, H. Hai, K. Saeki, Y. Shitaka, K. Sano, Y. Maeda, & T. Wakabayashi: Fluorescence resonance energy transfer between points on actin and the C-terminal region of tropomyosin in skeletal muscle thin filaments. *J. Biochem.* (2004) **136** 39-47.
- [6] M. Nakao, K. Maki, M. Arai, T. Koshihara, K. Nitta & K. Kuwajima: Characterization of kinetic folding intermediates of recombinant canine milk lysozyme by stopped-flow circular dichroism. *Biochemistry* (2005) **44** 6685-6692.
- [7] 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 β -lactoglobulin in the cold denatured state. *J. Mol. Biol.* (2005) in press.

(国内雑誌)

- [8] 桑島邦博：水と生体分子の物理化学の新展開（[新連載] 水と生体分子が織りなす生命現象（1））、現代化学（2005）1月号（No.406）45-50.
- [9] 池口満徳・桑島邦博：フォールディング実験とその分子動力学による再現（[新連載] 水と生体分子が織りなす生命現象（2））、現代化学（2005）2月号（No.407）49-54.

(学位論文)

- [10] 鎌形清人：Statistical analysis of the relationship between the folding rate and structure-based parameters of globular proteins.（博士論文）

(著書)

- [11] H. Roder, K. Maki, R.F. Latypov, H. Cheng, & M.C.R. Shastri: Early events in protein folding explored by rapid mixing methods. In *Protein Folding Handbook Volume 1*, eds. J. Buchner & T. Kiefhaber (WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim) (2005) pp. 491-535.
- [12] K. Maki, K. Kamagata & K. Kuwajima: Equilibrium and kinetically observed molten globule state. In *Protein Folding Handbook Volume 2*, eds. J. Buchner & T. Kiefhaber (WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim) (2005) pp. 856-883.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [13] K. Saeki, M. Arai, T. Yoda, M. Nakao, & K. Kuwajima: Localized nature of the transition-state structure in goat α -lactalbumin folding. *The 1st Pacific-Rim International Conference on Protein Science* (Yokohama, Japan, April 14-18, 2004) (Poster).
- [14] T. Inobe, & K. Kuwajima: Φ value analysis of an allosteric transition of GroEL based on a single-pathway model. *The 1st Pacific-Rim International Conference on Protein Science* (Yokohama, Japan, April 14-18, 2004) (Poster).
- [15] K. Kamagata, M. Arai, & K. Kuwajima: What determines the folding rates of non-two-state and two-state proteins? *The 1st Pacific-Rim International Conference on Protein Science* (Yokohama, Japan, April 2004) (Poster).
- [16] T. Oroguchi, M. Ikeguchi, K. Saeki, A. Kidera, & K. Kuwajima: Experimental and simulation studies of the unfolding of recombinant and authentic α -lactalbumin: Effect of an N-terminal methionine residue, *The 1st Pacific-Rim International Conference on Protein Science* (Yokohama, Japan, April 2004) (Poster).
- [17] Y. Yamada, T. Yajima, K. Fujiwara, M. Arai, K. Ito, K. Nakagawa, A. Shimizu, H. Kihara, K. Kuwajima, Y. Amemiya, & M. Ikeguchi: Cold denaturation of equine β -lactoglobulin. *The 1st Pacific-Rim International Conference on Protein Science* (Yokohama, Japan, April 14-18, 2004) (Poster).
- [18] R. Iizuka, T. Yoshida, T. Inobe, K. Kuwajima, & M. Yohda: The mechanism of ATP-driven conformational change of the helical protrusion region of the archaeal group II chaperonin. *The 1st Pacific-Rim International Conference on Protein Science* (Yokohama, Japan, April 14-18, 2004) (Poster).
- [19] T. Inobe, & K. Kuwajima: Φ value analysis of an allosteric transition of GroEL based on a single-pathway model. *Molecular Chaperone & the Heat Shock Response* (Cold Spring Harbor Laboratory, New York, USA, May 5-9, 2004) (Poster).

招待講演

- [20] K. Kuwajima: The molecular chaperone function of the *Escherichia coli* chaperonin GroEL. *The 1st Pacific-Rim International Conference on Protein Science* (Yokohama, Japan, April 14-18, 2004).

(国内会議)

一般講演

- [21] 佐伯喜美子、新井宗仁、桑島邦博：変異蛋白質の安定性とフォールディング反応、第21回技術シンポジウム（東京大学大学院理学系研究科、2004年9月3日）
- [22] 佐伯喜美子、鎌形清人、桑島邦博：ヒト α -ラクトアルブミンの遷移状態の構造、日本生物物理学会第42回年会（国立京都国際会館、2004年12月13日-15日）

- [23] 中尾正治、榎互介、桑島邦博: イヌ・ミルク・リゾチームのフォールディングの解析、日本生物物理学会第42回年会(国立京都国際会館、2004年12月13日-12月15日)
- [24] 榎佐和子、佐伯喜美子、榎互介、伊野部智由、桑島邦博: 緑色蛍光蛋白質 GFP の酸変性と巻き戻り、日本生物物理学会第42回年会(国立京都国際会館、2004年12月13-15日)
- [25] 笠口友隆、池口満徳、佐伯喜美子、木寺詔紀、桑島邦博: 真正体および組換え体 α -ラクトアルブミンのアンフォールディング解析: N末端メチオニン残基の影響、日本生物物理学会第42回年会(国立京都国際会館、2004年12月13日-15日)
- [26] 飯塚怜、吉田尊雄、座古保、伊野部智由、桑島邦博、養王田正文: グループ II 型シャペロニンにおける Helical protrusion の役割、日本生物物理学会第42回年会(国立京都国際会館、2004年12月13日-15日)
- [27] 佐伯喜美子、鎌形清人、桑島邦博: ストップフロー法を用いたフォールディング反応の解析、第16回生物学技術研究会(岡崎コンファレンスセンター、2005年2月17日-18日)
- [28] K. Saeki, K. Kamagata, & K. Kuwajima: Structure of the transition state of folding of human α -lactalbumin. 特定領域研究「水と生体分子」第2回公開ワークショップ(東京、コクヨホール、2005年3月17-18日)
- [29] 榎互介、遠藤峻彦、桑島邦博: Backbone ^1H , ^{13}C and ^{15}N Resonance Assignments of a proline-free Variant of Staphylococcal Nuclease and the Application to Native State Hydrogen Exchange. 特定領域研究「水と生体分子」第2回公開ワークショップ(東京、コクヨホール、2005年3月17-18日)
- [30] T. Inobe, K. Takahashi, K. Maki, K. Kamagata, S. Enoki, & K. Kuwajima: GroEL-GroES complex studied by small-angle X-ray scattering. 特定領域研究「水と生体分子」第2回公開ワークショップ(東京、コクヨホール、2005年3月17-18日)
- [31] K. Kamagata, & K. Kuwajima: Relationship between the substructure arrangement and the folding rate of non-two-state proteins. 特定領域研究「水と生体分子」第2回公開ワークショップ(東京、コクヨホール、2005年3月17-18日)
- [32] T. Oroguchi, M. Ikeguchi, K. Saeki, K. Kamagata, A. Kidera, & K. Kuwajima: Molecular dynamics simulation can reproduce the acceleration of unfolding caused by the presence of an N-terminal methionine in recombinant α -lactalbumin, 特定領域研究「水と生体分子」第2回公開ワークショップ(東京、コクヨホール、2005年3月17日-18日)
- 招待講演
- [33] 桑島邦博: 緑色蛍光蛋白質 (GFP) のフォールディング機構、特定領域研究「水と生体分子」特定領域研究「タンパク質の一生」共同主催公開シンポジウム(東京、日本科学未来館、2004年9月11日)
- [34] 桑島邦博: 球状蛋白質フォールディングの分子機構、第27回溶液化学シンポジウム(東京電機大学鳩山キャンパス、2004年11月19-21日)
- [35] 桑島邦博: 蛋白質フォールディングの分子機械シャペロニンの作用機構、学振169委員会研究会(回折構造生物)(東京都、主婦会館プラザエフ、2004年12月2日)
- [36] 桑島邦博: 蛋白質のフォールディング機構、日本生物物理学会第42回年会シンポジウム「蛋白質と水の生物物理学」(国立京都国際会館、2004年12月13日)
- [37] 桑島邦博: 蛋白質フォールディングの分子機械シャペロニンの作用機構、分子研研究会(物理化学から生命科学を展望する~分子組織体から細胞へ~)(岡崎コンファレンスセンター、2004年12月20日)
- [38] 鎌形清人: 球状蛋白質の構造とフォールディング速度との関係、理学系研究科21世紀COEプログラム合同シンポジウム(小柴ホール落成記念)(東京大学・理学部・小柴ホール、2005年3月7-8日)
- [39] 桑島邦博: α -ラクトアルブミン: 私たちのフォールディング研究におけるお気に入り蛋白質、札幌タンパク質科学シンポジウム(札幌、北大学術交流会館、2005年3月22日)
- (セミナー)
- [40] 桑島邦博: 蛋白質フォールディングの分子機構、京都大学・大学院理学研究科・化学専攻セミナー(京都大学、2004年5月27日)
- [41] K. Kuwajima: Protein folding. *The 3rd KIAS Protein Folding Summer School* (The Korea Institute for the Advanced Studies (KIAS), Seoul, Korea, August 9-13, 2004).
- [42] K. Kuwajima: Unification of the folding mechanisms of non-two-state and two-state proteins. *The 3rd KIAS Protein Folding Summer School* (The Korea Institute for the Advanced Studies (KIAS), Seoul, Korea, August 9-13, 2004).
- [43] 桑島邦博: 蛋白質フォールディングの分子機構、三菱化学生命研セミナー(東京都町田市三菱化学生命研、2004年11月19日)
- [44] 桑島邦博: 蛋白質のフォールディングと分子シャペロン、富山医科薬科大学セミナー(富山、2005年1月6日)

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1000億もの神経細胞が存在し、それぞれが平均1000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実際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の機能解析

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たのだろうか。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。今年度は昨年度に引き続き、DNA チップによる新たな機能分子の探索を行った。

単一細胞ジーンチップ解析を用いた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、一つの標的細胞に的を絞り、そこで働く神経標的認識分子の網羅的同定を試みた。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、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二つの筋肉、筋肉 12 及び筋肉 13 で発現量が2倍以上異なる遺伝子を、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、膜貫通型または分泌タンパク質に焦点をあて、機能解析を行った。機能解析は Gal4-UAS 系を用いた異所発現実験により行った。筋肉 12 の候補分子については4つ、筋肉 13 については7つの遺伝子について完全長 cDNA を用いて UAS コンストラクトをつくり、形質転換体を作製した。それを筋

肉全体で発現する 24B-Gal4 と掛け合わせし、筋肉全体で強制発現させた時の表現型を観察した。筋肉 12 の候補分子については表現型の見られたものはなかったが、筋肉 13 の候補分子では4つについて、その異所発現により筋肉 12 にシナプスをつくる神経軸索が筋肉 13 にも異所的に異所的にシナプスを形成するという標的認識異常の表現型がみられた。以上の結果から、通常筋肉 13 で発現している、少なくとも4つの分子が、筋肉 12 に投射する神経に反発的に働く可能性が示された。

標的認識過程における細胞の形態変化の in vivo 可視化（高坂洋史、能瀬聡直）

神経細胞の成長円錐は、いくつかの細胞の中から標的認識分子を発現している細胞（標的細胞）を認識してシナプス形成を始める。近年、シナプス形成初期において、標的細胞が突起を伸縮させていることがいくつかの系で報告されている。標的細胞の突起は、神経細胞軸索との接触によってシナプス形成に関わっていると考えられているが、その機能は明らかではない。突起が単に標的細胞の表面積を大きくするためだけにあるのならば、標的認識分子が標的細胞上に一様に分布することで標的認識の効率は良くなると考えられる。ところが我々は以前、ショウジョウバエの神経筋結合系において、標的細胞の出す突起（マイオボディア）の先端に標的認識分子カプリシャスが局在することを発見した。この現象は、マイオボディアが表面積を大きくする以外の役割を担っていることを示唆する。

従来、ショウジョウバエ胚の標的選択過程の解析は、染色した解剖胚で行われてきた。この方法では、成長円錐とマイオボディアが染色によって区別できるものの、in vivo での挙動を経時的に解析することができない。我々はショウジョウバエの遺伝学と共焦点レーザー顕微鏡を用いて、in vivo での標的選択過程の可視化に成功した。この可視化により、2時間にわたる標的選択過程の形態変化を同一個体で経時的に観察できるようになった。運動神経細胞と筋肉細胞（M12）に膜局在型蛍光タンパク質（gapGFP）を発現させ、その挙動を解析したところ、マイオボディアの先端が実際に成長円錐と接触することが観察された。マイオボディアの先端と成長円錐との接触に関して、43%は安定化してシナプス形成まで維持されるが、残りの57%は離れてしまう。この現象は、マイオボディアの先端と成長円錐との間に何らかの相互作用が起こっていて、シナプスを作る相手かどうかの識別をしていることを示唆する。標的選択過程において筋肉細胞 M12 の近傍には、M12 にシナプスを作る運動神経細胞 RP5 の軸索末端と、M12 にシナプスを作らない運動神経細胞 RP1 の軸索末端が存在する。M12 のマイオボディアは、RP5 のみならず RP1 の軸索末端にも接触する。M12 のマイオボディアと RP1 の成長円錐との「不適合な」接触は、イメージングを行なった時間内では91%が離れた。このことは、マイオボディアの先端が成長円錐を見分けていることを示唆する。in vivo イメージングの

解析から、マイオポディアが成長円錐の単なる標的として振舞うのではなく、マイオポディア自体が成長円錐と動的な接触を行なっていることが明らかになった。以上のことから、標的認識過程において、成長円錐のみならず標的細胞の出す突起も積極的にシナプスを作るパートナーとなる細胞を探索しているという双方向的な仕組みがあると示唆される。

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指している。

シナプス形成過程における接着分子ファシクリン II の局在解析 (高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直)

シナプス部は、前膜と後膜に発現する種々の細胞接着分子によって、接着構造が保たれていると考えられている。我々はこれまでに、ショウジョウバエ神経筋結合シナプスで安定性を担っている細胞接着分子ファシクリン II の可視化を行なってきた。シナプス後膜 (筋肉細胞) 側に、ファシクリン II と蛍光タンパク質との融合タンパク質 (FasII-XFP) を発現させ、それがシナプス部に局在することを観察した。またこの局在には、成長円錐との相互作用が必要であることを示した。そこで今年度は、様々な既存の変異体を用いて、FasII の後シナプス部への局在を担っている因子の探索を行なった。調べた限りでは、FasII-XFP の後シナプス部局在が全くなくなる変異体は見つからなかった。ファシクリン II、及び分泌に関与しているタンパク質シンタキシンの欠失変異体では、部分的に FasII-XFP の局在が減少した。このことは、シナプス前細胞の接着分子と分泌が、共に後シナプス部の接着分子の局在に関与していることを示唆する。また、成熟したシナプスで FasII のシナプス部局在を担っている裏打ちタンパク質 Dlg の変異体において、FasII-XFP の局在は正常だった。このことは、シナプスを作る機構と、成熟したシナプス構造を維持する機構との間に異なるしくみがあることを示唆する。

シナプス形成過程における裏打ちタンパク質 Dlg の in vivo 可視化 (高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直)

シナプス後膜部には、細胞接着分子や伝達物質受容体などが局在している。この局在の維持には、PDZ タンパク質群を含む種々の裏打ちタンパク質が重要であると考えられている。裏打ちタンパク質のシナプス部への局在メカニズムの解明は、シナプス形成過程を理解する上で重要な課題であり、様々な細胞を用いて研究されている。我々は、ショウジョウバエの神経筋結合系で、裏打ちタンパク質としてシナプス構造を支えている PDZ タンパク質の一つ、Dlg の可視化を行なった。Dlg と蛍光タンパク質 YFP との融合タンパク質 (Dlg-YFP) を筋肉細胞に発現する系を確立し、共焦点レーザー顕微鏡を用いて観察した。産卵後 13 時間において、筋肉細胞 M12 はマイオポディアというアクチン性の突起を伸縮させるが、Dlg-YFP はこのマイオポディア上を一様に分布した。シナプス形成期の産卵後 15 時間になると、Dlg-YFP はシナプス部に集積した。これらの結果は、我々の確立した系が、シナプス形成期の PDZ タンパク質の局在を解析するのに有用であることを示している。現在、様々な変異体を用いて、Dlg の後シナプス部への局在メカニズムの解析を進めている。

