

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

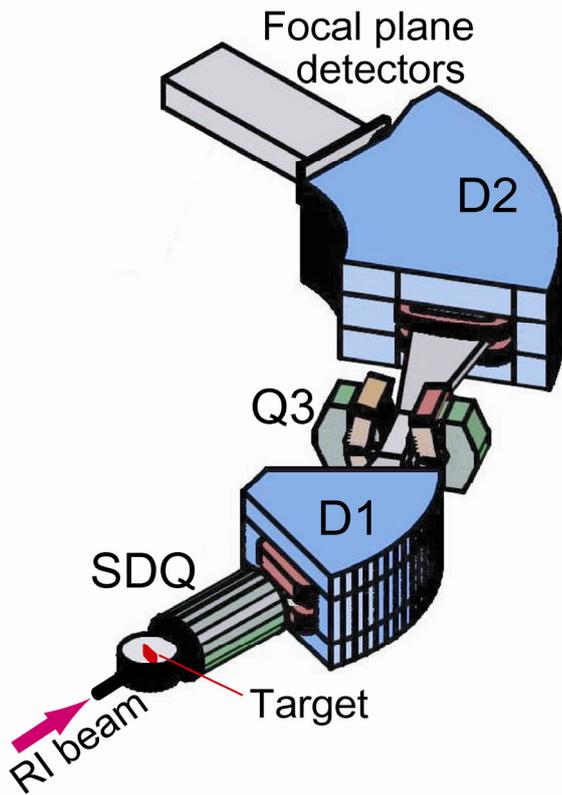
# Annual Report

2006

平成18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

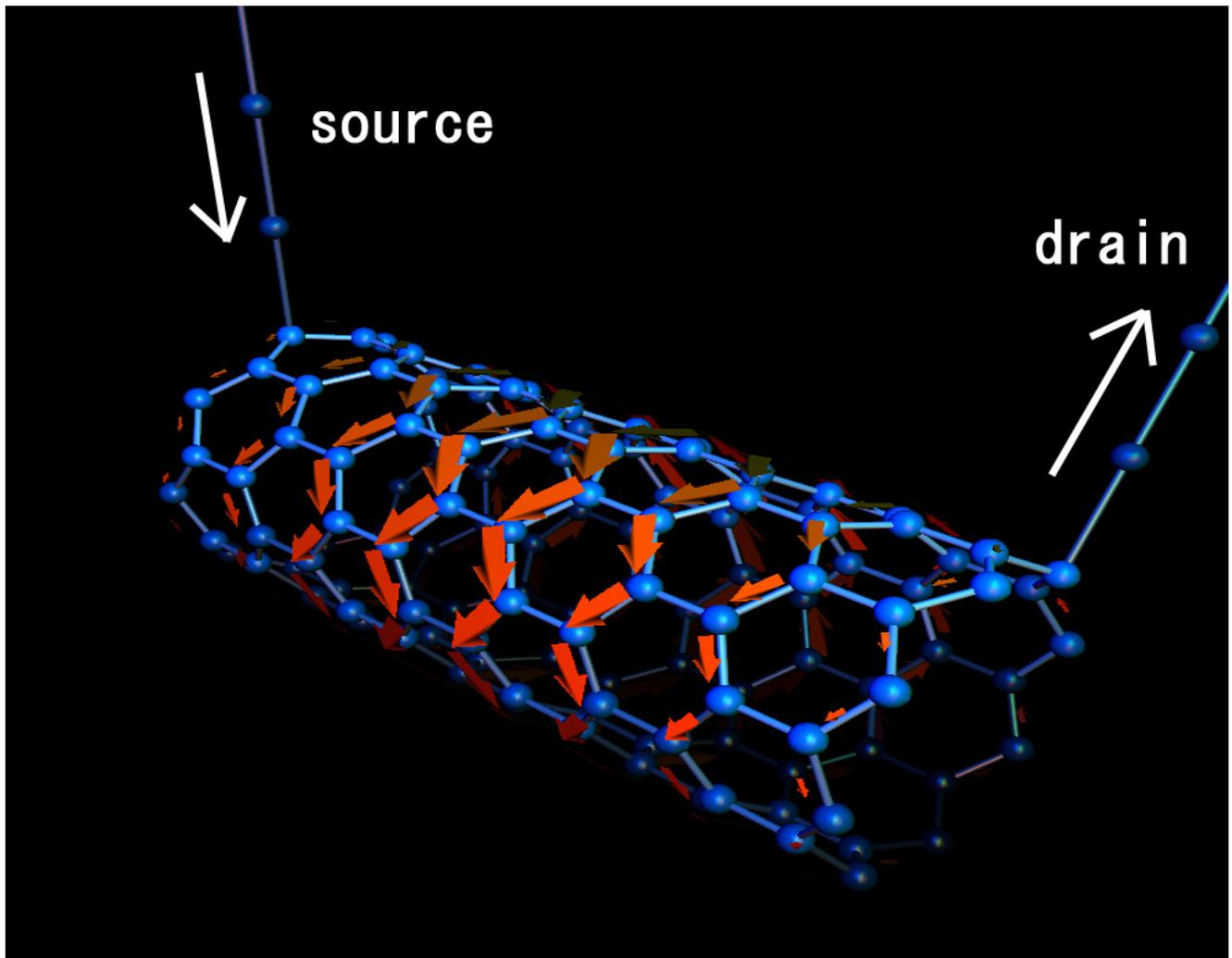


The magnetic spectrometer SHARAQ dedicated to the radio isotope beam experiments is being constructed under the ICHOR program (see Sakai Hideyuki group). It consists of a super conducting doublet quadrupole magnet (SDQ), a dipole magnet (D1), a quadrupole magnet (Q3) and a dipole magnet (D2) and its total weight is about 500 tons. The SHARAQ spectrometer having the maximum rigidity of 6.8 Tm with dispersion of 5.86 m is designed to achieve a good momentum resolution of 14,700 as well as a dispersion matching mode operation in lateral and angle directions. **(Sakai Hideyuki group in collaboration with CNS)**

(a) Artistic illustration of the SHARAQ spectrometer.



(b) Photograph of the D2 dipole magnet (300 tons).



A carbon nanotube with source and drain electrodes attached is schematically shown. When a current is injected from the electrode, a quantum loop current (red arrows) is theoretically predicted to be induced around the tube, whose magnitude is orders of magnitude greater than that for the current across the electrodes. **(Aoki group)**

## 序

平成18年度(2006年4月 - 2007年3月)東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・理学部物理学科の年次報告をお届けします。この小冊子が物理学教室で行われている多彩で活発な研究・教育の現状を知っていただく手がかりとなれば幸いです。

教員の異動についてですが、平成18年度に藤森淳教授が新領域創成科学研究科複雑理工専攻から教室に戻って来られました。藤森先生のご専門は物性実験で、固体の光電子分光分野での研究で世界をリードされています。これまでも教室会議のメンバーとして教室の運営に参加いただいておりますが、当教室に戻られてますます研究を発展させられるとともに、学生の教育、後進の育成に大いに力を発揮していただけるものと期待しております。一方、桑島邦博教授が自然科学研究機構岡崎総合バイオサイエンスセンター・センター長へ、江口徹教授が京都大学基礎物理学研究所・所長へと転出されました。

今年度は、和達三樹教授が定年を迎えられました。和達先生は物性基礎論・統計力学の分野、特に非線形現象、量子多粒子系に対する研究で世界的かつ独創的な研究成果をあげられるとともに、多くの優れた人材を育ててこられました。和達先生の多年にわたる研究・教育における貢献と教室運営における尽力に対して深く感謝申し上げます。

平成16年の法人化にあたり、教員の総数の見直しが行われ一時人事が凍結されました。その影響で、平成17年は、助教授から教授への昇任以外、教員の異動はありませんでした。平成18年度は、人事システムを機動性・柔軟性のあるものに多少変更し、若い優秀な人材を採用することができました。濱口幸一助教授(現・准教授)(素粒子理論)がドイツ DESY から、浅井祥仁助教授(現・准教授)(素粒子実験)が素粒子物理国際センターから着任されました。更に、講師として平野哲文博士(原子核理論)、小澤恭一郎博士(原子核実験)を教室におむかえしました。

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

本年度も教室内での活発な研究・教育活動の結果、多くの方々を受賞されております。内田が高温超伝導の研究でカマリング・オンネス賞を、牧島一夫教授・釜江常好名誉教授・中澤知洋博士(現・講師)ほか「あすか」衛星による銀河団のX線観測で日本天文学会欧文研究報告論文賞を受賞いたしました。また、若い人たちの研究でも、金井恒人博士(酒井広文研究室)と松浦妙子博士(初田研究室)が第23回井上研究奨励賞、西田祐介博士(初田研究室)が第1回日本物理学会若手奨励賞・第8回核理論新人論文賞、所裕子氏(宮下研究室)が第87回日本化学会優秀講演賞を受賞しました。さらに、学生・院生から竹内一将君(佐野研究室)が東京大学総長特別賞、東京大学総長賞を受賞、酒井志朗君(青木研究室)、西田祐介君(初田研究室)、和達大樹君(藤森研究室)、日下暁人君(相原研究室)が第1回理学系研究科研究奨励賞(博士)を、上掲竹内一将君、榎戸輝揚君(牧島研究室)、川崎真介君(駒宮研究室)が第1回理学系研究科研究奨励賞(修士)、そして高吉慎太郎君、中村栄太君、森本高裕君が第1回理学部研究奨励賞を受賞しました。

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

この年次報告書は、平野哲文講師のご尽力によって編集作成されました。この場を借りて感謝いたします。

2007年5月31日

物理学専攻長・教室主任  
内田 慎一

# 目次

<b>I</b>	<b>研究室別 2006 年度 研究活動報告</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>原子核・素粒子理論</b>	<b>3</b>
1.1	原子核理論研究室(大塚・初田・平野)	3
1.2	素粒子論研究室(江口・柳田・松尾・浜口)	14
1.2.1	弦理論	14
1.2.2	ゲージ理論と弦理論	15
1.2.3	TeV スケールの標準模型、素粒子論的宇宙論	16
<b>2</b>	<b>原子核・素粒子実験</b>	<b>22</b>
2.1	原子核実験研究室(酒井・早野・小沢)	22
2.1.1	ICHOR プロジェクト(酒井研究室)	22
2.1.2	スピン双極子遷移和則を用いた中性子スキン厚の決定(酒井研究室)	24
2.1.3	陽子-中性子系のスピン相関(酒井研究室)	25
2.1.4	反水素原子・反陽子ヘリウム原子の研究(早野研究室)	25
2.1.5	エキゾチック原子の分光による「陽子質量起源」の研究(早野研究室)	27
2.1.6	$K^-$ 中間子ヘリウム 4 原子 X 線の精密測定(早野研究室)	28
2.1.7	クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)の生成とその性質の研究(小沢研究室)	28
2.1.8	ハドロンが動的な質量を獲得する機構の研究(小沢研究室)	29
2.1.9	次世代の高統計実験に向けた新たな検出器の開発(小沢研究室)	30
2.1.10	RI ビームファクトリー計画と中性子過剰核の安定性(旧櫻井研究室)	30
2.1.11	ガンマ線分光による核構造研究(旧櫻井研究室)	31
2.1.12	ベータ分光を用いた核構造研究(旧櫻井研究室)	32
2.1.13	高分解能ガンマ線測定による励起状態の寿命決定(旧櫻井研究室)	33
2.1.14	TOF スペクトロメータ開発と中重領域の核分光(旧櫻井研究室)	33
2.1.15	天体核物理(旧櫻井研究室)	34
2.2	駒宮研究室	37
2.2.1	国際リニアコライダー ILC 計画	38
2.2.2	BES 実験	39
2.2.3	超冷中性子を用いた量子力学実験	40
2.2.4	LHC での物理解析	41
2.2.5	大気ニュートリノスペクトルの精密計算	41
2.3	衰輪研究室	43
2.3.1	アクシオンヘリオスコープ実験	43
2.3.2	暗黒物質探索実験	44
2.3.3	レーザー共鳴イオン化質量分析法によるニュートリノ検出	44
2.3.4	原子炉ニュートリノモニター	45
2.4	相原研究室	46
2.4.1	$B$ 中間子のフレーバー変換中性カレント崩壊の精密測定	46
2.4.2	中性 $B$ 中間子の $\rho\pi$ 崩壊における $CP$ 非対称の精密測定	47
2.4.3	Belle 検出器用パイプライン読み出しモジュールの開発	47
2.4.4	J-PARC ニュートリノ一次ビームライン用ビームモニターの開発	48

2.4.5	ビームプロファイルモニター	48
2.4.6	ビーム位置モニター	48
2.4.7	ビームラインシミュレーション	48
2.4.8	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	49
2.4.9	観測宇宙論によるダークエネルギーの研究	49
2.4.10	国際リニアコライダー用検出器の開発	50
<b>3</b>	<b>物性理論</b>	<b>54</b>
3.1	和達研究室	54
3.1.1	ボーズ・アインシュタイン凝縮	54
3.1.2	多粒子系	55
3.1.3	可積分系	55
3.1.4	結び目理論・低次元トポロジー	56
3.2	青木研究室	59
3.2.1	超伝導	59
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の物質設計	60
3.2.3	炭素系の物性	60
3.2.4	強相関電子系における非平衡・非線形現象	61
3.2.5	分数量子ホール効果	61
3.2.6	ヘテロ界面の電子物性	62
3.2.7	周期的ナノ構造の電子状態	62
3.2.8	その他	62
3.3	宮下研究室	64
3.3.1	スピנקロスオーバー錯体における協力現象の研究	65
3.3.2	相互作用間の競合がある系での遅い緩和現象	65
3.3.3	新奇な量子状態の研究	66
3.3.4	量子ダイナミックスの解明と制御	66
3.4	小形研究室	70
3.4.1	高温超伝導の理論	70
3.4.2	コバルト酸化物における異方的超伝導	71
3.4.3	有機導体に関する理論	71
3.4.4	異方的超伝導体の理論	72
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	72
3.4.6	近藤効果や重い電子系に関する理論	73
3.4.7	2次元 $^3\text{He}$ に関する理論	73
3.5	常行研究室	78
3.5.1	固体表面の電子状態と化学反応	78
3.5.2	ペロブスカイト型強誘電体の不純物効果	79
3.5.3	超高压下の物質変化	79
3.5.4	タンパク質の電子状態	79
3.5.5	シミュレーション手法の開発	79
<b>4</b>	<b>物性実験</b>	<b>84</b>
4.1	藤森研究室	84
4.1.1	高温超伝導	84
4.1.2	強相関遷移金属酸化物	84
4.1.3	酸化物界面	84
4.1.4	半導体スピントロニクス	85
4.2	内田研究室	94
4.2.1	梯子型 Cu 酸化物の電荷秩序と超伝導	94
4.2.2	高温超伝導体の擬ギャップ相	95

4.3	長谷川研究室	98
4.3.1	表面電子輸送	98
4.3.2	表面ナノ構造	99
4.3.3	新しい装置・手法の開発	100
4.4	福山研究室	104
4.4.1	2次元フェルミ粒子系の強相関効果	104
4.4.2	走査トンネル分光法による2次元電子系の研究	105
4.4.3	異方的超伝導体のSTS研究	107
4.4.4	グラファイト層間化合物 $C_6Yb$ の超伝導	108
4.5	岡本研究室	110
4.5.1	劈開表面に形成された2次元電子系	110
4.5.2	強相関2次元電子系	111
4.5.3	量子ホール系における電子スピン流と核スピン偏極による検出	112
4.6	島野研究室	114
4.6.1	1次元電子系	115
4.6.2	半導体高密度電子正孔系	115
4.6.3	超伝導	115
4.6.4	マルチフェロイクス系	115
4.6.5	新しい分光計測技術の開発	116
<b>5</b>	<b>一般物理理論</b>	<b>118</b>
5.1	宇宙理論研究室 (佐藤・須藤)	118
5.1.1	初期宇宙・相対論	119
5.1.2	観測的宇宙論	120
5.1.3	天体核・素粒子物理	123
5.2	村尾研究室	132
5.2.1	エンタングルメント理論	132
5.2.2	マクロな系におけるエンタングルメント	135
5.2.3	エンタングルメントの応用研究	135
<b>6</b>	<b>一般物理実験</b>	<b>137</b>
6.1	牧島研究室 + 中澤研究室	137
6.1.1	「すざく」衛星の運用と稼働状況	137
6.1.2	星と太陽の物理学	137
6.1.3	コンパクト天体からのX線放射	138
6.1.4	広がった宇宙プラズマからのX線	139
6.1.5	雷雲からのガンマ線の観測	140
6.1.6	将来に向けての技術開発	140
6.2	高瀬研究室	147
6.2.1	TST-2 球状トカマクにおけるプラズマ生成・加熱・維持実験	147
6.2.2	HHFW による電子加熱実験	147
6.2.3	反射計による密度分布・波動測定	147
6.2.4	電流生成過程の単一粒子軌道解析	148
6.2.5	MHD 不安定性	148
6.2.6	ゾーナルフローと GAM	149
6.2.7	コムラインアンテナの特性試験	149
6.2.8	JT-60U トカマクにおける自発電流によるプラズマ電流駆動実験	150
6.2.9	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	150
6.3	坪野研究室	153
6.3.1	レーザー干渉計を用いた重力波の検出	154
6.3.2	宇宙空間レーザー干渉計	155

6.3.3	精密計測の研究	156
6.3.4	熱雑音の研究	156
6.4	佐野研究室	161
6.4.1	非線形非平衡系の物理学	161
6.4.2	非平衡ソフトマターの物理学	163
6.4.3	生命現象の物理学	164
6.5	山本研究室	167
6.5.1	富士山頂サブミリ波望遠鏡	168
6.5.2	HEB ミクサ素子の開発	168
6.5.3	星形成領域の観測的研究	169
6.5.4	銀河系中心部の観測的研究	171
6.6	酒井広文 研究室	173
6.6.1	静電場と整形されたレーザー電場の併用による分子配向の制御	174
6.6.2	非断熱的に配列した分子への偏光ゲート法の適用による高次高調波発生	175
6.6.3	非断熱的に配列した多原子分子の多光子イオン化と解離過程の制御	175
6.6.4	1300 nm 光を基本波とする $H_2/D_2$ 中での高次高調波発生と分子振動のダイナミクス	176
6.6.5	4 年生特別実験	176
6.6.6	その他	177
<b>7</b>	<b>生物物理</b>	<b>179</b>
7.1	桑島研究室	179
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	179
7.1.2	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	181
7.2	能瀬研究室	184
7.2.1	シナプス特異性を決める分子の同定と機能解析	184
7.2.2	シナプス形成の生物物理	185
7.2.3	シナプス成長・可塑性の分子機構	186
7.2.4	その他	187
<b>8</b>	<b>技術部門</b>	<b>189</b>
8.1	技術部門	189
8.1.1	実験装置試作室(大塚、†今西、南城)	189
8.1.2	安全衛生・薬品管理(佐伯、山本)	189
8.1.3	IT 関連業務(藤代)	190
8.1.4	学生実験(櫻村、佐伯、藤代、山本)	190
8.1.5	学生実習(佐伯)	190
<b>II</b>	<b>Summary of group activities in 2006</b>	<b>191</b>
1	Theoretical Nuclear Physics Group	193
2	Theoretical Particle and High Energy Physics Group	194
3	Sakai (Hideyuki) Group	196
4	Hayano Group	198
5	Ozawa Group	199
6	Komamiya group	200
7	Minowa Group	201
8	Aihara Group	201
9	Wadati Group	202
10	Aoki Group	203
11	Miyashita Group	204
12	Ogata Group	206

13	Tsuneyuki Group . . . . .	207
14	Fujimori Group . . . . .	207
15	Uchida Group . . . . .	208
16	Hasegawa Group . . . . .	209
17	Fukuyama Group . . . . .	210
18	Okamoto Group . . . . .	211
19	Shimano Group . . . . .	212
20	Theoretical Astrophysics Group . . . . .	213
21	Murao Group . . . . .	215
22	Makishima Group & Nakazawa Group . . . . .	216
23	Takase Group . . . . .	217
24	Tsubono Group . . . . .	218
25	Sano Group . . . . .	219
26	Yamamoto Group . . . . .	220
27	Sakai (Hirofumi) Group . . . . .	221
28	Kuwajima Group . . . . .	222
29	Nose Group . . . . .	223

### **III 2006年度 物理学教室全般に関する報告 225**

<b>1</b>	<b>学部講義概要 227</b>	<b>227</b>
1.1	2年生 冬学期 . . . . .	227
1.1.1	電磁気学 I : 駒宮 幸男 . . . . .	227
1.1.2	解析力学・量子力学 I : 藤森 淳 . . . . .	227
1.1.3	物理数学 I : 常行 真司 . . . . .	228
1.1.4	物理実験学 : 島野 亮 . . . . .	228
1.2	3年生 夏学期 . . . . .	229
1.2.1	電磁気学 II : 佐野 雅己 . . . . .	229
1.2.2	量子力学 II : 村尾 美緒 . . . . .	229
1.2.3	現代実験物理学 I : 岡本 徹、能瀬 聡直 . . . . .	230
1.2.4	物理数学 II : 松尾 泰 . . . . .	230
1.2.5	統計力学 I : 和達 三樹 . . . . .	230
1.3	3年生 冬学期 . . . . .	231
1.3.1	物理数学 III : 小形正男 . . . . .	231
1.3.2	量子力学 III : 大塚 孝治 . . . . .	232
1.3.3	流体力学 : 江尻 晶 . . . . .	232
1.3.4	現代実験物理学 II : 蓑輪 眞、早野 龍五 . . . . .	233
1.3.5	電磁気学 III : 内田 慎一 . . . . .	233
1.3.6	生物物理学 : 桑島 邦博、能瀬 聡直 . . . . .	233
1.3.7	統計力学 II : 宮下 精二 . . . . .	234
1.4	4年生 夏学期 . . . . .	234
1.4.1	場の量子論 I : 柳田 勉 . . . . .	234
1.4.2	固体物理学 I : 青木 秀夫 . . . . .	234
1.4.3	一般相対論 : 須藤 靖 . . . . .	234
1.4.4	プラズマ物理学 : 高瀬 雄一 . . . . .	235
1.4.5	原子核物理学 : 初田 哲男 . . . . .	236
1.4.6	統計物理学特論 : 高山 一 . . . . .	236
1.4.7	量子光学 : 酒井 広文 . . . . .	237
1.5	4年生 冬学期 . . . . .	238
1.5.1	宇宙物理学 : 須藤 靖 . . . . .	238

1.5.2	素粒子物理学：相原 博昭 . . . . .	239
1.5.3	場の量子論 II：濱口 幸一 . . . . .	239
1.5.4	生物物理学特論：桑島 邦博 . . . . .	239
1.5.5	固体物理 II：長谷川 修司 . . . . .	240
1.5.6	化学物理学：山本 智 . . . . .	241
<b>2</b>	<b>各賞受賞者紹介</b>	<b>242</b>
2.1	内田慎一教授：カマリング - オンネス賞 . . . . .	242
2.2	牧島一夫教授、中澤知洋講師、釜江常好名誉教授、高橋忠幸教授 (JAXA, 協力講座) ほか：日本天文学会欧文研究報告論文賞 . . . . .	242
2.3	所裕子 (宮下研究室)：第 87 日本化学会年会「優秀講演賞」 . . . . .	243
2.4	金井恒人博士 (酒井広文研究室)：第 23 回井上研究奨励賞 . . . . .	243
2.5	松浦妙子博士 (初田研究室)：第 23 回井上研究奨励賞 . . . . .	243
2.6	西田祐介博士 (初田研究室)：第 1 回日本物理学会若手奨励賞・第 8 回核理論新人論文賞 . . . . .	243
2.7	竹内一将君 (佐野研究室)：東京大学総長特別賞、東京大学総長賞、理学系研究科研究奨励賞 . . . . .	244
2.8	酒井志朗氏 (青木研究室)：第 1 回理学系研究科研究奨励賞 (博士) . . . . .	244
2.9	西田祐介博士 (初田研究室)：第 1 回理学系研究科研究奨励賞 (博士) . . . . .	244
2.10	和達大樹博士 (藤森研究室)：第 1 回理学系研究科研究奨励賞 (博士) . . . . .	244
2.11	日下暁人博士 (相原研究室)：第 1 回理学系研究科研究奨励賞 (博士) . . . . .	245
2.12	榎戸輝揚君 (牧島研究室)：第 1 回理学系研究科研究奨励賞 (修士) . . . . .	245
2.13	川崎真介君 (駒宮研究室)：第 1 回理学系研究科研究奨励賞 (修士) . . . . .	245
2.14	高吉慎太郎君、中村栄太君、森本高裕君：第 1 回理学部研究奨励賞受賞者 . . . . .	245
<b>3</b>	<b>人事異動</b>	<b>246</b>
<b>4</b>	<b>役務分担</b>	<b>247</b>
<b>5</b>	<b>教室談話会</b>	<b>248</b>
<b>6</b>	<b>物理学教室コロキウム</b>	<b>249</b>

I

# 研究室別 2006年度 研究活動報告



# 1 原子核・素粒子理論

## 1.1 原子核理論研究室(大塚・初田・平野)

### 原子核理論研究室の概要

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

「核構造」は主に大塚孝治教授・清水助教・板垣助手(在外、6月に移動)と大学院学生らにより行なわれた。「量子ハドロン物理学」は主に初田哲男教授・佐々木助教及び博士研究員と大学院学生らにより行なわれた。「高エネルギーハドロン物理学」は主に平野哲文講師により行なわれた。以下に先ずそれぞれの分野での研究内容の概要を述べ、後で各々のテーマについて個別に説明する。

### 原子核構造

原子核構造と言われる分野には色々な問題が含まれるが、我々の研究室では

- 1) 不安定核の構造と反応、天体現象への応用
- 2) モンテカルロ殻模型による原子核の多体構造の解明
- 3) 原子核多体問題、量子カオスや核力の新しい方法論の模索

の3つのテーマを主に追求している。研究室のメンバーによる研究は後で述べられているので、ここでは背景と概略を述べ、後で述べられていない研究についてはやや詳しく述べる。ここで参照される文献、講演も後で出て来ないものに限定されている。

安定核とは、我々の身のまわりの物質を構成している原子核で、陽子数と中性子数が等しいか、大体等しい。一方、不安定核とは、それらの数がアンバ

ランスになっているものを指す。そのため様々な特異な性質を示すことが分かっているが、研究は始まったばかりで、未知の事柄に満ち溢れたフロンティアである。その例として、魔法数があげられる。原子の場合と同じように原子核でも(陽子或は中性子の数としての)魔法数があり、構造上決定的な役割を果たす。魔法数は1949年のメイヤー・イェンゼンの論文以来、安定核では変わってこなかった。しかし、不安定核の殻構造(一粒子軌道エネルギーのパターン)は陽子や中性子の数によって変わり(殻進化と言う)、不安定核での魔法数は安定核のそれとは系統的に異なる。そのメカニズムは核力のスピン・アイソスピン依存性、特にテンソル力のそれによるものが大きい、という成果が最近我々の研究室で得られた。[75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 129] この研究成果は今後の核構造論研究の方向性を左右し、進める原動力となり、世界各地でそれに関する実験が多く行われている。[6, 7, 8] また、その方向に沿って、テンソル力を含め、さらにはペアリング相関も同時に取り入れた平均場理論の構築も行っている。[2, 3]

不安定核では、安定核とは異なり、過剰な中性子が糊の役割を果たして、幾つかのアルファクラスターをつなげる事を示してきた。このようなクラスター構造の「結晶的安定化」という新しいメカニズムや、クラスター構造と殻構造の相互関係についてもさらに研究している。今年度は、糊の役目の中性子が1個の場合について研究し、遷移的領域での事象であるのでこれまでよりも複雑であるが、結晶化へ向けの変化を調べた。

不安定核に関しては、束縛されてはいないが、低い励起エネルギーを持ち、束縛状態と強く結合している核子の状態の理論的扱いの研究を進め、不安定な中性子過剰酸素同位体などに応用して、その励起スペクトルなどを求めている。

我々が1994年頃からオリジナルな理論手法として提唱・発展させてきたモンテカルロ殻模型を中心にした研究も展開している。[74] この方法は原子核に於ける量子多体系の解法における大きなブレークスルーとなり、不安定核攻略の重要な武器である。この手法により、多数の一粒子軌道からなるヒルベルト空間に多数の粒子を入れて相互作用させながら運動させる事が可能になった。殻構造がどんどん変わっていく不安定核では特に重要になっており、世界の10箇所以上のグループと、それぞれの研究対象である原子核に関して理論計算を受け持って共同研究をしている。多くの新しい知見が得られており、最近は中性子数が18や19の原子核でも、不安定核であれば $N=20$ の魔法数構造が普遍的に壊れていることを示した。[75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 129] これは旧来の平均ポテンシャル描像や Warburton らの「Island of Inversion」模型では理解できないもので、重要なものである。[7] また、モンテカルロ殻模型は多数の核子がコヒーレントに運動する集団運動の微視的な解明を、平均場理論の壁を越えて行うことも可能にしている。さらに、殻模型による研究の進展とも相まって、ニュートリノと原子核の反応がよく記述できるようになり、天体核現象へ応用する。[9] さらに、ダブルベータ崩壊の核行列要素の計算を

開始しニュートリノ質量の測定に備えている。[26]

核子多体系おしおの反応や、時間とともに自発的に変化する状態を扱うために時間依存ハートリーフォック法を展開、発展させる研究を行なっている。

特に、3番目のテーマについては、相対論的な多体理論への入口となるべき相対論的平均場理論の発展 [1]、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 [27]。量子カオスに関しては、カオスがある規則性の源になる、という新しい概念を導入して研究している。加えて、軌道が1本の場合には、別の幾何学的なメカニズムでも結果的には似た現象が起こることも指摘した。[130]

### 中重核の原子核構造の微視的記述

中重核領域の核構造の理論的解析を原子核殻模型に基づいて微視的におこなっている。主にキセノン、バリウムの同位体において、典型的ないくつかの集団運動状態とその間の遷移の様子を研究した。特に、キセノンの同位体の磁気能率の実験値を、広い質量領域において統一的に再現することに成功した。

また、これまでの研究で取り扱われた相互作用はモデル化されたものに限られていたが、一般の相互作用を取り扱うものに改良を試みた。それにより、微視的な有効相互作用である Chou-Warburton 相互作用を用いる事が可能となった。その相互作用を現象論的に修正することにより、適用領域がスズ 132 近傍に限られていたものを、質量数 150 近傍の変形領域にまで広げる事に成功した。[100, 28]

### 炭素原子核におけるクラスター構造

炭素原子核  $A=12$  においては  $\alpha$  クラスター構造が出現することが理論実験的な点から調べられてきているが、最近の実験から中性子が付加した  $^{13}\text{C}$  においても  $\alpha$  クラスター出現の可能性が示唆されてきている。そこで中性子が加わることで3つの  $\alpha$  クラスター構造がどのように変化していくかを  $A=13, 14$  の炭素原子核について、 $E0$  遷移やエネルギー、中性子と  $\alpha$  クラスター間の束縛の強弱を計算し、 $A=13$  においてもクラスター構造が発達し  $E0$  遷移強度が大きな状態を得ることができた。[45, 29, 101, 102, 103]

### 平均場理論による不安定核におけるテンソル力の効果

本研究では、平均場近似を用いて原子核構造に与えるテンソル力の効果を、核図表の広い範囲に渡って、特に不安定核領域において、系統的に研究することを目的としている。本年度においては、そのテンソル力の効果が顕著に現れるいくつかの現象について考察し、また対相関との競合についても考察した。最近の実験において、従来のテンソル力を含まない平均場近似では説明できない現象が確認されている。例えば、 $\text{Sb}$ (アンチモン) アイソトープにおける  $\pi h_{11/2}$

軌道と  $\pi g_{7/2}$  軌道のエネルギー差の変化である。この変化がテンソル力を含めることで再現が可能であることを示した。また、このテンソル力による原子核構造の変化に与える影響を踏まえて、 $\text{Ni}$ (ニッケル)78 における魔法数の変化について計算した。この原子核においてテンソル力は陽子の魔法数 28 を消失させるように影響を与えることが分かった。以上のことは論文 [11, 12, 30] としてまとめた。次に行ったことは、テンソル力が原子核の対相関に与える影響についての考察である。テンソル力の影響により原子核構造に変化がおき、それによって間接的に原子核の対相関に影響を与えることが分かった。例えば、 $\text{Sn}$ (スズ) アイソトープでの対相関エネルギーにこのテンソル力が影響を与えるために、2 中性子分離エネルギーに影響が及ぶことを明らかにした。テンソル力を含まない相互作用と比較すると、実験値に近いのはテンソル力を含んだほうである。[53, 54, 55, 109, 110, 111, 112, 113]

### 平均場計算による重核の変形度の研究

陽子、中性子数が共にマジックナンバーである  $^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$  原子核は球形で安定になることが知られているが、その近傍の偶-偶核において、バレンス中性子数 ( $N_n$ )、バレンス陽子数 ( $N_p$ ) を  $N_n = N_p$  のラインで変化させたとき、また、 $A=208$  のラインで変化させたとき、バレンス粒子が多くなるにつれて原子核の変形度も大きくなる。相互作用は Skyrme 力 ( $\text{SkM}^*$ )、コードは  $\text{ev8}$  を用いた。[47]

### 殻模型計算における連続状態の寄与

原子核のドリップ線付近の殻構造の研究は原子核物理のなかで最も興味深い対象の1つである。安定線近傍の原子核は強く束縛された多体系であり、その構造は殻模型で十分によく記述される。ドリップ線付近の原子核では単一粒子の波動関数は空間的に広がっており、運動エネルギーの減少のみならず有効相互作用の働きに影響を与える。従って不安定核領域では、一粒子基底を束縛近似した計算である殻模型計算では系の記述は不十分であり、連続状態と束縛状態の中性子のカップリングを考慮する必要があると考えられる。これを基に、できるだけ多くの核子核子相関を取り入れたドリップ線付近の酸素同位体の低励起状態の計算を行い、従来の殻模型計算に対してより大きな束縛エネルギーを持ち、実験結果と無矛盾であることが分かった。[114, 115, 116]

### 量子ハドロン物理学

ハドロン(核子、中間子、及びその励起状態)は、クォークとグルーオンの強い束縛状態で、量子色力学(QCD)がその多様な構造や相互作用を支配している。QCDはその本質的な非線形性と強い量子効果のために、そのハミルトニアン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・クォーク・グルオン構造、QCDの真空構造と高温高密度における相転移などを、QCDの量子多体問題という観点から理論的に研究している。その手法は、場の量子論による解析的アプローチと、格子上で定義されたQCDの数値シミュレーションによる第一原理的アプローチである。

我々の研究対象は、ハドロン・励起状態スペクトルの構造、新しいハドロン状態としてのマルチクォーク状態の解明、原子核中でのカイラル対称性、宇宙初期の高温プラズマの熱力学的性質やその動的構造、中性子星やクォーク星内部の高密度クォーク物質におけるカラー超伝導現象、相対論的重イオン衝突実験から得られるクォーク・グルオン・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。

### 格子量子色力学による核力の研究

核力の起源の解明は、原子核物理学の基礎を与えると同時に、QCDにおける大きなチャレンジでもある。我々は、格子上に2核子を配置し、その相対ベータ・サルピーター振幅を数値シミュレーションで求めることにより、核子間ポテンシャルを逆算した。その結果、核力に中心力について、近距離での強い斥力芯・中間距離での引力を両方備えたポテンシャルが得られた。これは、現象論的に知られていた核力の定性的性質と合致している。また、スピン3重項のポテンシャルが1重項に比べて強い傾向が見られた。[13, 131, 34, 57, 118, 119, 134, 135]

### 強結合クォーク・グルオン・プラズマの動的性質

クォーク・グルオン・プラズマは、その温度が相転移温度を越えても非摂動的振る舞いをするのが、理論・実験両面から示唆されている。このような強相関するプラズマについて、その現状を総括する講義を行った。[87, 88, 89, 90, 91, 92, 132, 133]

### $\bar{\nu}$ 触媒型核反応

長寿命で電荷を持つ重い素粒子  $X^-$  が存在した場合に、それが核融合反応に与える影響について研究した。加速器で生成し集積した  $X^-$  を d-d 核融合反応の触媒として使用し、核融合サイクルを維持してエネルギー生成を行う可能性について検討した。さらに、宇宙初期の元素合成時に、 $X^-$  を触媒として d-He<sup>4</sup> 反応で Li<sup>6</sup> が生成される過程の厳密三体計算を実行しその反応率を評価した。[14, 15]

### 格子 QCD 数値解析による $J/\psi$ -ハドロン相互作用に関する研究

続々と発表される RHIC@BNL の実験データは総合的にクォーク・グルオン・プラズマ (QGP) 生成を示唆している一方、QGP 生成の決め手となるクリアーなシグナルはまだ得られていない。今後、クリアーなシグナルの候補の一つ「 $J/\psi$  粒子抑制」に関するデータが実験の統計がたまり次第発表される予定ではあるが、理論的には「 $J/\psi$  粒子抑制」が QGP 生成の直接の証拠として考えてよいかどうかは議論の余地を残している。特に議論が絶えないものとして、ハドロン相での  $J/\psi$  粒子崩壊の促進による「 $J/\psi$  粒子抑制」の可能性である。本研究では  $J/\psi$  粒子と他のハドロン、特に中間子や核子との非弾性散乱のモデル計算に必要なインプットとなる  $J/\psi$  粒子-ハドロン・弾性散乱断面積を直接格子 QCD 数値解析から見積もることを目的として  $J/\psi$ -ハドロン・S 波散乱長に関する計算を行った。[18]

### 格子 QCD 数値解析による K 中間子のセミレプトニック崩壊の研究

素粒子標準模型の検証および標準模型を超える実験的シグナルの発見に関連して、カビボ-小林-益川行列要素 (CKM 行列要素) のユニタリティの検証は現代素粒子論において重要な課題の一つである。現在最も実験的に精度が高く測定されている CKM 行列要素は行列の第一行目 ( $V_{ud}, V_{us}, V_{ub}$ ) である。 $V_{ub}$  はその他の要素に対して2桁小さいのでほとんど無視することができることから、ユニタリティの要請は  $|V_{us}| = \sqrt{1 - |V_{ub}|^2}$  となる。しかしながら、最新の PDG(2004) によるとこの関係式がわずかながら破れている(約 0.3%)。本研究では、 $V_{us}$  の決定に必要な K 中間子の弱い相互作用による崩壊の形状因子  $f_+(q^2)$  の測定が主目的となる。実験的に測定される崩壊率は  $V_{us}$  と前方極限  $q^2 \rightarrow 0$  での形状因子  $f_+(0)$  の積に比例し、 $f_+(0)$  を理論的に精密に知ること無しには高精度で  $V_{us}$  の値を決定することはできない。フレーバー  $SU(3)$  が厳密に成り立つ場合、 $f_+(0) = 1$  となるがストレンジネスクォークがアップ・ダウンクォークよりやや重い現実の世界ではこの関係は成り立たない。カイラル摂動論によってフレーバー  $SU(3)$  の破れの効果がどのくらいあるか見積もることができるが、摂動の最低次を超えると模型の不定性なしに評価することができない。そこで格子 QCD 数値解析を使って第一原理から非摂動的に  $f_+(0)$  を測定することが求められている。現在の実験精度は理論による  $f_+(0)$  の不定性を凌駕しており、CKM 行列のユニタリティの検証には格子 QCD 数値解析による  $f_+(0)$  の高精度測定が急務となっている。[17, 32]

## 格子 QCD 数値解析によるハイペロン 崩壊の研究

ハイペロン 崩壊とは、バリオン 8 重項 (ハイペロン) の弱い相互作用による semi-leptonic 崩壊 ( $B \rightarrow B' + l + \bar{\nu}_l$ ) のことで、中性子ベータ崩壊はその一部を成す。ハイペロン 崩壊の情報は、核子スピンにおける各フレーバー・クォークの寄与を査定するときインプットとして用いられる。しかしながら、その際、フレーバー  $SU(3)$  対称性を暗に仮定するために、核子スピンに対するストレンジクォークのスピン寄与に対する系統誤差は、実験的統計誤差と同程度と見積もられ、実際に核子内ストレンジクォークの核子スピンへの寄与が高い精度で決定できていない要因の一つになっている。ハイペロン 崩壊においてフレーバー  $SU(3)$  の破れを直接観測するには中性子ベータ崩壊 ( $n \rightarrow p$ ) と  $\Xi^0 \rightarrow \Sigma^+$  崩壊における  $g_A/g_V$  を比べることが重要となる。実験的にはこの崩壊は 1 グループ (KTeV collaboration@FNAL) でしか測定に成功しておらず、その実験誤差も測定値に対して約 15% と大きい。ハイペロン 崩壊のフレーバー  $SU(3)$  の破れの有無さえ確認できていない。中性子ベータ崩壊に対して、実験値を動的クォークを無視したクエンチ近似の下で 5% の再現を成功しており、ハイペロン 崩壊におけるフレーバー  $SU(3)$  の破れを 5% の誤差の範囲内で観測することを目指す。[31]

## 有限体積・格子場の理論における束縛状態形成の研究

近年、マルチクォーク状態 (4 クォーク状態) の候補ではないかと思われる中間子がいくつも発見された。BaBar によって発見された  $D_s(2317)$ 、CLEO の  $D_s(2463)$ 、Belle  $X(3872)$  など。いずれもチャームクォークを含む共鳴状態で、ある崩壊閾値のすぐ下に存在し、非常に幅が狭く、非相対論的クォークモデルでは存在が予測できなかった中間子状態である。特に Belle の  $X(3872)$  は  $DD^*$  の閾値のほぼ直上に存在し、 $DD^*$  が非常に弱く束縛した状態、ハドロン分子共鳴状態ではないかと予想される。本研究の最終目標は、格子 QCD 数値解析によってマルチクォーク状態 (= ハドロン分子共鳴状態) としての可能性を探ることである。しかしながら、ハドロンの分子共鳴状態のように非常に弱く束縛した状態 (あるいは閾値のごく近傍の束縛状態) は、格子 QCD 数値解析のように有限体積中で考えた場合、引力的な散乱をする二体状態との区別が難しい。なぜならば、有限体積中においてはすべてのエネルギー固有値は不連続となり無限系での束縛・共鳴状態 (不連続状態) と散乱状態 (連続状態) はその点で区別が難しいからである。無限系では、閾値以下の状態は束縛状態しかあり得ないが、さらに問題を複雑にしている要因として、有限系において引力的な二体散乱状態は負のエネルギー (閾値を零点として) 解になることが知られている。つまり本研究では有限体積中での弱い束縛状態と二体散乱状態を区別する方法を模索するために、まず、格子 QED による電子・陽電子束縛状態の研究を行った。この場合、ハドロンの分子共鳴状態のような「複合粒子同士による束縛状態」

ではなく、「素粒子による束縛状態」となり、より問題設定が単純化され、精密な数値解析も可能となる。ただし、束縛状態から引力的な散乱状態への連続的な変化を制御するためには、長距離的なクォーク相互作用では不可能なので、光子に質量を持たせて電子・陽電子の相互作用を短距離型にした数値実験を行った。このような研究を通じて、「格子 QCD 数値解析によるハドロン分子共鳴状態の探索」へ発展させることを目指している。[16]

flavor  $SU(3)$  singlet negative parity baryon (1405) の研究

(1405) は strangeness=-1 の negative parity baryon である。strange quark を一つ含むのに、flavor  $SU(3)$  の negative parity sector で一番軽いバリオンになっている。これまで行われた quenched 格子 QCD の計算では、(1405) は 300 ~ 400 MeV 程度 overestimate されている。この値は他のバリオンと比べ際だって大きい。有力な原因の一つが古くから存在する N Kbar molecule 説である。実際 (1405) が強い相互作用で結び付いた N と Kbar の molecule だとすると、5 quark 成分が支配的になるため、通常の quenched 格子 QCD では、うまくいかない可能性がある。そこで我々は、5 quark operator を使った quenched QCD 計算を行い結果を比べた。(1405) を Kbar と N の単なる散乱状態から区別するため、空間方向の twist した境界条件を用いた。physical quark mass 領域へカイラル外挿した結果は、残念ながら通常の 3quark operator を使った計算よりもさらに 100 MeV ほど重くなってしまった。ここから結論できるのは、(1) (1405) の研究は十分にクォーク質量が軽い領域で行わなければならない。(2) (1405) は 3quark 状態と 5quark 状態をどちらも無視できないほど含む可能性がある。[33, 96, 117]

## 厳密繰り込み群を用いた BCS-BEC クロスオーバー現象の研究

BCS 理論が提唱されて以来、超伝導・超流動現象は、固相 (金属超伝導) 液相 (超流動ヘリウム) では観測されてきたものの、気相においての実現は実験的な困難のため憚られてきた。しかし、近年遂に、超低温でのアルカリ原子気体を用いての超流動現象が観測され、話題をよんでいる。この系の特徴はフェッシュバハ共鳴を利用し外部磁場を用いて原子間の相互作用の大きさを実験的にも自由に調整できることであり、これにより実験による観測と理論計算との比較が広範囲の相互作用領域にわたって行えるところにある。理論的にはこの系は相互作用の弱い極限では BCS 理論で、強い極限ではボース凝縮として良く記述されているが、この二つの全く異なる理論がフェルミオン間の散乱長という一つのパラメータで連続的に結ばれる (BCS-BEC クロスオーバー)。我々は、厳密繰り込み群という手法を用いて全ての温度密度領域、相互作用領域にわたってこの現象を

非摂動的に記述しようと試みている。今まで行われてきた平均場やガウス揺らぎなどの手法では、特定の相互作用の大きさだけでの記述や揺らぎの考慮が不十分なものであったが、この厳密繰り込み群による計算ではあらゆる相互作用の大きさの領域が記述できるので系の連続的变化が明瞭になり、しかも従来よりも精度の高い計算が可能となる。現在、この手法の核となる有効ポテンシャルに対する繰り込み群方程式の数値的解析を進めている。

#### ε 展開を用いたユニタリー・フェルミ気体の研究

短距離力で相互作用するフェルミ気体において、散乱長が発散する強結合極限はユニタリー極限と呼ばれる。本研究では、ユニタリー極限にあるフェルミ気体(ユニタリー・フェルミ気体)に対し、空間次元の4あるいは2からのずれを展開パラメータとする系統的な解析方法(イブシロン展開)を確立した。状態方程式、分散関係、臨界温度などユニタリー・フェルミ気体の様々な物理量について、イブシロン展開の最低次とその次の次数までで計算を行うことにより、数値シミュレーションや実験値と良く一致する結果が得られた。また粒子数に非対称性(分極)があるフェルミ気体において、ユニタリー極限近傍に安定なギャップレス超流動状態が現れうることを示した。[20, 21, 22, 46, 58, 59]

#### クォーク・グルーオン・プラズマ中の重いクォーク間ポテンシャルの研究

高温媒質中の重いクォーク間ポテンシャルは、QGP中でのクォークの性質を理解するうえで重要な物理量である。カラー自由度に基づく群論的分類により、クォーク( $q$ )・反クォーク( $\bar{q}$ )間ポテンシャルはカラー1重項と8重項に、 $qq$ 間ポテンシャルはカラー6重項と反3重項のチャンネルにそれぞれ分けられる。本研究では格子QCDシミュレーションにより、ポリヤコフ・ループの空間的な相関から、クォーク・グルーオン・プラズマ中でのそれぞれのカラーチャンネルにおけるポテンシャルの温度依存性を定量的に計算した。その結果、カラー1重項と反3重項は引力となり、カラー8重項と6重項は斥力になることを見出した。また、これらのポテンシャルから媒質中のデバイ遮蔽質量を計算した。その結果、デバイ遮蔽質量のカラーチャンネル依存性は、相転移温度の2倍程度の高温でカシミア項に吸収されること、デバイ遮蔽質量は高温領域では2次の摂動論と良い一致を示すことなどが分かった。さらにテラー展開法によりポテンシャルの密度意依存性を調べた結果、化学ポテンシャルに関する微分の1次の項の有無によって $q\bar{q}$ 間と $qq$ 間のポテンシャルの振る舞いに特徴的な違いを見出した。[23, 35, 38, 40, 41, 60, 61, 64, 66, 67, 68, 69, 120, 122, 124]

#### QCDの相転移温度の定量的評価

クォークやグルーオンが核子に閉じ込められたハドロン相から、それらが自由に振舞うクォーク・グルーオン・プラズマ相への相転移温度は、QCDにおける重要なパラメータの1つである。今までに多くのグループが格子シミュレーションによりその値を研究・評価しているが、いまだに統一見解が得られていない。また多くの研究が、格子上のクォーク作用としてスタッガード型を用いているが、この作用の格子化による誤差は十分に理解されていない。格子化による誤差を十分に取り除くためには、異なる作用による結果の比較が重要である。このため我々は、ウィルソン型クォーク作用を用いた格子シミュレーションによる相転移温度の評価を行った。その結果、クォークの質量がゼロになるカイラル極限において、相転移温度が165-180MeV程度と見積もられた。本研究は、より統計を上げ、さらに連続極限をとるという目的で現在も進行中である。[36, 39, 40, 41, 63, 66, 68, 123]

#### 有限温度・密度下の状態方程式の研究と臨界点の存在について

QCDの相構造において、低密度領域に相転移がクロスオーバーから2次転移になる臨界点があることがいくつかのモデルから予想されており、重イオン衝突実験での検証課題の1つになっている。本研究では格子QCDシミュレーションにより、クォーク数感受率からこの臨界点の存否を検証した。クォーク数感受率は2次相転移で発散するため、臨界点を見つけるための指標となる。クォーク数感受率の化学ポテンシャルに関するテラー展開を行い、2次の展開係数を計算した結果、相転移温度付近で大きなピークがあることを見出した。これは低密度領域に2次転移への臨界点があることを示唆していると考えられる。本研究は統計をより上げるために現在も進行中である。[37, 39, 40, 41, 62, 65, 66, 68, 121, 123]

#### 高密度QCDにおける新しい臨界点とハドロン-クォーク連続性

QCDのハドロン相とカラー超伝導相の中間バリオン密度領域に関しては、その相境界はどうなっているのか、また素励起がどのような形態で存在しているか等、多くの理論的な問題が謎に包まれている。我々はこの問題に対し、カイラル凝縮とダイクォーク凝縮の2つの秩序変数を含む一般的なGinzburg-Landau理論をQCDの対称性のみに基づいて構成した。このとき、軸性異常に由来する相互作用項がカラー超伝導中ではカイラル凝縮にとって外場のように働くことで、1次相転移であったカイラル相転移を途中で消失させ、ハドロン相からカラー超伝導相へのクロスオーバー、更にその中間領域に新しい臨界点が存在している可能性があることを示した。[24, 70, 125, 126] また、低エネルギー励起に対する有効ラグランジアンをQCDの対称性から構成し、有限密度領域に一

般化した Gell-Mann-Oakes-Renner 関係式を導出した。この結果、基底状態だけでなく  $\pi$  中間子のような励起状態に対してもハドロン-クォーク連続性が成り立つ可能性を明らかにした。[25, 42, 48, 71, 72, 127]

## 高エネルギーハドロン物理学

我々の研究室では、高温・高密度状態における核物質「クォーク・グルーオン・プラズマ」の実現の場としての高エネルギー原子核衝突反応に注目し、測定結果を基にした理論的研究を行っている。数値シミュレーションに基づくクォーク・グルーオン・プラズマの流体力学的記述、ハドロンガスの運動学的記述、クォーク・グルーオン・プラズマ中の高エネルギージェットやクォーク・グルーオンの伝播、高エネルギーハドロン・原子核の普遍的な姿としてのカラーガラス凝縮、など、原子核衝突反応の実験結果の理論的解析を通して、多角的な視点から高温クォーク・ハドロン物質の熱力学的性質、輸送的性質を研究している。

### カラーガラス凝縮による重イオン反応初期状態の記述

カラーガラス凝縮は高エネルギーハドロンの普遍的な姿と考えられている。この描像を高エネルギー重イオン衝突反応の初期状態に適用し、衝突後のクォーク・グルーオン・プラズマの時空発展を流体力学により記述した。カラーガラス凝縮の描像では、有限の衝突径数の反応における初期分布の歪みが大きくなり、これを反映して、通常予想されている以上の楕円型フロー（フローの歪み）が作られることがわかった [73]。

### ハドロン物質の散逸的性質と $\phi$ 中間子

高エネルギー重イオン衝突反応の終状態の時空発展をハドロン輸送理論により記述を行い、ハドロン物質の散逸の影響が集団的な流れの一つである楕円型フローに与える影響を調べた。完全流体 QGP 描像によって得られる楕円型フローのハドロンの質量依存性は、むしろ、ハドロンの散逸により生じることが分かった。更に、ハドロン相内でほとんど相互作用しない  $\phi$  中間子に注目し、質量毎に楕円型フローが小さくなるという傾向から外れることを示した [128, 139]。

### ジェットパートンと平衡状態化にあるパートンの結合

高エネルギーハドロン衝突反応における大きな横運動領域では、通常、独立破碎模型を用いて、パートンのハドロン化の計算を行う。この描像では、高エネルギーのパートンが真空からカラー重項になるように別のパートンを拾いあげる。一方、重イオン衝突反応では、ハドロン化が媒質近傍で起こるので、真空だけではなく、媒質中のパートンと結合してハ

ドロンを作ることも考えられる。この研究では、媒質パートンの位相空間分布の発展を相対論的流体力学により記述し、高エネルギーパートンと媒質パートンの間に紐を生成し、その崩壊によりハドロンを生成するモデルを作った。大きな横運動量でこの新しいハドロン化のメカニズムが重要である可能性を指摘した [44]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] S. Hirose, M. Serra, P. Ring, T. Otsuka and Y. Akaishi : “Relativistic mean field model based on realistic nuclear forces”, *Phys. Rev. C* **75**, 024301 (2007).
- [2] T. Otsuka, T. Matsuo, and D. Abe : “Mean Field with Tensor Force and Shell Structure of Exotic Nuclei”, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 162501 (2006).
- [3] A. Brown, T. Duguet, T. Otsuka, D. Abe, and T. Suzuki : “Tensor interaction contributions to single-particle energies”, *Phys. Rev. C* **74**, 061303 (2006).
- [4] M. A. G. Silveira, N. H. Medina, J. R. B. Oliveira, J. A. Alca'ntara-Nu'n ez, E. W. Cybulska, H. Dias, M. N. Rao, R. V. Ribas, W. A. Seale, K. T. Wiedemann, B. A. Brown, M. Honma, T. Mizusaki, and T. Otsuka : “ $^{58}\text{Co}$ : Structure of an odd-odd nucleus in the pf shell”, *Phys. Rev. C* **74**, 064312 (2006).
- [5] M. Horoi, B. A. Brown, T. Otsuka, M. Honma, and T. Mizusaki : “Shell model analysis of the  $^{56}\text{Ni}$  spectrum in the full pf model space”, *Phys. Rev. C* **73**, 061305(R) (2006).
- [6] A. Gade, B. A. Brown, D. Bazin, C. M. Campbell, J. A. Church, D. C. Dinca, J. Enders, T. Glasmacher, M. Horoi, Z. Hu, K. W. Kemper, W. F. Mueller, T. Otsuka, L. A. Riley, B. T. Roeder, T. Suzuki, J. R. Terry, K. L. Yurkewicz, and H. Zwahlen : “Evolution of the  $E(1/2_1^+) - E(3/2_1^+)$  energy spacing in odd-mass K, Cl, and P isotopes for  $N=20-28$ ”, *Phys. Rev. C* **74**, 034322 (2006).
- [7] J.R. Terry, D. Bazin, B.A. Brown, C.M. Campbell, J.A. Church, J.M. Cook, A.D. Davies, D.-C. Dinca, J. Enders, A. Gade, T. Glasmacher, P.G. Hansen, J.L. Lecouey, T. Otsuka, B. Pritychenko, B.M. Sherrilla, J.A. Tostevin, Y. Utsuno, K. Yoneda, and H. Zwahlen : “Direct evidence for the onset of intruder configurations in neutron-rich Ne isotopes”, *Phys. Lett. B* **640**, 86-90 (2006).
- [8] L. Gaudefroy, O. Sorlin, D. Beaumel, Y. Blumenfeld, Z. Dombardi, S. Fortier, S. Franchoo, M. Gelin, J. Gibelin, S. Grevy, F. Hammache, F. Ibrahim, K. W. Kemper, K.-L. Kratz, S. M. Lukyanov, C. Monrozeau, L. Nalpas, F. Nowacki, A. N. Ostrowski, T. Otsuka, Yu.-E. Penionzhkevich, J. Piekarewicz, E. C. Pollacco, P. Rousset-Chomaz, E. Rich, J. A. Scarpaci, M. G. St. Laurent, D. Sohler, M. Stanoiu, T. Suzuki, E. Tryggestad, and D. Verney : “Reduction of the Spin-Orbit