シナプス形成機構の解析: 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。本年度は、CaMKII の下流に位置し、この逆行的調節を仲介する因子の探索に取り組んだいくつかの候補分子の発現を免疫組織学的手法により調べたところ、ポスト内の CaMKII 活性を上げることによって、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 Fasciclin II (FasII) の局在様式が変化することを見いだした。従って、これ

らの分子は CaMKII の下流において、逆行性シグナル伝達に関与している可能性がある。そこで、これらシナプス構成タンパク質をコードする遺伝子を機能喪失させた上で、なお CaMKII 活性化による逆行的調節作用が残存するかどうかを調べた。DLG 及び FasII 機能喪失バックグラウンドでは、ポストの CaMKII 活性化によってプレの形態が調節される現象は消失していた。電気生理学的実験結果も、それを裏付けるものであった。従って、ポストの CaMKII 活性化によるプレの逆行的調節には、DLG と FasII が必要な因子であることが示唆された。逆行性因子として機能し得る分子には、膜透過分子、分泌性分子、及び膜結合分子の三種類があるが、FasII はこのうち膜結合型に分類される因子の一つである。

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、4 年生特別実験（吉見愛）、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、主要なもうひとつのサブユニット GluRIIB が GluRIIA とは逆の方向に局在が制御されることを明らかにした。すなわち、活性化型 CaMKII を筋肉細胞に発現させると GluRIIB のシナプス部への局在が増加し、阻害ペプチド Ala を発現させたときは変化が見られなかった。このことから、GluR はサブユニット特異的に CaMKII によって調節を受けることが明らかになった。GluRIIA は IIB と比較してカルシウムイオンを通しやすいと、アミノ酸配列から推測されている。このことから、GluRIIA を介したカルシウム流入により活性化された CaMKII が、カルシウム流入量を一定に保つようにセンサーとして働き、GluRIIA の局在を調節するのではないかという仮説が考えられた。さらにその詳細な機構について検討している。

シナプス形成過程におけるカルシウムシグナルの可視化（風間北斗、谷藤（森本）高子、能瀬聡直）

種々の組織が機能するとき、細胞内ではカルシウム濃度の変動が見られる。すなわち、定常状態では細胞内カルシウム濃度は nM のオーダーに低く保たれているが、細胞内カルシウム濃度が μ M レベルへと上昇することが引き金となって、様々な生体の反

応が引き起こされる。シナプス形成過程においても例外ではなく、神経細胞が標的細胞の方に伸長していく際に自発的な一過性のカルシウム濃度変動が見られること、また、神経細胞が標的細胞に接触したときにカルシウム濃度上昇が見られることが報告されている。しかし、特に後者は培養細胞系における結果であり、生体内では果たしてどうなのか、神経細胞が接触する標的細胞の方にはカルシウム濃度変化があるのかなど、その詳細は明らかになっていない。我々はシナプス形成が起こるときのカルシウム濃度変化を可視化することにより、シナプス形成に関わるシグナル機構を明らかにしたいと考え研究を進めている。具体的には、カルシウムイオンとの結合により蛍光強度が変化する指示薬を用いたイメージングを行っている。高感度冷却 CCD カメラ、Ar-Kr レーザー、ニポウ式共焦点ユニットを組み合わせ、全画素読み出しでありながらも高速な画像取得が可能で、4 次元解像度の高い測定系を構築した。シナプス形成期における標的細胞内カルシウムダイナミクスの解明に主眼を置いているが、特に、筋肉細胞から伸展される myopodia という細かな突起内に注目してイメージングを行った。ポスト内のカルシウム濃度をキレート剤で減少させると、myopodia の挙動が変化したので、カルシウムが何らかの役割を果たしている可能性が示唆された。現在、プレとポストの接触前後に myopodia や他のポストの構造内で特徴的なカルシウム濃度変動があるかどうか、データ解析を行うと共に更なる測定を続けている。また、筋肉細胞において、自発的に自家蛍光が変動することを見出した。この変動は、外液のカルシウムイオンに依存している。自家蛍光の変動を用いて、間接的にカルシウムイメージングが出来るかどうか、またこの現象はシナプス形成と関連があるのかどうかを検証していく予定である。

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（中山浩明、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。今年度はこの機構に GluRIIA が関与する可能性を GluRIIA の変異体を用いて検討した。しかし、GluRIIA が関与する可能性は低いことが明らかになった。

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 (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。この系を用いた以前の研究において、 K^+ イオンチャンネル (Shaker) と GFP との融合蛋白質を筋肉において発現することにより、ポストシナプス部の可視化、長期観察が行われている。しかし、プレシナプス部の形態変化を可視化し、さらにポストの変化と対応させた報告例はない。そこで、私たちは、GAL4-UAS システムを用い、膜結合型 YFP を運動神経細胞 (プレ) において強制発現させることを試み、プレシナプス部を可視化することに成功した。これにより、先行研究で観察された Addition という挙動に加えて、新たにシナプス部が退縮する現象 (Retraction) をとらえることに成功した。

さらに、先行研究で使われたポストシナプスマーカーの Color Variant (CD8::CFP::Shaker) を筋肉細胞で発現させ、これをプレシナプスマーカーと組み合わせることにより、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も成功した。この結果、Retract している箇所に関して、ポストシナプスマーカーが残る場合と、そもそもポストシナプスマーカーが存在していない場合があることを観察した。一方 Addition の際には、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観察した。これらのことは、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。

7.2.4 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 (石原孝容、ラム・チャーヤン、浜地慎一郎)、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ァアの添加により、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)。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Morimoto-Tanifuji, T., Kazama, H., and Nose, A.: Developmental stage-dependent modulation of synapses by postsynaptic expression of activated calcium/calmodulin-dependent protein kinase II. *Neuroscience* 128, 797-806. (2004)
- [2] Tanaka, H., Takasu, E., Aigaki, T., Kato, K., Hayashi, S. and Nose, A.: Formin3 is required for assembly of the F-actin structure that mediates tracheal fusion in *Drosophila*. *Dev Biol* 49, 413-425. (2004)

(国内雑誌)

- [3] 能瀬聡直、高坂洋史：神経筋連絡の特異性を制御する分子機構. *神経進歩* 49, 85-93. (2005)

(学位論文)

- [4] 高坂洋史：ショウジョウバエ神経筋結合系における標的選択過程及びシナプス形成過程の可視化 (博士論文)

- [5] 石橋和也：神経筋シナプス成長過程のライブイメージング（修士論文）

<学術講演>

（国際会議）

一般講演

- [6] Hokto Kazama, Takako Morimoto-Tanifuji and Akinao Nose: Molecular components necessary for retrograde signaling triggered by postsynaptic activation of CaMKII. Axon Guidance and Neural Plasticity (Cold Spring Harbor, U.S.A., September, 2004)
- [7] Kohsaka, H., Sakurai, K., Hayashi, S., Nose, A.: Postsynaptic dynamism and synaptic specificity – Localization and function of target recognition molecule capricious at the tip of myopodia. 2004 meeting on "Axon guidance and neural plasticity" (Cold Spring Harbor, U.S.A., September, 2004)
- [8] Morimoto-Tanifuji T, Kazama H, and Nose A.: Developmental stage-dependent modulation of synapses by postsynaptic activation of CaMKII at Drosophila neuromuscular junctions. (Neurons and Memory – the 2nd Neuron SFN Satellite meeting, San Diego, October, 2004)
- [9] Kohsaka, H., Sakurai, K., Hayashi, S., Nose, A.: Postsynaptic filopodia as target recognition protein providers in connecting Drosophila NMJ. (Neurons and Memory - the 2nd Neuron SFN Satellite meeting, San Diego, October, 2004)
- [10] Morimoto-Tanifuji T, Kazama H, and Nose A.: Developmental stage-dependent effects of postsynaptic activation of CaMKII on synapse formation at Drosophila neuromuscular junctions. (34th Annual Meeting of Society for Neuroscience, San Diego, October, 2004)
- [11] Kohsaka, H., Sakurai, K., Hayashi, S., Nose, A.: Long-distance communication by the target recognition molecule Capricious: implication for the role of myopodia in synaptic matchmaking of Drosophila NMJ. (Society for neuroscience 34th annual meeting, San Diego, U.S.A., October, 2004)
- [12] 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. The 46th Annual Drosophila Research Conference (San Diego, U.S.A., March, 2005)

（国内会議）

一般講演

- [13] 高坂洋史、櫻井香代子、林茂生、能瀬聡直：特異的シナプス形成のライブイメージング：標的認識分子 Capricious の動態と機能、日本発生生物学会第 37 回大会（名古屋、2004 年 6 月）

- [14] 高坂洋史、能瀬聡直：特異的シナプス形成の可視化：標的認識分子カプリシヤスの役割、第 27 回日本神経科学大会（大阪、2004 年 9 月）
- [15] 森本-谷藤 高子、中山 浩明、風間 北斗、能瀬聡直：標的細胞の大きさに応じて適切な大きさのシナプスを形成する仕組み、第 27 回日本神経科学大会・第 47 回日本神経化学大会（大阪、2004 年 9 月）
- [16] 稲木美紀子、鈴木芳枝、油谷浩幸、能瀬聡直：単一細胞ジーンチップ解析を用いた神経標的認識分子の網羅的同定、第 27 回日本分子生物学会年会（神戸、2004 年 12 月）
- [17] 石橋和也、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成長過程のライブイメージング、第 27 回日本分子生物学会年会（神戸、2004 年 12 月）
- [18] 高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直：シナプス形成初期過程における機能タンパク質の動態可視化：ショウジョウバエ神経筋結合系を用いた解析、第 27 回日本分子生物学会年会（神戸、2004 年 12 月）

8 技術部門

8.1 技術部門

8.1.1 実験装置試作室

利用状況

2004 年 4 月から 2005 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。

1. 内部製作件数	249 件
2. 設計及び部品等の問い合わせ	36 件
3. 外注発注	40 件
4. 他教室等からの作業依頼及び問い合わせ (鉱物学、五月祭)	2 件

工作実習

当教室所属の大学院 1 年生を対象として、6 月 3 日から 6 月 18 日まで下記の内容で工作講習会を行なった。

- 参加人員：32 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

II

Summary of group activities in 2004

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, Shoichi Sasaki, and Sinji Ejiri

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 Physics.

Nuclear Structure Physics

In Nuclear Structure group (T. Otsuka 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 still 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, 2]. In particular, the tensor force effects have been studied extensively from the viewpoints of the shell model and the mean-field calculation, the chaos has been investigated as a possible origin of regularity, and the clustering has been studied including its competition with the shell structure [3, 4]. The former two subjects have no references yet. The collective motion has been studied from various microscopic angles based on Monte Carlo and pair-truncated shell model calculations [5, 6].

Hadron Physics

In Hadron Physics group (T. Hatsuda, S. Sasaki and S. Ejiri), many-body problems of quarks and gluons are studied theoretically on the basis of the quantum chromodynamics (QCD).

Main research interests are the quark-gluon structure of hadrons, lattice gauge theories and simulations, matter under extreme conditions, quark-gluon plasma in relativistic heavy-ion collisions, high density matter, neutron stars and quark stars, chiral symmetry in nuclei, 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 [7]
 - 1.2 Color superconductivity in quark matter [8, 9]
 - 1.3 Hadrons in quark-gluon plasma [10, 11]
2. QCD structure of hadrons
 - 2.1 Lattice QCD study of the penta-quark [12]
 - 2.2 Color molecular dynamics simulation the penta-quark [13]

References

- [1] Y. Utsuno, T. Otsuka, T. Glasmacher, T. Mizusaki and M. Honma : “Onset of intruder ground state in exotic Na isotopes and evolution of the $N=20$ shell gap”, *Phys. Rev.* **C70**, 044307 (2004).
- [2] 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 ^{31}Mg : Evidence for a Strongly Deformed Intruder Ground State”, *Phys. Rev. Lett.*, **94**, 022501 (2005)
- [3] “Equilateral-triangular shape in ^{14}C ”, N. Itagaki, T. Otsuka, K. Ikeda, and S. Okabe, *Phys. Rev. Lett.*, **92**, 142502 (2004).
- [4] N. Itagaki, S. Aoyama, K. Ikeda and S. Okabe: “Cluster-shell competition in light nuclei”, *Phys. Rev. C* **70**, 054307 (2004).
- [5] N. Shimizu and T. Otsuka and T. Mizusaki and M. Honma: “Anomalous properties of quadrupole collective states in ^{136}Te and beyond”, *Phys. Rev. C* **70** 054313 (2004).
- [6] T. Takahashi, N. Yoshinaga and K. Higashiyama: “Backbending phenomena in $^{132,134,136}\text{Ce}$ with a pair-truncated shell model”, *Phys. Rev. C* **71**, 014305 (2005).
- [7] C.R. Allton, M. Döring, S. Ejiri, S.J. Hands, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann and K. Redlich: “Thermodynamics of two flavor QCD to sixth order in quark chemical potential”, *Phys. Rev. D* **71** (2005) 054508.
- [8] K.Iida, T.Matsuura, M.Tachibana, and T.Hatsuda: “Melting Pattern of Diquark Condensates in Quark Matter,” *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 132001.
- [9] K.Iida, T.Matsuura, M.Tachibana, and T.Hatsuda: “Thermal phase transitions and gapless quark spectra in quark matter at high density”, *Phys. Rev. D* **71** (2005) 054003.
- [10] M. Asakawa and T. Hatsuda: “ J/Ψ and η_c above the deconfinement phase transition”, *J. Phys. G* **30** (2004) S1337.
- [11] S. Sarkar, J. Alam and T. Hatsuda: “Medium effects on low mass dileptons from relativistic nuclear collisions”, *J. Phys. G* **30** (2004) 607.
- [12] S. Sasaki, “Lattice Study of Exotic $S=+1$ Baryon”, *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 152001.
- [13] Y. Maezawa, T. Maruyama, N. Itagaki and T. Hatsuda: “Wandering in Color-Space –why the life of pentaquark is so long?–”, *Acta Phys. Hung.* **A22**, 61 (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 Strings in curved background and D-branes [1, 3, 6, 7, 8, 9, 12, 16, 19, 20]
 - 1.2 String field theory [2, 13]
 - 1.3 p -adic strings [10, 17]
 - 1.4 AdS/CFT correspondence [11, 18]
2. Field Theory.
 - 2.1 Nonlinear gauge theories [14]
 - 2.2 Solitons in supersymmetric theories [22]
3. High Energy Phenomenology.
 - 3.1 Phenomenology of supersymmetric models [4, 15, 21]
 - 3.2 Particle cosmology [5, 23]

References

- [1] Y. Nakayama, “Liouville field theory: A decade after the revolution,” *Int. J. Mod. Phys. A* **19**, 2771 (2004).
- [2] I. Kishimoto and Y. Matsuo, “Cardy states as idempotents of fusion ring in string field theory,” *Phys. Lett. B* **590**, 303 (2004).
- [3] T. Eguchi and Y. Sugawara, “ $SL(2, \mathbb{R})/U(1)$ supercoset and elliptic genera of non-compact Calabi-Yau manifolds,” *JHEP* **0405**, 014 (2004).
- [4] M. Ibe, R. Kitano, H. Murayama and T. Yanagida, “Viable supersymmetry and leptogenesis with anomaly mediation,” *Phys. Rev. D* **70**, 075012 (2004).
- [5] M. Ibe and T. Yanagida, “A solution to the baryon and dark-matter coincidence puzzle in a N -tilde dominated early universe,” *Phys. Lett. B* **597**, 47 (2004).
- [6] G. Bertoldi, S. Bolognesi, M. Matone, L. Mazzucato and Y. Nakayama, “The Liouville geometry of $N = 2$ instantons and the moduli of punctured spheres,” *JHEP* **0405**, 075 (2004).
- [7] Y. Imamura, F. Koyama and R. Nobuyama, “Ricci-flat deformation of orbifolds and localized tachyonic modes,” *JHEP* **0411**, 042 (2004).
- [8] D. Ghoshal, S. Mukhi and S. Murthy, “Liouville D-branes in Two-Dimensional Strings and Open String Field Theory,” *JHEP* **0411**, 027 (2004).
- [9] Y. Nakayama, Y. Sugawara and H. Takayanagi, “Boundary states for the rolling D-branes in NS5 background,” *JHEP* **0407**, 020 (2004).
- [10] D. Ghoshal, “Exact noncommutative solitons in p -adic strings and BSFT,” *JHEP* **0409**, 041 (2004).
- [11] K. Ideguchi, “Semiclassical strings on $AdS(5) \times S^{**5}/Z(M)$ and operators in orbifold field theories,” *JHEP* **0409**, 008 (2004).
- [12] Y. Nakayama, “Crosscap states in $N = 2$ Liouville theory,” *Nucl. Phys. B* **708**, 345 (2005).