- Splittings at the  $N=28$  Shell Closure”, Phys. Rev. Lett. **97**, 092501 (2006).
- [9] T. Suzuki, S. Chiba, T. Yoshida, T. Kajino and T. Otsuka : “Neutrino-nucleus reactions based on new shell model Hamiltonians”, Phys. Rev. **C74**, 034307 (2006).
- [10] Y. Takei and Y. Iwata : “A Numerical Approach Based on Functional Analysis for Gravitating Compressible Viscous Fluids”, Journal of Information and Computational Science **3:4**, 1(2006).
- [11] T. Otsuka, T. Matsuo, and D. Abe : “Mean Field with Tensor Force and Shell Structure of Exotic Nuclei”, Phys. Rev. Lett. **97**, 162501 (2006).
- [12] B. A. Brown, T. Duguet, T. Otsuka, D. Abe, and T. Suzuki : “Tensor interaction contributions to single-particle energies”, Phys. Rev. **C74**, 061303 (2006).
- [13] N.Ishii, S.Aoki and T.Hatsuda : “The nuclear force from lattice QCD”, [nucl-th/0611096].
- [14] K.Hamaguchi, T.Hatsuda and T.T.Yanagida : “Stau-catalyzed nuclear fusion”, [hep-ph/0607256].
- [15] K.Hamaguchi, T.Hatsuda, M.Kamimura, Y.Kino and T.T.Yanagida : “Stau-catalyzed  $\text{Li}^6$  production in big-bang nucleosynthesis”, [hep-ph/0702274].
- [16] S. Sasaki and T. Yamazaki : “Signatures of S-wave bound-state formation in finite volume”, Phys. Rev. **D74**, 114507 (2006).
- [17] C. Dawson, T. Izubuchi, T. Kaneko, S. Sasaki and A. Soni : “Vector form factor in  $K_{l3}$  semileptonic decay with two flavors of dynamical domain-wall quarks”, Phys. Rev. **D74**, 114502 (2006).
- [18] K. Yokokawa, S. Sasaki, T. Hatsuda and A. Hayashigaki : “First lattice study of low-energy charmonium-hadron interaction”, Phys. Rev. **D74**, 034504 (2006).
- [19] H.Iida, T.Doi, N.Ishii, H.Suganuma, K.Tsumura : “Charmonium properties in deconfinement phase in anisotropic lattice QCD”, Phys. Rev. **D74**, 074502 (2006).
- [20] Y. Nishida and D. T. Son : “ $\epsilon$  expansion for a Fermi gas at infinite scattering length”, Phys. Rev. Lett. **97**, 050403 (2006) [cond-mat/0604500].
- [21] Y. Nishida and D. T. Son : “Fermi gas near unitarity around four and two spatial dimensions”, [cond-mat/0607835] ( Phys. Rev. A に投稿中 ).
- [22] Y. Nishida : “Unitary Fermi gas at finite temperature in the  $\epsilon$  expansion”, [cond-mat/0608321] ( Phys. Rev. A に投稿中 ).
- [23] Y. Maezawa, N. Ukita, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii and K. Kanaya [WHOT-QCD Collaboration] : “Heavy-Quark Free Energy, Debye Mass, and Spatial String Tension at Finite Temperature in Two Flavor Lattice QCD with Wilson Quark Action”, Phys. Rev. **D75**, 074501 (2007).
- [24] Tetsuo Hatsuda, Motoi Tachibana, Naoki Yamamoto and Gordon Baym : “New Critical Point Induced by the Axial Anomaly in Dense QCD”, Phys. Rev. Lett. **97**, 122001 (2006).
- [25] Naoki Yamamoto, Motoi Tachibana, Tetsuo Hatsuda and Gordon Baym : “Phase structure, collective modes, and the axial anomaly in dense QCD”, [arXiv:0704.2654] (Phys. Rev. D に投稿中).
- (会議抄録)
- [26] M. Honma, T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Hjorth-Jensen : “Effective interaction for  $f_5p_9$ -shell nuclei and two-neutrino double beta-decay matrix elements”, J. of Phys. : Conf. Ser. **49**, 45-50 (2006).
- [27] S. Fujii, T. Mizusaki, T. Otsuka, T. Sebe, and A. Arima : “Shell-model description of  $^{16}\text{C}$  with the Idaho  $N^3\text{LO}$  NN potential”, Proceedings of the International Symposium on *Structure of Exotic Nuclei and Nuclear Forces* (SENUF06), Tokyo, March 9-12, 2006. (Institute of Physics Publishing, J. of Phys. : Conf. Ser. **49**, 7-12 (2006)).
- [28] N. Shimizu, T. Otsuka, T. Mizusaki, and M. Honma : “Monte-Carlo shell model calculations of Xe and Ba isotopes”, J. Phys.: Conf. Ser. **49**, 178-183 (2006).
- [29] T. Yoshida, N. Itagaki and T. Otsuka : “Cluster and shell correlation in Ne isotopes”, Journal of physics: Conference Series (Structure of Exotic Nuclei and Nuclear Forces) Vol. **49**, 124-125 (2006).
- [30] D. Abe and T. Otsuka : “Tensor force effects on nuclei by the mean-field calculation”, Journal of Physics : Conference Series **49**, 41 (2006).
- [31] S. Sasaki and T. Yamazaki : “SU(3) breaking effects in hyperon beta decay from lattice QCD”, PoS LAT2006, **092** (2006).
- [32] D. J. Antonio, P. A. Boyle, C. Dawson, T. Izubuchi, A. Juttner, C. Sachrajda, S. Sasaki, A. Soni, R. J. Tweedie, J. M. Zanotti : “ $K \rightarrow \pi l \nu$  form factor with  $N_f = 2 + 1$  dynamical domain wall fermions”, PoS LAT2006, **101** (2006).
- [33] N.Ishii, T.Doi, H.Iida, M.Oka, F.Okiharui, H.Suganuma, K.Tsumura : “Anisotropic lattice QCD studies of penta-quarks and tetra-quarks” AIP Conf. Proc. **842**, 492 (2006). (Particles and Nuclei International Conference (PANIC05), Santa Fe, New Mexico, USA, 24-28 October, 2005).
- [34] N.Ishii, S.Aoki and T.Hatsuda : “Nuclear Force from Lattice QCD” Pos LAT2006, **109** (2006). (The 24th International Symposium on Lattice Field Theory(Lattice 2006), Tucson, Arizona, USA, 23-28 July, 2006).
- [35] Y. Maezawa, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, N. Ukita, S. Aoki and K. Kanaya : “Static quark free energies at finite temperature with two flavors of improved Wilson quarks”, Proceedings of

- Lattice 2006, PoS LAT2006, **141** (2006), [hep-lat/0610013].
- [36] N. Ukita, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, Y. Maezawa, S. Aoki and K. Kanaya : “Finite temperature phase transition of two-flavor QCD with an improved Wilson quark action”, Proceedings of Lattice 2006, PoS LAT2006, **150** (2006), [hep-lat/0610038].
- [37] S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, Y. Maezawa, N. Ukita, S. Aoki and K. Kanaya : “Equation of state for two-flavor QCD with an improved Wilson quark action at non-zero chemical potential”, Proceedings of Lattice 2006, PoS LAT2006, **132** (2006), [hep-lat/0609075].
- [38] 前沢祐 : 「格子 QCD による高温でのクォーク間ポテンシャルの研究」, 素粒子論研究 114 巻 3 号, C1 項 2006 年.
- [39] 江尻信司 : 「ウィルソン型クォーク作用を用いた 2 フレーバー QCD の有限密度での状態方程式の研究」, 素粒子論研究 114 巻 3 号, C1 項 2006 年.
- [40] Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya and N. Ukita : “Thermodynamics of two-flavor lattice QCD with an improved Wilson quark action at non-zero temperature and density”, Proceedings of Quark Matter 2006, [hep-lat/0702005].
- [41] Shinji Ejiri : “Lattice QCD thermodynamics with Wilson quarks”, Proceedings of Yukawa International Seminar “YKIS 2006”.
- [42] N. Yamamoto, T. Hatsuda, M. Tachibana and G. Baym : “Hadron-quark continuity induced by the axial anomaly in dense QCD”, to appear in Journal of Physics G : Nuclear and Particle Physics, [hep-ph/0701191].
- [43] T. Hirano : “Elliptic flow from a hybrid CGC, full 3D hydro, and hadronic cascade model”, proceedings of the 19th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Quark Matter 2006 (QM2006), J. Phys. G (in press).
- [44] M. Isse, T. Hirano, R. Mizukawa, A. Ohnishi, K. Yoshino, Y. Nara : “Jet-fluid string formation and decay in high-energy heavy-ion collisions”, proceedings of the 19th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Quark Matter 2006 (QM2006), Int. J. Mod. Phys. E (in press).
- (学位論文)
- [45] 吉田亨 : “Molecular states of carbon isotopes”, 博士論文.
- [46] 西田祐介 : “Unitary Fermi gas in the  $\epsilon$  expansion”, 博士論文 [cond-mat/0703465].
- [47] 高橋裕 : “Mean-field calculations on deformation of heavy nuclei”, 修士論文.
- [48] 山本直希 : “New Critical Point and Hadron-Quark Continuity in Dense QCD”, 修士論文.
- (国際会議)
- 一般講演
- [49] Yoritaka Iwata : “Poton-induced fission by TDHF calculation”, COLOQ GANIL 06, Giens, France (Poster presentation), Jun. 2006.
- [50] Yasuhiro Takei and Yoritaka Iwata : “A numerical approach based on functional analysis for gravitating compressible viscous fluids”, ISICS 2006, Dalian, China, Aug, 2006.
- [51] Yoritaka Iwata : “The time evolution of excited nuclei”, CISS 2006 (Student Session), Wako, Japan, Aug, 2006.
- [52] Yoritaka Iwata : “Competitive reaction mechanisms in heavy-ion collisions”, Japan-French workshop, Caen, France, Mar. 2007.
- [53] D. Abe and T. Otsuka : “Mean-field calculations with the Gogny force including the Tensor force”, Daniel Gogny Jubilee Nuclear Structure and Reactions, May 30-31, 2006, CEA DIF, Bruyères-le-Châtel, France.
- [54] D. Abe and T. Otsuka : “Investigation of tensor-force effect on exotic nuclei by the HFB method”, Joint JUSTIPEN-LACM Meeting, Joint Institute for Heavy Ion Research, Mar. 5-8, 2007, Oak Ridge, Tennessee, USA.
- [55] D. Abe and T. Otsuka : “Investigation of tensor-force effect on exotic nuclei by the HFB method”, Japanese French Workshop on Exotic Femto Systems, Mar. 13-16th, 2007, Caen France.
- [56] S. Sasaki and T. Yamazaki : “SU(3) breaking effects in hyperon beta decay from lattice QCD”, The XXIV international symposium on Lattice 2006, July 23-28, 2006, Tucson, Arizona, USA.
- [57] N.Ishii, S.Aoki, T.Hatsuda : “Nuclear Force from Lattice QCD”, “The 24th International Symposium on Lattice Field Theory(Lattice 2006)”, Tucson, Arizona, USA, 23-28 July, 2006.
- [58] Y. Nishida : “ $\epsilon$  expansion in cold atoms”, 21 Century COE Workshop on “Strongly Correlated Many-Body Systems – from Neutron Stars to Cold Atoms –”, Tokyo, Japan, January 19, 2007.
- [59] Y. Nishida : “ $\epsilon$  expansion in cold atoms”, ECT\* workshop on “The interface of quark-gluon-plasma physics and cold-atom physics”, Trento, Italy, March 19-23, 2007.
- [60] Y. Maezawa : “Heavy quark potentials in full QCD lattice simulations at finite temperature”, Frontiers in the Physics of Quark-Gluon Plasma, July7-8, 2006, RIKEN, Japan.
- [61] Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, Y. Taniguchi and N. Ukita : “Static

- quark free energies at finite temperature with two flavors of improved Wilson quarks”, The XXIV International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2006), July 23-28, 2006, Arizona, USA.
- [62] S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, Y. Maezawa, Y. Taniguchi, N. Ukita : “Equation of state for two-flavor QCD with an improved Wilson quark action at non-zero chemical potential”, The XXIV International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2006), July 23-28, 2006, Arizona, USA.
- [63] N. Ukita, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, Y. Maezawa and Y. Taniguchi : “Finite temperature phase transition of two-flavor QCD with an improved Wilson quark action”, The XXIV International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2006), July 23-28, 2006, Arizona, USA.
- [64] Y. Maezawa : “Heavy Quark Potentials in Full QCD Lattice Simulations at Finite Temperature”, RIKEN BNL Workshop “QCD in Extreme Conditions”, July 31-August 2, 2006, Brookhaven National Laboratory, USA.
- [65] Shinji Ejiri : “QCD thermodynamics with Two Flavors of Wilson Quarks”, RIKEN BNL Workshop “QCD in Extreme Conditions”, July 31-August 2, 2006, Brookhaven National Laboratory, USA.
- [66] Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya and N. Ukita : “Thermodynamics of two-flavor lattice QCD with an improved Wilson quark action at non-zero temperature and density”, The 19th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2006), (Nov. 14-20, 2006, Shanghai, China).
- [67] Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya and N. Ukita : “Static quark free energies at finite temperature in full QCD lattice simulations”(Poster Session), The 19th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2006), (Nov. 14-20, 2006, Shanghai, China).
- [68] Shinji Ejiri : “Lattice QCD Thermodynamics with Wilson quarks”, New Frontiers in QCD (YKIS 2006), (Nov. 20 - Dec. 8, 2006, Yukawa Institute, Japan).
- [69] Y. Maezawa : “Static quark potentials at finite temperature in full QCD lattice simulations”(Poster Session), New Frontiers in QCD (YKIS 2006), (Nov. 20 - Dec. 8, 2006, Yukawa Institute, Japan).
- [70] Naoki Yamamoto, Tetsuo Hatsuda, Motoi Tachibana and Gordon Baym : “New Critical Point Induced by the Axial Anomaly in Dense QCD”, RIKEN Workshop on “Frontiers in the Physics of Quark-Gluon Plasma”, July 8-9, 2006, RIKEN, Japan.
- [71] Naoki Yamamoto, Tetsuo Hatsuda, Motoi Tachibana and Gordon Baym : “Hadron-quark continuity induced by the axial anomaly in dense QCD”, The 19th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2006), Nov. 14-20, 2006, Shanghai, China.
- [72] Naoki Yamamoto, Tetsuo Hatsuda, Motoi Tachibana and Gordon Baym : “Excited spectra and hadron-quark continuity in dense QCD”, Workshop on Hadronic and Nuclear Physics 2007, Feb. 22-24, 2007, Busan, Korea.
- [73] T. Hirano : “CGC, Full 3D Hydro, and Hadronic Cascade”, the 19th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Quark Matter 2006 (QM2006), Shanghai, China, Nov. 2006.

## 招待講演

- [74] T. Otsuka : “Monte Carlo Shell Model calculations on Exotic Nuclei”, Daniel Gogny Jubilee Nuclear Structure and Reactions, May 30 - 31, 2006, CEA DIF, Bruyères-le-Châtel, France.
- [75] T. Otsuka : “Shell Structure of Exotic Nuclei”, Users meeting, National Superconducting Cyclotron Laboratory, May 31 - June 2, 2006, East Lansing, U.S.A.
- [76] T. Otsuka : “Tensor Force and Nuclear Mean Field”, 11th Int. Conf. on Nuclear Reaction Mechanisms, June 11 - 16, 2006, Varenna, Italy.
- [77] T. Otsuka : “Effects of Spin-Isospin Interactions on Nuclear Collective Motion”, 2nd Int. Conf. on Collective Motion in Nuclei Under Extreme Conditions, June 19 - 22, 2006, Rheinfels, St. Goar, Germany.
- [78] T. Otsuka : “Evolution of Nuclear Shells in Exotic Nuclei”, 7th Int. Conf. on Radioactive Nuclear Beams (RNB7), July 3 - 7, 2006, Cortina d’Ampezzo, Italy.
- [79] T. Otsuka : “Shell Evolution and Nuclear Forces”, Nuclear Structure 06 Conference, July 24 - 28, 2006, Oak Ridge, U.S.A.
- [80] T. Otsuka : “Perspectives of Shell Model”, Aug. 21 - 25, 2006, 核物理暑期学校、北京大学.
- [81] T. Otsuka : “Application of the shell model to nuclei far from stability : effective interaction and shell evolution”, 6th Euroschool on Exotic Beams, Sep. 11 - 15, 2006, ect\*, Trento, Italy.
- [82] T. Otsuka : “Mean field properties of Exotic Nuclei and the Tensor Force”, 28th Int. School of Nuclear Physics, Sep. 16 - 24, 2006, Ettore Majorana, Erice, Italy.

- [83] T. Otsuka : “Structure of Exotic Nuclei and the Tensor Force”, Nuclear Physics, the Core of Matter, the Fuel of Stars A symposium surveying the future of nuclear physics and celebrating 50 years of John Schiffer’s research at Argonne, Sep. 21 - 22, 2006, Argonne National Laboratory, U.S.A.
- [84] T. Otsuka : “Implications of Federman-Pittel mechanism for exotic nuclei”, XXX Nuclear Physics Symposium, Jan. 3 - 6, 2007, Cocoyoc, Mexico.
- [85] T. Otsuka : “Tensor force in shell and mean-field models”, Int. Workshop Joint JUSTIPEN-LACM meeting, Mar. 5 - 8, 2007, Oak Ridge National Laboratory, U.S.A.
- [86] T. Otsuka : “NN forces and the shell structure of exotic nuclei”, Japanese French Workshop on Exotic Femto Systems, Mar. 13 - 16, 2007, GANIL, Caen, France.
- [87] T. Hatsuda : “What we know about Charmonia above  $T_c$  in Lattice QCD Simulations”, 20th Anniversary of  $J/\Psi$  Suppression, Brookhaven, New York, May 9, 2006.
- [88] T. Hatsuda : “Phase Structure of Hot/Dense QCD”, The 11th Taiwan Nuclear Physics Summer School, Taipei, Taiwan, June 8-10th, 2006.
- [89] T. Hatsuda : “Static and Dynamic Correlations in Hot QCD”, RHIC Physics in the Context of the Standard Model: A Workshop and Symposium, Brookhaven, New York, June 18-23, 2006.
- [90] T. Hatsuda : “QCD Phase Diagram”, The 1st Asian Triangle Heavy Ion Conference (ATHIC 2006), Seoul, Korea, June 29 -July 1, 2006.
- [91] T. Hatsuda : “Strong Correlations in Hot QCD”, The XXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2006), Tucson, Arizona, July 23-28, 2006.
- [92] T. Hatsuda : “Bulk and Spectral Observables in Lattice QCD”, 19th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions: Quark Matter 2006 (QM2006), Shanghai, China, 14-20 Nov 2006 [hep-ph/0702293].
- [93] S. Sasaki : “Semileptonic decays on the lattice”, RIKEN BNL Research Center Symposium on RHIC Physics in the context of the standard model, June 18-23, 2006, BNL, New York, USA.
- [94] S. Sasaki : “Recent results from the lattice on PDFs and GPDs”, Workshop (Joint EIC2006 and Hot QCD meeting) on Future prospects in QCD at high energy, July 17-22, 2006, BNL, New York, USA.
- [95] N.Ishii, H.Iida, T.Doi, H.Suganuma, K.Tsumura : “Charmonium above  $T_c$  in lattice QCD”, “Selected Topics on Heavy Flavor Production in High-Energy Collisions”, Tsinghua University, Beijing, China, 22-23, November, 2006.
- [96] N.Ishii, T.Doi, M.Oka, H.Suganuma : “Lambda(1405) as a 5Q from anisotropic lattice QCD”, Yukawa International Seminars (YKIS) 2006, New Frontiers in QCD —Chiral dynamics in nuclear medium 京都大学基礎物理学研究所、京都府京都市、2006年12月.
- [97] T. Hirano : “Relativistic Hydrodynamics at RHIC and LHC”, Yukawa International Seminar (YKIS 2006), New Frontiers in QCD, Yukawa Institute of Theoretical Physics, Kyoto, Japan, Nov. 2006.
- [98] T. Hirano : “Dynamical Modeling of Relativistic Heavy Ion Collisions”, Strongly Coupled Quark-Gluon Plasma, Nagoya University, Nagoya, Japan, Feb. 2007.
- [99] T. Hirano : “Expansion and viscosity in heavy ion collisions”, The interface of quark-gluon-plasma physics and cold-atom physics, ECT\*, Italy, Feb. 2007.
- (国内会議)
- 一般講演
- [100] 清水則孝、大塚孝治、本間道雄、水崎高浩 : 「モンテカルロ殻模型による中重核の構造」, 2006年度物理学学会秋の分科会: 2006年9月:奈良女子大学、奈良.
- [101] 吉田亨、板垣直之、大塚孝治 : 「 $^{21}\text{Ne}$ における相関と一粒子軌道」, 日本物理学会 2006年春の年次大会、愛媛大学 2006年3月.
- [102] 吉田亨、板垣直之、大塚孝治 : 「 $^{21}\text{Ne}$ における相関とバレンス中性子」, KEK 原子核研究会「現代の原子核物理 - 多様化し進化する原子核の描像 -」 KEK 2006年8月.
- [103] 吉田亨、板垣直之、大塚孝治 : 「 $^{21}\text{Ne}$ における相関とバレンス中性子」, 日本物理学会 2006年秋の分科会、奈良女子大学 2006年9月.
- [104] 岩田順敬 : 「電氣的に励起された原子核の時間発展」, KEK 研究会 (高エネルギー加速器研究機構 2006年8月).
- [105] 岩田順敬, C.Simenele, 大塚孝治 : 「TDHFによるE1励起された不安定核の研究」, 日本物理学会 (奈良女子大学 2006年9月).
- [106] 岩田順敬 : 「E1励起された不安定核の非線形応答」 東京大学 COE・RA 若手交流シンポジウム (東京大学・小柴ホール 2006年11月).
- [107] Yoritaka Iwata : “Dynamically fluctuating alpha-particle in exotic nuclear reactions”, Colloquium of University of Frankfurt (University of Frankfurt, Feb. 2007).
- [108] 岩田順敬、大塚孝治 : 「重イオン核融合反応のTDHF計算」, 日本物理学会 (首都大学東京 2007年3月).
- [109] 阿部大介、大塚孝治 : “テンソル力を考慮した平均場計算による不安定核構造の研究”、KEK 研究会「現代の原子核物理 - 多様化し進化する原子核の描像」 (KEK, 2006年8月1日).

- [110] 阿部大介、大塚孝治：“不安定核構造に与えるテンソル力の効果の平均場理論による研究”、日本物理学会 2006 年秋季大会、(奈良女子大、2006 年 9 月 20 日-23 日)。
- [111] 阿部大介、大塚孝治：“テンソル力を用いた平均場計算”、RIBF ミニワークショップ「RIBF に於ける  $\gamma$  分光実験 II」(理化学研究所、2006 年 10 月 16 日)。
- [112] 阿部大介、大塚孝治：“テンソル力を考慮した Gogny 型相互作用を用いた HFB 計算”、基研研究会「有効相互作用の理論と核模型」(京都大学基礎物理学研究所、2007 年 2 月 6 日)。
- [113] 阿部大介、大塚孝治：“原子核構造に与えるテンソル力と対相関の効果”、日本物理学会 2007 年春季大会、(首都大学東京、2007 年 3 月 26 日)。
- [114] 月山幸志郎、大塚孝治、藤本林太郎：“ドリップ線付近の酸素同位体における殻模型計算に対する連続状態の寄与”、有効相互作用の理論と殻模型 (2007 年 2 月、京都大学基礎物理学研究所)。
- [115] K. Tsukiyama, T. Otsuka, and R. Fujimoto：“Continuum effects for the shell-model calculation near the drip line oxygen isotopes”, New Theoretical Approaches to Dynamics in Unstable Nuclei (2007 年 2 月 23, 24 日:理化学研究所)。
- [116] 月山幸志郎、大塚孝治、藤本林太郎：“ドリップ線付近の酸素同位体における殻模型計算に対する連続状態の寄与”、日本物理学会 2007 年春季大会 (2007 年 3 月、首都大学東京)。
- [117] Noriyoshi ISHII, Takumi DOI, Makoto OKA, Hideo SUGANUMA：“Lambda(1405) as a 5Q from anisotropic lattice QCD”, KEK 研究会「現代の原子核物理-多様化し進化する原子核の描像」, KEK, 茨城県つくば市、2006 年 8 月。
- [118] 石井理修、青木慎也、初田哲男：“格子 QCD による核力の計算”、日本物理学会、奈良女子大学、奈良県奈良市、2006 年 9 月。
- [119] 石井理修、青木慎也、初田哲男：“格子 QCD による核力”、基研研究会「有効相互作用の理論と核構造」, 京都大学基礎物理学研究所、京都府京都市、2007 年 2 月。
- [120] 前沢祐：“格子 QCD による高温でのクォーク間ポテンシャルの研究”、基研研究会「熱場の量子論とその応用」(京都大学基礎物理学研究所、2006 年 8 月 23-25 日)。
- [121] 江尻信司：“ウィルソン型クォーク作用を用いた 2 フレーバー QCD の有限密度での状態方程式の研究”、基研研究会「熱場の量子論とその応用」(京都大学基礎物理学研究所、2005 年 8 月 23 日-25 日)。
- [122] 前沢祐、青木慎也、江尻信司、初田哲男、石井理修、金谷和至、谷口裕介、浮田尚哉：“格子 QCD による高温でのクォーク間ポテンシャルの研究”、日本物理学会 2006 年秋季大会 (奈良女子大学、2006 年 9 月 20-23 日)。
- [123] 浮田尚哉、青木慎也、江尻信司、初田哲男、石井理修、金谷和至、前沢祐：“ウィルソン型クォーク作用を用いた格子 QCD シミュレーションによる相転移温度と熱力学の研究 1”、日本物理学会 2007 年春季大会 (首都大学東京、2007 年 3 月 25-28 日)。
- [124] 前沢祐、青木慎也、江尻信司、初田哲男、石井理修、金谷和至、浮田尚哉：“ウィルソン型クォーク作用を用いた格子 QCD シミュレーションによる相転移温度と熱力学の研究 2”、日本物理学会 2007 年春季大会 (首都大学東京、2007 年 3 月 25-28 日)。
- [125] 山本直希、初田哲男、橘基、Gordon Baym：“GL 理論におけるカイラル凝縮とダイクォーク凝縮の競合と相構造”、基研研究会「熱場の量子論とその応用」(京都大学基礎物理学研究所、2006 年 8 月 23-25 日)。
- [126] 山本直希、初田哲男、橘基、Gordon Baym：“GL 理論におけるカイラル凝縮とダイクォーク凝縮の競合と相構造”、日本物理学会 2006 年秋季大会 (奈良女子大学、2006 年 9 月 20-23 日)。
- [127] 山本直希、初田哲男、橘基、Gordon Baym：“高密度 QCD におけるカイラル・ダイクォーク凝縮の競合と励起スペクトル”、日本物理学会 2007 年春季大会 (首都大学東京、2007 年 3 月 25-28 日)。
- [128] 平野哲文：“Mass ordering of differential elliptic flow and its violation for  $\phi$  mesons”、日本物理学会 春の分科会、首都大学東京、2007 年 3 月。
- 招待講演
- [129] 大塚孝治：“カイラル摂動論と不安定核の殻進化”、基研研究会「有効相互作用の理論と核模型」(京都大学基礎物理学研究所、2007 年 2 月 5-7 日)。
- [130] 大塚孝治：“ランダム相互作用とガスの凝縮状態 - カオスを作る秩序の一例? - ”、阪大 RCNP 研究会「核子多体系におけるクラスター現象」(大阪大学核物理研究センター、2007 年 2 月 14-16 日)。
- [131] 初田哲男：“Nuclear Force and High Density Matter”、“超新星を舞台とする高エネルギー物理現象” (東京大学、2007 年 2 月 1 日-3 日)。
- [132] 初田哲男：“Introduction to Hot QCD”、“名古屋ウィンタースクール 宇宙と物質の起源” (メルパール伊勢志摩、2007 年 2 月 19 日-23 日)。
- [133] 初田哲男：“QCD の熱くて密な物語”、“ハドロン物理と超弦理論の再会 ハドロン、強結合プラズマ、そしてブラックホール” (KEK、2007 年 3 月 5 日-7 日)。
- [134] 石井理修、青木慎也、初田哲男：“Lattice QCD approach to the nuclear force”、“ストレンジネスとエキゾティクス・理論の課題”研究会志摩ビーチホテル、三重県鳥羽市、2007 年 3 月。
- [135] 石井理修、青木慎也、初田哲男：“格子量子色力学による核力の研究”、日本物理学会 (企画講演) 首都大学東京、東京都八王子市、2007 年 3 月。
- [136] 江尻信司：“高温高密度での格子量子色力学”、平成 18 年度原子核三者若手夏の学校 (長野、パノラマランド木島平、2006 年 8 月 5 日-10 日)。
- [137] 平野哲文：“Theoretical Overview —Current Status of perfect liquid—”, 第一回 Heavy Ion Café, 東京大学、2006 年 12 月。

[138] 平野哲文: “Toward understanding EOS of the QGP in relativistic heavy ion collisions”, Supernovae Conference 2007, 東京大学, 2007年2月.

[139] 平野哲文: “Mass ordering of differential elliptic flow and its violation for  $\phi$  mesons”, RHIC 高エネルギー原子核反応の物理研究会, 安曇野, 長野, 2007年2月.

## 1.2 素粒子論研究室 (江口・柳田・松尾・浜口)

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

### 1.2.1 弦理論

#### 二次元共形場理論

弦の作用はその世界面上の共形場の理論として記述される。弦理論のさまざまな状況での振る舞いを解析するためには、二次元共形場の理論を詳しく調べる必要がある。

超弦理論において素粒子模型として有望な超対称フラックス真空は、モジュラー空間上において特異カラビ・ヤウ空間の近傍に多く存在することが知られており、また世界面上の共形場理論の見地からは、多くの未解決問題を含むという意味においても、特異カラビ・ヤウ空間上の超弦理論は重要性を持つ。江口と菅原は、Taormina 氏 (Durham 大) との共同研究において、非コンパクト特異カラビ・ヤウ空間に対し、超弦理論における重要な物理量である楕円種数の代数的構造を調べた。これらの真空における超弦理論の conformal block は特異なモジュラー変換性を示すため、物理的に sensible な楕円種数を与えるのは極めて非自明な問題である。江口・菅原は、 $\Gamma(2)$  モジュラー部分群の作用で不変な楕円種数を提案し、同時に関連の深いテーマとして、これまで未解決であった一般のレベルでの (‘small’ and ‘large’)  $N=4$  超共形代数の指標のモジュラー変換公式を導くことに成功した。[2, 70, 75]

弦理論のソリトンである D プレーンを共形場理論を用いて厳密に記述する方法として境界状態がある。よく研究されてきたのは、D プレーンによる閉弦の吸収・放出を記述する閉弦セクターでの境界状態であるが、松尾、今村、磯野は 2005 年度に、D プレーンが交叉している状況において閉弦を吸収・放出する状態として、閉弦セクターでの境界状態を定義した。その段階ではボゾン弦においてのみ定義したが、今年度は引き続き、超弦理論などへの応用を見越して、フェルミオン弦における閉弦の境界状態

の性質について解析を行った。

2 次元ブラックホールは  $SL(2, \mathbf{R})/U(1)$  コセット模型として世界面の立場から厳密に記述することができるが、その空間上を伝播する D プレーンの運動を境界状態を用いて調べることで、2 次元ブラックホールの幾何学を量子的にプローブすることができる。菅原と中山は S.-J. Rey 氏 (ソウル国立大) と共に、閉弦-開弦のデュアリティとユニタリティの両立性を厳密に示し、世界面上でのウィック回転の正しい取り扱い方法を確立した [19]。これによって、先年度に提唱した境界状態の正当性が明らかになった。中山は、上記の結果を含む、2 次元ブラックホール中を運動する D プレーンの境界状態の構築とその物理的解釈を、弦とブラックホールの相転移現象に注目して博士論文としてまとめた [53]。

戴は  $\beta$  変形を受けた時間に依存する時空において、弦の生成率などを調べ、古典論と弦の世界面上の 2 次元 CFT を使った計算を比較した [30]。

信山はリッチ平坦な曲がった空間のオービフォルド背景上の弦理論を、世界面上の 2 次元共形場の理論の立場から調べた。背景時空の曲率を摂動として扱うことにより、平坦であるときには零質量であるモードがタキオンのような例を具体的に示した [55]。このようなモードは T 双対性を通して 0 型弦理論の NS5 プレーン上の閉弦タキオンのモードに対応しており、閉弦タキオンの凝縮の効果を調べる上で重要である。

#### 量子重力、行列模型

次元が 1 の低次元重力は行列量子力学で記述されることが知られている。この理論の通常の力学的自由度はタキオンと呼ばれるスカラー粒子であり、行列量子力学の言葉では 1 重項 (singlet) 波動関数で記述されることが知られている。最近この系のソリトン解である「長い開弦」が non-singlet 波動関数で記述されることがわかってきた。non-singlet セクターでは自由場に帰着される singlet セクターの場合とは異なり Calogero 型の相互作用が入ることが知られている。松尾と初田は non-singlet セクターの可解性を調べるため無限個の保存量の構成、無限次元の対称性代数、Boson 変数による書き換え、スペクトルの導出、波動関数の厳密解などを行った [3, 96]。

戴はゲージ群のランクが大きい 4 次元  $\mathcal{N}=4$  超対称ゲージ理論における 1/2 BPS 相関関数が、 $c=1$  行列模型の古典タキオン散乱振幅で再現できることを示した [32]。

#### 膜の理論

M 理論の基本励起は膜であると考えられている。弦理論において非可換時空 (non-commutative space) が 2 階反対称テンソル背景中に自然に現れることに対応して膜の理論においては 3 階反対称テンソル背景中に非結合空間 (non-associative space) が現れると考えられている。松尾は Pei-Ming Ho 氏 (台湾大)

と共同で膜の反対称テンソル背景中の運動の基本的な構造、すなわち非結合的な相互作用がどのように現れるのかをまず調べ、そのような空間における最も簡単なモデルの提唱とその基本的な性質 (UV/IR 混合) の解析を行った。また内部自由度をどのように導入すべきか、また格子重力理論との関連などを議論した [18]。

11 次元超膜理論の量子論的超ポアンカレ対称性は、超弦理論の非摂動的ふるまいと深い関係がある重要な性質であると考えられているが、同理論の量子化はこれらの対称性が極めて見えにくい光円錐ゲージでしかなされていない。相陌は風間氏 (東大駒場) との共同研究で、超弦理論の超ポアンカレ共变的記述を与えるピュアスピノル形式を超膜理論の場合に拡張し、古典論的には超弦理論の場合と近い記述ができることを見出した [1, 58, 59]。

### 位相的弦理論

桜井は昨年引き続き、Kapustin-Witten とは独立に 2 次元の Hitchin の安定ヒッグス束に関する Beilinson-Drinfeld の理論を、del Pezzo 曲面の位相的弦理論に拡張することを試みた。特に ADE 型の保型表現が closed Gromov-Witten 不変量の生成母関数 (分配関数) に寄与するという予想を、ピカル群の生成する局所系から議論した。[61][90] また、その open Gromov-Witten 不変量へのカテゴリカルな拡張の可能性を形式ループ空間の手法を用いて調べた。

## 1.2.2 ゲージ理論と弦理論

弦理論には D ブレーンと呼ばれる広がりを持ったオブジェクトが含まれ、その上ではさまざまな種類のゲージ理論が実現される。このことによる弦理論とゲージ理論の間の関係 (双対性) は弦理論における重要な研究課題の 1 つとなっている。特に、D ブレーンの重力的表現である AdS 空間を背景とする弦理論と、ブレーン上の共形場理論 (CFT) の間の双対性は AdS/CFT 対応と呼ばれる。もともとこの双対性は多数の超対称性および共形対称性を持つような場合について提案されたものであるが、現在では超対称性の数が少ない共形場理論や、共形対称性がないゲージ理論へも拡張され、ゲージ/重力対応とも呼ばれている。本研究室では、この双対性の解明に向け、ゲージ理論側と弦理論側の両方からさまざまなアプローチでの研究がなされている。

### 4 次元超共形場の理論

4 次元  $\mathcal{N} = 1$  の超対称ゲージ理論の赤外固定点では、超対称共形場の理論 (SCFT) が実現し、強結合にもかかわらずある程度厳密な解析が可能になる。川野と八木は、2 つのスピノル表現の場と複数のベクトル表現の場を含む、 $Spin(10)$  ゲージ理論の赤外固定点において、どの演算子が理論からデカップル

するかを、電磁双対性と a-maximization を利用して調べた。

### 超対称共形場の理論と AdS/CFT

ゲージ/重力対応によれば、ゲージ理論のモジュライ空間は、重力解が記述する時空における D ブレーンの位置に対応すると考えられている。小山と八木は、4 次元  $\mathcal{N} = 1$   $Sp(p+M) \times Sp(p)$  のカスケードゲージ理論の量子モジュライ空間を調べ、その各ブランチの変形パラメータの比が、対応する重力解から予想されるものと一致することを示した [17]。小山は、これらの結果を元に、カスケードゲージ理論のオリエンティフォルド化についてゲージ重力対応の観点から博士論文にまとめた [52]。

SCFT を分類することは、場の理論・弦理論の枠組みを定めるために重要である。SCFT における指数という概念は SCFT を特徴付ける新しい量であり、中山はその性質を詳しく調べた。具体的には、4 次元  $\mathcal{N} = 1$  conifold ゲージ理論で指数を計算し、AdS/CFT 対応から予言される結果を再現することを示した [20]。また、有限のゲージ群のランク  $N$  に対する指数の研究を通して、“maximal angular momentum bound” という極限を定義し、指数の計算を行った。さらに、重力的な観点からその極限の物理的意味を明らかにした [114]。

近年、超対称性の数が  $\mathcal{N} = 1$  である 4 次元 SCFT に対して AdS/CFT 対応の実例が多数構成された。そのような超共形理論の三角量子異常を知ることは、理論のダイナミクスを決定する鍵である  $a$ -最大化を実行するためなどにも基本的であるが、立川は、Benvenuti 氏 (Pisa 大) Pando Zayas 氏 (Michigan 大) とともに、これが重力側の描像では佐々木-Einstein 多様体の幾何からどのように得られるかを調べた。また、その結果が場の理論の予言と一致することを示した。これは AdS/CFT 対応の更なる確証になっている [33, 69]。

立川はまた、4 次元 SCFT の基礎、 $a$ -最大化原理などのレビューからはじめ上記結果に至る過程をレビューして学位論文 [54] とした。

ゲージ理論における重要な物理量として Wilson ループがある。戴は山口氏 (IHES) とともに、4 次元  $\mathcal{N} = 4$  SCFT の 't Hooft coupling が大きい場合において、二つの異なる表現 (基本表現と完全反対称表現) の Wilson ループの相関関数を具体的に計算した [31]。

D1 ブレーンと D5 ブレーンから成る系は、その上に二次元の SCFT が実現され、しかも重力の古典解として表せば  $AdS_3 \times S_3$  になるので、AdS/CFT の重要な例になっている。D1-D5 系の上の SCFT の微視的状態は AdS 空間上のブレーンの束縛状態として表されるため、この背景上でのブレーンの配位を調べることは AdS/CFT 対応を検証する上で重要である。Raeymaekers は K.P. Yogendran 氏 (ソウル大) とともに  $AdS_3 \times S^3$  時空上の BPS D ブレーンのうち、その worldvolume が  $AdS_3$  中の  $AdS_2$  方向に広がったものについての分類を行い、どのような超

対称性が保存されるかを詳しく調べた [27, 51, 60]。また Raeymaekers は  $S^3$  中の  $S^2$  方向に広がったブレーンについても解析を行い、BPS ブラックホールに見られるアトラクター機構と類似の振る舞いを示すことを発見した [28]。ブレーン形状に対するこのような機構は Aganagic, Neitzke および Vafa によって提案されており、位相的弦の分配関数とブラックホールエントロピーの関係についての Ooguri-Strominger-Vafa の仮説を開弦のセクターにまで拡張する際に重要な役割を果たすと期待される。また、D1-D5 系やその S-dual である F1-NS5 系において上記ブレーン形状の交差するブレーンとしての解釈も調べた。

柴は修士論文 [56] において、11 次元や 10 次元 IIB 型超重力理論の超対称解となる  $AdS \times S$  時空上の  $1/2$  BPS 状態が、2 次元の fermion droplet の系を用いて解析できるという、Lin-Lunin-Maldacena が行った最近の研究についてまとめた。

### スピン鎖と AdS 時空上の弦

4 次元  $\mathcal{N} = 4$  ゲージ理論と AdS 時空上の弦理論の非 BPS 領域における対応の検証として、AdS 時空で大きな角運動量を持った半古典弦のエネルギーと、大きな R チャージを持った超対称ゲージ理論 (SYM) 演算子の共形次元との比較がなされてきた。AdS/CFT 対応に拠れば両者は一致すべきだが、両理論のチャージを BMN 結合定数に関して展開した結果は、ある次数から合わないことが知られている。近年の研究により、この破綻は両理論で各々定義される  $1+1$  次元可積分模型 (スピン鎖) の S 行列がスカラー因子分だけずれていることに起因することが明らかにされてきた。

岡村は Dorey 氏、Chen 氏 (ともに Cambridge U., DAMTP) との共同研究 [23, 24, 26][85, 44, 49, 39, 94, 67, 101, 108] において、 $R \times S^3 \subset AdS_5 \times S^5$  上の弦理論と複素 sine-Gordon 模型との古典的な等価性に着目することで dyonic giant magnon と呼ばれる無限長の角運動量を持つ弦の解を構成し、これを無限長の SYM スピン鎖中の magnon 束縛状態と比較した。その結果、こうした漸近的領域では両理論のスペクトラムが完全に一致することを示すとともに、既に提案されていたスカラー因子込みの magnon S 行列に対して強い傍証を与えた。

岡村と鈴木は複素 sine-Gordon 模型と古典弦シグマ模型の等価性を利用することで helical 解と呼ばれる弦の解を構成した [25][86, 45, 50, 92, 40, 95, 64, 102, 109]。これはよく知られた folded 弦や circular 弦と (dyonic) giant magnon とをつなぐ古典弦解の族であり、楕円テータ関数を含んだ表式で与えられるその解の解析形は、AdS/CFT 対応を可積分性の観点から理解する上で意義深い。

AdS/CFT スペクトラムは、SYM 理論の次元リダクションから得られる行列模型を用いることでも調べられる。初田と岡村は、Berenstein らによって開発された手法に則り、これをマルチ・スピンの場合に拡張することで、種々のタイプの古典弦の形状を行列量子

力学の固有値分布として見出し、既に別のアプローチから知られていた弦理論および SYM 理論のスペクトラムを再導出することに成功した [9][100, 107, 96]。

スピン鎖と古典弦との対応は、開弦セクターでも実現例が知られている。岡村は吉田氏 (KEK) との共同研究において、開スピン鎖に対する Bethe 仮説方程式を、BMN 結合係数に関する高次補正の計算にまで適用可能な形に拡張し、これを giant graviton 系および D3-D5 ブレーン系に対し適用した [22]。その結果、Bethe 仮説により特徴付けられる可積分性を仮定する限り、giant graviton 上の開弦は BMN スケーリングを破ることを見出すとともに、いまだ高次摂動計算のなされていない defect CFT 演算子の共形次元を高次項まで予言した。

### ブレーンタイリング

4 次元  $\mathcal{N} = 1$  SCFT を弦理論で実現する方法としては、AdS/CFT を用いる方法のほかに D5-ブレーンと NS5-ブレーンから成るブレーン系の上の場の理論として実現するブレーンタイリングと呼ばれる方法がある。今村はブレーンタイリングを用い、ブレーン上の低エネルギー有効理論を解析することで、ゲージアノマリーの相殺条件や大域的対称性に付随したトーフトアノマリーなどが自然に現れることを示した [16, 15, 82, 111]。また、今村、磯野、木村、山崎は広いクラスの  $\mathcal{N} = 1$  SCFT において存在する exactly marginal 変形が、ブレーンの変形や背景場の変化と対応していることを明らかにした [14, 78, 66, 106, 112, 104]。

### 1.2.3 TeV スケールの標準模型、素粒子論的宇宙論

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

一方、超弦理論や余次元空間を持つ理論に現れるモジュライと呼ばれる粒子もまた、寿命が長く問題を引

き起こす事が知られている(モジュライ問題)。これまで、非常に重いモジュライ(質量100TeV以上)はビッグバン元素合成より前に崩壊するために問題は引き起こさないと考えられていた。浜口は遠藤氏、高橋氏( DESY )と共に、重いモジュライでもその崩壊時に大量のグラビティーノを生成し、そのグラビティーノが問題を引き起こす事を示した( moduli-induced gravitino problem)[6, 7]。

またグラビティーノが Lightest SUSY Particle (LSP) で安定な場合でも、その次に軽い Next-to-LSP (NLSP) が長寿命となり、その崩壊が問題を引き起こしかねない。浜口、柳田、伊部は、Buchmüller 氏( DESY )と共に、 $\mathcal{O}(100-1000)$  程度のエントロピー生成が温度  $T = \mathcal{O}(\text{GeV})$  から  $\mathcal{O}(\text{MeV})$  の間に起これば問題を回避出来る事を示した [4]。さらに別の可能性として、浜口、柳田は、Buchmüller 氏, Covi 氏, Ibarra 氏( DESY )と共に、R-parity がわずかに破れているシナリオがグラビティーノ暗黒物質、レプトジェネシス、ビッグバン元素合成のいずれの観点からも無矛盾で面白い可能性である事を示した [5]。

また、グラビティーノ LSP シナリオで電荷を持った粒子が NLSP の場合、その長寿命荷電 NLSP をコライダー実験において収集しその崩壊を調べると超重力理論がテスト出来て非常に面白い事が知られている。浜口は、野尻氏( KEK )、Roeck 氏( CERN )と共に、実際に LHC 実験における CMS 検出器の側に重い検出器を置いてそのような実験を行なう可能性を調べた [8]。

柳田、伊部、新原は超対称性を破っている粒子の初期宇宙での問題点に関する研究を行った [11]。この結果超対称性の破れが重力相互作用で媒介されている場合にはインフレーションのエネルギースケールが厳しく制限されることが明らかになった。

柳田、伊部、新原はスケールアノマリーにより超体制の破れが伝播している模型における暗黒物質の性質について研究を行った [12]。その結果、ある種のインフレーション模型ではインフラトンの崩壊により適切な量の暗黒物質が生成され、これまで観測と合わないと思われていた軽い粒子でも観測事実を説明できることを明らかにした。

余剰次元を含む理論は、標準模型を超える理論の一つと考えられている。余剰次元は階層性問題を解決する方法として導入され、その後、湯川行列やダークマターなど、他の現象論的な問題を説明する可能性があることが分かった。その一方で、バリオン数・レプトン数・フレーバーなどの破れが、通常の四次元時空の理論に比べて強く現れることが知られている。新原と中島は、余剰次元を含む理論の一つである Randall-Sundrum 模型において、バリオン数とレプトン数の破れの問題を解決する方法として、離散的ゲージ対称性を導入することを提案した。さらに、ニュートリノ質量がディラック型・マヨラナ型のそれぞれの場合について可能な対称性を分類し、対称性を実験によって区別する可能性を指摘した [21]。

< 報文 >

(原著論文)

[1] Y. Aisaka and Y. Kazama, “Towards pure spinor

type covariant description of supermembrane: An approach from the double spinor formalism,” JHEP **0605** (2006) 041.

- [2] T. Eguchi, Y. Sugawara and A. Taormina, “Liouville field, modular forms and elliptic genera,” JHEP **0703**, 119 (2007)
- [3] Y. Hatsuda and Y. Matsuo, “Symmetry and integrability of non-singlet sectors in matrix quantum mechanics”, J. Phys. A **40**, 1633 (2007).
- [4] W. Buchmuller, K. Hamaguchi, M. Ibe and T. T. Yanagida, “Eluding the BBN constraints on the stable gravitino,” Phys. Lett. B **643** (2006) 124.
- [5] W. Buchmuller, L. Covi, K. Hamaguchi, A. Ibarra and T. Yanagida, “Gravitino dark matter in R-parity breaking vacua,” JHEP **0703** (2007) 037.
- [6] M. Endo, K. Hamaguchi and F. Takahashi, “Moduli-induced gravitino problem,” Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 211301.
- [7] M. Endo, K. Hamaguchi and F. Takahashi, “Moduli / inflaton mixing with supersymmetry breaking field,” Phys. Rev. D **74** (2006) 023531
- [8] K. Hamaguchi, M. M. Nojiri and A. de Roeck, “Prospects to study a long-lived charged next lightest supersymmetric particle at the LHC,” JHEP **0703** (2007) 046.
- [9] Y. Hatsuda and K. Okamura, “Emergent classical strings from matrix model,” JHEP **0703**, 077 (2007)
- [10] M. Ibe, Y. Shinbara, T.T. Yanagida, “A New Inflation Model with Anomaly-mediated Supersymmetry Breaking,” Phys.Lett.**B642** (2006) 165.
- [11] M. Ibe, Y. Shinbara and T. T. Yanagida, “The Polonyi problem and upper bound on inflation scale in supergravity,” Phys. Lett. B **639**, 534 (2006)
- [12] M. Ibe, Y. Shinbara and T. T. Yanagida, “A new inflation model with anomaly-mediated supersymmetry breaking,” Phys. Lett. B **642**, 165 (2006)
- [13] M. Ibe, T. Moroi, T.T. Yanagida, “Possible Signals of Wino LSP at the Large Hadron Collider,” Phys.Lett.**B644** (2007) 355.
- [14] Y. Imamura, H. Isono, K. Kimura, M. Yamazaki, “Exactly marginal deformations of quiver gauge theories as seen from brane tilings”, to appear in Prog. Theor. Phys., hep-th/0702049
- [15] Y. Imamura, “Global symmetries and ‘t Hooft anomalies in brane tilings”, JHEP**12**(2006)041,
- [16] Y. Imamura, “Anomaly Cancellations in Brane Tilings”, JHEP**06**(2006)011,
- [17] F. Koyama and F. Yagi, “Quantum moduli space of the cascading  $\text{Sp}(p+M) \times \text{Sp}(p)$  gauge theory,” Prog. Theor. Phys. **117** (2007) 487.

- [18] P.-M. Ho and Y. Matsuo, “A toy model of open membrane field theory in constant 3-form flux,” arXiv:hep-th/0701130, General Relativity and Gravitation, to appear.
- [19] Y. Nakayama, S. J. Rey and Y. Sugawara, “Unitarity meets channel-duality for rolling / decaying D-branes,” JHEP **0608**, 014 (2006)
- [20] Y. Nakayama, “Index for supergravity on  $AdS(5) \times T^{**}(1,1)$  and conifold gauge theory,” Nucl. Phys. B **755**, 295 (2006)
- [21] H. Nakajima and Y. Shinbara, “Solutions to large B and L breaking in the Randall-Sundrum model,” Phys. Lett. **B648** (2007) 294.
- [22] K. Okamura and K. Yoshida, “Higher loop Bethe ansatz for open spin-chains in  $AdS/CFT$ ,” JHEP **0609**, 081 (2006)
- [23] H. Y. Chen, N. Dorey and K. Okamura, “Dyonic giant magnons,” JHEP **0609**, 024 (2006)
- [24] H. Y. Chen, N. Dorey and K. Okamura, “On the scattering of magnon boundstates,” JHEP **0611**, 035 (2006)
- [25] K. Okamura and R. Suzuki, “A perspective on classical strings from complex sine-Gordon solitons,” Phys. Rev. D **75**, 046001 (2007)
- [26] H. Y. Chen, N. Dorey and K. Okamura, “The asymptotic spectrum of the  $\mathcal{N} = 4$  super Yang-Mills spin chain,” JHEP **0703**, 005 (2007)
- [27] J. Raeymaekers and K.P. Yogendran, “Supersymmetric D-branes in the D1-D5 background,” J. High Energy Phys. JHEP**12**(2006)022.
- [28] J. Raeymaekers, “Open string attractors,” J. High Energy Phys. JHEP **04** (2007) 075.
- [29] Y. Sugawara, “Aspects of infalling D-branes in two-dimensional black hole,” Mod. Phys. Lett. A **22**, 83 (2007).
- [30] T.-S. Tai, “Winding String Dynamics in a Time-Dependent Beta Deformed Background,” Prog. Theor. Phys. **116** (2006) 965.
- [31] T.-S. Tai and S. Yamaguchi, “Correlator of Fundamental and Anti-symmetric Wilson loops in  $AdS/CFT$  Correspondence,” JHEP **0702** 035, (2007).
- [32] T.-S. Tai, “Classical  $c=1$  Tachyon Scattering and  $1/2$  BPS Correlators,” Prog. Theor. Phys. **117** (2007) 795.
- [33] S. Benvenuti, L. A. Pando Zayas and Y. Tachikawa, “Triangle anomalies from Einstein manifolds,” Adv. Theor. Math. Phys. **10** (2006) 395
- [34] M. Endo, K. Kadota, K. A. Olive, F. Takahashi, T.T. Yanagida, “The Decay of the Inflaton in No-scale Supergravity,” JCAP 0702:018,2007.
- [35] M. Endo, F. Takahashi, T.T. Yanagida, “Spontaneous Non-thermal Leptogenesis in High-scale Inflation Models,” Phys.Rev.**D74**(2006)123523.
- [36] M. Endo, M. Kawasaki, F. Takahashi, T.T. Yanagida, “Inflaton decay through supergravity effects,” Phys.Lett.**B642**(2006)518-524.
- [37] M. Kawasaki, F. Takahashi, T.T. Yanagida, “The Gravitino-overproduction problem in inflationary universe,” Phys.Rev.**D74**(2006)043519.
- [38] M. Kawasaki, F. Takahashi, T.T. Yanagida, “Gravitino overproduction in inflaton decay.” Phys.Lett.**B638**(2006)8.
- (会議抄録)
- [39] 岡村圭祐, “AdS 時空上の超弦理論 vs.  $\mathcal{N} = 4$  超対称ゲージ理論 vs. スピン鎖模型,” 「第2回 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム」アブストラクト集, A3.
- [40] 鈴木了, “ $AdS_5 \times S^5$  時空上の回転弦解,” 「第2回 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム」アブストラクト集, A4.
- [41] 戴大盛, “Two Wilson Loop Correlator,” 「第2回 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム」アブストラクト集, A5.
- [42] 山崎雅人, “Dimer, coamoeba and homological mirror symmetry,” 「第3回数学総合若手研究集会 -他分野との学際的交流を目指して-」研究会報告, 北海道大学数学講究録 **117**, 20-24, 2007年2月
- [43] 山崎雅人, “Brane tilings, algae and quiver gauge theories -with application to homological mirror symmetry-,” 「弦理論と場の量子論における新たな進展」研究会報告, 素粒子論研究 **114**, F94, 2007年3月
- [44] 岡村圭祐, “Dyonic Giant Magnons,” 「弦理論と場の量子論における新たな進展」研究会報告, 素粒子論研究 **114** 巻6号 (2007年3月号) F73.
- [45] 鈴木了, “Classical strings from Complex sine-Gordon solitons,” 「弦理論と場の量子論における新たな進展」研究会報告, 素粒子論研究 **114** 巻6号 (2007年3月号) F85.
- [46] 今村洋介, “Anomalies in brane tilings” 「弦理論と場の量子論における新たな進展」研究会報告, 素粒子論研究 **114-6** (2007)
- [47] 磯野裕, “Boundary states in the open string channel,” 「弦理論と場の量子論における新たな進展」研究会報告, 素粒子論研究 **114-6** (2007)
- [48] 戴大盛, “Winding String Dynamics in Time-Dependent Beta Deformed Background,” 「弦理論と場の量子論における新たな進展」研究会報告, 素粒子論研究 **114-6** (2007)
- [49] 岡村圭祐, “Complex Sine-Gordon Solitons vs. Magnon Boundstates in  $AdS/CFT$ ,” 「場の量子論の基礎的諸問題とその応用」研究会報告, 素粒子論研究 **115** 巻1号 (2007年4月号) A29.
- [50] 鈴木了, “Sine-Gordon integrability of classical string solutions on  $AdS_5 \times S^5$ ,” 「場の量子論の基礎的諸問題とその応用」研究会報告, 素粒子論研究 **115** 巻1号 (2007年4月号) A77.

- [51] J. Raeymaekers, "Microstates and near-horizon D-brane probes," *Fortschr. Phys.* 5-6, 811 (2007).  
(学位論文)  
博士論文
- [52] F. Koyama, "Orientifolding the cascading gauge theory and its gravity dual."
- [53] Y. Nakayama, "Black hole - string transition and rolling D-brane,"
- [54] Y. Tachikawa, "AdS/CFT Correspondence with Eight Supercharges."
- [55] R. Nobuyama, "Aspects of Closed String Tachyons in Type II/Type 0 String Theory"  
修士論文
- [56] 柴 正太郎, 「16 個の超対称電荷を持つ系とその解析」  
(著書)
- [57] (翻訳) ポルチンスキー著「ストリング理論第2巻」  
伊藤克司・松尾泰・小竹悟訳  
< 学術講演 >  
(国際会議)  
一般講演
- [58] Y. Aisaka, "Origin of pure spinor superstring," Workshop on pure spinors in superstring theory, Instituto de Física Teórica, Brazil, 2006 年 7 月.
- [59] Y. Aisaka, "Towards pure spinor type description of supermembrane," Workshop on pure spinors in superstring theory, Instituto de Física Teórica, Brazil, 2006 年 9 月.
- [60] J. Raeymaekers "Microstates and near-horizon D-brane probes," at the RTN workshop "Constituents, fundamental forces and symmetries of the universe", Napoli, Italy, 2006 年 10 月
- [61] M. Sakurai, "Beilinson-Drinfeld chiral algebra, geometric Langlands program, and open Gromov-Witten invariants", APS-JPS Joint meeting, Hawaii, USA, 2006 年 10 月
- [62] Y. Matsuo, "Symmetry and integrability of non-singlet sectors in matrix quantum mechanics," APS-JPS Joint meeting, Hawaii, USA, 2006 年 10 月
- [63] T.-S. Tai, "Winding String Dynamics in a Time-Dependent Beta Deformed Background," APS-JPS Joint meeting, Hawaii, USA, 2006 年 11 月
- [64] R. Suzuki, "Sine-Gordon Integrability of Classical String Solutions on  $AdS_5 \times S^5$ ," International Meeting on Perspectives of Soliton Physics, PS08, Tokyo University, Tokyo, Japan, 2007 年 2 月
- [65] M. Yamazaki, "What is brane tiling?" Winter School in Niseko 2007, Niseko, Japan, 2007 年 3 月
- [66] K. Kimura, "Exactly marginal deformations of quiver gauge theories as seen from brane tilings," Winter School in Niseko 2007, Niseko, Japan, 2007 年 3 月
- [67] K. Okamura, "The Asymptotic Spectrum of AdS/CFT in the Limit of Large Spin/R-charge," Winter School in Niseko 2007, Niseko, Japan, 2007 年 3 月
- [68] Y. Hatsuda, "Emergent Classical Strings from Matrix Model," Winter School in Niseko 2007, Niseko, Japan, 2007 年 3 月  
招待講演
- [69] Y. Tachikawa, "Triangle anomalies from Einstein manifolds," Workshop on Strings, Black Holes, and Quantum Spacetime, Bokwang Phoenix Park, Korea, 2006 年 4 月
- [70] Yuji Sugawara, "Modular Properties of Large/Small  $N=4$  Superconformal Field Theories," APCTP Focus Program "Liouville, Integrability and Branes (3)", APCTP, Postech, Pohang, Korea. 2006 年 5 月-6 月
- [71] Y. Nakayama, "Exactly Solvable Dynamics of Rolling D-brane," Strings 2006, Beijing, 2006 年 6 月
- [72] K. Hamaguchi, "Baryo/Lepto-genesis," Summer Institute 2006, APCTP, Pohang, Korea, 2006 年 8 月.
- [73] K. Hamaguchi, "Gravitino Dark Matter," DESY Theory Workshop 2006 "The Dark Universe," DESY, Hamburg, Germany, 2006 年 9 月.
- [74] M. Yamazaki, "Sasaki-Einstein manifolds and Z-minimization as geometric dual of a-maximization," The 12th International Symposium on Complex Geometry, 菅平, 2006 年 10 月
- [75] Y. Sugawara : "Recent Progress in Superstrings on Non-compact Calabi-Yau Manifolds," "International Workshop on Non-commutativity in Strings, Gravity and Field Theory", Tokyo Metropolitan Univ, 2006 年 11 月
- [76] K. Hamaguchi, "Long-lived staus at the CMS detector at LHC," DESY Mini-Workshop on Superweakly Interacting Dark Matter, DESY, Hamburg, Germany, 2006 年 12 月.
- [77] T. Eguchi, "Liouville Field, Modular Forms and Elliptic Genera," Komaba 2007 -Recent Developments in Strings and Fields-, Tokyo Univ., Tokyo, Japan, 2007 年 2 月
- [78] Y. Imamura, "Anomalies and marginal deformations in brane tilings," Komaba 2007 -Recent Developments in Strings and Fields-, Tokyo Univ., Tokyo, Japan, 2007 年 2 月
- [79] K. Hamaguchi, "Stau at the LHC," KEK Annual Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEKPH07), KEK, Tsukuba, Japan, 2007 年 3 月.