- [13] I. Kishimoto and Y. Matsuo, “Cardy states, factorization and idempotency in closed string field theory,” Nucl. Phys. B **707**, 3 (2005).
- [14] N. Ikeda and Izawa K.-I., “Dimensional Reduction of Nonlinear Gauge Theories,” JHEP **0409**, 030 (2004).
- [15] M. Ibe, Izawa K.-I. and T. Yanagida, “Realization of Minimal Supergravity,” Phys. Rev. **D71**, 035005 (2005).
- [16] G. Bertoldi, S. Bolognesi, G. Giribet, M. Matone and Y. Nakayama, “Zamolodchikov relations and Liouville hierarchy in $SL(2, \mathbb{R})/k$ WZNW model,” Nucl. Phys. B **709**, 522 (2005).
- [17] D. Ghoshal and T. Kawano, “Towards p -Adic String in Constant B -field,” Nucl. Phys. **B710**, 577 (2005).
- [18] Y. Imamura, “On String Junctions in Supersymmetric Gauge Theories,” Prog. Theor. Phys. **112**, 1061 (2004).
- [19] T. Eguchi and Y. Sugawara, “Conifold type singularities, $N = 2$ Liouville and $SL(2; \mathbb{R})/U(1)$ theories,” JHEP **0501**, 027 (2005).
- [20] Y. Nakayama, K. L. Panigrahi, S. J. Rey and H. Takayanagi, “Rolling down the throat in NS5-brane background: The case of electrified D-brane,” JHEP **0501**, 052 (2005).
- [21] M. Ibe, R. Kitano and H. Murayama, “A viable supersymmetric model with UV insensitive anomaly mediation,” Phys. Rev. D **71**, 075003 (2005).
- [22] M. Eto, Y. Isozumi, M. Nitta, K. Ohashi, K. Ohta, N. Sakai and Y. Tachikawa, “Global Structure of Moduli Space for BPS Walls,” Phys. Rev. **D71**, 105009 (2005).
- [23] M. Ibe, K. Tobe and T. Yanagida, “A gauge-mediation model with a light gravitino of mass $O(10)$ -eV and the messenger dark matter,” to appear in Phys. Lett. B.

3 Sakai 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 $^3\vec{\text{He}}$), and spin-polarization analysis of reaction products ($\vec{p}$, $\vec{n}$ and $\vec{d}$).

Major activities during the year are summarized below.

Study of Gamow-Teller unit cross sections at 300 MeV

We are studying the behavior of pions in nuclei by measuring the total strength of the Gamow-Teller (GT) excitations in the $^{90}\text{Zr}(p, n)$ and $^{90}\text{Zr}(n, p)$ reactions at 300 MeV. An important ingredient is the GT unit cross section, which is used when measured GT cross sections are converted to the GT strengths. To obtain the GT unit cross section, we have measured the double differential cross sections for the $^{58}\text{Ni}(p, n)$, $^{70}\text{Zn}(p, n)$, $^{118}\text{Sn}(p, n)$, and $^{120}\text{Sn}(p, n)$ reactions at 300 MeV using the neutron time of flight facility at Research Center for Nuclear Physics. A mass number dependence of the GT unit cross section for the medium heavy nuclei at 300 MeV has been obtained for the first time. The GT unit cross section for ^{90}Zr is estimated to be 3.45 ± 0.12 mb/sr. This value is consistent with the value we used previously, 3.5 ± 0.6 mb/sr while the accuracy is much improved.

Experimental test of Bell’s inequality via the ($d, ^2\text{He}$) reaction

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. To test the Bell’s inequality in a two-proton system, we have measured the spin correlation between the two protons in $[^1\text{S}_0]$ produced by the $^1\text{H}(d, ^2\text{He})$ reaction. The violation of Bell’s inequality is demonstrated with an accuracy of 2.9 standard deviations, which corresponds to a confidence level of 99.6%.

We are planning a similar measurement for the proton-neutron system. A neutron polarimeter system is under development.

Search for super narrow dibaryon via the $p+d$ scattering

One of the interesting predictions of the quantum chromodynamics is the existence of six-quark states, i.e. dibaryons. No decisive conclusion has been drawn on the existence of the dibaryons after more than twenty years of experimental efforts. Recently Fil’kov *et al.* have found three narrow resonances in the $p+d$ scattering data at the Institute for Nuclear Research. The resonances were claimed as candidates of super-narrow dibaryons, whose decay by the strong force was forbidden by the Pauli principle and the energy conservation law. We have performed an experiment to study the resonances with an order higher statistical accuracy under very low background condition by employing a liquid deuterium target and two magnetic spectrometers. No peaks are found in the missing mass spectra in the mass region of 1898 - 1952 MeV. Our analysis of the upper limit cross section excludes two out of three candidates with dibaryon masses of 1904 MeV and 1926 MeV. The candidate at 1942 MeV is not excluded.

4 Hayano Group

Research Subjects: Study of fundamental symmetries using exotic nuclei and exotic atoms.

Member: Ryugo S. Hayano, Takashi Ishikawa, Ryo Funakoshi and Eberhard Widmann

‘Exotic nuclei’ and ‘Exotic atoms’ are the keywords of Hayano group. We study deeply bound states of mesons (π^- , K^- , and η) and nuclei to investigate the partial restoration of chiral symmetry in the nuclear medium. We also use antihydrogen atoms (antiproton + positron), antiprotonic helium atoms (helium nucleus + antiproton + electron), antiprotonic helium ions (helium nucleus + antiproton) to study matter–antimatter symmetry (CPT) which is the most fundamental symmetry of nature.

- **Discovery of a strange tribaryon $S^0(3115)$ at KEK**

Motivated by theoretical predictions that kaons can form deeply-bound states in light nuclei, we performed a search for such states by stopping negative kaons (K^- meson) in a liquid helium target, and by measuring the energies of neutrons and protons emitted from the reaction. A monoenergetic peak was observed in ${}^4\text{He}(\text{stopped } K^-, p)$ spectrum. This peak was interpreted as a new kind of tribaryon $S^0(3115)$ with strangeness $S = -1$ and isospin $T = -1$.

- **High-precision tests of matter–antimatter symmetry at CERN-AD (Switzerland)**

- **Antihydrogen**

The antihydrogen atom is the bound state of an antiproton and a positron, and it is the antimatter counterpart of the hydrogen atom. In 2004, as the first step towards high-precision spectroscopy of antihydrogen, the ATHENA experiment attempted to perform laser-induced formation using a CO_2 laser to induce the radiative combination of a positron and an antiproton to produce antihydrogen with principal quantum number $n = 11$. Preliminary results indicate that we did not observe a high laser-induced formation rate, but there seems to be some indication that we produced $n = 11$ antihydrogen. Analysis of the data is still ongoing.

- **Antiprotonic helium atom** Antiprotonic helium is an exotic metastable 3-body ‘atom’ (consisting of a helium nucleus, an antiproton, and an electron: $\text{He}^{++}-\bar{p}-e^-$ (short $\bar{p}\text{He}^+$) discovered by our group, and is continuously studied in detail by using the laser-spectroscopy and microwave-spectroscopy techniques by the ASACUSA collaboration at CERN AD. In 2004, improvement of the precision of the laser spectroscopy by a factor of 10 was achieved by using a new narrow-band laser system calibrated and stabilized by an optical frequency comb. Potentially, we can reach a precision of 10^{-9} (1 ppb) for the antiproton–proton mass & charge comparison.

- **Antiprotonic helium ion** In 2003 we succeeded in observing also metastable antiprotonic helium ions, two-body systems ${}^4\text{He}^{++}-\bar{p}$ (short $\bar{p}{}^4\text{He}^{2+}$) and ${}^3\text{He}^{++}-\bar{p}$ (short $\bar{p}{}^3\text{He}^{2+}$) and measured the density-dependent lifetime of various states. It was shown that the lifetimes of $\bar{p}{}^3\text{He}^{2+}$ against annihilation induced by collisions were shorter than those of $\bar{p}{}^4\text{He}^{2+}$, and decreased for states with larger principal quantum numbers. These results indicate that the laser spectroscopy of $\bar{p}\text{He}^{2+}$ may be possible, by inducing transitions between ionic states with different principal quantum numbers n and making use of n dependence of their lifetimes to detect the resonance signal. Since the energy levels of this highly-excited two-body system can be calculated to a much higher precision than the three-body system, it can be used to obtain theory-independent measurements of the antiproton charge and mass in the future.

- **Partial restoration of chiral symmetry in nuclei – study of the origin of proton mass at GSI (Germany)**

Following the observation of partially restored chiral symmetry in nuclei, obtained by the study of deeply bound pionic Pb and pionic Sn atoms, we started a new experiment to study η -mesic nuclei. We are aiming at producing bound states of η meson and ${}^{11}\text{B}$ nucleus and measuring its binding energy and width. Purpose of this experiment is to extract further information on the chiral symmetry restoration in nuclear medium.

5 Sakurai Group

Research Subjects: Structures and Reactions of Extremely Neutron-rich Nuclei, and Nuclear Reactions Related with Astrophysical Phenomena

Member: Hiroyoshi Sakurai, Hironori Iwasaki

Research activities of our laboratory have covered a particular domain of nuclear physics, i.e., the field brought out by the advent of the radioactive isotope (RI) beams, emphasizing an isospin degree of freedom in nuclei. The recent developments of RI beams have opened an access to a drastically enlarged range of nuclear species as well as nuclear reactions involving such radioactive isotopes. Our research programs are coordinated to exploit these new opportunities and are directed to subjects related to 1) stability of nuclei and exploration of new domain of nuclear chart towards the drip lines, 2) exotic properties of nuclear structure and reactions of extremely neutron-rich nuclei, such as neutron halos and skins, magicity-loss, and appearance of new magic numbers, and 3) nuclear reaction rates and nuclear properties concerning the stellar nuclear synthesis.

The experiments are mainly performed using the RI beam facility RIPS (RIKEN Projectile-fragment Separator) at RIKEN. Several R&D studies have been focused on experimental simulations and detectors to be used for the RI Beam Factory (RIBF) project at RIKEN.

Our program in the fiscal year 2004 has covered the following subjects;

1. Particle stability and β -decay properties of very neutron-rich nuclei near the drip line.
2. Recoil shadow method for lifetime measurements of the low-lying excited states in $^{15,17}\text{B}$ and $^{17,18}\text{C}$.
3. Proton inelastic scattering to investigate neutron-matter deformation of ^{16}C .
4. Proton inelastic scattering to determine low-lying level schemes in the very neutron-rich nuclei ^{74}Ni and ^{78}Zn .
5. Coulomb excitation of $^{76,78,80,82}\text{Ge}$ and quadrupole collectivity around $N=50$.
6. β spectroscopy of the proton-rich nuclei ^{46}Cr and ^{24}Si .
7. R&D studies for Zero-degree Forward Spectrometer at RIBF.
8. Development of strip Germanium telescope for in-beam gamma spectroscopy of fast-moving RI beams.
9. Development of TOF spectrometer for gamma spectroscopy of medium-heavy neutron-rich nuclei.
10. Precise measurements of Coulomb and nuclear breakup reactions of ^{11}Be .
11. Coulomb dissociation of ^{23}Al and ^{27}P to study key reactions of the rp-process path, $^{22}\text{Mg}(p,\gamma)^{23}\text{Al}$ and $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$.

6 Komamiya Group

Research Subjects: (1) Preparation for an accelerator technology and an experiment for the International linear e^+e^- collider ILC; (2) TOF detector development for BES-III experiment at BEPC-II and data analysis for the BES-II experiment at BEPC-I; (3) Detector development for studying gravitational quantum effects and searching for new medium range force using ultra-cold neutrons; (4) OPAL experiment at LEP e^+e^- collider; (5) 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 started various ILC accelerator simulations and hardware tests at KEK, especially on the cavities and 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 a 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 are developing the test system of photomultipliers in 1[T] magnetic field. We have studied the data analysis of a search for CP violation using $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ with 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 a neutron into charged nuclear fragments. The simulation of the quantum effects of UCN in a narrow slit with 100 [μ] height is under way.

4) OPAL experiment: 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 particle searches the lower mass limit of the lightest neutralino, which is the most important candidate of the dark matter material, was set to be 36.0 GeV. The W boson mass was determined to be 80.412 ± 0.042 GeV (statistical and systematic errors combined).

5) BESS experiment: The spectrum of cosmic muon, proton and Helium were measured at various height. 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. We optimized a computing code for hadronic interactions to reproduce muon spectrum observed at sea level and at mountain altitude with the BESS spectrometer. This modified interaction code would accurately calculate energy spectrum of Atmospheric neutrinos.

7 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.

Formerly, our cryogenic detectors, aka bolometers, of lithium fluoride and sodium fluoride gave stringent limits in the parameter plane of the neutralino-proton spin-dependent coupling(a_p) and neutralino-neutron spin-dependent coupling(a_n). 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. 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 $a_p - a_n$ plane.

In the new phase of our dark matter search project we started the development of the direction sensitive detectors as reported previously. In 2004, we again tried to go further with the fluorine target but with an ordinary $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ scintillator. With carefully selected raw material for the scintillator and low radioactivity photomultipliers as well as high purity copper shielding, the limit to the spin dependent cross section is improved by an order of magnitude. In the $a_p - a_n$ plane, our result excluded DAMA's region allowed by their annual modulation observation.

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.

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. We are also developing an automatic cable handling system for it to make long-term fully automated observations possible.

Another completely new project is an R and D of a neutrino detector with a resonance ionization spectroscopy. In a 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.

8 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), and R&D for Linear Collider Silicon Detector (SiD)

Members: H. Aihara, M. Iwasaki, H. Kakuno

The main research activity of our group has been a study of CP-violation in the B meson system and precision measurements of CKM matrix elements using the KEK B -factory (KEKB).

Direct CP Violation The first evidence for direct CP violation in B meson decay was reported by the Belle group in January 2004 in the disintegration of the B meson into two charged π mesons. From a sample of 152 million B meson pairs, Belle observed 264 anti- B meson decays but only 219 B meson decays, establishing direct CP violation with more than 99.8% probability. Most recently, Belle has found clear evidence of direct CP violation in the process of B mesons decaying to a K meson and a π meson. From a sample of 274 million B meson pairs, Belle found 1165 B meson decays but only 974 anti- B meson decays, establishing direct CP violation with a confidence level of more than 99.99%.

Hint of New Physics If the Standard Model is correct, several B meson processes other than the decay to $J/\psi K^0$ must show CP violation of a size that is determined by $\sin 2\phi_1$. A particularly interesting case is the decay into the ϕ meson and the K^0 meson. This process is believed to occur through a process involving so-called “quantum fluctuations” where the beauty quark within the B meson splits, for a brief instant, into a top quark and a W boson. It is possible that the top quark and/or W boson could occasionally be replaced by new particles that have never been seen and are not part of the Standard Model. Their hidden presence might appear as an anomalous value for $\sin 2\phi_1$. In summer 2003, the Belle group reported that the value of $\sin 2\phi_1$ determined using the ϕK^0 decay mode deviated significantly from the well-established value of $+0.736$ obtained from $J/\psi K^0$ decays. Further investigation requires a large data sample, and the experimenters are steaming ahead toward resolving what is probably the most serious challenge to the Standard Model in recent days. Using a 274 million B meson sample, the Belle group collected 175 ϕK^0 decays, and also extended its analysis to five other decay processes that are believed to behave similarly to the ϕK^0 . Now, the value of $\sin 2\phi_1$ after combining all these decays is $+0.43 \pm 0.11$, which represents a deviation from the Standard Model value with 99% probability. Further improvement of the measurement remains one of the most important issues in high energy physics.

T2K We have been involved in the next generation long-baseline neutrino oscillation experiment, JHFnu, which shoots off-axis neutrino beam from Tokai 50 GeV proton synchrotron to Super Kamiokande detector. We have been developing profile monitors for the primary proton beam. This past year we performed the beam test of the prototypes.

SiD Our R&D work also includes the design of Linear Collider beam delivery system, the interaction region and a general purpose detector based the silicon technology.

- H. Ishino *et al.* [Belle Collaboration], “Improved Evidence for Direct CP Violation in $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ Decays and Model-independent constraints on ϕ_2 ,” [arXiv:hep-ex/0502035]. submitted to PRL.
- K.-F.Chen *et al.*, [Belle Collaboration] “Time-Dependent CP-Violating Asymmetries in $b \rightarrow s\bar{q}q$ Transitions,” [arXiv:hep-ex/0504023]. submitted to PRD.
- M. Iwasaki *et al.* [Belle Collaboration], “Improved Measurement of Electroweak Penguin Process $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$,” [arXiv:hep-ex/0503044]. submitted to PRD.
- T. Ziegler *et al.*, “The Belle trigger system with the new silicon vertex detector SVD2,” IEEE Trans. Nucl. Sci. **51**, 1852 (2004).

9 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

10 Aoki Group

Subject: Theoretical condensed-matter physics

Members: Hideo Aoki, Ryotaro Arita

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
 - High- T_C cuprates, Ru and Co compounds [1,2]
 - How to optimize T_C through the “fermiology” [3,4]
 - Spin-triplet superconductivity [1,2,4,5]
 - Superconductivity in multi-orbital systems and correlated electron systems coupled to phonons [6,7]
- Magnetism in repulsively interacting electron systems
 - Flat-band ferromagnetism in a designed organic polymer [8]
 - Fullerene derivatives [9]
- Non-equilibrium and nonlinear phenomena in correlated electron systems
 - Landau-Zener tunnelling in the breakdown of Mott’s insulator [10]
- Quantum Hall systems
 - Interaction and effective mass in the fractional quantum Hall liquid [11]
 - Integer quantum Hall effect in three dimensions [12]
 - Electron-molecule picture for quantum dots in magnetic fields
- Electronic structure and correlation effects in hetero-interfaces
 - Metal-induced gap states at metal/insulator interfaces [8,13]
 - Metal-insulator transition on polar surfaces [8,14]
- Electronic structure of alkali-metal-loaded zeolites — “supercrystal” picture and magnetism [15]
- Electrons on periodic curved surfaces [16]

- [1] R. Arita, S. Onari, K. Kuroki and H. Aoki, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 247006 (2004).
- [2] K. Kuroki, Y. Tanaka and R. Arita, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 077001 (2004).
- [3] Hideo Aoki, *J. Phys.: Condensed Matter* **16**, V1 (2004).
- [4] S. Onari, R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **70**, 094523 (2004).
- [5] R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **73**, 533 (2004).
- [6] S. Sakai, R. Arita and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **70**, 172504 (2004).
- [7] M. Tezuka, R. Arita and H. Aoki, *Physica B* **359-361**, 708 (2005).
- [8] Hideo Aoki, *Applied Surf. Sci.* **237**, 2 (2004).
- [9] S. Okada, R. Arita, Y. Matsuo, E. Nakamura, A. Oshiyama and H. Aoki, *Chem. Phys. Lett.* **399**, 157 (2004).
- [10] T. Oka, N. Konno, R. Arita and H. Aoki, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 100602 (2005).
- [11] Hideo Aoki, *Physica E* **20**, 149 (2003).
- [12] Mikito Koshino and Hideo Aoki, *Phys. Rev. B* **69**, 081303(R) (2004).
- [13] R. Arita, Y. Tanida, K. Kuroki and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **69**, 115424 (2004).
- [14] R. Arita, Y. Tanida, S. Entani, M. Kiguchi, K. Saiki and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **69**, 235423 (2004).
- [15] R. Arita, T. Miyake, T. Kotani, M. van Schilfgaarde, T. Oka, K. Kuroki, Y. Nozue and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **69**, 195106 (2004).
- [16] M. Koshino and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **71**, 73405 (2005).

11 Miyashita Group

Research Subjects: Statistical Mechanics, Phase Transitions, Quantum Spin systems,
Nonequilibrium Phenomena

Member: Seiji Miyashita and Keiji Saito

1. Magnetization Processes in Quantum Triangle Lattices

We studied the magnetization process in weakly XY-anisotropic antiferromagnetic Heisenberg spin systems. The magnetization processes of this type of model at finite temperatures were studied in their corresponding classical models, where we found very complicated successive phase transitions. They reflect magnetic-field-dependence of the entropy of various nearly degenerate ordered states of the models. We found that the quantum fluctuation causes the same effects on the stabilization of successive phases in the field in the ground state. We studied the quantum models in the approximation where we use a $3 \times \infty$ lattice instead of the two-dimensional triangular lattice. This lattice can be studied by PWFRG method and DMRG method.

It has been found that this lattice is exactly the same as the system of alternate-triangle tube material. The existence of the gap between the ground state and the excited states is a matter of interest. Although in the regular triangle tube, the existence of the gap is known, in the present case there may be a ground state phase transition, which is under investigation.

2. Nature of Ferrimagnetic Order in Quantum Spin Systems

We have investigated types of ferrimagnetism in the ground state of quantum spin systems. The most familiar type is the Lieb-Mattis type in the antiferromagnetic model on bipartite lattices with different number of sublattice sites. On the other hand, in the case of frustrated lattices, the ground state spin configuration is often non-collinear, and they show a non-collinear ferrimagnetic states. In order to realize these types of ferrimagnetism in a lattice and to study the phase transitions between them, we investigate a lattice with frustrated interactions. We find that this model contains two types of ferrimagnetism as a function of the parameter. Furthermore we found that the system has an incommensurate spin configuration. The wavelength of the oscillation changes with a parameter. The mechanism of this behavior is now under investigation.

3. Quantum Effects on the Charge Transfer Spin-Crossover Phenomena

As a new frontier of studies of the phase transition, phase transition of structure of materials due to charge transfer and also magnetic phase transition on such materials have been attracted interests. In some materials of this type, in the low temperature configuration the magnetic atoms are surrounded by non-magnetic atoms and the interaction between magnetic atoms is expected to be very small. Nevertheless, magnetic ordering occurs. Mechanism of this magnetic order is an interest problem. We have proposed that thermal fluctuation may assist the magnetic order. However this mechanism has been shown to be difficult at least in two-dimensional systems. Thus, we proposed alternate mechanisms including ones due to quantum fluctuation. We demonstrated that quantum mixing due to the DM interaction helps the magnetic order, and electron hopping also helps the order. We also studied effects of photo-irradiation on systems which shows the photomagnetism.

4. ESR Study on Nano-scale Molecular Magnets

We have developed a numerical method to obtain the ESR by means of direct numerical evaluation of the Kubo formula. We have studied characteristics of ESR absorption as functions of the frequency of the AC field ω and the strength of the static field H_0 . In particular, we have studied the temperature dependence of total amplitude of the absorption of ESR of a molecular magnet V_{15} . At very high temperature, all the 15 spin gives independent data and we have 15 times of the absorption of single isolated spin. When the temperature decreases, due to the magnetic interaction the effective degree of freedom is reduced to 3 for a loosely coupled three spins. At further low temperatures, we found that the system shows various temperature dependence depending on the magnetization. We also find the dynamical shift, i.e., dependence of the absorption on the relative angle between the AC field and the system.

6. Mechanism of Slow Dynamics in Decorated Bond Systems

We also studied mechanism of reentrant phenomena and memory effect in a lattice consisting of frustrated decorated bond. There, we found that the time evolution of the spin becomes very slow due to a kind of dynamical metastability. We successfully evaluated the relaxation time by an analysis of distribution of configurations of a decorated bond. By this study we find that, although the equilibrium state is well defined, it may take very long time to reach it even in relatively simple systems.

12 Ogata Group

Research Subjects: Condensed Matter Theory

Member: Masao Ogata, Youichi Yanase

We are studying condensed matter physics and many body problems, such as strongly correlated electron systems, high- T_c superconductivity, Mott metal-insulator transition, magnetic systems, low-dimensional electron systems, mesoscopic systems, organic conductors, unconventional superconductivity, and Tomonaga-Luttinger liquid theory. The followings are the current topics in our group.

- High- T_c superconductivity
 - Superconductivity correlation length in the strongly correlated electron system.[1]
 - Energy analysis of high- T_c superconductors.[2,3]
 - Randomness and superconductivity fluctuation in high- T_c superconductors.
- Anisotropic superconductivity in Na_xCoO_2
 - Spin triplet superconductivity in a multi-orbital model.[4,5]
 - D-vector and multiple phase in a magnetic field.
 - Superconductivity due to charge fluctuation.[6]
- Organic conductors
 - Superconductivity and charge fluctuation in θ -type organic conductors.[7]
 - Quantum melting due to geometrical frustration.[8]
- Theories of anisotropic superconductivity
 - Electronic states in the vortex state.[9]
 - Quasi-classical theory on the angle dependence of specific heat in a magnetic field.[10]
 - Proximity effects of superconductivity and magnetism in the bilayered structure.
- Electronic and spin states in frustrated systems
 - Superconductivity correlation in a triangular lattice.
 - Charge order and superconductivity in a triangular lattice.
 - Numerical simulation on the classical spin system with frustration.
- Metal-insulator transition
 - Disorder operator in two-dimensional insulators.

- [1] T. Koretsune and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 1390-1393 (2005).
- [2] H. Yokoyama, Y. Tanaka, M. Ogata and H. Tsuchiura: J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 1119-1122 (2004).
- [3] Y. Yanase and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, No.5 (2005).
- [4] M. Mochizuki, Y. Yanase and M. Ogata: Phys. Rev. Lett. **94**, 147005-1-147005-4 (2005).
- [5] Y. Yanase, M. Mochizuki and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 430-444 (2005).
- [6] Y. Tanaka, Y. Yanase and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 319-322 (2004).
- [7] Y. Tanaka, Y. Yanase and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 2053-2056 (2004).
- [8] J. Merino, H. Seo, and M. Ogata: Phys. Rev. B **71**, 125111-1-125111-5 (2005).
- [9] M. Udagawa, Y. Yanase and M. Ogata: Phys. Rev. B **70**, 184515-1-184515-8 (2004).
- [10] M. Udagawa, Y. Yanase and M. Ogata: Phys. Rev. B **71**, 024511-1-024511-11 (2005).

13 Tsuneyuki Group

Research Subjects: Theoretical Condensed-matter physics

Member: Shinji Tsuneyuki and Kazuto Akagi

Computer simulations, such as the first-principles molecular dynamics method, 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 ultra-high pressure or at surfaces.

In FY2004, we investigated chemical reactions in condensed water promoted by so-called proton relay, chemisorption of organic molecules on Si(001) surface, gigantic effective charge in hypervalent As_2Te_3 , and the self-organization in N/Cu(001) surface. We also developed new methods of computer simulation of condensed matter as follows.

The Transcorrelated Method

The density functional theory (DFT) is one of the most popular bases of the first-principles simulations of materials nowadays, though its limitation, at least within the present approximation, has also been clarified: cohesive energy of solids are overestimated, van der Waals interaction is not reproducible, activation barrier of chemical reactions is underestimated, and electronic excitation spectrum is not correctly calculated for some narrow gap materials or strongly correlated electronic systems. The most significant problem is that we do not know how to improve the approximations adopted with DFT systematically in contrast to the wave function theory (WFT). To overcome these difficulties, we proposed a new method of first-principles simulation of solids based on the transcorrelated (TC) method. In the TC method, a Slater-Jastrow-type many-body wave function is fully optimized by solving a Hartree-Fock-like mean-field wave equation (TC-SCF equations) self-consistently.

We showed that, even with use of the simplest Jastrow function, total energy of the electron gas is surprisingly well reproduced for a wide range of the Wigner parameter r_s . We also demonstrated that excitation energy of a helium atom is accurately calculated within the scheme of the TC method. Since electronic correlation is taken into account through the Jastrow function, the band structure is much better than that obtained by the Hartree-Fock method for solids, i.e. no anomaly is observed at the Fermi surface of simple metals and the band gap of semiconductors is much improved.

Elastic Lattice Green's Function

Surface science is an important playground of DFT and the so-called first-principles molecular dynamics method, where we usually simulate a surface by a slab model with the periodic boundary conditions in three dimensions. If we consider large-scale self-organization at surfaces, however, the slab model is sometimes problematic, since the convergence of the elastic deformation energy is much slower than that of the electronic energy. Based on the pioneering work by Y. Saito in Keio University, we derived and implemented an elastic Green's function for an fcc crystal for surface simulation. We confirmed that the Green's function dramatically improves various elastic deformations and interactions within a thin slab model.

Replica-Exchange Molecular Dynamics

Structural optimization of complicated systems, like biomolecules, is another important and difficult problem of atomistic simulation of materials. Statistical sampling with so-called extended ensembles at present seems a hopeful tool for solving this problem. We developed the replica-exchange molecular dynamics method with the isobaric formalism and demonstrated that solidification of the Lennard-Jones particles is simulated more rapidly and systematically than parallel but independent simulations with the canonical ensemble. The present result suggests the usefulness of the replica exchange method for simulating the first-order structural phase transition, though further investigation is needed.

K. Akagi, S. Tsuneyuki, Y. Yamashita, K. Hamaguchi and J. Yoshinobu, Structural and chemical property of unsaturated cyclic-hydrocarbon molecules regularly chemisorbed on Si(001) surface, *Appl. Surf. Sci.* 234 (2004) 162.

N. Umezawa and S. Tsuneyuki, Excited electronic state calculations by the transcorrelated variational Monte Carlo method: Application to a helium atom, *J. Chem. Phys.* 121 (2004) 7070.

Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki, First-principles study on the strain effect of the Cu(001)-c(2×2)N self-organized structure, *Appl. Surf. Sci.* 237 (2004) 274.

14 Fujimori Group

Research Subjects: Photoemission Spectroscopy of Strongly Correlated Systems

Member: Atsushi Fujimori and Teppei Yoshida

The electronic structures of strongly correlated systems and complex materials are studied 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 ferromagnetism and spin/charge/orbital ordering [3] in strongly correlated systems such as transition-metal oxides, magnetic semiconductors, and their nano-structures.

[1] K. Tanaka, T. Yoshida, A. Fujimori, Z.-X. Shen, X.-J. Zhou, H. Eisaki, Z. Hussain, S. Uchida, T. Sugaya, T. Mizuno, T. Fujii and I. Terasaki: Effects of Next-Nearest-Neighbor Hopping t' on the Electronic Structure of Cuprates, *Phys. Rev. B* **70** (2004) 092503-1–4.

[2] H. Wadati, D. Kobayashi, H. Kumigashira, K. Okazaki, T. Mizokawa, A. Fujimori, K. Horiba, M. Oshima, N. Hamada, M. Lippmaa, M. Kawasaki, and H. Koinuma: Hole-Doping-Induced Changes in the Electronic Structure of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$: Soft X-Ray Photoemission and Absorption Study of Epitaxial Thin Films, *Phys. Rev. B* **71** (2005) 035108-1–7.

[3] D. D. Sarma, S.R. Krishnakumar, M. Bertolo, S. La Rosa, G. Cautero, T. Y. Koo, P. A. Sharma, S-W. Cheong and A. Fujimori: Direct Observation of Large Electronic Domains with Memory Effect in Doped Manganites, *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 097202-1–4.

15 Uchida Group

Research Subjects: High- T_c superconductivity

Member: Uchida Shin-ichi (professor), Kojima Kenji M. (research associate)

1. Project and Research Goal

The striking features of low-dimensional electronic systems with strong correlations are the “fractionalization” of an electron and the “self-organization” of electrons to form nanoscale orders. In one dimension (1D), an electron is fractionalized into two separate quantum-mechanical particles, one containing its charge (holon) and the other its spin (spinon). In two dimensions (2D) strongly correlated electrons tend to form spin/charge stripe order.

Our study focuses on 1D and 2D copper oxides with various configurations of the corner-sharing CuO_4 squares. The common characteristics of such configurations are the quenching of the orbital degree of freedom due to degraded crystal symmetry and the extremely large exchange interaction (J) between neighboring Cu spins due to large $d-p$ overlap (arising from 180° Cu-O-Cu bonds) as well as to the small charge-transfer energy. The quenching of orbitals tends to make the holon and spinon to be well-defined excitations in 1D with quantum-mechanical character, and the extremely large J is one of the factors that give rise to superconductivity with unprecedentedly high T_c as well as the charge/spin stripe order in 2D cuprates. The experimental researches of our laboratory are based upon successful synthesis of high quality single crystals of cuprate materials with well-controlled doping concentrations which surpasses any laboratory/institute in the world. This enables us to make systematic and quantitative study of the charge/spin dynamics by the transport and optical measurements on the strongly anisotropic systems. We also perform quite effective and highly productive collaboration with world-leading research groups in the synchrotron-radiation, μSR and neutron facilities, and STM/STS to reveal electronic structure/phenomena of cuprates in real- and momentum-space.