- [80] T. Eguchi, “Liouville Field, Modular Forms and Elliptic Genera,” Exploration of New Structures and Natural Constructions in Mathematical Physics, Nagoya U., Nagoya, Japan, 2007 年 3 月  
(国内会議)  
一般講演
- [81] 山崎雅人, “Brane tilings and quiver gauge theories,” 原子核三者若手夏の学校, 木島平, 2006 年 8 月
- [82] 今村洋介, “Anomalies in brane tilings” 弦理論と場の量子論における新たな進展, 京都大学基礎物理学研究所, 2006 年 9 月
- [83] 戴大盛, “Winding String Dynamics in a Time-Dependent Beta Deformed Background,” 弦理論と場の量子論における新たな進展, 京都大学基礎物理学研究所, 2006 年 9 月
- [84] 山崎雅人, “Brane tilings, algae and quiver gauge theories -with Application to Homological Mirror Symmetry-,” 弦理論と場の量子論における新たな進展, 京都大学基礎物理学研究所, 2006 年 9 月
- [85] 岡村圭祐, “Dyonic Giant Magnons,” 弦理論と場の量子論における新たな進展, 京都大学基礎物理学研究所, 2006 年 9 月
- [86] 鈴木了, “Classical strings from Complex sine-Gordon solitons,” 弦理論と場の量子論における新たな進展, 京都大学基礎物理学研究所, 2006 年 9 月
- [87] 磯野裕, “Boundary states in the open string channel” 弦理論と場の理論における新たな進展, 京都大学基礎物理学研究所, 2006 年 9 月
- [88] 植田一石, 山崎雅人, 「ブレーンによるタイル張り」と McKay 籠, 日本数学会秋期総合分科会, 大阪市立大学, 2006 年 9 月
- [89] 植田一石, 山崎雅人, 「三角の Newton 多角形を持つ Laurant 多項式の藻類」, 日本数学会秋期総合分科会, 大阪市立大学, 2006 年 9 月
- [90] 桜井真, “Beilinson-Drinfeld chiral algebra, geometric Langlands program, and open Gromov-Witten invariants,” 日本数学会 2006 年度秋季総合分科会, 大阪市立大学, 2006 年 9 月
- [91] 岡村圭祐, “AdS/CFT/Spin-chain Triality,” 第 2 回 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム, 東京大学, 2006 年 11 月
- [92] 鈴木了, “ $AdS_5 \times S^5$  時空上の回転弦解,” 第 2 回 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム, 東京大学, 2006 年 11 月.
- [93] 戴大盛, “Two Wilson Loop Correlator,” 第 2 回 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム, 東京大学, 2006 年 11 月.
- [94] 岡村圭祐, “Complex Sine-Gordon Solitons vs. Magnon Boundstates in AdS/CFT,” 場の理論の基礎的諸問題と応用, 京都大学基礎物理学研究所, 2006 年 12 月
- [95] 鈴木了, “Sine-Gordon integrability of classical string solutions on  $AdS_5 \times S^5$ ,” 場の理論の基礎的諸問題と応用, 京都大学基礎物理学研究所, 2006 年 12 月
- [96] 初田泰之, “Symmetry and Integrability of Non-Singlet Sectors in Matrix Quantum Mechanics,” 場の理論の基礎的諸問題と応用, 京都大学基礎物理学研究所, 2006 年 12 月
- [97] 山崎雅人, “Dimer, coamoeba and homological mirror symmetry,” 第 3 回数学総合若手研究会 -他分野との学際的交流を目指して-, 北海道大学, 2007 年 2 月
- [98] 山崎雅人, “Recent developments in the theory of toric Sasaki-Einstein manifolds,” 第 4 回城崎新人セミナー, 城崎, 2007 年 2 月
- [99] 山崎雅人, “Brane tiling and homological mirror symmetry,” KEK 理論研究会 2007, 高エネルギー加速器研究機構, 2007 年 3 月
- [100] 初田泰之, “Emergent Classical Strings from Matrix Model,” KEK 理論研究会 2007, 高エネルギー加速器研究機構, 2007 年 3 月
- [101] 岡村圭祐, “The Asymptotic Spectrum of AdS/CFT,” KEK 理論研究会 2007, 高エネルギー加速器研究機構, 2007 年 3 月
- [102] 鈴木了, “Spinning string solutions from sine-Gordon solitons,” KEK 理論研究会 2007, 高エネルギー加速器研究機構, 2007 年 3 月
- [103] 戴大盛, “Two Wilson/Polyakov loop correlators from gravity duals,” KEK 理論研究会 2007, 高エネルギー加速器研究機構, 2007 年 3 月
- [104] 磯野裕, “Exactly marginal deformations of quiver gauge theories and deformations of brane tilings” KEK 理論研究会 2007, 高エネルギー加速器研究機構, 2007 年 3 月
- [105] 中島寛人, “Solutions to large B and L breaking in the Randall-Sundrum model”, 日本物理学会, 首都大学東京, 2007 年 3 月.
- [106] 木村圭助, “Exactly marginal deformations of quiver gauge theories as seen from brane tilings,” 日本物理学会, 首都大学東京, 2007 年 3 月.
- [107] 初田泰之, “Emergent Classical Strings from Matrix Model,” 日本物理学会, 首都大学東京, 2007 年 3 月
- [108] 岡村圭祐, “Dyonic Giant Magnons and Magnon Boundstates in AdS/CFT,” 日本物理学会, 首都大学東京, 2007 年 3 月
- [109] 鈴木了, “Classical strings from Complex sine-Gordon solitons,” 日本物理学会, 首都大学東京, 2007 年 3 月
- 招待講演
- [110] 濱口幸一, 「レプトジェネシス」, マヨラナ・ニュートリノとその周辺, 岡山大学, 岡山, 2006 年 12 月.
- [111] 今村洋介 “Anomaly inflow in Brane tilings,” 立教大学弦理論研究会, 立教大学, 2006 年 12 月

- [112] 山崎雅人, “Exactly marginal deformations of quiver gauge theories as seen from brane tilings,” 名古屋弦理論研究会 2007, 名古屋大学, 2007 年 2 月
- [113] 今村洋介, “AdS/CFT -基本的な考え方とその応用-,” ハドロン物理と超弦理論の再開, 高エネルギー加速器研究所, 2007 年 3 月
- [114] 中山優, “Finite N Index and Angular Momentum Bound from Gravity,” KEK 理論研究会 2007, 高エネルギー加速器研究所, 2007 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・小沢)

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

酒井研究室では、原子核のスピン・アイソスピン自由度に着目し、ハドロン多体系としての原子核の構造や、核子間の相互作用の研究を中心に行っている。偏極イオン源、偏極標的、散乱粒子の偏極度を測定する偏極度計などの開発を進めて来た。昨年度に開始したプロジェクト「発熱型荷電交換反応による時間領域でのスピン・アイソスピン応答 (ICHOR: Isospin-spin responses in CHarge-exchange exOthermic Reactions)」では、理化学研究所の不安定核 (RI) ビームファクトリーで得られる大強度 RI ビームの特質を生かして、未開拓領域の原子核励起状態を探索する。今年度は、実験施設の建設・検出器の製作を進めるとともに、発熱型反応と相補的な従来の荷電交換反応によるスピン・アイソスピン励起の研究を行った。また、陽子-中性子系の量子力学的スピン相関の解析を進めた。

早野研究室では、物質・反物質の対称性 (CPT 対称性) の検証をめざして、ジュネーブの CERN 研究所において反水素原子や反陽子ヘリウム原子の研究を行っている。2006 年には反陽子ヘリウム原子の精密レーザー分光によって反陽子質量を 10 桁決定することに成功し、その結果は近々理科年表等に掲載させる陽子質量値に反映される。また、陽子の質量起源の解明をめざして、ドイツ重イオン研究所 (GSI) において、 $\eta$  中間子と原子核の束縛状態の探索を行うとともに、高エネルギー加速器研究機構において K 中間子ヘリウム原子の  $3d \rightarrow 2p$  X 線の精密測定を行い、完成間近な J-PARC 加速器における K 中間子原子・原子核の研究の準備も進めている。

小沢研究室では、強い相互作用の非摂動論的側面に関わる諸問題を実験的に解明するための研究を行っている。特に、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の生成とその性質を調べる実験や陽子や中間子などのハドロンが動的な質量を獲得する機構を調べる実験に力を入れており、それぞれ米国ブルックヘブン国立研究所の高エネルギー重イオン衝突実験と KEK-PS や J-PARC での実験に従事している。2006 年度の特筆すべき結果として、KEK で行った  $\phi$  中間子の原子核中での質量測定において、自由空間での質

量との有意な差を発見したことがあげられる。今後、この現象を J-PARC において深く追求していく計画である。また、米国での実験では、今までに見られていない様々な現象が観測され、我々はパートンレベルの流体模型で記述される新しい物質相が存在することを 2005 年に発見した。

原子核実験研究室では、旧櫻井研究室のメンバーを中心に不安定核ビームを用いた実験的研究を行っており、天然に存在する安定核よりも中性子数や陽子数が極端に多い不安定核を生成し、その高アイソスピンに由来するエキゾチックな性質を探る研究を行っている。特に中性子過剰核に現れる特異な現象に着目し、中性子過剰核のハロー構造や殻構造の変化 (魔法数の消失や新魔法数の出現など) や、核反応を用いた動的性質の研究を進めている。また、天体現象で重要な役割を果たす不安定核による核反応の研究にも取り組んでいる。実験は、主に理化学研究所の不安定核ビーム装置 RIPS (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 ICHOR プロジェクト (酒井研究室)

原子核のスピン・アイソスピン型応答 (スピン移行量  $\Delta S = 1$ 、アイソスピン移行量  $\Delta T = 1$ ) はもっとも基本的な励起モードであり、従来、安定核ビームを用いた ( $p, n$ )、( $d, {}^2\text{He}$ )、( ${}^3\text{He}, t$ )、( ${}^{12}\text{C}, {}^{12}\text{B}$ ) などの反応によって研究されてきた。これらの手法では、標的粒子の基底状態近傍では無反跳条件 (運動量移行  $q \sim 0$ ) を近似的に満たすことができるが、励起エネルギーが 20 MeV 以上の高励起状態では、大きな運動量移行を伴い、標的核を効率よく励起できない。この点、不安定重イオンビームを用いた発熱型荷電交換反応は、高励起状態で  $q \sim 0$  の条件を満たすため、原子核の高励起状態の強力なプローブとなる (図 2.1.1 参照)。

理研 RI ビームファクトリー (RIBF) で得られる RI ビームは、核子あたり 200–350 MeV のエネルギーを持つが、このエネルギー領域では歪曲効果が最小になると同時にスピン・アイソスピン励起が最も強調される最適のエネルギーである。本研究は、RIBF で、( ${}^{12}\text{N}, {}^{12}\text{C}$ )、( ${}^{12}\text{B}, {}^{12}\text{C}$ )、( ${}^{20}\text{Mg}, {}^{20}\text{Ne}$ ) といった反応を用い、無反跳条件下でスピン単極子共鳴および二重ガモフ・テラー (GT) 共鳴状態を探索する。また、同時に、従来の ( $p, n$ )、( $n, p$ ) 反応を用い、二重 GT 遷移である二重ベータ崩壊核の中間状態核の構造研究を進める。

#### 磁気スペクトロメータ SHARAQ の建設

RIBF の不安定核重イオンビームを用いた測定に特化した高分解能磁気スペクトロメータ (SHARAQ ス

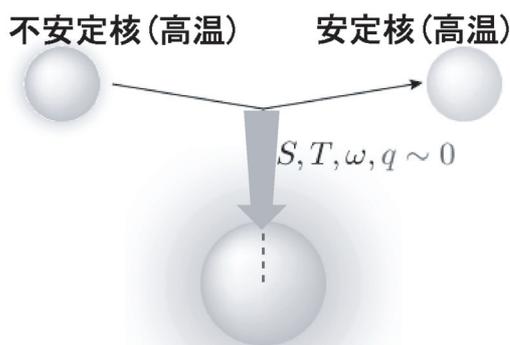


図 2.1.1: 発熱型反応の概念図。原子核の励起モードはスピン ( $S$ )、アイソスピン ( $T$ )、励起エネルギー ( $\omega$ )、運動量移行 ( $q$ ) で特徴づけられる。不安定核の内部エネルギーを発熱型荷電交換反応によって標的核に付与することにより、ほぼ無衝撃 ( $q \sim 0$ ) で原子核を励起できる。

ペクトメーター: Spectroscopy of HAdron systems with RadioActive Quantum beams) を建設中である。平成 19 年度の完成を目指している。本年次報告口絵の図に示すように、SHARAQ は 2 つの双極子電磁石と 3 つの四重極電磁石からなり、設計上のエネルギー分解能は相対値で  $1/7000$  である。今年度は第二双極子電磁石と超伝導二連四重極電磁石を完成し、既存の磁石とあわせて、必要な電磁石をそろえたとともに、ビーム診断用の多芯線検出器を開発した。[56, 86]

#### 発熱型荷電交換反応の有効性

SHARAQ スペクトロメータの完成に先立ち、現時点で RI ビームを得ることができるミシガン州立大学国立超伝導サイクロトロン研究所 (NSCL) において、発熱型荷電交換反応の予備的な測定を計画している。

この実験の目的は、発熱型荷電交換反応がスピン・アイソスピン応答の強力なプローブであることを確かめることである。このため、発熱型反応  $^{13}\text{C}(^{12}\text{N}, ^{12}\text{C})^{13}\text{N}^*$  と吸熱型反応  $^{13}\text{C}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{B})^{13}\text{N}^*$  の測定を行って結果を比較する。前者の測定では、入射核破砕反応によって生成・分離された  $\beta^+$  崩壊核  $^{12}\text{N}$  ビーム ( $100 \text{ MeV}/A$ ) を標的核  $^{13}\text{C}$  に照射し、散乱角  $0^\circ$  に出射された  $^{12}\text{C}$  のエネルギーを測定することにより残留核  $^{13}\text{N}$  の励起状態を調べる。後者の測定も同様に行う。

本測定では、特に  $^{13}\text{N}$  の  $3.5 \text{ MeV}$ ,  $15.1 \text{ MeV}$  の 2 個の励起状態に注目する。 $^{13}\text{C}$  の基底状態からこれらの状態への遷移は GT 型で、スピン移行  $\Delta S = 1$ 、アイソスピン移行量  $\Delta T = 1$ 、軌道角運動量移行  $\Delta L = 0$  で特徴づけられる。2 重畳込みポテンシャルを用い

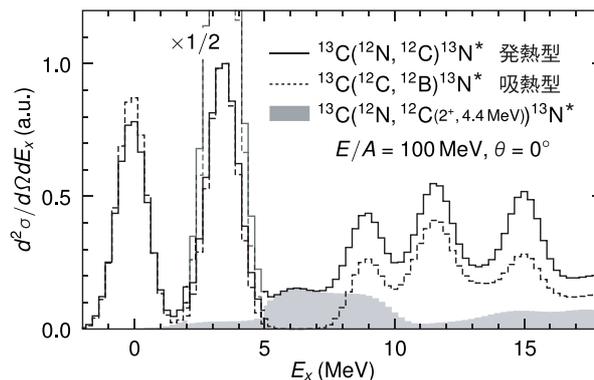


図 2.1.2: 予想される  $^{13}\text{C}(^{12}\text{N}, ^{12}\text{C})^{13}\text{N}^*$  (実線) と  $^{13}\text{C}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{B})^{13}\text{N}^*$  (破線) 反応の励起エネルギースペクトル。但し、散乱角  $0^\circ$ 、入射エネルギー  $100 \text{ MeV}/A$  で、縦軸はそれぞれ  $3.5 \text{ MeV}$  のピークに規格化してある。灰色で示した部分は、 $(^{12}\text{N}, ^{12}\text{C})$  反応で入射核  $^{12}\text{N}$  が出射核  $^{12}\text{C}$  の励起状態 ( $2^+$ ,  $4.4 \text{ MeV}$ ) に遷移する場合の寄与を示す。

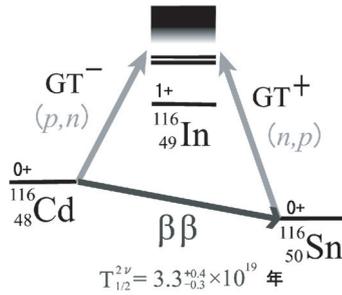
た歪曲波ボルン近似計算によれば、 $15.1 \text{ MeV}$  の状態への遷移の、 $3.5 \text{ MeV}$  の状態への遷移に対する相対的な断面積は、 $(^{12}\text{N}, ^{12}\text{C})$  反応が  $(^{12}\text{C}, ^{12}\text{B})$  反応よりも 2 倍大きい。この計算結果に基づき、 $^{13}\text{C}(p, n)^{13}\text{N}^*$  の励起エネルギースペクトルを元に、本実験で得られるスペクトルを予想して図 2.1.2 に示した。発熱型の  $(^{12}\text{N}, ^{12}\text{C})$  反応が吸熱型の  $(^{12}\text{C}, ^{12}\text{B})$  反応よりも  $15.1 \text{ MeV}$  の状態をより強く励起していることが見て取れるであろう。

本実験のプロポーザルは NSCL の課題審査委員会により採択された。これを受けて平成 19 年中に実験を実施する予定である。

#### 二重ベータ崩壊核 $^{116}\text{Cd}$ の崩壊過程

二重ベータ崩壊とは、原子核が 2 段階の  $\beta$  崩壊を一度に行い、電子を 2 個放出する現象である。 $^{116}\text{Cd}$  核の二重ベータ崩壊を例にとると (図 2.1.3)、 $^{116}\text{Cd}$  核の基底状態から中間核  $^{116}\text{In}$  へ、 $^{116}\text{In}$  から娘核  $^{116}\text{Sn}$  の基底状態への 2 段階の仮想的な GT 遷移によって起こると考えられ、それぞれの遷移行列要素を理論的に求めることによって、その半減期  $3.3 \times 10^{19}$  年を説明する試みがなされてきた。しかしながら、現時点では理論計算の予言能力が十分であるとは言いがたい。

本研究では、実験的に親 (娘) 核から中間核への GT 遷移強度  $B(\text{GT}^-/+)$  を、中間状態毎に求めることにより、二重ベータ崩壊の移行列要素を微視的に明らかにすることを目的とする。測定には、反応機構の不定性が小さいプローブとして、入射エネルギー  $300 \text{ MeV}$  の  $(p, n)$ 、 $(n, p)$  反応を用いる。このプローブは、励起エネルギー  $50 \text{ MeV}$  の領域までの  $B(\text{GT})$  分布を絶対値も含めて精度よく決定できる唯一のものである。

図 2.1.3:  $^{116}\text{Cd}$  の二重ベータ崩壊スキーム。

我々は、大阪大学核物理研究センター (RCNP) の中性子飛行時間施設を用い、 $(p, n)$  反応の測定を  $^{116}\text{Cd}$  標的核に対して行った。高エネルギー分解能測定のため、新型中性子検出器 NPOL3 を用いた。この検出器の時間分解能は 230 ps で、最終的なエネルギー分解能は 450 keV であり、この入射エネルギー領域の  $(p, n)$  測定では世界最高の分解能を達成した。 $^{116}\text{In}$  核の基底状態への遷移について、 $\beta^-$  型の遷移強度  $B(\text{GT}^-)$  は  $0.26 \pm 0.02$  であり、以前の  $(^3\text{He}, t)$  反応で求めた  $B(\text{GT}^-)$  より 10 倍程度大きい、という驚くべき結果が得られた。

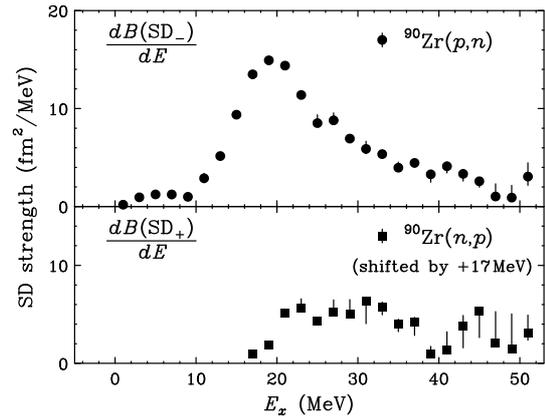
$B(\text{GT}^-)$  の値に関するプローブ間の大きな違いを検証するため、さらに、核子あたり 140 MeV にて  $^{116}\text{Cd}(p, n)$ 、 $(^3\text{He}, t)$  測定を行い、以前に  $(^3\text{He}, t)$  測定で用いられた標的が、十分に同位体濃縮されていないなかったことをつきとめた。

300 MeV での  $(p, n)$  測定より得た  $^{116}\text{Cd}$  から  $^{116}\text{In}$  の基底状態への  $B(\text{GT}^-)$  の値と、ベータ崩壊測定による  $^{116}\text{In}$  から  $^{116}\text{Sn}$  の基底状態への  $B(\text{GT}^+)$  の値を用いて、 $^{116}\text{Cd}$  の二重ベータ崩壊核行列に対する  $^{116}\text{In}$  の基底状態の寄与を、 $0.070 \pm 0.003$  と導出した。この値のみから  $^{116}\text{Cd}$  核の寿命を推定すると、 $(2.8 \pm 0.2) \times 10^{19}$  年となり、実験値を良く説明する。つまり、 $^{116}\text{Cd}$  の二重ベータ崩壊遷移行列の大きさが、中間核  $^{116}\text{In}$  の基底状態を経由する遷移でほぼ説明できることが明らかになった。

今年度、RCNP にて、娘核  $^{116}\text{Sn}$  を標的とした  $(n, p)$  反応の測定も行った。 $(p, n)$ 、 $(n, p)$  両方から中間核  $^{116}\text{In}$  の励起状態への  $B(\text{GT}^{-/+})$  をそれぞれ求め、1 段階 GT 遷移の理論計算に対して拘束条件を与えるとともに、 $^{116}\text{Cd}$  の崩壊遷移行列への寄与を議論する予定である。[51, 57, 54, 55, 71]

### 2.1.2 スピン双極子遷移和則を用いた中性子スキン厚の決定 (酒井研究室)

原子核中の陽子と中性子が空間的にどのように分布しているかは、原子核物理学の基礎となるべき情報である。なかでも、中性子分布の半径から陽子分布の半径を差し引いたものとして定義される中性子スキン厚は、原子核の対称エネルギーや中性子物質

図 2.1.4:  $^{90}\text{Zr}(p, n)$ 、 $(n, p)$  反応から求めた荷電交換スピン双極子 (SD) 遷移強度の励起エネルギー分布。上パネルは  $\beta^-$  型、下パネルは  $\beta^+$  型の遷移強度分布である。

の状態方程式と密接に関連していることが知られている。陽子分布が、電子散乱により高精度で知られているのに対し、中性子分布については、陽子、 $\alpha$  粒子、反陽子などの原子核プローブを用いた測定が試みられてきたものの、高信頼度の決定例はない。その一因は、核力が密度依存性を持つことにある。

荷電交換反応のスピン双極子 (SD) 遷移は、アイソスピン移行  $\Delta T = 1$ 、軌道角運動量移行  $\Delta L = 1$ 、スピン移行  $\Delta S = 1$  で特徴づけられる。SD 遷移には、核力・核構造の記述に非依存の和則が存在し、

$$S_- - S_+ = \frac{9}{4\pi} (N \langle r^2 \rangle_n - Z \langle r^2 \rangle_p),$$

が成り立つ。ここで、 $S_-$ 、 $S_+$  はそれぞれ  $(p, n)$ 、 $(n, p)$  型荷電交換反応から得られる総 SD 遷移強度であり、上式の左辺を和則値と呼ぶ。また、 $Z$ 、 $N$ 、は陽子・中性子数、 $\langle r^2 \rangle_p$ 、 $\langle r^2 \rangle_n$  はそれぞれ陽子・中性子分布の平均二乗半径である。和則値を実験的に得るために、われわれは大阪大学 RCNP で取得した 300 MeV における  $^{90}\text{Zr}(p, n)$ 、 $(n, p)$  反応データを解析した。300 MeV における  $(p, n)$ 、 $(n, p)$  散乱の断面積は角運動量移行  $\Delta L$  に特徴的な角度分布を示す。このことを利用して、さまざまな  $\Delta L$  の寄与を多重極展開の手法で分離し、SD 遷移強度分布を高励起状態にまで渡って求めた (図 2.1.4)。SD 遷移強度を励起エネルギー 40 MeV にまで積分して求めた和則値は、 $148 \pm 12 \text{ fm}^2$  となり、この結果と電子散乱から得られた  $\langle r^2 \rangle_p$  とを合わせて、 $^{90}\text{Zr}$  核の中性子スキン厚  $0.07 \pm 0.04 \text{ fm}$  を得た。この手法はほとんどの中重核・重い核に適用可能である。[3, 51, 72]

### 2.1.3 陽子-中性子系のスピン相関 (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結果が他方の粒子に対する測定結果に影響を及ぼすことがある。量子力学のこのような「非局所性」を疑って、アインシュタインらが1935年にパラドックスを提示したことは広く知られている。非局所性を解消するために、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るのが1964年にベルによって示された。

それ以来、もつれた光子対を用いて2粒子相関を研究する実験が多く行われ、殆ど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2粒子相関の実験は数少ない。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。

我々のグループでは既に2陽子の系での相関実験を行い、量子力学的な相関を持つことを示す高精度の結果を得た [2, 84]。次段階として、同種粒子だけでなく異種粒子の系でも量子力学的相関の存在を確かめることは非常に興味深い。

われわれは、理化学研究所加速器施設において、スピン1重項状態にある陽子-中性子対を大量に生成し、スピン相関測定実験を行なった。270 MeVの偏極重陽子ビームを液体重水素標的に照射し、 ${}^2\text{H}(\vec{d}, pn)[{}^1\text{S}_0]pn$  反応によって生成された陽子、中性子それぞれのスピンの向き (スピン偏極) を同時測定した。陽子のスピン偏極は磁気スペクトロメータ SMART の第二焦点面に設置された陽子偏極度計 EPOL により、中性子のスピン偏極は標的より下流 18 m に設置された中性子偏極度計 SMART-NPOL により測定した。これらのスピン偏極度計では、解析時にスピン偏極測定軸 ( $\vec{a}, \vec{b}$ ) をそれぞれ検出平面内で  $360^\circ$  自由に回転できるため、高精度の測定が可能である。また、陽子・中性子のスピン偏極測定が3メートル離れた地点で同時に行われ、両測定が互いに「空間的」な (光速度をもってしても互いのスピン測定結果を伝達できない) 関係になることも特色の一つである。

得られた結果から、陽子と中性子のスピン相関の強さを表すスピン相関関数  $C(\Phi) = \langle \sigma_p \cdot \vec{a} \sigma_n \cdot \vec{b} \rangle$  を導出した。 $\vec{a}, \vec{b}$  はそれぞれ陽子、中性子のスピン偏極を測定する軸方向を表す単位ベクトル、 $\Phi$  は  $\vec{a}, \vec{b}$  間の角度である。この関数は陽子と中性子のスピンの符号の積の期待値に相当する。全データの1/4を解析し、陽子-中性子間の距離が核力の到達距離の  $10^{15}$  倍に隔たっても、量子力学的なスピン相関が保たれていることを確認した (図 2.1.5)。[73, 52, 70]

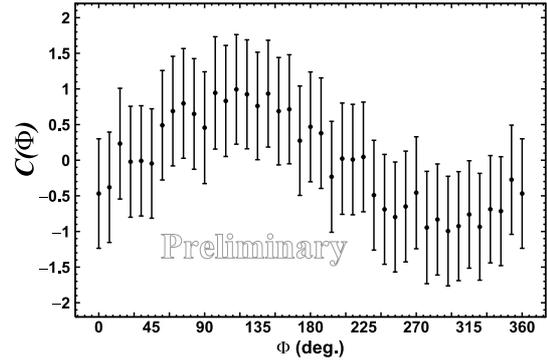


図 2.1.5: 陽子・中性子間のスピン相関係数。陽子のスピン測定軸  $\vec{a}$  を固定し、中性子のスピン測定軸  $\vec{b}$  を変えながらデータを整理して得られた結果である。

### 2.1.4 反水素原子・反陽子ヘリウム原子の研究 (早野研究室)

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

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

反陽子ヘリウム原子のレーザー分光による基礎物理定数の精度更新

陽子の質量は電子質量の約 1800 倍。物質の構成要素である陽子と電子の質量比は、自然界の重要な基本定数である。我々は「光周波数コム (櫛)」を使って、陽子の反粒子である「反陽子」と電子の質量の比率を、 $1836.152674 \pm 0.000005$  という世界最高の精度で決定することに成功した。この実験結果により、物質と反物質の質量が9桁まで一致することが確認された [11]。

2007年3月に、科学技術データ委員会 (CODATA: Committee on Data for Science and Technology) は基礎物理定数の2006年版を発表したが、その中で、陽子・電子質量比は、2002年版の  $1836.15267261(85)$

<sup>1</sup>通常の原子のレーザー分光とは異なり、我々はヘリウム原子核に束縛された反陽子準位の遷移をレーザーによって誘導している。その遷移周波数が反陽子の換算質量に比例することを用いて反陽子質量を決定できるのである。

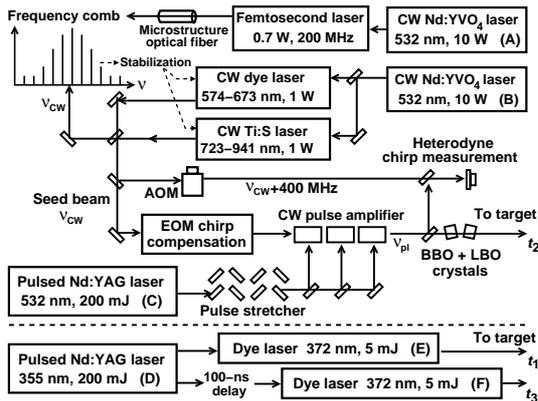


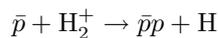
図 2.1.6: 反陽子ヘリウム原子の分光に用いているレーザーの模式図。光周波数コムにロックした CW レーザー光を、パルス増幅し、反陽子ヘリウム原子に照射している。実験は CERN の反陽子減速器施設で行っている。

から 2006 年版の 1836.152 672 47(80) へと、精度が向上した。この精度向上は、我々が求めた反陽子・電子質量比を (CPT 対称性が成り立っていることを仮定して) 基礎物理定数の評価に用いることで実現したものである。

現在、我々は更なる精度向上を目指して、新たな実験に取り組みつつある。

### 反陽子水素原子 (Protonium) の発見

我々は CERN の低速反陽子施設にて、低速反陽子と  $^{22}\text{Na}$  線源から得られる陽電子を、3T の磁場と直径 2.5 cm のリング状電極によって閉じ込め、混合して、反水素原子を生成し、その分光をめざしている。その研究の副産物として、反陽子 ( $\bar{p}$ ) と水素分子イオン ( $\text{H}_2^+$ ) が反応を起こして反陽子水素原子 ( $\bar{p}p$ ) と水素原子が生じる反応



を観測した。この反応で生じた反陽子水素原子 (protonium) は、寿命約 1 マイクロ秒で陽子と反陽子が対消滅して  $\pi$  中間子などを放出する。我々は高精度のシリコン飛跡検出器で  $\pi$  中間子の発生点分布を可視化し、反応の詳細を解明した (図 2.1.7)。反物質と物質の「化学反応」が観測されたのは世界で初めてである [18]。

測定から、生成された protonium の量子数が、第一原理計算の予想とは大きく異なることが分かった。この反応は、陽子二個、反陽子一個、電子一個のみが関与する簡単なものであるだけに、これは意外な結果で、今後の研究課題である。

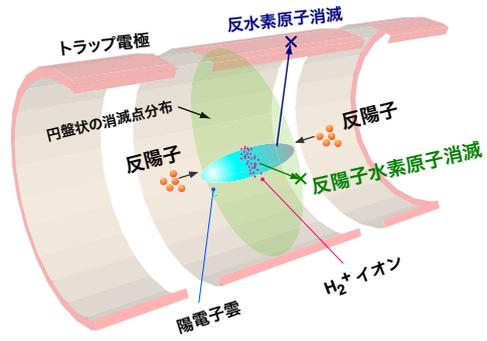


図 2.1.7: 物質 ( $\text{H}_2^+$  イオン) と反物質 (反陽子) の衝突で反陽子水素原子が生じる化学反応の模式図。

### $\text{CO}_2$ レーザーを用いた反水素原子の誘導生成

陽電子と反陽子を混合して反水素を生成させる際、波長  $11\mu\text{m}$  の  $\text{CO}_2$  レーザーを照射することで連続状態から反水素原子の  $n = 11$  への遷移を誘導し、反水素原子生成率を高めることを目指して実験を行い、その解析を完了した。その結果、誘導生成率が理論予想よりもはるかに小さく、検出限界内であることが示された。これは、高磁場下の陽電子プラズマ中での反陽子生成過程が、従来考えられていたよりもはるかに複雑であることを示唆している [20]。

### 反水素原子の閉じ込め実験

反水素原子の高精度レーザー分光を実現するには、基底状態の反水素原子を狭い空間に閉じ込めることが必須である。このため、我々は従来のソレノイド磁場を用いた反水素原子生成装置に、超伝導八重極磁石を組み合わせた装置を建設し、実験を開始した。八重極磁石が作る磁場勾配と反水素原子の磁気モーメントと間に働く力を利用して、反水素原子の閉じ込めを試みるのである [19]。この研究は、CERN にて最近組織された ALPHA 国際共同実験グループの枠組みで行われている。

我々は、反水素閉じ込め用の磁場・電場のリアルタイム制御を可能にすべく、実験装置全体の制御システムを開発した。システムは、リアルタイム OS、FPGA (Field Programmable Gate Array)、XML などの、最新のハードウェア・ソフトウェア技術を駆使して組み立てられており、反陽子と陽電子の混合を、マイクロ秒の精度で数時間にわたって安定制御することに成功した。

### 超伝導高周波トラップを用いた反水素原子生成

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

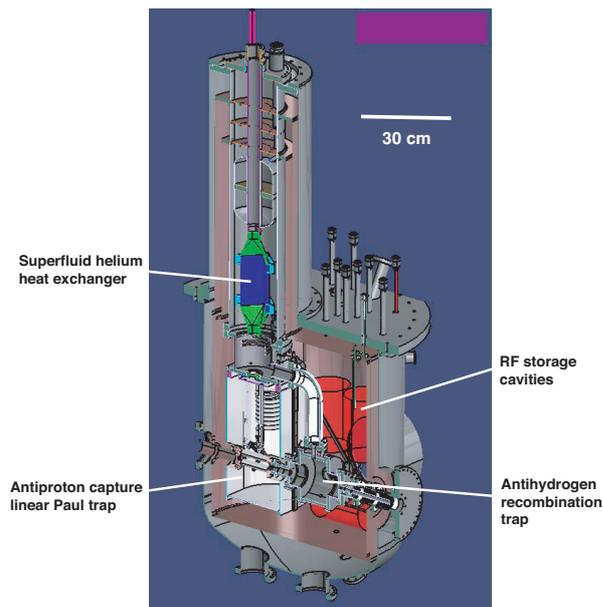


図 2.1.8: 反陽子原子の基底状態超微細構造周波数の高精度マイクロ波分光を目指して建設中の、超伝導高周波トラップ。クリオスタットの内部に、反陽子捕獲用の線形トラップと、反陽子・陽電子混合用の球形トラップが納められている。球形トラップに、二つの異なる周波数の高周波をかけることで、質量・電荷が異なる二種類の粒子の同時閉じ込めを実現する。

空洞の製作を行っている。これまでは超伝導テスト空洞を作成してその高周波特性を調べるなど、基礎的な開発を続けてきたが、最近、全システムの詳細設計が完成した。その成果の一部が、図 2.1.8 に示す三次元図である。現在、CERN において制作・組み立てを進めている。

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

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

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

我々はプローブとして  $\pi, K, \eta$  などの中間子を用い、これらを原子核中に入れた場合と真空中に置いた場合とで、中間子の質量や崩壊定数などがどのように変化するかを測定する手法で、陽子質量起源の

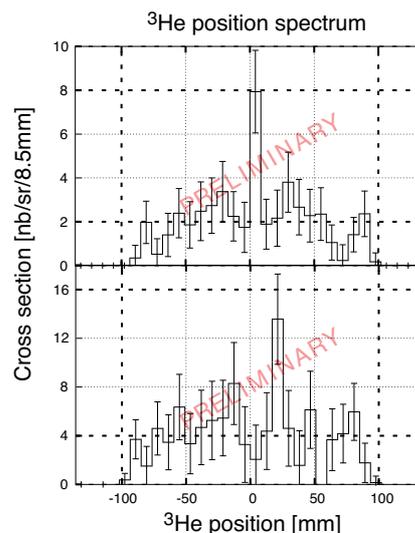


図 2.1.9: スペクトロメーター焦点面での  $^3\text{He}$  位置スペクトル

解明につとめている。

2006 年度は、 $\eta^-$  原子核の束縛状態の探索、 $K$  中間子と原子核の深い束縛状態の探索、および  $K$  中間子ヘリウム原子の X 線精密測定を行った。

### $\eta$ 中間子と原子核の深い束縛状態の探索

我々はすでに  $\pi^-$  中間子原子の精密分光から、 $\pi$  崩壊定数の核密度依存性を決定し、 $q\bar{q}$  凝縮量が核密度とともに減少することを定量的に示した。そして、同様な効果が他の中間子でも見られるかどうかを調べるため、ドイツの重イオン研究所 (GSI) にて、 $^{12}\text{C}(d, ^3\text{He})^{11}\text{B} \otimes \eta$  反応による  $\eta$  中間子と原子核の束縛状態探索実験を行った。

その第一歩として、 $(\text{CH}_2)_n$  を標的とした実験により、 $p(d, ^3\text{He})\eta$  の生成断面積を求める解析を行った。図 2.1.9 は  $p(d, ^3\text{He})$  反応で発生する  $^3\text{He}$  のスペクトロメーター焦点面での位置スペクトルである。この入射位置から  $^3\text{He}$  の運動量が分かり、 $\eta$  中間子の状態を知ることができる。上の図と下の図では、スペクトロメーターの磁場の値が 0.5% 変化している。このとき、 $^3\text{He}$  の入射位置は 17mm 変化するはずで、実際に図 2.1.9 からピークの位置が 17mm 変化しているのが分かる。このことから、 $p(d, ^3\text{He})\eta$  反応が起きている事が確かめられ、 $T_d \sim 3.5\text{GeV}$  での  $\eta$  中間子の生成断面積は  $8.2 \pm 3.5\text{nb/sr}$  であることが分かった。このビームエネルギーでの  $p(d, ^3\text{He})\eta$  反応の断面積は、今回の実験で初めて測定されたものである。[89]

実験の最終目的である  $\eta$  中間子と原子核との束縛状態については、現在解析を進めている。

### 2.1.6 $K^-$ 中間子ヘリウム4原子 X 線の精密測定 (早野研究室)

通常の原子核とストレンジネスをもったハドロン  
の相互作用はどのようなものなのだろうか。中でも、  
ストレンジネスをもつハドロンのうち最も軽い  $K^-$  中  
間子は、原子核とどのような相互作用をするのだら  
うか。この興味深い問題は現在世界中で研究されて  
いる分野で、理論・実験ともに発展しつつある。

E570 実験グループは、2005 年の 10 月から 12 月  
にかけて KEK の 12 GeV 陽子シンクロトロン上の K5  
ビームラインを用いて、 $K^-$  中間子ヘリウム4原子  
X 線の精密分光実験を行った。 $K^-$  中間子ヘリウム  
4 原子は、ヘリウム原子中の一つの電子を  $K^-$  中間  
子に置き換えたエキゾチックアトムで、中心付近の  
原子軌道はヘリウム原子核との強い相互作用によっ  
てシフトと幅をもって存在する。 $K^-$  中間子ヘリウム  
の場合観測可能な最終原子軌道は  $2p$  であり、その  
軌道への遷移 X 線 (バルマー系列) を精密に測定す  
ることで、 $K^-$  中間子とヘリウム原子核との強い相  
互作用を定量的に評価することができる。

過去に行われた実験によれば、 $2p$  軌道のシフトは  
およそ  $-40$  eV (斥力) である。一方、カイラル模型  
に基づく  $\bar{K}N$  の S 波相互作用から出発して計算さ  
れた比連崎らのエネルギー準位によると、シフトは  
ゼロ eV と分離できない程の大きさであり、巨大な  
エネルギーシフトは説明できなかった ( $K^-$  中間子ヘ  
リウムパズル)。それに加え、赤石と山崎によって  $K^-$   
中間子と原子核が強い相互作用で深く束縛した状態  
が予言され、その原子軌道に有限のシフトがある  
という可能性から、より精密な実験が強く求められ  
ていた。

E570 実験では、統計精度  $\sim 2$  eV で X 線のエネ  
ルギーを測定することを目指した。有効面積  $100 \text{ m}^2$ 、  
厚さ  $260 \mu\text{m}$  ながら高いエネルギー分解能を備えた  
X 線検出器、シリコンドリフトディテクター (SDD)  
を用い、また、エネルギー較正を正確に行うため、  
目的の X 線のシグナルを取るのと同時に Ti と Ni の  
特性 X 線を測定するというインビームエネルギー較  
正を行った。さらに、目的の X 線が標的の中から発  
生したことを保証するために  $K^-$  中間子が静止した位  
置をドリフトチェンバーによって再構成し、fiducial  
volume cut をかけバックグラウンドを低減した。そ  
してシミュレーションにより、X 線の減衰やコンプ  
トン散乱の効果を評価し、過去の実験では不十分で  
あったと推測される補正を正しく行った。

図 2.1.10(a) は E570 実験で得られた X 線のエネ  
ルギースペクトラムである (second cycle のもので、統  
計は全体のおよそ  $1/2$ )。  $K^-$  中間子ヘリウム4原子の  
バルマー系列に相当する X 線の測定に成功し、その  
分解能は  $6.5 \text{ keV}$  の位置で  $190 \text{ eV}$  (FWHM) であ  
った。図 2.1.10(b) は  $3d \rightarrow 2p$  遷移を拡大したも  
ので、縦に引いた点線が過去の実験値  $-43 \text{ eV}$  を示  
しており、破線がクーロン相互作用のみで計算したシ  
フト  $0 \text{ eV}$  を示している。我々の結果は、理論的に  
説明できなかった過去の実験を棄却する結果となり、  
長年のパズルを解決した。2007 年に入り E570 実  
験の解析は最終段階に入り、論文執筆の準備を進  
めている。

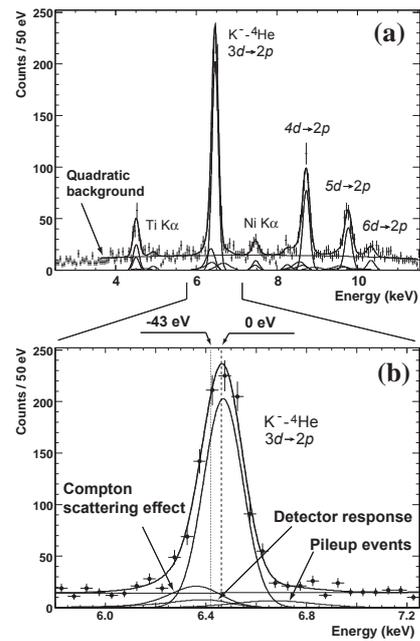


図 2.1.10: (a): E570 実験で得られた  $K^-$  中間子ヘ  
リウム4原子 X 線のエネルギー・スペクトラム (second  
cycle のみで全統計の  $\sim 1/2$ )。 (b):  $3d \rightarrow 2p$  遷移を  
拡大したもの。

### 2.1.7 クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の生成とその性質の研究 (小沢研究 室)

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

日本を含む世界各国のグループの参加により検出器  
の建設が進められ、2000 年 4 月から現在までに、金-  
金衝突、陽子-陽子衝突、重陽子-金衝突、銅-銅衝突  
を核子あたり  $200 \text{ GeV}$  の重心系エネルギーでのデー  
タを中心に収集した。測定のための検出器系は、透  
過的なプローブであるレプトンや光子を捉える  
事を主眼に置いたもので、広いアクセプタンス、高  
い運動量分解能、高いパイオン除去率などの能力を  
持つ。我々は、電子同定用検出器である Ring Image  
Cerenkov Counter (RICH) の運用、低質量ベクトル  
中間子 ( $\rho, \omega, \phi$ ) や  $J/\psi$  粒子の解析などで中心的な役  
割を果たしてきた。この実験によって、今までに見ら

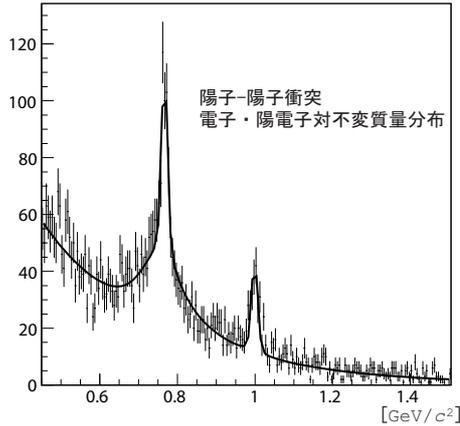


図 2.1.11: 陽子-陽子衝突における電子・陽電子対の不変質量分布。低い質量のピークが  $\omega$  中間子に対応し、高い質量のピークが  $\phi$  中間子に対応する。

れていない様々な現象が観察され、我々はパートンレベルの流体模型で記述される新しい物質層が存在することを発見した。この結果は 2005 年に記者発表したが、その後も精力的な解析が我々も含む共同研究者らによって続けられ、2006 年度にも様々な重要な結果が得られた。[7, 8, 9, 12, 14, 16, 17, 21, 23, 23, 24]

我々のグループでは、特に電子・陽電子崩壊を用いた低質量ベクトル中間子 ( $\rho, \omega, \phi$ ) の解析に力を入れている。これは、我々のもうひとつの研究テーマであるハドロンが動的な質量獲得機構とも密接に関連したもので、RHIC で実現されている高温・高密度状態中で、カイラル対称性の回復によるベクトル中間子の質量変化や収量変化を捉えようというものである。この解析の中で、我々のグループが RHIC での測定で初めて  $\phi$  中間子の電子対崩壊のピークを同定した。その後のアクセプタンスや様々な測定効率の評価を含むすべての解析を我々自身の手で行い、結果を 2005 年の Quark Matter 国際会議で発表した。この解析では、ピークの同定には成功したものの、S/N 比に比べて統計が十分でないため、巾の変化や質量分布の変化は捉えられなかった。2006 年度から 2007 年度にかけてのデータ収集においては、S/N 比の向上のための新たな検出器を導入した。

質量分布に対する検出器の効果や比較のための予想収量を精度良く決定するためには、陽子-陽子衝突データの解析が本質的に重要となる。我々のグループでは、その重要性に着目し、他のグループに先駆けて陽子-陽子衝突データの解析を行った。その結果、2.1.11 に示される電子・陽電子対の不変質量分布を得ることに成功した。これにより、PHENIX 実験がこの測定に対して十分な分解能を持つことなどが示された。

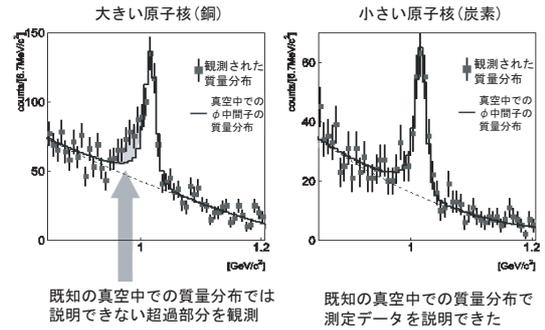


図 2.1.12: KEK において測定された不変質量分布。四角い点が今回の実験で得られた  $\phi$  中間子の質量の分布を表すデータを表し、実線は  $\phi$  中間子が原子核物質の影響を受けずに崩壊した場合の既知の分布を表す。左図は標的原子核として比較的大きな銅原子核を用いた場合、右図は、比較的小さな炭素原子核を用いた場合の結果である。ここでは、速度の小さな  $\phi$  中間子のみを選んでいる。

### 2.1.8 ハドロンが動的な質量を獲得する機構の研究 (小沢研究室)

KEK において、有限密度下でのベクトル中間子の有効質量の変化を測定する実験を行った。2006 年度には、その実験の様々な結果が公表された。[13, 25]

この実験は、カイラル対称性の部分的回復による素粒子質量の変化に対して実験的知見を与えるものである。具体的には、ベクトル中間子の質量変化を直接観測するために、KEK-PS からの 1 次ビーム (12 GeV 陽子) を原子核標的に当てて原子核中にベクトル中間子を生成し、その  $e^+e^-$  崩壊や  $K^+K^-$  崩壊の不変質量分布の測定を行った。ここで、ベクトル中間子を用いるのは、相互作用項が小さく質量がほぼクォークの 2 倍であるため、カイラル対称性の回復とクォークの質量に関する実験的知見を得るために非常に良いプローブとなるからである。また、電子崩壊を測定することで、Final State Interaction の影響を避けることが出来る。

本年度に得られた結果のうち、もっとも重要な結果は、世界で初めて、 $\phi$  中間子の原子核中での質量分布を測定し、それが自由空間とは有意に違うことを示したことである。実験的には、炭素と銅の 2 種類の原子核標的を用いて同時測定を行い、銅標的のみ自由空間での質量分布からの変化が見られることを示した。図 2.1.12 に結果を示す。

図 2.1.12 の左図をみると、 $\phi$  中間子の真空中崩壊のピークの低質量側に、既知の分布の形では説明できない超過成分が存在する。この超過成分は、もともと実線で描かれた形を持っていた  $\phi$  中間子の一部が変形して形作っていると考えるのが自然で、炭素原子核を用いた右図ではこの超過が見られないことは、この超過が原子核内部で崩壊した  $\phi$  中間子によって形作られていることを示唆している。これを原子

核内部の  $\phi$  中間子の質量が変化していると考え評価すると、3%程度の質量減少にあたり理論的な予想とも矛盾しない。

また、図 2.1.12 は速度の小さな  $\phi$  中間子のみを選んで観測した場合の結果であるが、速度の大きな  $\phi$  中間子を選んでみると、この超過成分は少なくなる。原子核標的が小さい場合や速度の大きい  $\phi$  中間子を選んだ場合には、 $\phi$  中間子が原子核内で崩壊する割合は小さくなり、観測される  $\phi$  中間子の質量変化も小さくなると予想される。今回得られた結果はこの予想と一致しており、観測された超過成分が  $\phi$  中間子の原子核内崩壊によって形成されたものであることを支持している。

この結果は、ひとつのマイルストーンであるが、さらに実験結果をカイラル対称性の回復へと結びつけて行くためには、より Exclusive な測定を行う必要がある。それは、たとえば、確実に原子核内で生成された  $\phi$  中間子を捉えるなどの方法である。すくなくともそれを統計的に行うためには、より運動学的な条件の絞れる高統計の実験が要求されている。また、陽子標的やより大きな標的の実験が重要である。以上のような要求にこたえる実験を我々のグループで計画し、プロポーザルを J-PARC の PAC に提出した。プロポーザルは、1月の PAC において第1段階(物理的意義)の認可を得た。

### 2.1.9 次世代の高統計実験に向けた新たな検出器の開発 (小沢研究室)

我々のグループでは、J-PARC での実験を視野に入れた検出器の開発を行ってきた。J-PARC での実験では、低質量電子対測定を大立体角で捉えることが重要になる。そのための Gas Čerenkov Counter の開発・研究をおこなってきた。2006 年度には、広島大学の電子周回装置で性能評価のためのテスト実験を行った。

また、Gas Electron Multiplier(GEM)の開発を行い、その応用研究を行ってきた。GEM は、CERN で開発された電子増幅機構を持つフォイルと穴構造を持つ検出器である。東大 CNS では、CERN とは違ったエッチング方法を用いた GEM の製作を行ったさらに、穴構造の改善を進め、より増幅度と安定度の高い GEM の製作に成功している。

さらに、PHENIX 実験に新たに Time Projection Chamber(TPC)を導入する可能性を調べるために基礎的な性能評価を行い、重イオン実験に使用できる性能を持つことを確認した。[26]

### 2.1.10 RIビームファクトリー計画と中性子過剰核の安定性 (旧櫻井研究室)

中性子過剰核の存在やその安定性は高アイソスピに依拠する核構造の変化、有効核力の異常などを理解する上で基礎をなすものである。この観点か

ら未開の中性子ドリップ線近傍核に関して、新同位元素探査、質量、半減期 ( $t_{1/2}$ ) 及び  $\beta$  遅発中性子放出確率 ( $P_{in}$ ) の測定を試みている。[31]

これらの研究により、近年、中性子過剰領域での魔法数の消失、新魔法数の出現などの特異な核構造が次々と明らかになってきた。しかし、このような研究は軽い原子核に限られていた。本格的な研究展開を目指して、理研 RI ビームファクトリー計画に着手し、2007 年度の実験開始を目指している。RI ビームファクトリーは、現施設に加え、新たに3つのサイクロトロンを建設し、加速エネルギーの増強を図り、水素からウランまで全ての安定原子核をカバーし、ウランを核子あたり最高 350 MeV まで加速することができる。また、同時に加速方法等の工夫により、ビーム強度も格段に向上させる。RI ビームの生成は、これまでの入射核破砕反応に加えて、中性子過剰核の生成に有利な、ウランビームによる核分裂反応を用いることが計画されている。これにより、中重領域の中性子過剰核を中心に新たに 1,000 種類におよぶ不安定原子核が生成可能であると期待されている。現在は、新しい不安定核分離装置 (BigRIPS) の開発、および不安定核ビーム生成技術の確立を目指し活動をおこなっている。

#### BigRIPS ビームラインの磁場計算

BigRIPS ビームラインは、理化学研究所に建設した新たな不安定核ビーム分離装置である。生成量が少なく純度の悪い核種を用いた実験にも対応するため、世界初の本格的タンデム型を採用し、目的とする核種の2段階分離が可能である。核子あたり 345 MeV の  $^{238}\text{U}$  ビームの核分裂反応によって出来た、大きな角度広がりを持つ粒子を効率良く捉えるために、ビームラインは大きなアクセプタンスを持つように設計された。その大きさは、運動量に対して  $\pm 3$  垂直方向の角度に対して 100 mrad である。

BigRIPS ビームラインは、世界初の本格的なタンデム型の不安定核分離装置で、不安定核製造及び分離を行なう第一セクションと、粒子識別及び2段階目の分離を行なう第二セクションとに分かれている。第一セクションは不安定核生成標的のある第0焦点面 (F0) から第3焦点面 (F3) までの約 30m、第二セクションは F3 から第7焦点面 (F7) までの約 50m となっている。F2-F3 間以外のビームラインには軌道を曲げるための双極磁石が入っており、焦点面の前後には全て、粒子の軌道を収束させるための三連四重極磁石が入っている。この三連四重極磁石は、ビームラインの大きなアクセプタンスを達成するため、超電導磁石を採用した。

F0 から F7 まで、大きな角度広がりを持つビームが通るように、設定磁場の計算を行なった。特に超電導磁石は、磁場の強度によって磁石両端部のフリンジ磁場の形状が大きく変化するため、磁場強度の変化に対して単一の形状では近似できない。またコイルに流す電流と磁石中心での磁場強度の関係も、磁石コイル内の鉄芯の影響のために、単純な比例関係からずれている。これらの理由のため、計算コード

COSY Infinity を使用して、上に記したような磁石の複雑な特性をシミュレーション計算に取り込んだ。精度の良いシミュレーションにより、焦点面が多く長いビームラインでも、ビームを焦点面に精度良く収束させ、効率良く輸送することが出来る。

本年度の2月と3月に、一次ビームとして  $^{86}\text{Kr}$ ,  $^{238}\text{U}$  を用いた、ビームラインのテスト実験を行なった。その結果、目的とする核種ビームを焦点面に収束させることができ、粒子を F7 まで輸送することが出来ていることを確認した。

現在は、粒子識別時に核種の分離を良くするための作業を行なっている。核種の識別は、第二セクションを通過する時の飛行時間 (TOF) と F7 の  $\Delta E$  から識別する。この時、粒子の運動量や軌道の違いによって広がる TOF を中心軌道を通った時の TOF に補正することで、分離を良くすることが原理的に可能である。

### 2.1.11 ガンマ線分光による核構造研究 (旧 櫻井研究室)

原子核の低励起準位は、原子核の回転や振動運動に対応する低励起  $2^+$ 、 $4^+$  状態、殻構造を特徴づける一粒子状態など、原子核の代表的な励起様式が現れ、核構造研究の重要な研究対象である。不安定核の低励起状態を実験的に調べるには、ガンマ線核分光の手法を用い、不安定核ビームを標的に照射し、適当な核反応で励起状態を生成し、脱励起する際の  $\gamma$  線のエネルギーと絶対強度を測定する。これにより、励起準位のエネルギー、スピン・パリティ、遷移強度等の知見が得られる。我々は、対象となる不安定核の種類や得られるビーム強度、測定する物理量に応じて、様々な測定方法、励起方法を用いた研究を行っている。[27, 28, 29, 30, 40, 48]

また、より広範囲の原子核を対象とし、多様な物理量を測定するための新しい手法の開発も行っている。以下に現在取り組んでいるテーマを測定手法で分類して述べる。

#### 軽い中性子過剰核の励起状態の寿命測定法

我々は、不安定核ビームを用いた、励起状態の寿命を直接測定する実験手段として、Recoil Shadow Method (RSM) を考案し、軽い中性子過剰核を対象とした実験を展開している。[41, 48]

RSM は、不安定核を標的に照射し、脱励起の  $\gamma$  線を測定する際に、励起状態の寿命に応じて、 $\gamma$  線の放出位置がビーム軸方向に移動することを利用する。例えば核子あたり 50 MeV の不安定核ビームを標的に照射すると、励起された不安定核は光速の  $1/3$  程度の速さで移動する。励起状態の寿命が 30ps とすると、平均 3mm 程度移動することになる。ここで標的周辺に鉛コリメータを置くなどして、 $\gamma$  線の放出位置によって、検出効率の異なる幾つかの検出器群を用いると、各々の検出器群で測定する  $\gamma$  線の収

量が励起状態の寿命に依存して変化する。各検出器群の収量と寿命の関係を、シミュレーションを用いて求め、寿命を決定することができる。

我々は RSM を用いて中性子過剰なホウ素同位体、炭素同位体の励起状態の寿命測定を行った。先に行なった実験より、 $^{16}\text{C}$  の  $2^+$  状態の寿命が異常に長く、 $2^+$  状態のエネルギーから予測される値に比べても十倍以上長いことがわかっている。偶偶核の  $2^+$  状態の寿命は、電気四重極遷移確率  $B(E2)$  の逆数に比例するため、陽子分布の四重極変形 (または振動) の発現強度を端的に表す物理量である。したがって、得られた実験結果は四重極集団運動に対して陽子の寄与が異常に小さいことを示唆するが、このような現象が何故生じるのかは未だに解明されておらず、同様な現象が周辺の中性子過剰核にも一般に出現するかどうかを実験的に明らかにすることは重要な課題である。 $^{16}\text{C}$  近傍核の核構造を系統的に調べるため、 $^{15,17}\text{B}$ 、 $^{17,18}\text{C}$  を対象に、励起状態探査実験、および、RSM による励起状態の寿命測定を行っている。特に、 $^{18}\text{C}$  は、 $2^+$  状態の励起エネルギーが、1585 keV と、 $^{16}\text{C}$  の  $2^+$  状態の励起エネルギー (1766 keV) に近いいため、 $^{16}\text{C}$  と同様な構造を持ち、四重極集団運動に対する陽子の寄与が抑制されている可能性がある。