2. Accomplishment

(1) Ladder Cuprate

Significant progress has been made in the experimental study of a hole-doped two-leg ladder system $\text{Sr}_{14-x}\text{Ca}_x\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ and undoped $\text{La}_6\text{Ca}_8\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$:

- 1) From the high pressure (P) study we constructed and x - P phase diagram (in collaboration with Prof. N. 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 $x=0$, $\text{Sr}_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$, compound in the inelastic light scattering (with G. Blumberg, Bell Lab.), microwave and nonlinear conductivity (with A. Maeda and H. Kitano, U. of Tokyo), and inelastic X-ray scattering (with P. Abbamonte and G. A. Sawatzky).
- 4) In the undoped compound $\text{La}_6\text{Ca}_8\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ spin thermal conductivity is remarkably enhanced to the level of silver metal along the ladder-leg direction due to the presence of a spin gap and to a ballistic-like heat transport characteristic of 1D.

(2) Observation of Two Gaps, Pseudogap and Superconducting Gap, in Underdoped High- T_c Cuprates.

The most important and mysterious feature which distinguishes cuprate from conventional superconductors is the existence of “pseudogap” in the normal state which has the same d-wave symmetry as the superconducting gap does. We employed c-axis optical spectrum of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.8}$ as a suitable probe for exploring gaps with d-wave symmetry to investigate the inter-relationship between two gaps. We find that the two gaps are distinct in energy scale and they coexist in the superconducting state, suggesting that the pseudogap is not merely a gap associated with pairs without phase coherence, but it might originate from a new state of matter which competed with d-wave superconductivity.

(3) Nanoscale Electronic Phenomena in the High- T_c Superconducting State

The STM/STS collaboration with J. C. Davis' group in Cornell Univ. is discovering numerous unexpected nanoscale phenomena, spatial modulation of the electronic state (local density of states, LDOS), in the superconducting CuO_2 planes using STM with sub-Å resolution and unprecedentedly high stability. These include (a) “+” or “×” shaped quasiparticle (QP) clouds around an individual non-magnetic Zn (magnetic Ni) impurity atom, (b) spatial variation (distribution) of the SC gap magnitude, (c) a “checkerboard” pattern of QP states with four unit cell periodicity around vortex cores, and (d) quantum interference of the QP. This year's highlights are as follows:

1) Granular structure of high- T_c superconductivity

The STM observation of “gap map” has been extended to various doping levels of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$. The result reveals an apparent segregation of the electronic structure into SC domains of $\sim 3\text{nm}$ size with local energy gap smaller than 60meV , located in an electronically distinct background (“pseudogap” phase) with local gap larger than 60meV but without phase coherence of pairs. With decrease of doped hole density, the (coverage) fraction of the superconducting area decreases or the density of the number of superconducting islands decreases. Apparently, this is related to the doping dependence of superfluid density as well as the doping dependence of the normal-state carrier density.

2) Homogeneous nodal superconductivity and heterogeneous antinodal states

Modulation of LDOS is observed even without vortices, at zero magnetic field. In this case, the modulation is weak and incommensurate with lattice period, showing energy (bias voltage) dependence. The dispersion is explained by quasiparticle interference due to elastic scattering between characteristic regions of momentum-space, consistent with the Fermi surface and the d-wave SC gap determined by ARPES (angle-resolved-photoemission).

These dispersive quasiparticle interference is observed at all dopings, and hence the low-energy states, dominated by the states on the “Fermi arc” formed surrounding the gap nodes, are spatially homogeneous (nodal superconductivity). By contrast, the quasiparticle states near the antinodal region degrade in coherence with decreasing doping, but have dominant contribution to superfluid density. This suggests that the volume fraction of spatial regions all of whose Fermi surface contributes to superfluid decreases with reduced doping. The result indicates the special relationship between real-space and momentum-space electronic structure.

16 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 (STM), scanning tunneling micro/spectroscopy, photoemission spectroscopy, and in-situ 4-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-four-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 film. Ge nanodots layer.

(3) Construction of new apparatuses: Green function STM (low-temperature four-tip STM). A new machine of conductivity measurement by photoemission spectroscopy.

- [1] I. Matsuda, M. Ueno, T. Hirahara, R. Hobara, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *Electrical Resistance of a Monatomic Step on a Crystal Surface*, Physical Review Letters **93**, 236801 (2004).
- [2] T. Tanikawa, I. Matsuda, T. Kanagawa, and S. Hasegawa: *Surface-state electrical conductivity at a metal-insulator transition on silicon*, Physical Review Letters **93**, 016801 (2004).
- [3] T. Nagao, J. T. Sadowski, M. Saito, S. Yaginuma, Y. Fujikawa, T. Kogure, T. Ohno, Y. Hasegawa, S. Hasegawa, and T. Sakurai: *Nanofilm Allotrope and Phase Transformation of Ultrathin Bi Film on Si(111)-7 × 7*, Physical Review Letters **93**, 105501 (2004).
- [4] H. Morikawa, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Direct observation of soliton dynamics in charge density waves on a quasi-one-dimensional metallic surface*, Physical Review B **70**, 085412 (2004).
- [5] H. Okino, R. Hobara, I. Matsuda, T. Kanagawa, S. Hasegawa, J. Okabayashi, S. Toyoda, M. Oshima, and K. Ono: *Nonmetallic transport of a quasi-one-dimensional metallic Si(557)-Au surface*, Physical Review B **70**, 113404 (2004) (Subsequently selected in Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology **10**, (2004)).
- [6] C. Liu, S. Yamazaki, R. Hobara, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Two-Dimensional Liquid-Solid Phase Transition Observed on Atomic Scale*, Physical Review B **71**, 041310(R) (2005).
- [7] A.A. Saranin, A.V. Zotov, I.A. Kuyanov, V.G. Kotlyar, M. Kishida, Y. Murata, H. Okado, I. Matsuda, H. Morikawa, N. Miyata, S. Hasegawa, M. Katayama, and K. Oura: *Reversible structural transitions at the one-monolayer Ti/Si(100)2 × 1 interface*, Physical Review B **71**, 165307 (2005).
- [8] T. Hirahara, I. Matsuda, M. Ueno and S. Hasegawa: *The effective mass of a free-electron-like surface state of the Si(111)√3 × √3-Ag surface investigated by photoemission and scanning tunneling spectroscopies*, Surface Science **563**, 191-198 (2004).
- [9] C. Liu, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *STM observation at initial stage of Cs adsorption on Si(111)-√3 × √3-Ag surface*, Surface and Interface Analysis **37**, 101-105 (2005).
- [10] R. Hobara, S. Yoshimoto, T. Ikuno, M. Katayama, N. Yamauchi, W. Wongwiriyan, S. Honda, I. Matsuda, S. Hasegawa, and K. Oura: *Electronic Transport in Multiwalled Carbon Nanotubes Contacted with Patterned Electrodes*, Japanese Journal of Applied Physics **43**, L1081-L1084 (2004).
- [11] M. Konishi, I. Matsuda, C. Liu, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *A √21 × √21 phase formed by Na adsorption on Si(111)√3 × √3-Ag surface and its electronic structure*, e-J. Surf. Sci. Nanotech. **3**, 107-112 (2005).
- [12] N. Miyata, I. Matsuda, M. D'angelo, H. Morikawa, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *STM observation of the Si(111)-c(12 × 2)-Ag surface*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3**, 151-155 (2005).
- [13] F. Shimokoshi, I. Matsuda, S. Hasegawa, and S. Ino: *Successive Phase Transitions Induced by Ca and Sr Adsorptions on a Si(111) Surface*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3**, 178-185 (2005).

17 Fukuyama Group

Research Subjects: Low Temperature Physics:

Strong correlations, frustration effects and superfluidity in quantum fluids and solids, Low temperature scanning tunneling microscopy and spectroscopy for low-dimensional conductors and exotic superconductors.

Member: Hiroshi Fukuyama, Hiroshi Kambara

Our current interests are on (i) quantum many body phenomena such as strong correlation effects, frustrated magnetism and superfluidity in fluid and solid ^3He especially in two dimensions, (ii) electronic properties of low-dimensional conductors in high magnetic fields, (iii) exotic superconductors with non s -wave Cooper pairs, *etc.* We are investigating these topics experimentally at very low temperatures down to 50 μK .

1. Strong correlation effects in 2D ^3He :

Monolayer ^3He adsorbed on a graphite surface is an ideal model system for strongly correlated two dimensional (2D) Fermions. Recently, we studied a rich quantum phase diagram of the second layer ^3He with four distinct quantum phases depending on density from heat-capacity and NMR measurements. At densities slightly lower than that for the $4/7$ registered phase ($\rho_{4/7}$), there exists a quantum fluid phase possibly with the zero-point vacancies. On the other hand, there exists another quantum fluid phase either with the fluid over layer or interstitials in the $4/7$ phase at densities slightly higher than $\rho_{4/7}$. As density increases further, ferromagnetic tendencies appear and the system undergoes a two-phase coexistence with the ferromagnetic phase.

2. STM/STS studies of low dimensional conductors:

(a) Visualization of the possible quantum Hall states at graphite surface:

Scanning tunneling spectroscopy (STS) measurements in high magnetic fields by use of an ultra-low temperature scanning tunneling microscope (ULT-STM) enable us to visualize spatial distributions of the possible localized and extended states of the quantum Hall state at quasi-two dimensional graphite surfaces. The localized states trapped circularly around a surface defect have expected width comparable to the magnetic length (~ 10 nm at 6 T). The width increases with decreasing field as expected.

(b) Graphite edge state:

The electronic local density of states (LDOS) was measured near single step edges at the surface of exfoliated graphite as a function of distance from the edges. A clear LDOS peak at an energy just below the Fermi level was found only near the zigzag edge but not the armchair one. The peak height develops with approaching the zigzag edge. These observations, which are in good agreement with the first-principles calculations by Tagami and Tsukada, indicate that we found the predicted “graphite edge state” experimentally for the first time.

(c) 0D and 2D electronic systems at semiconductor surfaces:

It is known that a thin film of InAs epitaxially grown on a GaAs(111)A surface contains tetrahedral stacking faults. Inside and outside this tetrahedron, quasi 0-dimensional and 2-dimensional electronic states are formed on the surface. We started to study magnetic field dependencies of these electronic states with the ULT-STM as a collaboration with Hirayama group of NTT Basic Research Laboratories.

(d) An unconventional superconductor Sr_2RuO_4 :

STM/STS studies of the spin-triplet superconductor Sr_2RuO_4 were carried out. We observed an antisymmetric LDOS structure below 100 meV at cleaved SrO planes. We also observed a large gap structure ($\Delta \sim 5$ meV) which is not related to the superconducting state. But its origin is still unknown. Further STM/STS studies are ongoing.

3. Magnetotransport measurements of quasi 2D graphites:

Magnetotransport measurements for HOPG (highly oriented pyrolytic graphite) samples were done at temperatures down to 2 mK and in magnetic fields up to 14 T. Measured in-plane resistances increase logarithmically with decreasing temperature due to the electron-electron interaction in high fields and to weak localization in low fields. Also observed are quantum Hall-like plateaus in Hall resistance vs. magnetic field plot. This suggests the possible quantum Hall state realized in the quasi 2D electronic system in HOPG.

18 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. Magnetism in strongly correlated two dimensional systems:
 - (i) We have studied the magnetoresistance in a high-mobility Si-MOS sample down to low electron concentrations at which the longitudinal resistivity ρ_{xx} has an activated temperature dependence. The results indicate that a ferromagnetic instability does not occur even in the far insulating regime.
 - (ii) We have performed electron spin resonance measurements for a Si/SiGe quantum well. In the parallel magnetic field, we observed a negative change in ρ_{xx} , which is opposite of the effect of electron heating. It can be attributed to the reduction of the spin polarization.
 - (iii) We have investigated the magnetotransport in the strongly localized regime of GaAs 2D hole systems (2DHSs). Giant positive $B_{\perp}$ -dependence of ρ_{xx} at $T = 100$ mK was observed for $B_{\text{tot}} = 1$ T. We consider that it may be caused by the strong spin-orbit interaction in GaAs 2DHSs.
2. 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. The three following techniques have been applied: (i) Infrared illumination: We have found that odd-filling-factor QHE states at 4.2K are induced by infrared illumination. We have also observed that this anomalous state exhibits an extremely long relaxation time of more than 10 min. (ii) Spatial mapping of 1/f noise: We have developed a novel technique for imaging 1/f-noise distributions in quantum Hall systems. This imaging system has made it possible to reveal the existence of two different types of 1/f noises. (iii) Time-resolved measurement of Terahertz photoresponses: We have found that “multiple-trapping process” of photoexcited carriers leads to a strong photoresponse of a THz detector based on a quantum Hall device.
3. Heat flow in quantum Hall systems:

We have observed Ettingshausen effect in the IQHE breakdown regime. Electron temperature difference across the current channel has been measured using two miniature Hall bars.
4. Two dimensional electrons at a cleaved semiconductor surface:

Low temperature in-plane magnetotransport measurements have been performed on adsorbate-induced electron systems formed at *in-situ* cleaved surfaces of *p*-type InAs. The Ag-coverage dependence of the surface electron density strongly supports a simple model based on a surface donor level lying above the conduction band minimum. The observations of the quantized Hall resistance and zero longitudinal resistivity demonstrate the perfect two dimensionality of the surface electron system. We also observed the Rashba effect due to the strong asymmetry of the confining potential well. The Shubnikov-de Haas oscillations were also observed for cleaved surfaces of *p*-InSb.

19 Shimano Group

Research Subjects: Optical and Terahertz Spectroscopy of Condensed Matter

Member: Ryo Shimano and Shinichi Watanabe

Our research interests are light-matter interactions and many body quantum correlations in optically excited semiconductors and low dimensional systems such as carbon nanotubes, organic conductors. Our study focuses on the low energy electromagnetic responses in the region of several meV, i.e., terahertz frequency region where various collective excitations exist. We also aim at studying the ultrafast dynamics of photo-induced phase transition in those low dimensional systems by THz conductivity measurements. R. Shimano started working at Physics Department, University of Tokyo in March, 2004. S. Watanabe joined our group in August, 2004.

The research summary in this year is as follows.

1. Instrumental Developments

Rapid-scan terahertz time domain spectroscopy

Firstly, we have constructed a conventional terahertz time-domain spectroscopy setup. Optical rectification and electro-optic detection scheme is used for the THz generation and detection, respectively. Determination of dielectric function in the frequency range between 0.5 to 2.5THz has become possible. Secondly, we introduced a rapid scan system, by shaking the optical delay for the gate pulse of electro-optic sampling. As a result, the data taking period is drastically reduced, typically within 0.2sec for 20psec scan range, and the *real-time* indication of THz waveform become possible. The scheme allows us to eliminate the effect of long term fluctuation of laser light.

Terahertz Hall measurements

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. Recently, it has become possible to perform the magneto-optical measurements in THz frequency region. Because the phenomenon is equivalent to the high frequency ac Hall effect, the magneto-optical effect provides us deep insights into the dynamical properties of scattering processes of electrons under magnetic field. However, the magneto-optical signal, i.e., the polarization rotation and ellipticity of transmitted or reflected light is typically very small, of the order of mrad or less in the THz frequency regime. Accordingly, it is particularly important to develop a high sensitive detection scheme of polarization rotation and ellipticity. For this purpose, we have developed a scheme to control and modulate the circular polarization of a broadband THz pulse, which can be applied to high sensitive detection of circular dichroism in the THz region. The technique is based on the relative phase control of two THz pulses that are generated from optical rectification of ultrashort optical pulses in a ZnTe crystal. By changing the temporal separation of the optical pump pulses, continuous control of circular polarization from right to left is achieved in the frequency range from 0.3 to 2.5THz.

2. Terahertz spectroscopy of carbon nanotubes

Carbon nanotubes are considered as one of the candidate materials for one dimensional electron system. Various exotic behaviors in optical and transport phenomena have been observed, while the dynamical aspects of transport properties are open problems. In order to clarify this issue, and to reveal the one dimensional nature of nanotubes, we started the study of THz electromagnetic responses of nanotubes.