本年度は、 $^{18}\text{C}$  に関するデータの解析により、 $2^+$  状態の寿命を決定し、 $2^+$  状態のエネルギーから予測されるより四倍大きい値であることがわかった。これは、 $^{18}\text{C}$  では四重極集団運動に対する陽子の寄与が抑制されているということを示す実験結果である。 $2^+$  状態の寿命測定により得られた  $^{16,18}\text{C}$  の  $B(E2)$  を他の偶々核と比較したところ、陽子閉殻構造を持つ原子核とほぼ同程度に小さいことから、 $^{16,18}\text{C}$  は陽子閉殻構造を持つ可能性が高い。

#### $^{17}\text{C}$ 励起状態の寿命測定

$^{17}\text{C}$  は、1 中性子分離エネルギーがわずかに 780 keV しかない弱束縛核である。近年不安定核ビームを用いたインビーム・ガンマ線核分光によって束縛励起状態が励起エネルギー 210 keV と 330 keV に縮退していることが明らかになった。これらの弱束縛状態の知見を得るために、我々は RSM を用いて二つの励起状態から基底状態への  $\gamma$  崩壊寿命を測定し、基底状態-励起状態間の電磁遷移強度を実験的に決定した。

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

寿命値に基づいて、両遷移は共に M1 が支配的な  $\gamma$  崩壊過程であることが結論された。これは、過去の実験において示唆された励起状態のスピン・パリティを支持する結果である。寿命値から、M1 遷移強度を導出した。その結果、第一励起状態から基底状

態への M1 遷移強度は、第二励起状態から基底状態への強度に比べて約 15%しかないとわかった。現在、遷移強度の違いの起源を解明すべく、 $^{17}\text{C}$  の核構造の議論を進めている。

#### $^{15,17}\text{B}$ の核分光

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

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

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

#### 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。クーロン励起法により、中性子数  $N=50$  周辺の中性子過剰な Ge 同位体を対象に  $2^+$  状態の電気四重極遷移確率の導出を行った。Ge 同位体を対象とした実験では、Ge 同位体の中性子過剰領域では、安定核近傍の原子核と同様に魔法数  $N=50$  に起因する閉殻構造の発現が見られることがわかった。また、将来 RIBF において展開しうる中重領域の原子核分光法として、中間エネルギーでの二段階クーロン励起法を提案している。特に偶偶核の第二励起状態 ( $2_2^+$ ,  $4_1^+$  状態) の分光を行なうべく、解析法の確立、最適な実験条件の考案などの懸案に関して議論を行なっている。[40]

#### 2.1.12 ベータ分光を用いた核構造研究 (旧 櫻井研究室)

$\beta$  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  $\beta$  崩壊するため、 $\beta$  核分光は、全ての不安定核研究に適用できる汎用性もち、かつ、他の 2 次反応を用いる核分光法にくらべ、極めて効率のよい実験手段である。安定線から離れた陽子・中性子過剰核を対象とした場合は、ベータ崩壊の  $Q$  値が一般に 10~20 MeV 程度と大きいため、 $\beta$  線と、遅発陽子・中性子、 $\gamma$  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。

#### $\beta$ - $\gamma$ 分光法を用いた核構造

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

本年度は、中性子過剰な炭素、窒素、酸素同位体の  $\beta$ - $\gamma$  核分光実験のデータ解析を中心に行った。この領域の原子核の殻模型配位は、中性子の最外殻は  $sd$  殻、陽子の最外殻は  $p$  殻という特徴をもつ。GT 遷移は軌道角運動量を変えない遷移であるので、これらの不安定核が GT 遷移により崩壊する場合  $sd$  殻の中性子が  $sd$  殻の陽子に変わる。特に、娘核が窒素や酸素の同位体の場合は、基底状態の陽子の最外殻は  $p$  殻であるため、GT 遷移によって陽子が  $p$  殻から  $sd$  殻に励起した状態に選択的に遷移することになる。したがって、 $\beta$  遅延ガンマ線の測定によって、シェルギャップ間の遷移に対応するガンマ線を同定できる可能性があり、中性子過剰領域における陽子の  $p$  殻と  $sd$  殻間のシェルギャップの変化について実験的に調べることができる。

$\beta$  崩壊に際して放出される  $\beta$  線をプラスチックシンチレータを用いて観測し、娘核が励起状態から脱

励起する際に放出される  $\gamma$  線をゲルマニウム検出器で観測して、 $\beta$  線と  $\gamma$  線の同時測定を行った。実験上の工夫点は、ゲルマニウム検出器に  $\beta$  線によるバックグラウンドを除去するための薄いブラックシンチレーターを施し、高いエネルギー分解能と、高い信号・雑音比を両立している点があげられる。

データ解析の結果、 $\beta$  崩壊に由来する  $\gamma$  線を複数確認することが出来た。観測された  $\gamma$  線から  $^{20}\text{N}$  の  $\beta$  崩壊の崩壊様式を決定した。今後は、他の原子核の  $\beta$  崩壊の崩壊様式を決定し、理論計算との比較などから、核構造に関する知見を深める予定である。

### 陽子過剰核 $^{24}\text{Si}$ のベータ核分光

我々は  $^{24}\text{Si}$  の  $\beta^+$  崩壊をプローブとして、 $T_z = -2$  の陽子過剰核の  $0^+$  超許容における CVC 仮説の検証、および  $\beta$  崩壊の娘核  $^{24}\text{Al}$  の核構造における  $T_z = \pm 1$  のアイソスピン対称性についての検証を行った。

超許容遷移は比較的軽い陽子過剰核の  $\beta^+$  崩壊に特有の遷移モードである。なぜなら、原子核の荷電アナログ状態のアイソスピン多重項同士を比べると、クーロン力のために  $T_z$  の小さい陽子過剰核の方がエネルギーが高くなり、 $\beta$  崩壊をプローブとして遷移を調べることができるからである。また質量数の高い原子核では、中性子数の方が陽子よりも多くなり、実験的にアイソスピン多重項間の遷移の測定が困難になる。さらに偶々核  $0^+$  から荷電アナログ状態への遷移では Gamow-Teller 遷移が禁止されるために純粋な Fermi 遷移となる。純粋な Fermi 遷移では核子の内部構造に依らずに始状態と終状態の波動関数が最大限重なっていると考えられるので、崩壊の速さ  $ft$  値は  $|N - Z|$  と弱い相互作用のベクトル遷移の結合定数  $G_V$  のみで決まる。つまり同じ  $T_z$  の核からの Fermi 遷移であれば、どの原子核が親核でもベクトル流が保存している限り、 $ft$  値は等しくなる。このベクトル流の保存 (CVC 仮説) を検証するために、 $T_z = -1$  の  $\beta^+$  崩壊は様々な核について調べられているが、 $T_z = -2$  の  $\beta$  崩壊についてはデータが少なく、あってもエラーが非常に大きいので、CVC 仮説の成否を議論するには不十分であった。そこで高統計で Fermi 遷移を精度良く求める実験が必要であった。

また、 $^{24}\text{Si}$  では束縛状態への遷移が観測されたことがなく、崩壊様式が定まっていなかった。そのため娘核  $^{24}\text{Al}$  では低励起準位でもスピパラリティが定まっていない準位が有り、鏡映核  $^{24}\text{Na}$  とのアイソスピン対称性を比較することができなかった。

これらの問題を解決するために、 $^{24}\text{Si}$  の  $\beta$  遅延陽子の分光、および  $\beta$  遅延  $\gamma$  線の分光実験を行った。ドリップラインに近い陽子過剰核では  $\beta$  崩壊の  $Q$  値が大きいため、完全な崩壊様式を得ようとするならば、非束縛状態の分光に対応する  $\beta$  遅延陽子、および束縛状態の分光に対応する  $\beta$  遅延  $\gamma$  線の測定の両方を行うことが必要である。 $\beta$  遅延陽子の測定では我々の開発した大立体角の  $\Delta E$ - $E$  システムによって従来の 10 倍の高統計かつバックグラウンドの少ない高精度な陽子スペクトルを得ることに成功した。 $\beta$

遅延  $\gamma$  線の測定では新たに  $^{24}\text{Al}$  の第 1 励起準位、第 2 励起準位への  $\beta$  遷移を初観測し、特に第 2 励起準位は遷移の  $ft$  値からスピ・パリティを  $1^+$  と定めることができた。

以上の測定からまず、 $^{24}\text{Si}$  の崩壊様式を定め、 $^{24}\text{Al}$  と  $^{24}\text{Na}$  の間で低励起準位のエネルギーレベル、スピ・パリティ、 $\beta$  遷移の  $ft$  値など基本的なアイソスピン対称性が成り立っていることを確認した。また、Fermi 遷移の  $ft$  値は理論的な予想に近い値を示し、 $T_z = -2$  の Fermi 遷移についても CVC 仮説の成立を確認できる結果を得た。本研究の結果は投稿論文として発表される予定である。

### 2.1.13 高分解能ガンマ線測定による励起状態の寿命決定 (旧櫻井研究室)

ドリップライン近傍までの核を対象とした実験手法として、現在、インビーム  $\gamma$  線核分光が広く使われている。インビーム  $\gamma$  線核分光ではクーロン励起や原子核破碎反応などの手法で目的の核の励起状態を作りそこからの脱励起  $\gamma$  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、新しい実験手法の開拓と、それを可能とする  $\gamma$  線検出器の高精度化、高効率化が求められている。

我々は、Recoil Distance Method (RDM) を使い、 $^{32}\text{Mg}$  の第一  $2^+$  励起状態の寿命を直接決定する実験研究を行っている。RDM とは、励起状態生成用の標的と、入射粒子を減速するための標的の 2 層の反応標的を用い、それぞれの標的通過後に放出されたガンマ線の個数の比から、励起状態の寿命を決定する手法である。中間エネルギーの不安定核ビームへの適用は本実験が世界初である。ガンマ線の個数の比を精度よく求めるためには、高分解能で脱励起ガンマ線を測定することが不可欠であり、実験では CNS のゲルマニウム検出器アレイ GRAPE を用いてガンマ線を測定した。また、我々が開発している BGO 検出器をコンプトンシールドとして使い、信号雑音比の向上を図った。同時に実験手法の妥当性を確かめるため、 $^{22}\text{Na}$ 、 $^{21}\text{Ne}$  についても同様の測定を行った。これらについても  $^{32}\text{Mg}$  と同様の手法により寿命の決定を行った。その結果、既存の実験の結果と誤差の範囲内で一致する値を得た。並行して  $^{32}\text{Mg}$  についての解析も進めており、既存の実験の結果と矛盾しない値を得ている。これらの結果は論文としてまとめている。

### 2.1.14 TOF スペクトロメータ開発と中重領域の核分光 (旧櫻井研究室)

中重領域の中性子過剰核では、中性子数 28、40 の (擬)魔法数消失、中性子数 32 の新魔法数出現などが示唆され、実験による核構造の解明が望まれている。不安定核の分光手段としては、逆運動学非弾性散乱を用いたインビーム  $\gamma$  線核分光が盛んに行われている。

るが、これまでは二次標的からの散乱粒子の質量識別に  $\Delta E$ - $E$  法を用いていたため、主に質量数 30 程度以下の軽い不安定核にしか適用できなかった。そこで我々は、開発した TOF スペクトロメータを用い、実験可能領域を質量数 70 程度まで広げること成功した。TOF スペクトロメータは、超伝導三連四重極電磁石と、その前後に配置されたプラスチック検出器、最下流に置かれたシリコン検出器からなり、散乱粒子の質量識別法として、TOF- $E$  法を採用している。TOF スペクトロメータの特徴は、三連四重極電磁石を用いることによって質量数領域に見合った TOF 分解能を得るための飛行距離を確保しながら下流の検出器面積を小さくし、測定の効率化を図った点にある。

2004 年度に、中性子過剰な Ti 同位体に注目し殻構造の振る舞いを調べる実験を行った。中性子数 40 の同調核では、中性子が過剰になるに従って原子核の変形度が増し、魔法数が消失している可能性がある。実際に質量数 40 程度以下の軽い中性子過剰領域では、中性子数 8、20 の閉殻構造が崩れて魔法数が消失し、中性子数 16 が新魔法数になるなど、殻構造の異常な変化が実験的にも理論的にも指摘されている。そこで我々は中性子過剰な Ti 同位体に注目し、液体水素標的を用いた、インビーム  $\gamma$  線核分光実験を行った。偶偶核において、陽子非弾性散乱や原子核破砕反応などの多様な核反応を用いて励起状態を生成し、その性質に関する実験情報から殻構造の振る舞いを調べている。これにより、Ti 同位体近辺の核構造の様子を探ることを目的としている。

本年度は、Ti 同位体やその周辺核種の低励起状態のエネルギーを決定した後、<sup>54,56,58</sup>Ti において陽子非弾性散乱による 2<sup>+</sup> 励起状態への励起断面積を求めた。また、核内における陽子分布と中性子分布の変形が等しいと言う仮定の下で、これらの核の変形度を導出した。これら新たに得た実験結果を、付近の核種の励起エネルギーや変形度と合わせて比較することで、Ti 同位体の中性子過剰領域での核構造の振る舞いを理解することができる。今後は、複数の  $\gamma$  線の相関や、陽子非弾性散乱以外の反応チャンネル（荷電交換反応、中性子ロックアウト反応等）を調べ、さらに核構造に関する知見を深める予定である。

### 2.1.15 天体核物理 (旧櫻井研究室)

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。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、<sup>23</sup>Al、<sup>27</sup>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 <sup>22</sup>Mg( $p, \gamma$ )<sup>23</sup>Al 反応、<sup>26</sup>Si( $p, \gamma$ )<sup>27</sup>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  $\gamma$  線源となる <sup>22</sup>Na、<sup>26</sup>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。[38]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] H. Kuboki, H. Sakai, K. Yako *et al.*: “Search for super narrow dibaryons via the  $pd \rightarrow ppX$  and  $pd \rightarrow pdX$  reactions” *Phys. Rev. C* **74**, 035203 (2006).
- [2] H. Sakai, H. Kuboki, M. Sasano, K. Yako *et al.*: “Spin correlations of strongly interacting massive fermion pairs as a test of Bell’s Inequality”, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 150405 (2006).
- [3] K. Yako, H. Sagawa, and H. Sakai: “Neutron skin thickness of <sup>90</sup>Zr determined by charge exchange reactions”, *Phys. Rev. C* **74**, 051303(R) (2006).
- [4] T. Wakasa, H. Sakai, H. Kuboki, M. Sasano *et al.*: “Isovector effective NN interaction in <sup>28</sup>Si( $\bar{p}, \bar{n}$ )<sup>28</sup>P(6<sup>-</sup>) at 198 MeV”, *Phys. Lett. B* **645** 402–407 (2007).
- [5] K. Suda, H. Sakai, K. Yako *et al.*: “Absolute calibration of the deuteron beam polarization at intermediate energies via the <sup>12</sup>C( $\bar{d}, \alpha$ )<sup>10</sup>B\* [2<sup>+</sup>] reaction”, *Nucl. Instrum. Methods A* **572**, 745–753 (2007).
- [6] H. Mardanpour, H. Kuboki, H. Sakai, M. Sasano, K. Yako *et al.*: “Precision measurement of vector and tensor analyzing powers in elastic deuteron-proton scattering”, *Eur. Phys. J. A* **31**, 383–391 (2007).
- [7] S.S. Adler *et al.* (PHENIX collaboration): “Jet structure from dihadron correlations in d+Au collisions at  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  GeV”, *Phys. Rev. C* **73**, 054903 (2006).
- [8] S.S. Adler *et al.* (PHENIX collaboration): “Common suppression pattern of eta and pi(0) mesons at high transverse momentum in Au plus Au collisions at  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  GeV”, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 202301 (2006).
- [9] S.S. Adler *et al.* (PHENIX collaboration): “Improved measurement of double helicity asymmetry in inclusive midrapidity  $\pi^0$  production for polarized  $p+p$  collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV”, *Phys. Rev. D* **73**, 091102 (2006).
- [10] A. Kellerbauer, R. Funakoshi, R.S. Hayano *et al.*: “Sideband cooling of ions in a non-neutral buffer gas”, *Phys. Rev. A* **73**, 062508 (2006).

- [11] M. Hori, R.S. Hayano, N. Ono *et al.*: “Determination of the antiproton-to-electron mass ratio by precision laser spectroscopy of  $\bar{p}\text{He}^+$ ”, Phys. Rev. Lett. **96**, 243401 (2006).
- [12] S.S. Adler *et al.* (PHENIX collaboration): “Azimuthal angle correlations for rapidity separated hadron pairs in d+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV”, Phys. Rev. Lett. **96**, 222301 (2006).
- [13] T. Tabaru, K. Ozawa *et al.*: “Nuclear mass number dependence of inclusive production of omega and phi mesons in 12-GeV p + A collisions”, Phys. Rev. C **74**, 025201 (2006).
- [14] S.S. Adler *et al.* (PHENIX collaboration): “Nuclear effects on hadron production in d plus Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV revealed by comparison with p plus p data”, Phys. Rev. C **74**, 024904 (2006).
- [15] B. Juhasz, R.S. Hayano *et al.*: “Low temperature behaviour of collisions between antiprotonic helium and hydrogenic molecules and an indication of the Wigner threshold law”, Chem. Phys. Lett. **427**, 246 (2006).
- [16] S.S. Adler *et al.* (PHENIX collaboration): “Dense-medium modifications to jet-induced hadron pair distributions in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV”, Phys. Rev. Lett. **97**, 052301 (2006).
- [17] S.S. Adler *et al.* (PHENIX collaboration): “Jet properties from dihadron correlations in p plus p collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV”, Phys. Rev. D **74**, 072002 (2006).
- [18] N. Zurlo, R. Funakoshi, R.S. Hayano *et al.*: “Evidence for the production of slow antiprotonic hydrogen in vacuum”, Phys. Rev. Lett. **97**, 153401 (2006).
- [19] W. Bertsche, R. Funakoshi, R.S. Hayano *et al.*: “A magnetic trap for antihydrogen confinement”, Nucl. Instrum. Meth. A **566**, 746 (2006).
- [20] M. Amoretti, R. Funakoshi, R.S. Hayano *et al.*: “Search for laser-induced formation of antihydrogen atoms”, Phys. Rev. Lett. **97**, 213401 (2006).
- [21] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration): “Measurement of High- $p_T$  single electrons from heavy-flavor decays in p+p collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV”, Phys. Rev. Lett. **97**, 252002 (2006).
- [22] G. Andresen, R. Funakoshi, R.S. Hayano *et al.*: “Antimatter plasmas in a multipole trap for antihydrogen”, Phys. Rev. Lett. **98**, 023402 (2007).
- [23] S.S. Adler *et al.* (PHENIX collaboration): “High transverse momentum eta meson production in p+p, d+Au, and Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV”, Phys. Rev. C **75**, 024909 (2007).
- [24] S.S. Adler *et al.* (PHENIX collaboration): “Measurement of direct photon production in p+p collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV”, Phys. Rev. Lett. **98**, 012002 (2007).
- [25] R. Muto, K. Ozawa *et al.*: “Evidence for in-medium modification of the phi meson at normal nuclear density”, Phys. Rev. Lett. **98**, 042501 (2007).
- [26] S.X. Oda, K. Ozawa *et al.*: “Development of a time projection chamber using gas electron multipliers (GEM-TPC)”, Nucl. Instrum. Meth. A **566**, 312–320 (2006).
- [27] Z. Elekes, H. J. Ong *et al.*: “Proton inelastic scattering studies at the borders of the “island of inversion”: The  $^{30,31}\text{Na}$  and  $^{33,34}\text{Mg}$  case”, Phys. Rev. C **73**, 044314 (2006).
- [28] Zs. Dombradi, H. Iwasaki *et al.*: “Vanishing  $N = 20$  Shell Gap: Study of Excited States in  $^{27,28}\text{Ne}$ ”, Phys. Rev. Lett. **96**, 182501 (2006).
- [29] S. Michimasa, S. Shimoura, H. Iwasaki *et al.*: “Proton single-particle states in the neutron-rich  $^{23}\text{F}$  nucleus”, Phys. Lett. B **638**, 146 (2006).
- [30] Z. Elekes, D. Suzuki, M. Suzuki *et al.*: “Search for neutron decoupling in  $^{22}\text{O}$  via the (d,d' $\gamma$ ) reaction”, Phys. Rev. C **74**, 017306 (2006).
- [31] B. T. Roeder, K. W. Kemper, H. Suzuki *et al.*: “Production cross sections for heavy-ion fragmentation reactions on a liquid deuterium target at intermediate energies”, Phys. Rev. C **74**, 034602 (2006).
- [32] Z. Elekes, T. K. Ohnishi, D. Suzuki, M. Suzuki *et al.*: “Spectroscopic Study of Neutron Shell Closures via Nucleon Transfer in the Near-Dripline Nucleus  $^{23}\text{O}$ ”, Phys. Rev. Lett. **98**, 102502 (2007).
- (会議抄録)
- [33] M. Amoretti, R. Funakoshi, R.S. Hayano *et al.*: “Progress with cold antihydrogen”, Nucl. Instrum. Meth. A **247**, 113 (2006).
- [34] S. Okada for KEK-PS E570 collaboration: “Precise measurement of kaonic helium  $3d \rightarrow 2p$  x-rays”, AIP Conference Proceedings Volume 870, 493–495 (2006).
- [35] H. Kanda for KEK-PS E289 collaboration: “Measurement of Sigma+ p elastic scattering cross sections at KEK-PS”, AIP Conference Proceedings Volume 870, 501–503 (2006).
- [36] M. Naruki for KEK-PS E325 collaboration: “Medium modification on vector mesons observed in 12-GeV p+A reactions”, AIP Conference Proceedings Volume 870, 503–505 (2006).
- [37] R. Muto for KEK-PS E325 collaboration: “First observation of phi-meson mass modification in nuclear medium”, Nucl. Phys. A **774**, 723–726 (2006).
- [38] Y. Togano, H. Iwasaki, H. Sakurai *et al.*: “Study of the  $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$  reaction through Coulomb dissociation of  $^{27}\text{P}$ ”, Eur. Phys. J. A **27**, Supplement 1, 233 (2006).

- [39] Z. Elekes, D. Suzuki, M. Suzuki *et al.*: “Testing of the RIKEN-ATOMKI CsI(Tl) array in the study of  $^{22,23}\text{O}$  nuclear structure”, *Eur. Phys. J. A* **27**, Supplement 1, 321 (2006).
- [40] H. Iwasaki, M. Tamaki *et al.*: “Spectroscopy on neutron-rich nuclei near  $N = 50$  via two-step Coulomb excitation at intermediate energies”, *J. Phys. Conf. Ser.* **49**, 65 (2006).
- [41] H. J. Ong, H. Iwasaki *et al.*: “Inelastic proton scattering on  $^{16}\text{C}$ ”, *J. Phys. Conf. Ser.* **49**, 13 (2006).
- [42] T. K. Onishi, H. Sakurai *et al.*: “Beta Decay of  $^{46}\text{Cr}$ ”, *J. Phys. Conf. Ser.* **49**, 51 (2006).
- (国内雑誌)
- [43] 竜野秀行 for KEK-PS E570 collaboration: 「K 中間子ヘリウム原子 X 線の精密測定」、特定領域「ストレンジネスで探るクォーク多体系」研究会報告集、139–145 (2006)
- [44] 小沢恭一郎:「国際協力実験を推進する上で科研費制度に期待すること」、*学術月報 (日本学術振興会)* 2006 年 10 月号
- [45] 早野龍五:「物質と反物質の化学反応を見る」、*科学 (岩波)* 2007 年 2 月号
- [46] 早野龍五、堀正樹:「反陽子と電子の質量比の決定 – 反陽子ヘリウム原子の超高精度分光 –」、*日本物理学会誌 (最近の研究から)* 2007 年 2 月号
- (学位論文)
- [47] 竜野秀行: “Precision Spectroscopy of Kaonic Helium-4  $3d \rightarrow 2p$  X-rays”, 「K 中間子ヘリウム 4 原子 X 線  $3d \rightarrow 2p$  遷移の精密分光」(修士論文)
- [48] Hooi Jin Ong: “Lifetime measurement of the first excited  $2^+$  state in  $^{18}\text{C}$ ” ( $^{18}\text{C}$  の第一  $2^+$  励起状態の寿命測定、博士論文).
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [49] S. Okada for KEK-PS E570 collaboration: “Precise measurement of kaonic helium  $3d \rightarrow 2p$  x-rays”, *Conference on the Intersections of Particle and Nuclear Physics (CIPANP2006)*, Westin Rio Mar Beach Puerto Rico, May 30–June 3, 2006
- [50] M. Sasano *et al.*: “Discrepancy between Gamow-Teller strength by  $(p,n)$  and  $(^3\text{He},t)$  measurements on a double beta decay nucleus”, 2nd international conference on collective motion in nuclei under extreme conditions, June 20–23, 2006, Sankt Goar, Germany.
- [51] K. Yako *et al.*: “Neutron skin thickness deduced from charge exchange reactions on  $^{90}\text{Zr}$ ”, *ibid.*
- [52] K. Miki *et al.*: “Measurement of the  $d(d,pn)$  reaction at 0 degrees at 270 MeV”, 18th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB18), Santos, São Paulo, Brazil, August 21–26, 2006.
- [53] S. Okada for KEK-PS E570 collaboration: “Precision spectroscopy of Kaonic Helium  $3d \rightarrow 2p$  X-rays”, *ibid.*
- [54] K. Yako *et al.*: “Study of intermediate states of double-beta decay nuclei via  $(p,n)$  and  $(n,p)$  reactions”, The 2nd German-Japanese workshop on nuclear structure and astrophysics, October 4–7, 2006, RIKEN, Saitama, Japan.
- [55] K. Yako *et al.*: “Study of intermediate states of double beta decay nucleus  $^{116}\text{Cd}$  by  $(p,n)$  and  $(n,p)$  reactions”, 21st COE international symposium on neutrino Processes and stellar evolution, February 7–9, 2007, Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan.
- [56] H. Sakai: “Spin-isospin responses of nuclei and ICHOR project”, *ibid.*
- [57] M. Sasano *et al.*: “Precise determination of the Gamow-Teller unit cross section of the  $(p,n)$  reaction at 137, 198, and 297 MeV”, *ibid.*
- [58] K. Ozawa: “Cherenkov radiation Chamber with GEM”, International Workshop on Education and Research for Accelerator Sciences (REFER2007), Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Japan, February 28–March 2, 2007.
- Poster
- [59] H. Tatsuno for KEK-PS E570 collaboration: “Silicon Drift Detectors for the Precision Spectroscopy of Kaonic Helium  $3d \rightarrow 2p$  X-rays”, *ibid.*
- 招待講演
- [60] R.S. Hayano: “Spectroscopy of Long-Lived Antiprotonic He and Antihydrogen Formation”, Japan-US workshop on Collision-induced X-ray Emission and Antimatter Physics, Tokyo Metropolitan University, Japan, April 13–15, 2006.
- [61] R.S. Hayano: “Laser spectroscopy of antiprotonic helium –weighing the antiproton–”, International Workshop on Precision Physics of Simple Atomic Systems (PSAS 2006), Venice International University, Italy, June 12–16, 2006.
- [62] R.S. Hayano: “Antihydrogen”, International Workshop on Exotic hadronic atoms, deeply bound kaonic nuclear states and antihydrogen: present results, future challenges, European Centre for Theoretical Nuclear Physics and Related Areas (ECT\*), Trento, Italy, June 19–24, 2006.
- [63] R.S. Hayano: “Laser spectroscopy of antiprotonic helium –weighing the antiproton–”, *ibid.*
- [64] H. Sakai: “Experimental status of three-nucleon force study by nucleon-deuteron system” 18th International IUPAPA conference on Few-Body Problems in Physics (FB18), São Paulo, Brazil, August 21–26, 2006.
- [65] R.S. Hayano: “Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons”, International