20 Theoretical Astrophysics Group

Research Subjects: Particle Astrophysics, Relativistic Astrophysics, Physics of Supernovae and High Density Matter, Observational Cosmology

Member: Katsuhiko Sato, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, & 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; 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 Gravitational Many-body Systems

21 Murao Group

Research Subjects: Quantum Information Theory

Members: 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 a nonlocal correlation that appears in certain types of quantum states (non-separable states) and has been considered as the fundamental resource for quantum information processing. In our group, we are investigating new properties of multiparticle and multi-level entanglement and the use of these properties as resources for quantum information processing. Our current projects are the following:

- *Entanglement convertibility for infinite dimensional pure bipartite states:* It is shown that the order property of pure bipartite states under SLOCC (stochastic local operations and classical communications) changes radically when dimensionality shifts from finite to infinite. In contrast to finite dimensional systems, where there are no pure incomparable states, the existence of infinitely many mutually SLOCC incomparable states is shown for infinite dimensional systems, even under the bounded energy and finite information exchange condition. These results show that the effect of the infinite dimensionality of Hilbert space, the “infinite workspace” property, remains even in physically relevant infinite dimensional systems.
- *Local copying and its relationship to local discrimination:* We obtain the necessary and sufficient conditions of a set of maximally entangled bipartite states in prime dimensional systems for creating two copies of a given unknown maximally entangled state drawn from the set, only using a known maximally entangled state and local operations and classical communications (LOCC). In prime dimensional systems, the set of the locally copiable maximally entangled states is equivalent to a subset of the canonical Bell states which are decomposable by simultaneous Schmidt decomposition. As a result of this, we show that local copying of the maximally entangled states is more difficult than local discrimination at least in prime dimensional systems.
- *Asymmetric qubit information sharing between two parties:* The necessary and sufficient conditions for deterministic extraction of qubit information encoded in bipartite states using only LOCC are presented. The conditions indicate that there is a way to asymmetrically share qubit information between two parties where one party’s qubit can be only used as a remote “quantum key” to fully recover the original qubit information at the other party. A communication protocol which allows conditional transmission of qubit information using the non-copyable quantum key is proposed.
- *Local state discrimination and multipartite entanglement measures:* We present necessary conditions for the local, perfect discrimination of general multipartite states in terms of the global robustness of entanglement, the relative entropy of entanglement and the geometric measure. These lead to an upper bound to the number of orthogonal multipartite states that can be locally discriminated exactly. The bound is explicitly found for pure bipartite states and is shown to be tight for a set of generalized m-party GHZ states, adding evidence that W-states are more ‘powerfully’ entangled than GHZ states for this kind of task. Some known results are proved in a unified way.
- *The transition to infinite dimensions:* We study how and when large spin systems can indeed be treated as bosonic systems in the approach from finite to infinite dimensions. The mathematical basis of this transition is group contraction. Many theoretical tools exist for infinite dimensional systems, which do not exist for large spin systems. We hope to use this to develop rigorous analogy of homodyne measurements and other continuous variable operations for spin systems and see when a system really behaves as infinite dimensional.
- *One-way quantum computation and graph states:* In the one-way quantum computer, the computation carried out is defined by the set of measurement commands, and the graph state. We investigate the relationship between the set of possible computations and the graph state and find a set of necessary conditions that the graph must satisfy to be consistent with a unitary computation. We hope to use this result to show how graph states can be used in cryptographic protocols.

22 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

23 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.

Instrumental Developments: We have developed X-ray instruments onboard the solar mission *Yohkoh* (1991 – 2002), and the cosmic X-ray mission *ASCA* (1993 – 2001). We have also completed the Hard X-ray Detector (HXD-II) [1] onboard *Astro-E2*, to be launched in June-July 2005. The HXD-II has an unprecedented sensitivity to cosmic hard X-rays in the 10–600 keV range, and is expected to innovate our knowledge on high-energy astrophysics. We also develop future X-ray and gamma-ray technologies, including hard X-ray imagers with Fourier-synthesis optics, and ceramic inorganic scintillators.

Solar and stellar flares: We study solar flares using the X-ray and γ -ray data acquired with *Yohkoh* [2], and employing Monte-Carlo simulations. Our research activities also cover thermal X-ray emission from stellar coronae, and thermal/non-thermal radiations from their flares.

Physics of Neutron Stars: When a weakly magnetized neutron star accretes matter from its binary companion, optically-thick X-rays are emitted from its surface as well as the accretion disk around it. We have discovered that significant mass outflows take place when the mass accretion rate exceeds the critical value. Strongly magnetized neutron stars exhibit electron cyclotron resonance features in their spectra, which have enabled us to accurately measure their magnetic field intensities.

Physics of Black Holes: We are reinforcing our novel view, first obtained with *ASCA*, that “ultra-luminous compact X-ray sources” (ULXs) seen in nearby galaxies are massive ($\sim 100 M_{\odot}$) stellar black holes under very high mass accretion rates [3]. We are constructing a unified description of high-accretion-rate black holes, including ULXs, ordinary black-hole ($\sim 10 M_{\odot}$) binaries, and Narrow-Line type 1 Seyfert galaxies ($\sim 10^6 M_{\odot}$).

Plasma Heating and Particle Acceleration in the Inter-Stellar Space: The inter-stellar space of our Galaxy, and those of other spiral galaxies [4], is filled with enigmatic diffuse hard X-ray emission which may be a composite of thermal and non-thermal signals. We have detected thermal and/or non-thermal diffuse X-rays from several globular clusters. The emission may arise when the clusters move through the Galactic halo and interact with the halo plasma.

Physics of Cluster of Galaxies: The X-ray emitting hot plasmas associated with clusters of galaxies constitute the most dominant known baryonic component in the universe. We have established with *ASCA* and *XMM-Newton* that these plasmas exist in the form of two-phase (hot and cool) media, and their radiative cooling is somehow suppressed. We attempt to explain these puzzles by invoking a magnetic field configuration like that of the solar corona. Then, kinetic energies of the member galaxies may be dissipated on the plasma by exciting magnetohydrodynamical turbulence, resulting in their continuous infall toward the cluster center.

1. Kokubun, M., Abe, K., Ezoe, Y., Fukazawa, Y., Hong, S., Inoue, H., Itoh, K., Itoh, T., Kasama, D., Kawaharada, M., *et al.*: “Improvements of the *ASTRO-E2* Hard X-ray Detector (HXD-II)”, *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **51**, 1991 (2005)
2. Matsumoto, Y., Makishima, K., Kotoku, J., Yoshimori, M., Suga, K., Kosugi, T., Masuda, S. & Morimoto, K.: “A Statistical Study of Gamma-Ray Emitting Solar Flares Observed with *Yohkoh*”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **57**, 211–210 (2005)
3. Miyawaki, R., Sugihara, M., Kokubun, M. & Makishima, K.: “*Chandra* Observation of Luminous Sources in the Nearby Irregular Galaxy NGC 4449”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **56** 59 (2004)
4. Takahashi, H., Okada, Y., Kokubun, M. & Makishima, K.: “*XMM-Newton* and *Chandra* Observations of the Central Region of M31”, *Astrophys. J.* **615**, 242 (2005)

24 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, Syun'ichi Shiraiwa, Kenichi Yamagishi

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 an international burning plasma experiment is ready to be constructed. 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 (defined as the ratio of the plasma pressure to the confining magnetic pressure), several times greater than the conventional tokamak. High beta plasma research using the ST approach is a rapidly developing field worldwide, and is being carried out in our group using the TST-2 spherical tokamak.

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) located on the inboard side of the torus. Several approaches are being investigated on TST-2. TST-2 was temporarily relocated to Kyushu University in 2003 in order to take advantage of the powerful microwave power (200 kW at 8.2 GHz). An ST plasma with a plasma current of 4 kA was successfully produced and maintained for 0.3 sec by microwave power. Magnetic reconstruction of this plasma indicated the existence of plasma current outside the last closed flux surface.

ST plasmas have very high dielectric constants compared to conventional tokamaks, and therefore, methods to diagnose, heat and drive current using different waves, such as the electron Bernstein wave (EBW) and the high harmonic fast wave (HHFW), must be developed. EBW heating based on the X-B mode conversion scenario was investigated. Over 100 kW of RF power was successfully injected into the plasma. Although some indications of heating were observed, only a small fraction (10–20%) of the injected power seemed to have contributed to heating. Possibilities of power loss at the plasma edge are being considered.

TST-2 is now located in a new experimental building on the Kashiwa Campus. Numerous improvements have been implemented, and it is now ready to start experiments with improved capabilities.

Collaborations

A completely CS-less plasma current start-up to 100 kA was achieved on the JT-60U tokamak at Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), using the same scenario as TST-2. The plasma current was generated even without a field null (where the poloidal magnetic field is zero), contrary to conventional belief. However, a strong ionization source, in this case by 1 MW of RF power, is required. A plasma current of 260 kA was maintained for 1 s by neutral beam current drive and self-driven bootstrap current alone. A ramp-up of plasma current from 215 to 310 kA was also achieved. An indication of bootstrap current overdrive was observed, as evidenced by a recharging of the CS. In a future experiment, plasma current ramp-up by bootstrap overdrive will be attempted.

Both coherent and turbulent fluctuations were studied on the JFT-2M tokamak at JAERI using three diagnostics: fast reciprocating Langmuir probes, two channels of reflectometers, and fast magnetic probes. A large scale coherent potential fluctuation around 10 kHz, observed last year, was identified as the Geodesic Acoustic Mode (GAM). Analysis showed that the bicoherence of the GAM fluctuations scaled as the squared envelope of the GAM fluctuations, as expected from theory.

Electron heating by HHFW was investigated on the Large Helical Device at the National Institute for Fusion Science. Central electron heating to 3.3 keV was observed when the starting electron temperature was 2.5 keV. However, no heating was observed when the starting temperature was 2.0 keV. This result is not inconsistent with the requirement to satisfy the Landau resonance condition for the wave to be absorbed effectively.

A collaboration on the NSTX spherical tokamak (Princeton Plasma Physics Laboratory) on CS-less start-up is also being carried out.

25 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, $h \sim 3 \times 10^{-21}/\sqrt{\text{Hz}}$ 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. We are now analyzing the obtained data searching for the gravitational waves from coalescing binaries, supernovae and pulsars.

We summarize the subjects being studied in our group.

- Laser interferometric gravitational wave detectors
 - Current status of TAMA project
 - Search for burst gravitational waves
 - Search for gravitational waves from SN1987A
 - Systematic analysis of TAMA monitoring signal
 - Study of the next-generation laser interferometer, LCGT
- Space laser interferometer
 - Space laser interferometer DECIGO
 - FP-DECIGO
- Study of thermal noise
 - Direct measurement of the thermal noise
 - Thermal noise caused by the inhomogeniously distributed loss
- Study of the precise measurement
 - Suspension point interferometer for vibration isolation
 - Development of the low-frequency vibration isolation system (SAS)
 - New vibration isolation system using magnetic levitation
 - Laser stabilization using optical fiber
 - Test of the law of gravitation at extremely small distance

references

- [1] Y. Aso, M. Ando, K. Kawabe, S. Otsuka and K. Tsubono: Stabilization of a Fabry Perot interferometer using a suspension-point interferometer, Phys. Lett. A **327** (2004) 1.
- [2] K. Numata, K. Yamamoto, H. Ishimoto, S. Otsuka, K. Kawabe, M. Ando, and K. Tsubono: Systematic measurement of the intrinsic losses in various kinds of bulk fused silica, Phy. Lett. A **327** (2004) 263.
- [3] M. Ando, *et al*: Observation results by the TAMA300 detector on gravitational wave bursts from stellar-core collapses, Phy. Rev. D **71** (2005) 082002.

26 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. Y. Kobayashi and M. Sano: Anomalous Collective Diffusion in One-dimensional Driven Granular Media, J. Phys. Soc. Jpn, 73, 2697-2700 (2004).
2. L.C. Jia, M. Sano, Pik-Yin Lai, and C.K. Chan: Connectivities and Synchronous Firing of Cortical Neural Networks, Phys. Rev. Lett. 93, 088101 (2004).
3. Fukatsu, K., Bannai, H., Zhang, S., Nakamura, H., Inoue, . and Mikoshiba, K.: Lateral diffusion of inositol 1,4,5-triphosphate receptor type 1 is regulated by actin filaments and 4.1N in neuronal dendrites, J. Biol.Chem. 279 ,48976-48982 (2004).
4. T. Mashiko, Y. Tsuji, T. Mizuno, and M. Sano: Measurement of Velocity Field in Thermal Turbulence in Mercury by Ultrasonic Doppler Method, Theor. Appl. Mech. Jpn. 53, 207-214 (2004).
5. Y. Tsuji, T. Mizuno, T. Mashiko, and M. Sano: Mean Wind in Convective Turbulence of Merccury, Phys. Rev. Lett. 94, 034501 (2005).
6. H. Wada: Electroviscous effects of simple electrolytes under shear, J. Stat. Mech. -Theor. & Exp. P01001 (2005).
7. Y. Murayama and M. Sano: Exchange of Counterions in DNA Condensation, Biopolymers 77, 354-360 (2005).
8. S. Toyabe and M. Sano: Spatial Suppression of Error Catastrophe in a Growing Pattern, Physica D 203,1 (2005).

27 Yamamoto Group

Research Subjects: Submillimeter-wave Astronomy, Physical and Chemical Evolution of Interstellar Molecular Clouds, Laboratory Spectroscopy of Interstellar Molecules

Member: Satoshi Yamamoto & 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. With this in mind, we are studying submillimeter-wave astronomy as well as the laboratory microwave spectroscopy, as described below.

Our group is running the Mt. Fuji submillimeter-wave telescope in order to explore formation processes, detailed structure, and chemical evolution of molecular clouds. The main reflector of the telescope has a diameter of 1.2 m, and the telescope is enclosed in a space frame radome with a Gore-Tex membrane. We have developed a superconductor mixer receiver with high sensitivity for this telescope to observe the spectral lines of the atomic carbon (CI) ($^3P_1 - ^3P_0$ 492 GHz; $^3P_2 - ^3P_1$ 809 GHz). The telescope system was installed at the summit of Mt. Fuji (el. 3700 m) in July 1998, and we started astronomical observations from November 1998 in a remote way by using a commercial satellite communication system. The Mt. Fuji submillimeter-wave telescope is being operated as a research project of Research Center for the Early Universe (RESCEU) in collaboration with researchers of National Astronomy Observatory, National Space Development Agency, and Fukui University.

With this telescope, we are conducting large scale mapping observations of the 492 GHz line of CI toward a number of molecular clouds in our Galaxy. Until now we have observed various sources including dark clouds, giant molecular clouds and translucent clouds. Total observing area is more than 50 square degrees, which is the largest survey of the CI line so far made. Furthermore, a few representative clouds (Orion A, Orion B, M17, and DR21) have been mapped with the 809 GHz line of CI. By comparing the CI distribution with the CO distribution, we are studying formation and evolution of molecular clouds in detail.

In addition, our group has developed the portable 18 cm submillimeter-wave telescope (POST18). The main purpose of this telescope is a survey of the CI 492 lines over the Milky Way. In 2002, we accomplished the first observation of the CI line with this telescope at the Pampa la Bola site (alt. 4800 m) in Chile. In 2003, we have successfully conducted the CI line observation toward the southern Milky Way. With the result, we are studying formation and evolution of molecular clouds in the galaxy scale.

Furthermore, we are developing a hot electron bolometer (HEB) mixer that can be used at 1.5 THz for a survey of the NII fine structure line. For this purpose, we have newly introduced an electron beam lithography system and a mixer fabrication system in our

laboratory. With these equipments, we fabricated a diffusion-cooled type HEB mixer using Nb as a superconductor material, and confirmed that this mixer shows a good response at 800 GHz. We are also developing a phonon-cooled type HEB mixer using NbTiN.

- [1] T. Oka, M. Iwata, H. Maezawa, M. Ikeda, et al. “Submillimeter-wave CI Spectral Lines from the NGC1333 Region”. *The Astrophysical Journal* **602**, 803 (2004)
- [2] T. Oka, K. Kamegai, M. Hayashida, M. Nagai, M. Ikeda, N. Kuboi, K. Tanaka, L. Bronfman, & S. Yamamoto, “Atomic Carbon in the Milky Way”, *The Astrophysical Journal*, **623**, 889-896 (2005)

28 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 2004 are as follows:

(1) Enhancement of molecular orientation with combined electrostatic and intense, nonresonant laser fields

We have already succeeded in the proof-of-principle experiments of one-dimensional and three-dimensional orientation of molecules with combined electrostatic and intense, nonresonant laser fields. However, it is indispensable to further increase the degree of orientation in order to use a sample of oriented molecules in applications. In the last academic year, we designed a new apparatus where a higher electrostatic field can be applied. With the help of detailed simulations of ion trajectories, we paid special attention to the design of the electrodes and their surroundings so that the fragment ions arrive at the detector in a correct manner.

In this academic year, after we constructed the apparatus and confirmed that it worked as expected, the experiments to enhance the degree of molecular orientation are ongoing. With a sample of OCS molecules diluted (5%) with He gas, a backing pressure of 10 atm., an electrostatic field of 4.4 kV/cm, and a laser peak intensity of 1.7×10^{12} W/cm², we have already succeeded in achieving higher degree of orientation than that achieved in the proof-of-principle experiments. Although the laser peak intensity, which was limited by the damage threshold of the polarizing beamsplitter cube, was only 2/3 of that used in the proof-of-principle experiments, the achieved higher degree of orientation shows the efficacy of a higher electrostatic field than that used in the proof-of-principle experiments by more than one order of magnitude. We aim to further enhance the degree of orientation by increasing the laser peak intensity up to around 2.6×10^{12} W/cm².

(2) Controlling high-order harmonic generation from nonadiabatically aligned molecules

A sample of aligned molecules is an ideal quantum system to investigate the quantum phenomena associated with molecular symmetries. This is illustrated by HHG from aligned molecules. Here, we employ the nonadiabatic alignment technique to align molecules with a relatively high rotational temperature of several tens K. We introduce a novel methodology that we observe both ion yields and harmonic signals under the same experimental conditions. Thereby, we can disentangle the contributions from each step in the three-step model for HHG from molecules.

Some of the major results obtained so far are as follows: (1) We confirm that high-order harmonic generation characteristics reflect the symmetry of the HOMO of the sample molecule. (2) Characteristic modulation patterns of both ion yields and harmonic signals measured as a function of the pump-probe delay are successfully explained by our original formulae determined by the valence orbital of the molecules.

(3) As the most remarkable result, we report the first demonstration of quantum interference of electron de Broglie waves evidenced by HHG from aligned CO₂ molecules. (4) In order to explain the destructive interference observed for CO₂ molecules, we successfully extend the two point emitters model, which was originally proposed for a diatomic molecule, to a triatomic molecule. (5) We propose that simultaneous observations of both ion yields and harmonic signals can serve as a new route to probe the instantaneous structure of the molecular systems.

- [1] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, Tsuneto Kanai, and Hirofumi Sakai, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 133005 (2004).
- [2] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, *Appl. Opt.* **43**, 6047-6050 (2004).
- [3] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, *Nature* **435**, 470-474 (2005).

29 Kuwajima Group

Research Subjects: Protein Folding, Molecular Chaperones, Protein Stability, Physicochemical Studies of Biological Macromolecules

Member: Kunihiro Kuwajima, Kosuke Maki, & Kimiko Saeki

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 a biological cell. To this end, we are using various physicochemical, protein engineering, and computational techniques, including rapid reaction techniques, mutational analysis, and molecular dynamics simulations.

To investigate whether the structure partially formed in the molten globule folding intermediate of goat α -lactalbumin is further organized in the transition state of folding, we constructed a number of mutant proteins and performed Φ -value analysis on them. We studied the equilibrium unfolding transitions and kinetic refolding and unfolding reactions of the mutants using equilibrium and stopped-flow kinetic circular dichroism techniques. The results have indicated that the folding nucleus in the transition state of goat α -lactalbumin is not extensively distributed over the α -domain of the protein, but very localized in a region that contains the Ca^{2+} -binding site and the interface between the C-helix and the β -domain. It is concluded that the specific docking of the α - and β -domains at a domain interface is necessary for this protein to organize its native structure from the molten globule intermediate.

We investigated the kinetic refolding of a mutant (F99S/M153T/V163A) of green fluorescent protein, which is known to mature more efficiently than the wild-type protein, from the acid-denatured state; refolding was observed by chromophore fluorescence, tryptophan fluorescence, and the far-UV circular dichroism, using a stopped-flow technique. In this study, we demonstrated that the kinetics of the refolding of the mutant have at least five kinetic phases, and involve nonspecific collapse within the dead time of a stopped-flow apparatus and the subsequent formation of an on-pathway intermediate with the characteristics of the molten globule state. We also demonstrated that the slowest phase and a major portion of the second slowest phase were rate-limited by slow prolyl isomerization in the intermediate state, and this rate limitation accounts for a major portion of the observed kinetics in the folding of green fluorescent protein.

- [1] K. Saeki, M. Arai, T. Yoda, M. Nakao & K. Kuwajima: Localized nature of the transition-state structure in goat α -lactalbumin folding. *J. Mol. Biol.* (2004) **341** 589-604.
- [2] S. Enoki, K. Saeki, K. Maki & K. Kuwajima: Acid denaturation and refolding of green fluorescent protein. *Biochemistry* (2004) **43** 14238-14248.

30 Nose Group

Research Subjects: 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 are now conducting functional analyses of some of these genes, in particular, those encoding transmembrane or secreted proteins.

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

2004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 ローレンツ短縮

2.6 時間のパラドクス

2.7 スカラー、ベクトル、テンソル

2.8 質点の相対論的運動方程式

3. 相対論的運動

3.1 エネルギーと運動量

3.2 重心系 (CMS) 座標

3.3 粒子生成の閾値

3.4 粒子崩壊の運動学

4. 電場

4.1 動いている電荷

4.2 異なる座標系での電場

4.3 動いている電荷に働く力

4.4 動いている電荷どうしに働く力

5. 磁場

5.1 磁場の性質

5.2 ベクトルポテンシャル

5.3 電磁場の変換則

5.4 ローレンツ力とローレンツ変換

6. 電磁誘導とマックスウエルの方程式

6.1 電磁誘導

6.2 静電磁気学の適応限界

6.3 電磁場に蓄えられたエネルギー

6.4 変位電流

6.5 マックスウエルの方程式

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

8. 電磁気学の相対論的形式

8.1 4元ポテンシャルとローレンツゲージ

8.2 電磁場テンソルとマックスウエル方程式の4元形式

8.3 相対論的粒子の Lagrangian と Hamiltonian

8.4 電磁場の Lagrangian Density

8.5 電磁気学Ⅱ、電気力学、量子電磁力学への展望

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. 場のラグランジュ方程式

連成振動子, 電磁場のラグランジアン

5. ハミルトンの正準方程式

6. 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

7. 前期量子論

古典力学の限界, ボーアの対応原理

8. シュレディンガー方程式

物質波, 波動関数の意味

9. 演算子とヒルベルト空間

状態と演算子の表示, 時間発展

10. ハイゼンベルグ方程式

シュレディンガー表示とハイゼンベルグ表示

11. 観測と状態

偏光との対応, 位置・運動量の観測

12. 調和振動

磁場中の荷電粒子, 振動する場の量子化

1.1.3 物理数学 I : 村尾 美緒

1. Complex analysis

1.1 Complex numbers

1.2 Derivative and analytic functions

1.3 Geometry of analytic functions

1.4 Basic complex functions

1.5 Complex integration

1.6 Series

1.7 Laurant series and Residue theorem

2. Differential equations

2.1 Lipschitz condition

2.2 Elementary methods for differential equations (Quadrature)

2.3 Second order linear differential equations

3. Fourier analysis and Laplace transforms

3.1 Fourier analysis

3.2 Laplace transforms

1.1.4 物理実験学 : 福山 寛、早野 龍五

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 基礎物理定数

2.3 秒

2.4 メートル

2.5 アンペア

2.6 キログラム

キログラム原器、ジョセフソン効果、量子ホール効果、プランク定数の関係

3. 実験環境の実現とその計測

3.1 真空

気体分子運動論、種々の真空ポンプ、真空度の測定法

3.2 極低温

熱力学温度、極低温の生成法、各種の温度計

3.3 強磁場

強磁場の発生法、強磁場の応用

4. 標準模型の実験的基礎

4.1 標準模型

4.2 放射線の発見

4.3 陽電子の発見

4.4 反陽子の発見

4.5 W ボソンの発見

4.6 基礎知識

相対論的運動学、重要な数値、サイクロトロン運動、宇宙線、霧箱、荷電粒子の物質中でのエネルギー損失、電子の物質中でのエネルギー損

失、光子と物質の相互作用、加速器の必要性、
静電加速器、サイクロトロン、シンクロトロン、
断面積と平均自由行程

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

5. 誤差論

5.1 実験誤差

5.2 種々の確率統計

5.3 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

6. 実験レポートの書き方

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 光学の研究の歴史

1.2 幾何光学、波動光学、電磁光学

2. 光の伝播

2.1 平面波の伝播

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 限られた空間での伝播（導波管と薄膜導波路）

2.6 光ビーム

3. 偏光

3.1 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 波面分割による干渉

4.2 振幅分割による干渉

4.3 鮮鋭度（Visibility）

4.4 準単色光の干渉

4.5 van Cittert and Zernike の定理

4.6 開口合成

4. 回折

4.1 Huygens の原理

4.2 Fresnel-Kirchhoff の回折理論

4.3 Fraunhofer 回折と Fresnel 回折

1.2.2 量子力学 II：小形正男

1. 3次元のシュレディンガー方程式

1.1 演算子

1.2 調和振動子（復習を兼ねて）

1.3 Laplacian

1.4 角運動量

1.5 球面調和関数

1.6 ルジャンドル多項式と直交性

1.7 軌道

1.8 直交性とエルミート演算子

1.9 動径方向とラゲール多項式

1.10 水素原子

2. スピンと角運動量

2.1 昇降演算子

2.2 角運動量の代数と行列表示

2.3 スピン

2.4 スピンの行列表示

2.5 磁場中の Larmor 歳差運動

2.6 角運動量の合成**2.7 実空間での回転****2.8 Stern-Gelrach の実験****3. 摂動論****3.1 時間に依存しない摂動****3.2 縮退のある場合****3.3 時間に依存する摂動****3.4 フェルミの Golden rule****4. 準古典近似****4.1 $\hbar$ 展開****4.2 Bohr-Sommerfeld の量子化****4.3 調和振動子の場合****4.4 ポテンシャル障壁****5. 量子力学における対称性****5.1 対称性とは****5.2 全運動量とエネルギー保存則****5.3 回転対称性と角運動量****5.4 いろいろな対称性****5.5 パリティと選択則****5.6 時間反転対称性**

おまけ. ファインマンの経路積分による量子力学

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 : 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

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 (分子軌道法、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 (Fermi 面、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 エネルギー方程式

1.5 粒子の方程式から流体の方程式へ

1.6 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

1.3.5 現代実験物理学 II : 坪野公夫、酒井英行

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. 放射線検出器

- 5.1 検出原理
- 5.2 荷電粒子の電離損失、飛程、多重散乱、輻射長
- 5.3 光電効果、コンプトン散乱、電子陽電子対生成、制動放射、電磁シャワー
- 5.4 中性子と物質との相互作用
- 5.5 チェレンコフ放射
- 5.6 例： π 中間子の発見、陽電子の発見、反陽子の発見

6. 放射線測定器

- 6.1 ガス検出器の原理
- 6.2 ガイガーカウンター、比例計数管、MWPC、ドリフトチェンバー
- 6.3 シンチレーション検出器、光電子増倍管
- 6.4 半導体検出器、ファノ因子

7. 加速器

- 7.1 静電加速器
- 7.2 サイクロトロン、ビーム収束の原理
- 7.3 シンクロトロン
- 7.4 ビーム衝突型加速器

8. 実験装置

- 8.1 粒子の識別
- 8.2 磁気分析装置、質量分析と運動量分析

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 散乱振幅と断面積

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 蛋白質・核酸の構造

1.2 遺伝情報の流れ

1.3 エネルギーの流れ

1.4 酸，塩基，緩衝液

2. 蛋白質

生命現象における蛋白質の役割、蛋白質のフォールディング問題

3. 蛋白質の化学構造と立体構造

3.1 アミノ酸の特性と蛋白質の化学構造

3.2 蛋白質の立体構造

4. 蛋白質立体構造の安定化因子

4.1 静電相互作用，van der Waals 相互作用，水素結合

4.2 水の性質と疎水性相互作用

4.3 電解質溶液中での静電相互作用

5. 蛋白質の熱力学的安定性

蛋白質のアンフォールディング転移，二状態モデル

6. 遺伝子操作による生命現象の解析

組み替え DNA 技術発展の歴史、遺伝子クローニングの流れ、生体における分子の機能解析、ゲノム時代の生物物理

7. バイオイメーjing

種々の顕微鏡による観察法、レーザー顕微鏡、蛍光蛋白質による生体内可視化

8. 脳神経系の構成と機能

神経回路とは、神経系における情報処理、神経系の可塑性と記憶

9. 神経系における信号の生成と伝達機構

神経膜電位，活動電位（神経インパルス）の生成機構，ホジキン・ハクスレー方程式

1.3.8 統計力学 II : 青木 秀夫

1. 相転移

1.1 秩序パラメータと対称性の破れ

1.2 二次相転移と Ginzburg-Landau 理論

2. 相互作用系の統計力学

2.1 多体問題 — スピン系と電子系

2.2 平均場近似

2.3 Bose 気体と Fermi 気体（ボース凝縮、フェルミ縮退、超伝導）

3. 非平衡統計力学への序論

3.1 輸送現象（Boltzmann 方程式）

3.2 線形応答理論

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・櫻井 博儀

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 原子核の集団運動

5.3 エキゾチック原子核と魔法数の喪失

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 パイコね変換

1.4.4 生物物理学特論：宮下保司、能瀬聡直

- 1. 生体システムとしての脳
 - 1.1 脳・神経システム概論
 - 1.2 視覚システム

眼球の構造と網膜、精神物理学の計測、大脳一次視覚野と機能円柱、不良設定問題と協力現象、大脳高次視覚野と主観的知覚、心身二元論と因果性（主観的現象を客観的に研究する方法）
 - 1.3 記憶システム

記憶のモデル、記憶障害、記憶ニューロンと意味ネットワーク、記憶の認知制御
 - 1.4 脳活動の物理的計測

さまざまな脳活動計測法、MRI の原理、機能的 MRI の生物学的基礎、データ解析法
- 2. 分子・細胞レベルからのアプローチ
 - 2.1 序論
 - 2.2 シナプス伝達機構

シナプス小胞と量子仮説、神経伝達物質放出機構、神経伝達効率の量子解析、パッチクランプ法
 - 2.3 シナプス可塑性

短期可塑性、長期増強（LTP）と長期抑圧（LTD）、ヘブ則、シナプス可塑性にもとづく記憶モデル、長期増強の分子機構、形態可塑性
 - 2.4 神経回路網形成機構

神経軸索誘導機構、神経標的認識とシナプス形成、発達可塑性：活動依存的神経回路形成

1.4.5 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 Doppler 広がり****1.11 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 発振条件****4.3 各種のレーザー****4.4 3 準位レーザーと 4 準位レーザー****4.5 固体レーザー****4.6 気体レーザー****4.7 色素レーザー****4.8 半導体レーザー****1.4.6 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****1.4.7 一般相対論 : 須藤 靖****1. 特殊相対論****1.1 Newton 力学と Galilei の相対性原理****1.2 Maxwell 方程式と Galilei 変換****1.3 光速度不変の原理と Lorentz 変換****1.4 Minkowski 時空****1.5 Minkowski 時空の性質****1.6 Minkowski 時空におけるスカラー、ベクトル、テンソル****1.7 物理法則の共変形式****2. 一般相対性原理とその数学的表現****2.1 特殊相対論の限界****2.2 一般相対論の概念構成**

2.3 物理量はテンソルである:物理学の幾何学化**2.4 平行移動と共変微分****2.5 一般のテンソルの (共変) 微分****2.6 リーマン接続とクリストッフェル記号****2.7 平行移動とリーマンの曲率テンソル****2.8 まとめ: 物理量とテンソル****3. 測地線方程式****3.1 重力場のもとでの粒子の運動方程式****3.2 Newton 理論との対応****3.3 接続係数とゲージ相互作用: $\Gamma_{\alpha\beta}^{\mu}$ と A^{μ}** **4. 重力場の方程式****4.1 Mach の原理****4.2 エネルギー運動量テンソル****4.3 Einstein 方程式への道****4.4 Newton 理論との対応****4.5 宇宙定数****4.6 変分原理による定式化****5. 相対論的宇宙モデル****5.1 宇宙原理と宇宙の一様等方性****5.2 Robertson – Walker 計量の幾何学的性質****5.3 アインシュタイン方程式からフリードマン方程式へ****5.4 フリードマン宇宙モデル****5.5 宇宙定数とダークエネルギー****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 Schwarzschild black hole****6.4 一般相対論の検証****6.5 Schwarzschild black hole のまわりの質点の運動****6.6 Black hole は観測できるか? Eddington 光度****1.4.8 固体物理学 I : 常行 真司****1. 固体 (結晶) の特徴****1.1 力学的性質****1.2 熱力学的性質****1.3 光学的性質****1.4 電氣的性質と相転移****1.5 誘電的性質と相転移****1.6 磁氣的性質と相転移****2. 結晶構造と対称性****2.1 並進対称性****2.2 単位格子****2.3 7 個の結晶系****2.4 14 個のブラベー格子****2.5 結晶点群****2.6 空間群****2.7 結晶の方位と面****2.8 結晶の対象性と物理的性質: ノイマンの原理****3. 周期系と波の回折****3.1 物質による波の散乱****3.2 散乱強度とパターン関数****3.3 周期系の散乱強度分布****3.4 逆格子****3.5 周期系の散乱条件 (ラウエの条件)****3.6 エバルトの作図法****3.7 逆格子ベクトルとミラー指数****3.8 ブラッグの反射条件****3.9 ブリリュアン・ゾーン****3.10 原子散乱因子と構造因子****3.11 X線回折実験法のいろいろ****3.12 波長とエネルギー****3.13 特性X線****4. 固体の凝集機構****4.1 交換斥力****4.2 イオン結合**

- 4.3 イオン結合の静電エネルギー
- 4.4 イオン半径と配位数
- 4.5 共有結合
- 4.6 共有結合からイオン結合へ
- 4.7 金属結合
- 4.8 水素結合
- 4.9 分子結合（ファン・デル・ワールス結合）
- 5. 共有結合
 - 5.1 水素分子イオン
 - 5.2 水素分子 (1) : ハイトラー-ロンドンの理論
 - 5.3 混成軌道と共有結合の異方性
 - 5.4 水素分子 (2) : 分子軌道法
 - 5.5 Hartree-Fock 法と CI 法
 - 5.6 単純化した LCAO-MO 方による分子の取り扱い
- 6. 固体の電子状態

- 6.1 ブロッホの定理
- 6.2 強束縛近似
- 6.3 エネルギーバンドと電子数
- 6.4 自由電子ガス
- 6.5 弱い周期ポテンシャル中の電子
- 6.6 半導体のバンド構造
- 7. バンド構造と物性
 - 7.1 バンド構造と電子の運動
 - 7.2 有効質量
 - 7.3 正孔
 - 7.4 電気伝導
 - 7.5 交流電気伝導
 - 7.6 電子気体の比熱
 - 7.7 電子気体の熱伝導
 - 7.8 半導体

1.5 4 年生 冬学期

1.5.1 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

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
- 3.6 強い相互作用のゲージ理論

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ピボ角
- 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 C P 対称性を破る訳
- 4.5 B 中間子と B ファクトリー

4. ニュートリノ

- 4.1 ニュートリノの質量
- 4.2 ニュートリノのフレーバー振動

1.5.2 固体物理学 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、

1.5 熱膨張

1.6 熱伝導

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

1.5.3 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ル

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 宇宙の始まり****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****5.8 新しい標準宇宙像****1.5.4 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

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 和達三樹教授 : 紫綬褒章

2004 年 4 月 29 日 春の褒章発令において、和達三樹 物理学教室教授が紫綬褒章を受章されました。

和達三樹教授は物性基礎論・統計物理学の分野で先駆的、独創的な研究を行ってきました。とくに非線形現象を中心に研究を進め、物理学における厳密に解ける模型（可解模型）の統一的理論を構成しました。まず非線形発展方程式の初期値問題を解く手法として逆散乱法と呼ばれる手法を拡張し、いくつかの模型を厳密に解くことに成功しました。さらに逆散乱法とベックルンド変換との関係、それらを用いた保存則の導出を行い、ソリトン概念の確立を含めて世界的に優れた業績を次々にあげました。また逆散乱法を量子系、統計力学系に拡張した量子逆散乱法を作り上げ、これを用いて完全可積分性や無限個の可解模型が存在することの証明に成功しました。新たに統計力学における量子転送行列法と呼ばれる方法の開発も行いました。

数学と物理学との接点に関する研究として、統計力学における可解模型と数学における結び目理論との関係を明らかにしました。この研究は Jones による絡み目多項式の発見とほぼ同時であり、絡み目多項式は無限個あることの証明にも成功しました。

以上のように物性基礎論・統計物理学における和達教授の先駆的な功績は国内外で高く評価されています。さらに日本物理学会の運営などにおいても大きな貢献をされました。

2.2 樽茶清悟教授 : 紫綬褒章

2004 年 4 月 29 日 春の褒章発令において、樽茶清悟 物理学教室教授が紫綬褒章を受章されました。

樽茶清悟教授は、高度な微細構造作成技術を駆使することによって、半導体の中に理想的な 2～0 次元構造を人工的に作り、種々の量子現象、電子相関効果の研究を先駆的に進めてきた。第 1 に、ナノスケールの幅に電子を閉じこめた十分に長い 1 次元量子細線を作成して、電気伝導のコンダクタンスがべき的溫度依存性を示すことを見出した。この結果は朝永－ラッティンジャー液体の特徴を初めて実験的に捉えたものである。第 2 に、ナノスケールの円盤中に電子を閉じこめた「人工原子」を実現し、原子に類似の基本則（殻構造とフント則）の存在を検証した。また、人工原子に閉じこめられた少数電子系の励起状態の測定法を確立し、これを用いて、電子相関に起因して強磁場中で実現する、さまざまな状態遷移の詳細を明らかにした。第 3 に、人工原子を複数並べた人工分子を開発した。さらに、磁場や電場の関数として、人工原子、分子中のスピン状態を厳密に制御できる手法を開発し、これを利用して電気伝導におけるパウリの排他律効果を実証するとともに、軌道縮退の関与する近藤効果、ユニタリ極限での近藤効果など、典型的なスピン相関現象である近藤効果の新しい特徴を発見した。これらの研究は、物性物理学に対して普遍的な知見をもたらすとともに、量子計算機などへの応用面での可能性を大きく広げたことでも国際的に高く評価されている。

2.3 小林孝嘉教授 : 時間分解振動分光学会賞

小林孝嘉教授は、International Conference on Time-resolved Spectroscopy において、「振動分光の永年にわたる多くの重要な学問的貢献」に対して、時間分解振動分光学会賞を授与された。世界最短可視光パルスレーザの開発とそれを用いた分子の超高速動力学、特に分子振動を実時間的に測定し、これまで極めて

困難あるいは不可能と考えられていた凝縮系の遷移状態における遷移状態の測定を可能にし、遷移状態分光の確立に貢献した。

2.4 須藤靖助教授 : 第9回日本天文学会林忠四郎賞

須藤靖助教授は第9回日本天文学会林忠四郎賞を受賞された。近年の観測技術の飛躍的發展を背景として、須藤靖氏は、観測的宇宙論の重要な成果を次々とあげてきた。宇宙マッハ数の提唱、X線銀河団の個数密度を用いた宇宙論パラメータ決定、サブミリ波領域での銀河団のSZ効果マッピング、暗黒物質ハローの密度プロファイルの高分解能数値シミュレーション、SDSS銀河・クエーサーによる宇宙大構造の研究など、銀河および銀河団を用いた観測的宇宙論の須藤靖氏の系統的研究は特によく知られている。理論をベースとしながら観測も行うという、独自の研究スタイルにより、世界的に顕著で独創的な業績をあげてきたことが評価されて今回の受賞となった。

2.5 長谷川修司助教授 : 日本顕微鏡学会学会賞（瀬藤賞）

長谷川修司助教授が、「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」により日本顕微鏡学会の第50回学会賞（瀬藤賞）を受賞された。長谷川研究室で長年かけて開発してきた4探針走査トンネル顕微鏡（STM）、およびそれを利用したマイクロ4探針プローブ法による表面・ナノ構造の電気伝導特性の研究が評価された。この一連の研究により、結晶表面上の1原子層や原子鎖の電気伝導度を測定することが可能となり、ナノメータスケール構造体の伝導物性研究および応用研究に重要な進展をもたらした。

2.6 角野秀一助手（相原研究室） : 第6回高エネルギー物理学奨励賞

“Measurement of $|V_{ub}|$ using inclusive $B \rightarrow X_u \ell \nu$ Decays with a Novel X_u -Reconstruction Method.”

Belle測定器で記録された $B \rightarrow X_u \ell \nu$ 事象を選別し、CKM行列の最も小さい要素 V_{ub} の大きさを求めた研究である。B中間子対生成という複雑な多粒子事象に対し、ハドロン系の不変質量（ M_x ）と、レプトン・ニュートリノ系の不変質量とを求める手法を開発し、初めて理論的な解釈を容易にする包含的な形で崩壊比を得た。これは、以前の実験ではできなかったことである。この研究では、荷電レプトンを持つ事象から、欠損質量がニュートリノによると同定できるものを選び、対生成されたもう一方のB中間子からの崩壊生成粒子の識別にSimulated Annealingという新手法を適用した。この研究は、従来の解析手法を乗り越え、理論的な不定さを最も小さくできる解析手法を提案し、それをBelle実験データを用いて実証したものである。研究グループに新たな蓄積を加えた高い水準の研究であると評価された。

2.7 大栗真宗博士（須藤研究室） : 東京大学総長賞

大栗真宗氏が、平成16年度第2回学生表彰「東京大学総長賞」を受賞した。大栗氏は、須藤研在学中に遠方宇宙にある巨大重力源（銀河、銀河団）によって光線の経路が曲げられる重力レンズ現象についての理論的研究を行うとともに、日米独国際共同プロジェクトであるスローンデジタルスカイサーベイにおける重力レンズ探査の中心的存在として活躍した。特に2003年に稲田直久氏とともに発見した最大分離角重力レンズクエーサーの探索は彼が提案したものであり、その探索と発見は彼が主導したものと言ってよい。この重力レンズの理論および観測的探求によって、宇宙論パラメータを決定するとともに、冷たい暗黒物質による構造進化のシナリオの描像の正当性を示すことに成功した。これらの顕著な業績が評価されて今回の受賞に至ったものである。

2.8 藤井新一郎博士（大塚研究室）：第6回核理論新人論文賞

藤井新一郎博士（大塚研学術支援員）が第6回核理論新人論文賞を受賞しました。この賞は学位取得後5年半以内の、若手原子核理論研究者による論文に与えられる賞です。受賞論文では、基本的な核子-核子相互作用から出発し、核力の短距離での斥力芯、励起モードとの結合のような多体効果をほぼ完全に取り込んで、スピン軌道分岐を含む原子核中の「軌道運動」のエネルギーなどを求め実験データが第一原理的に説明できる事を初めて示しました。

2.9 三宅章雅博士（和達研究室）：第21回井上研究奨励賞

三宅章雅博士の博士論文“Quantum Multipartite Entanglement: Classification and Use for Quantum Information”「量子多体エンタングルメント：分類と量子情報における効用」は、多体系エンタングルメントの基本的性質を新しい手法により、明らかにしたものである。双対性と超行列式を指針として、エンタングルメントの変換における様々な純粋多体効果が、対応する超行列式の大きさによって与えられることを示した。そして、量子情報処理への応用面で興味ある2量子ビットとその他の $(2 \times 2 \times n)$ 系に対して、系統的にエンタングルメントの階層構造を明らかにした。この階層構造から、多体量子情報処理・量子コンピューターに対する多くの考察が可能となり、その業績が高く評価された。

2.10 鈴木謙博士（早野研究室）：第11回原子核談話会新人賞

鈴木博士は「 π 中間子の深い束縛状態」を用い、「原子核内におけるカイラル対称性の部分的回復」を検証した。ハドロン質量の起源は真空のクォーク凝縮（カイラル凝縮）にあると考えられている。原子核中ではクォーク凝縮が真空値よりも減少すると予測されており、それを検証することは原子核物理の中心的課題の一つである。鈴木氏は、 π 中間子 $^{115,119,123}\text{Sn}$ 原子の1s状態の精密分光を行い、原子核の中心ではクォーク凝縮が真空中に比べて約67%に減少していることを導いた。核内でのクォーク凝縮の減少について、このような定量的な知見が得たのはこれが最初であり、その成果は新聞等にも大きく報道された。

3 人事異動

[物理教室にいられた方々]

宮下 精二	教授	2004 年 4 月 1 日	配置換 (工学系研究科)
岩崎 昌子	講師	2004 年 4 月 1 日	昇任 (素粒子物理国際研究センター)
藪下 篤史	助手	2004 年 5 月 16 日	採用
渡邊 紳一	助手	2004 年 8 月 1 日	採用
齋藤 圭司	助手	2004 年 9 月 1 日	採用
向山 信治	助手	2004 年 10 月 1 日	採用
江尻 信司	助手	2005 年 2 月 1 日	採用
山口 智之	物理事務室	2004 年 4 月 1 日	配置換 (工学部)
川崎 勝	物理事務室	2004 年 4 月 1 日	配置換 (総務部)
荻荘 美穂	物理事務室	2004 年 4 月 1 日	採用
石山 伯子	第 2 事務分室	2004 年 4 月 1 日	採用
森 玲子	物理図書室	2004 年 4 月 1 日	採用
中川 裕美子	第 3 事務分室	2004 年 8 月 1 日	採用

[物理教室から移られた方々]

櫻井 博儀	助教授	2005 年 3 月 31 日	辞職 ((独) 理化学研究所)
藤 貴夫	助手	2004 年 5 月 7 日	辞職
平澤 正勝	助手	2004 年 5 月 15 日	辞職
井上 奈保	第 2 事務分室	2004 年 4 月 30 日	辞職
塚本 久美子	物理事務室	2004 年 12 月 31 日	辞職
小原 典子	物理事務室	2005 年 2 月 20 日	辞職
熊谷 志おり	物理図書室	2005 年 2 月 28 日	辞職
高野 由美子	第 3 事務分室	2005 年 3 月 11 日	辞職
植木 昭勝	技術専門員	2005 年 3 月 31 日	定年退職
山岸 健一	技術専門員	2005 年 3 月 31 日	定年退職
森田 美由紀	物理図書室	2005 年 4 月 1 日	出向 ((独) 国立女性教育会館)

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	坪野	佐々木、河島、小原
理系委員（専攻副主任）	山本	
常置委員	牧島、桑島	
教務係	蓑輪（理学部教務委員）、小形、酒井（広）、松尾（大学院）	佐々木、河島、小原
学生実験	福山、能瀬、櫻井	樫村
就職係	長谷川、（大学院他部局：杉野）	横山
奨学金	佐野	小幡
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、4号館長：青木 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	大塚（茂）
試作室	坪野	
研究材料・回路	酒井（広）	
低温	岡本	
電顕	長谷川	
計算機・ネットワーク	早野	加倉井
図書係	青木（理図書委員）、長谷川、松尾、能瀬	森田、熊谷、森
複写係	酒井（広）	川崎
談話会	初田、柳田、佐野、青木、小林	田中
年次報告	村尾	横山
記録係	島野、酒井（広）	
物品供用官	酒井（英）	山口（智）
環境安全	駒宮	川崎
放射線管理	櫻井	山口（智）
衛生安全	早野	山口（智）、川崎
事務分室	第1：酒井（英）、第2：須藤、第3：福山	山口（智）
理交会	島野	山口（智）
教職員親睦会	常行	
建物	牧島、福山	山口（智）
進学指導担当	櫻井	佐々木
ホームページ	須藤、初田、蓑輪	川崎
	岡本、酒井（広）、松尾	

5 教室談話会

< 2004 年 >

- 4 月 1 日 (金) Anthony Leggett 氏 (イリノイ大学)
 「Superfluidity, phase coherence and the new Bose-condensed alkali gases」
- 4 月 16 日 (金) Seth Lloyd 氏 (マサチューセッツ工科大学)
 「Introduction to Quantum Computation」
- 5 月 21 日 (金) 宮下精二氏
 「分子磁性体での量子ダイナミックスとその機構」
- 6 月 4 日 (金) 南部陽一郎氏 (シカゴ大学)
 「自発的対称性の破れとその周辺」
- 6 月 25 日 (金) 島野亮氏
 「半導体の高密度光励起現象」
- 7 月 9 日 (金) 早野龍五氏
 「反水素原子の生成と分光」
- 10 月 22 日 (金) 吉田篤正氏 (青山学院大学 理工学部)
 「ガンマ線バースト・プロンプト放射からの X 線輻射」
- 11 月 12 日 (金) Qi Ouyang 氏 (北京大学)
 「Control spiral instabilities in a reaction-diffusion system」
- 11 月 19 日 (金) 須藤靖氏
 「太陽系外惑星探査：過去 10 年の進展と今後 10 年の展望」

< 2005 年 >

- 1 月 21 日 (金) 川崎雅裕氏 (東京大学宇宙線研究所)
 「素粒子的宇宙論の発展」