- conference on Trapped charged particles and fundamental physics (TCP06), Tigh-Na-Mara - Parksville, BC - Canada, September 3-8, 2006.
- [66] R.S. Hayano: "Precision spectroscopy of kaonic helium-4 X-rays", 9th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2006), Johannes Gutenberg-Universität, Mainz, October 10-14, 2006.
- [67] R.S. Hayano: "Precision spectroscopy of exotic atoms as a tool to test chiral dynamics in nuclei", New Frontiers in QCD (Yukawa International Seminar), Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, November 20-December 8, 2006.
- [68] R.S. Hayano: "Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons", 37th Winter Colloquium on The Physics of Quantum Electronics, Snowbird, Utah, USA, January 2-6, 2007.
- [69] H. Tatsuno for KEK-PS E570 collaboration: "Precision spectroscopy of kaonic helium-4 X-rays", Workshop on Hadronic and Nuclear Physics 2007 (HNP2007), Pusan National University, February 22-24, 2007.
- (国内会議)  
一般講演
- [70] 野地俊平、他: 「中性子偏極度計 SMART-NPOL の最適化解析」日本物理学会 2006 年秋期大会、2006 年 9 月 20-23 日、奈良女子大学。
- [71] 笹野匡紀、他: 「入射エネルギー 300MeV における  $(p, n)$ ,  $(n, p)$  反応を用いた二重ベータ崩壊の研究 I」、同上。
- [72] 矢向謙太郎、他: 「 $^{90}\text{Zr}(p, n)$ ,  $(n, p)$  反応におけるスピンドル遷移と中性子スキン厚」、同上。
- [73] 久保木浩功、他: 「 $(d, pn[^1\text{S}_0])$  反応における陽子-中性子系スピン相関測定」、同上。
- [74] 竜野秀行、KEK-PS E570 collaboration: 「K 中間子ヘリウム原子  $3d \rightarrow 2p$  X 線の精密測定 (II)」、同上。
- [75] 大西健夫、他: 「中性子過剰な炭素、窒素、酸素同位体のベータガンマ核分光」、同上。
- [76] 中尾太郎、他: 「中性子過剰核  $^{17}\text{B}$  励起準位の探索」、同上。
- [77] 鈴木賢、他: 「Recoil Distance Method による  $^{32}\text{Mg}$  における第一  $2^+$  励起状態の寿命測定」、同上。
- [78] 鈴木宏、他: 「中性子過剰な Ti 同位体のインビーム・ガンマ線分光」、同上。
- [79] 市川雄一、他: 「陽子過剰核  $^{24}\text{Si}$  の崩壊」、同上。
- [80] 竜野秀行、KEK-PS E570 collaboration: 「K 中間子ヘリウム原子 X 線の精密測定」、特定領域「ストレンジネスで探るクォーク多体系」研究会 2006、熱海、2006 年 12 月 13-15 日。
- [81] 小沢恭一郎: 「In-medium modification of rho/omega at gamma+A reaction」、LEPS2 ビームラインによるクォーク核物理の新展開」研究会、大阪大学核物理研究センター、2007 年 1 月 8-9 日。
- [82] 小沢恭一郎: 「CsI 光電面と GEM を用いたガステレンコフ検出器」、「第 3 回マイクロパターンガス検出器研究会」、佐賀大学、2007 年 1 月 26-27 日。
- [83] 板橋健太、KEK-PS E570 collaboration: 「K 核に関連した動機による K 中間子ヘリウム原子 X 線分光実験の現状」、特定領域「ストレンジネスとエキゾティクス理論の課題」研究会、鳥羽、2007 年 3 月 1-3 日。
- [84] 酒井英行、他: 「強い相互作用をするフェルミオン対によるベルの不等式の検証」日本物理学会 2006 年秋期大会、鹿児島大学、2007 年 3 月 18-21 日。
- [85] 小沢恭一郎: 「Future GEM detectors at J-PARC」、「GEM を用いた飛跡検出器開発の現状および今後の展開」研究会、理研、2007 年 3 月 23 日。
- [86] 齋藤明登、他: 「低圧動作型多芯線ドリフトチェンバーの開発」日本物理学会春季大会、首都大学東京、2007 年 3 月 25-28 日。
- [87] 船越亮、Lawrence Gene C. Posada, 早野龍五, ALPHA Collaboration: 「多重極磁石による反水素原子の閉じ込め実験 -2006 年の実験結果と現状-」、同上。
- [88] 竜野秀行、KEK-PS E570 collaboration: 「K 中間子ヘリウム原子  $3d \rightarrow 2p$  X 線の精密測定 (III)」、同上。
- [89] 伊藤聖、大能直哉、進藤美紀、早野龍五、S214 collaboration: 「 $p(d, ^3\text{He})$  反応における  $\eta$  中間子の生成断面積の測定」、同上。
- [90] 小沢恭一郎: 「核物質中のハドロンとその質量スペクトル測定実験の今後」、シンポジウム「カイラル対称性と核物質中のハドロン質量分布の測定」、同上。
- (セミナー)
- [91] R.S. Hayano: "Exotic Encounters", Festkolloquium für Prof. Dr. Paul Kienle, Technical University of Munich, Nov 6, 2006.
- [92] R.S. Hayano: "Laser spectroscopy of antiprotonic helium -weighing the antiproton-", University of Southampton Physics Colloquium, Southampton, UK, February 9, 2007.
- [93] H. Tatsuno: "Precision spectroscopy of kaonic helium X-rays", INFN Laboratori Nazionali di Frascati, March 14, 2007.
- [94] 小沢恭一郎、「高エネルギー原子核物理学」、東京理科大学、11 月 9 日、2006。

## 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す。これにはエネルギーフロンティア(最高エネルギー)における加速器実験がもっとも有効な手段である。2000 年にデータ取得が終了した CERN の電子陽電子コライダー LEP-II での OPAL 実験のデータ解析は 2004 年度でほぼ終了し素粒子の世代数を 3 と決定し、電弱相互作用と強い相互作用がゲージ原理を発現していることを決定的にするなどの成果を挙げた。これらの成果を踏まえ

て、LEP-IIの次世代加速器である国際電子陽電子リニアコライダー ILC 計画の推進をその中心となって行っている。特に加速器のモニター系の研究開発に参加し、ILC での実験の検討を行っている。また、2008 年から世界最高エネルギー 14 TeV の陽子陽子衝突実験が始まる CERN の LHC における ATLAS 実験のデータ解析にも大学院学生が参加している。エネルギーフロンティアにおける加速器実験に加え、中小規模の実験で本質的な素粒子物理研究を行う為に、粒子検出器の開発研究を行っている。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 測定器の開発を行った。また、BES-II 実験のデータ解析を行っている。更に旧折戸研究室のメンバーによる飛翔体を利用した宇宙線観測実験のデータ解析も続けている。

### 2.2.1 国際リニアコライダー ILC 計画

電子と陽電子 ( $e^-$  と  $e^+$ ) は、素粒子とみなすことができるので、それらの衝突は素過程である。また、 $e^-$  と  $e^+$  は粒子と反粒子の関係にあるので、衝突によって対消滅が起こり、その全ての衝突エネルギーは新たな粒子の生成に使われる。従って、エネルギーフロンティアでの  $e^+e^-$  衝突反応の実験研究は、素粒子の消滅生成の素過程反応そのものを直接、詳細に観測できるという本質的利点を有する。しかし、LEP のような円形  $e^+e^-$  コライダーではシンクロトロン放射によって電子や陽電子のエネルギーが急速に失われる。従って、電子・陽電子を向かい合わせて直線的に加速して正面衝突させるシンクロトロン放射の出ないリニアコライダーの方が経済的である。日本はいち早く  $e^+e^-$  リニアコライダーを高エネルギー物理の次期基幹計画として取り上げ、技術開発を進めてきた。5 年程前から ICFA (International Committee for Future Accelerators) ではリニアコライダーを国際的に推進する体制を整えた。2004 年 8 月には国際的に主線形加速器の加速技術を超電導加速空洞を用いることを決定し、プロジェクトは国際的に大きく進展した。わが国に 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。

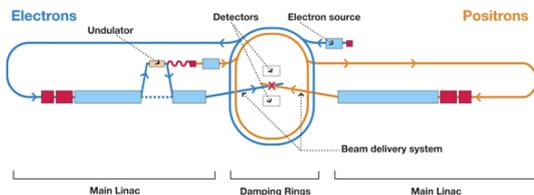


図 2.2.13: ILC 計画

一方、LEP のデータは電弱統一ゲージ理論の正しさを圧倒的な精度で検証したのみならず超対称性の正しさを示唆している。この理論では 130 GeV 以

下の質量を持った軽いヒッグス粒子の存在を予測しており、また超対称性粒子が TeV 以下の質量領域で存在する可能性が高く、LHC での実験と相補い合う形でのリニアコライダーでの実験が極めて急務である。特に LHC でこれらの新粒子や新物理の兆候が見えれば ILC 計画に拍車がかかる。本研究室はリニアコライダーでの物理・測定器の研究を行ってきた。ILC での実験の測定器では荷電粒子と中性粒子をバランス良く測定し、ハードロンジェットのエネルギーを正確に測定する必要があり、半径が大きい測定器が極めて有利である。このような測定器のコンセプトを国際的に詰めている。本研究室は更に、ILC の加速器自体の研究開発にも参加し、具体的には KEK の ATF において、新竹ビームサイズモニタや、超高精度ビーム位置モニタの開発を行っている。本研究室の駒宮は KEK の鈴木機構長とともに ICFA 及び ILCSC (International Linear Collider Steering Committee) のわが国の代表であり、佐貫は ILC 加速器の Working Group 4 (最終収束と衝突点) のアジア代表である。

#### 最終収束システムの研究

ILC の最終収束系には、(i) 主線形加速器で高いエネルギーに加速された電子・陽電子ビームを極めて細く絞り込むために、四極磁石等を組み合わせて構築する最終収束系システムの開発と、(ii) 電子ビームと陽電子ビームを確実に衝突させるためのビーム軌道制御技術の確立が必要である。

最終収束系システムを実証するための研究施設 (ATF2) の建設へ向けて準備している。ATF2 は、現在 KEK で稼働中の先進加速器試験装置 (ATF) を拡張し、実機と全く同じ原理の最終収束系を実証する施設である。 $10^{10}$  個の電子を縦 37nm の非常に狭い空間に閉じこめ、極微のビームサイズを実現することが初期の目標である。さらに、このビームの軌道を 2nm の精度で制御できることを実証する。小さなビームサイズと、精密なビーム軌道制御が可能になれば、電子と陽電子を高い頻度で衝突させることを保証できる。現在は、このような非常に小さい電子ビームの大きさや軌道を正確に求めるためのモニタの開発や、軌道を一定に保つためのフィードバックシステムの研究を進めている。

ATF2 は日本が主導する計画だが、アメリカやアジア、ヨーロッパの多数の国々が参加する国際共同研究として進めている。2007 年の夏から建設を開始し、2008 年中に実験を開始する計画である。

#### ILC 衝突点ビームサイズモニタ (新竹モニタ) の開発

ILC 衝突点で極小ビームサイズを測定するビームサイズモニタとして有望視されているものに、レーザーの干渉縞を用いた新竹モニタがある。これは、衝突点にレーザー光の干渉縞を作り、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 (位相) を動かすと発生する  $\gamma$  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、米 SLAC 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た。本研究室では、ATF2 で達成される予定の 37nm のビームサイズを測定するため、FTTB で使用した装置を日本に移転し改良を行っている。

ATF2 の新竹モニタでは、ILC 本実験のビームサイズモニタとしての実証も兼ねて、37nm のビームサイズを誤差  $\pm 2\text{nm}$  以内という高い精度で測定することを目標としている。新竹モニタの測定精度向上には IP での干渉縞位相安定化が特に重要であり、2nm の精度を実現するには、(最大 1 時間程度の測定時間において)  $\sigma = 10\text{nm}$  程度の安定度が必要となる。これを達成するため、アクティブフィードバックによる位相安定化システムを開発した。連続波レーザーを用いた試験では、1 分間で  $\sigma = 2.9\text{nm}$  の位相安定度が達成された。今後、長時間安定性の向上とともに、実際に ATF2 で用いるパルスレーザーを用いて位相制御性能を評価し、ATF2 での運転に備える予定である。

### 新竹モニタにおける $\gamma$ 線検出器の開発

加速器のビームライン上には、加速電子と加速管壁との散乱による  $\gamma$  線が大量に存在するため、新竹モニタで ATF2 のビームサイズを測定するためには、バックグラウンドに強い  $\gamma$  線検出器を開発する必要がある。ATF2 では FFTB と比べて測定する  $\gamma$  線のエネルギーが非常に低いため、バックグラウンド  $\gamma$  線の除去はより困難となる。

本研究室では、多層チェレンコフ方式、多層シンチレータ方式の 2 つの測定器を考案し、各々の方式のバックグラウンド分離性能と最適な設計をシミュレーション等を用いて検討してきた。この結果をもとに、より性能が良いと思われる多層シンチレータ方式について、実際に測定器の設計・開発を進めている。

### ILC 衝突点ビーム位置モニタ (IP-BPM) の開発

ATF2 では、最終収束点 (仮想衝突点, IP) においてビーム軌道を 2nm で制御することを目指す。このためにはナノメートルの分解能をもつ超高分解能のビーム位置モニタ (IP-BPM) の開発が不可欠である。

ストリップライン BPM など従来の電極型 BPM では信号をデジタル化して引き算を行うため、分解能はせいぜい  $1\mu\text{m}$  程度で制限されてしまう。そこで IP-BPM では空洞型 BPM を採用している。空洞型 BPM はダイポールモードを利用することで、信号をデジタル化する前に空洞に自動的に差分を取り出させることができる。特に空洞中心付近では信号が小さいため、高ゲインの検出回路を用いることで ADC のビット数に制限されることなく、熱ノイズ限界まで感度を上げることができ、原理的にはナノメートルの分解能が達成可能である。

現在までに 2 台の IP-BPM ホットモデルを開発し、ATF 取り出しラインでその位置分解能測定を実施しており、10nm オーダーの位置分解能を達成している。駒宮研究室では今後とも、KEK と連携して ILC の最

終収束系のための技術開発に取り組んでいく。

### 2.2.2 BES 実験

Beijing Spectrometer (BES) 実験は中国・北京の高能研究所 (IHEP) にある Beijing Electron-Positron Collider (BEPC) で行われている、高エネルギー電子・陽電子衝突実験である。1989 年よりおよそ 12 年間続いた BES-I 実験の終了後、1996 年から upgrade され、BES-II 実験 (図 2.2.2) が行われた。BEPC のビームエネルギーは 1.5 GeV から 2.8 GeV である。

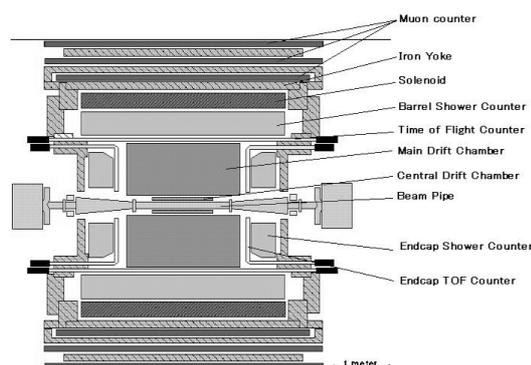


図 2.2.14: BES II detector

BEPC は  $c$ -クォークと  $\tau$  レプトンの物理に特化した加速器である。特に  $J/\psi$  粒子は BES-I 実験にて  $7.8 \times 10^6$ 、BES-II 実験にて  $5.77 \times 10^7$  事象得られており世界最大である。現在、加速器は BEPC-II に upgrade され 1.89 GeV でピーク luminositiy を  $10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  に増強する。加速器の upgrade に伴い、実験装置の性能を更に向上させた BES-III 実験が計画されている。BES-III 実験では 1 年間に  $10^9$  の  $J/\psi$  粒子を得ることが計画され、これまでの実験結果よりさらに精度の高い結果が得られると期待される。

本研究室では、BES-III 実験に向け新たな TOF システムの構築を IHEP, USTC とともに担当している。BES-III では、 $\tau \rightarrow \mu\gamma$  稀崩壊の探索などを行う予定である。当面は、BES-III 測定器の建設と BES-II での  $J/\psi$  からのバリオン対の生成を研究している。

### BES-II 実験のデータを用いた $J/\psi$ のバリオン対への崩壊過程の研究

$J/\psi$  からのバリオン対の生成を系統的に研究する。Perturbative QCD は  $\tau$  のハドロン崩壊のエネルギー領域で研究され最も精度の良い  $\alpha_s(M_Z)$  を測定しているが、これと同程度のエネルギー領域での高次効果の予言と測定を比較する。

$J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  過程において、崩壊振幅に起因する直接的な  $CP$  の破れを探索した。また、 $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  の崩壊

分岐比の測定も行った。我々はまず、これまでの4体崩壊の事象解析により得られていた  $J/\psi$  の全事象数の系統誤差 4.7% を減らすために、 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  事象を用いて  $J/\psi$  の全事象数の見積もりを行った。その結果、誤差を 2.4% に減らすことが出来た。解析の結果、 $J/\psi \rightarrow \Delta \bar{\Delta}$  過程の崩壊率を  $(2.25 \pm 0.07) \times 10^{-3}$  と測定した。これはこれまでの世界平均値  $((1.30 \pm 0.12) \times 10^{-3})$  よりも有意に大きな値である。また、 $CP$  の破れを  $J/\psi \rightarrow \Delta \bar{\Delta}$  過程で探索したが 0 からの有意なずれは見られなかった。

$\Delta \bar{\Delta}$  以外にも、 $p\bar{p}$ ,  $\Delta \bar{\Delta}$ ,  $\Sigma^* \bar{\Sigma}^*$  の測定を行った。バリオンペアへの崩壊事象については、Perturbative QCD に高次効果を加えた様々な修正モデルが検討されている。まず、 $p\bar{p}$  への崩壊モデルの議論が進められ、BES 実験以前の段階で、いくつかの実験データとの比較をとることで修正モデルの構築・理解が深まってきた。また最近では  $p\bar{p}$  の拡張として、重いバリオンペアへの崩壊の議論も始められている。こうした背景のもと本研究室では、複数の崩壊モードについての解析を行っている。崩壊分岐比やバリオンの角度分布について、それまでの実験にはない精度での測定を行い、クォークの質量やバリオンのスピンを考慮した修正 QCD モデルとの詳細な比較・議論をし、バリオン生成事象の系統的な理解を進めた。

### BES-III 実験用の TOF 測定器の開発と建設

中国高能研究所の BES 実験グループとの共同で、2007 年度に開始する BES-III 実験のための飛行時間測定器 (TOF) の開発を行った。TOF は、プラスチックシンチレータと光電子増倍管 (PMT) を組み合わせた測定器であり、荷電粒子の飛行時間を測定することで、粒子識別等の役割を果たす。BES-III では、約 100ps の時間分解能を目指し、測定器の設計およびその最適化を進めた。本研究室では、主に TOF 測定器のうちの PMT 部分で役割を果たしてきた。高電圧分割回路の設計や PMT のハウジングの設計を行ったのち、量産後は、PMT の性能試験を行った。青色 LD をファイババンドルで分岐した測定システムを自ら開発・設計・製作し、そのうえで、KEK にある牛若電磁石を用いた PMT の磁場試験を行った。TOF 用に生産された約 550 本全ての PMT について、BES-III 検出器と同じ磁場 1 テスラ以内での電流増倍率や時間分解能の特性を評価し、要求性能を満たしていることを確認したうえで、実際に BES-III で使用する 448 本の PMT の選別を行った。試験した PMT は中国に輸送し、現地にてシンチレータを含めた TOF システムのセットアップ作業が行われた。出力チェック等を行ったうえで、2006 年度終わりごろからは、BES-III 検出器内へのアセンブリを進め、2007 年度の BES-III 実験の開始に備えている。

### 2.2.3 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、CCD で中性子を観測できることの確認を終え、超冷中性子の検出効率を向上させる研究を進めている。

### 超冷中性子用ピクセル検出器の開発

超冷中性子の重力による量子化を検出するための測定器を開発している。

まず、上部に吸収体を付けたスリットに超冷中性子を通す。高さ方向に大きなエネルギーを持つ中性子はスリット上部の吸収体で吸収され、スリットを通り抜けるのは十分に小さなエネルギーを持つ中性子のみである。この中性子は高さ方向に束縛状態を形成し、その典型的な高さは  $10\mu\text{m}$  程である。この分布を正確に測定するため以下の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。超冷中性子が固体表面上で全反射する特性を利用し、ガラス棒の曲率を利用して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  ${}^6\text{Li}$  や  ${}^{10}\text{B}$  等のコンバータ膜を CCD 表面に蒸着し、中性子とコンバータとの核反応によって生成される荷電粒子を CCD で検出することにより中性子の位置を知ることができる。これまでの研究により、このコンバータ膜つき CCD の作成に成功した。

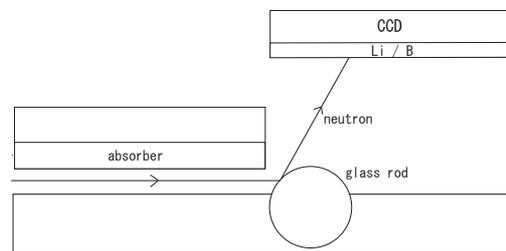


図 2.2.15: 実験セットアップ概念図

### CCD 検出器の耐久性能評価

UCN の測定器として、受光部分に  ${}^6\text{Li}$  を蒸着した CCD 検出器を用いる。UCN の核反応により発生する  $\alpha$  粒子とトリチウムを CCD で検出する。Li は Si 中に拡散する速度が速い物質として知られている。常温で 1 年間以上保存した場合に、CCD 中に拡散する Li の量を求め、CCD に与える影響を評価する。

Si 中の Li の拡散定数は文献値を用いることができるが、Si と Li の界面における Li の濃度が不定である。この値は実験によって決定する必要がある。

京都大学原子炉実験所にある蒸着施設を使用して Si ウェハーに  ${}^7\text{Li}$  を蒸着したサンプルを作成した。サンプルを恒温槽中で約  $170^\circ\text{C}$  に加熱し、抵抗値の変化を測定した。約 2000 時間の加速試験の結果、抵抗値の顕著な変化は測定されなかった。

この結果より、Si と Li の界面における Li の濃度は Si ウェハーが持つキャリア濃度より低い事が推測出来る。実験より得られた Li の表面濃度を用いて、CCD を常温で 1 年間保存した場合の Li の濃度分布を見積もった。1 年後においても CCD が電荷転送に使用することが出来る有効なキャリアは  $10^{15}[\text{cm}^{-3}]$  以上残っている。一般的に CCD の受光部分に使用される Si のキャリア濃度は  $10^{15}[\text{cm}^{-3}]$  程度なので、1 年後においてもキャリアは十分に存在しており、CCD は 1 年以上正常に動作すると推測できた。

### 2.2.4 LHC での物理解析

LHC は CERN の世界最高エネルギーの陽子陽子衝突の加速器である。2008 年に重心系エネルギー 14 TeV での実験が開始される。わが国は汎用測定器の ATLAS 実験に参加している。本来、 $e^+e^-$  コライダ実験の方が LHC のようなハドロンコライダー実験よりも事象や実験環境がクリーンであり、バックグラウンドも非常に低いが、円形加速器ではシンクロトロン放射によるエネルギー欠損が大きく  $e^+e^-$  衝突ではリニアコライダー以外の解はない。シンクロトロン放射によって円形加速器を粒子が一周する毎に失うエネルギーは  $(E/m)^4$  に比例するので、質量の重い陽子を用いればエネルギーを失う事無く高い衝突エネルギーが得られる。しかし、実験はバックグラウンドが高く放射線レベルも高いので難しい。ATLAS 実験はこのような困難を克服して TeV スケールの重要な物理を発見できるよう設計され建設が進んでいる。本学は素粒子物理国際研究センターを中心に物理解析の準備を進めてきた。LHC での最も重要な物理は、質量の起源とされるヒッグス粒子の発見と、重力も含めた相互作用の超統一にとって不可欠な超対称性の発見である。ヒッグス粒子はこれまでの測定から 114 GeV と約 200 GeV の間に質量領域が絞られている。LHC ではバックグラウンドが低いヒッグスの生成・崩壊モードを見極めて探索が行われる。特にクォークから振りほどかれた  $W$  ボゾン同士が衝突してヒッグス粒子を生成し、ヒッグス粒子が  $\gamma\gamma$  か  $\tau\tau$  の対に崩壊するモードが有望である。超対称性粒子に関しては、強い相互作用で生成されるグルーオン

やクォークの超対称性パートナーが大量に生成されると期待されている。これらは何段階かのカスケード崩壊を行い最も軽い超対称性を生成するが、これらの事象の特徴を捉えて探索する。LHC の実験開始から早い時期にこれらの発見を目指す。

### ATLAS 検出器を用いた超対称性粒子探索のためのバックグラウンド評価

LHC では、グルーオンやスクォークと呼ばれる超対称性粒子が多く生成される可能性がある。 $R$  パリティが保存する場合には、これらはジェットを放出しながら最も軽い超対称性粒子 (LSP) にまで崩壊する (カスケード崩壊)。暗黒物質との兼ね合いから、LSP は中性であると考えられている。中性の粒子は検出されないため、超対称性粒子を伴った事象の特徴として、大きな横方向の消失運動量と、横運動量の大きい多数のジェットの存在が挙げられる。

しかし、このような特徴を持った事象は標準理論の範囲においても起こりうるため、それらは超対称性事象のバックグラウンドとなる。主要なものとして、 $t\bar{t}$  の対生成事象、 $W$  と複数のジェットを伴った事象、 $Z$  と複数のジェットを伴った事象、QCD multi-jet 事象などが挙げられる。超対称性粒子を発見するためには、バックグラウンドを精度良く評価する必要がある。この評価法として、実データからのコントロールサンプルを用いたバックグラウンドの評価法とモンテカルロを活用した手法について研究した。

### 2.2.5 大気ニュートリノスペクトルの精密計算

大気  $\mu$  粒子は大気ニュートリノと同じく  $\pi$  粒子や  $K$  粒子の崩壊から作られるので、大気  $\mu$  粒子の観測結果を正確に再現できる計算は、大気ニュートリノも正確に予測できると期待される。そこで、大気  $\mu$  粒子の観測結果を再現するように相互作用モデルを最適化し、計算結果と観測結果の詳細な比較から大気ニュートリノ計算の系統誤差を評価した。この計算は、ニュートリノ振動のパラメータを詳細に決定し、その系統誤差を評価するために非常に重要である。

<受賞>

- [1] 川崎真介, 理学系研究科研究奨励賞, 東京大学大学院理学系研究科, 2007 年 3 月

<報文>

(原著論文)

- [2] OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Measurement of the running of the QED coupling in small-angle Bhabha scattering at LEP, Eur.Phys.J. C45 (2006) 1-21
- [3] OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Colour reconnection in  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  at  $\sqrt{s} =$

- 189 GeV-209 GeV, Eur.Phys.J. C45 (2006) 291-305
- [4] OPAL Collaboration, G.Abbiendi et al. : Measurement of the mass and width of the W-boson, Eur.Phys.J. C45 (2006) 307-335
- [5] OPAL Collaboration, G.Abbiendi et al. : Determination of  $\alpha_s$  using jet rates at LEP with the OPAL detector Eur.Phys.J. C45 (2006) 547-568
- [6] OPAL Collaboration, G.Abbiendi et al. : Search for guge-mediated supersymmetry breaking topologies in  $e^+e^-$  collisions at LEP, Eur.Phys.J. C46 (2006) 307-341
- [7] OPAL Collaboration, G.Abbiendi et al. : Measurement of the strong coupling  $\alpha_s$  from four jet observables in  $e^+e^-$  annihilation, Eur.Phys.J. C47 (2006) 295-307
- [8] T. Sanuki, M. Honda, T. Kajita, K. Kasahara, S. Midorikawa : Study of cosmic ray interaction model based on atmospheric muons for the neutrino flux calculation, Phys. Rev. D75 (2007) 043005
- [9] M. Honda, T. Kajita, K. Kasahara, S. Midorikawa, T. Sanuki : Calculation of atmospheric neutrino flux using the interaction model calibrated with atmospheric muon data, Phys. Rev. D75 (2007) 043006
- (会議抄録)
- [10] 大川英希, 関口豊和, 駒宮幸男 : 「超冷中性子を用いた重力場中での量子効果のシミュレーション」, 第12回東京大学素粒子物理国際研究センターシンポジウムトランスペアレンシー集, pp.325-346, 2006
- [11] 大川英希 : 「LHC 加速器における ATLAS 検出器を用いた超対称性粒子の探索」, 第2回 COE RA 若手交流シンポジウムアブストラクト集, pp.6-6, 2007
- [12] 大川英希, 麻植健太, 富島佑允, 浅井祥仁, 小林富雄, 駒宮幸男 : 「ATLAS 実験における超対称性事象のバックグラウンドの評価」, 日本物理学会講演概要集, 社団法人日本物理学会, 第62巻・第1号・第1分冊, pp21-21, 2007
- [13] 中村友哉, 本田洋介, 井上洋一, 日野徹 : 「ILC 最終収束系における空洞型ビーム位置モニター (IP-BPM)」, 日本物理学会講演概要集, 社団法人日本物理学会, 第62巻・第1号・第1分冊, pp22-22, 2007
- [14] 依田博太郎 : 「ATF2 衝突点ビームサイズモニタにおけるガンマ線検出器の開発研究」, 日本物理学会講演概要集, 社団法人日本物理学会, 第62巻・第1号・第1分冊, pp22-22, 2007
- (学位論文)
- [15] 倉田正和 : 「A Study of  $L/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  Decay the Using BES-II Detector」, 博士論文 (東京大学大学院理学系研究科), 2007年2月
- [16] 川崎真介 : 「超冷中性子用ピクセル検出器の開発」, 修士論文 (東京大学大学院理学系研究科), 2007年3月
- [17] 園田真也 : 「超冷中性子用 CCD 検出器の耐久性能評価」, 修士論文 (東京大学大学院理学系研究科), 2007年3月
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [18] T.Yamamura “Tests and Selection of Photomultipliers in Japan for the BES-III TOF”, BES-III Collaboration Meeting (June 2006), Beijing, China
- [19] T.Suehara “Shintake-monitor: upgrade and requirement”, Second ATF2 Project Meeting (May 2006), KEK, Tsukuba, Japan
- [20] T.Suehara “Commissioning schedule of Shintake-monitor”, Second ATF2 Project Meeting (May 2006), KEK, Tsukuba, Japan
- [21] T.Suehara “Laser Fringe Stabilization of 35nm IP Beam Size Monitor (Shintake monitor) for ATF2/ILC”, Joint Meeting of Pacific Region Particle Physics Communities (Oct. 2006), Sheraton Waikiki, Hawaii, USA
- [22] T.Suehara “Status of Shintake-monitor Optics”, Third ATF2 Project Meeting (Dec. 2006), KEK, Tsukuba, Japan
- [23] T.Suehara “Schedule of Shintake-monitor”, Third ATF2 Project Meeting (Dec. 2006), KEK, Tsukuba, Japan
- [24] H.Okawa, K.Ozone, O.Jinnouchi, S.Asai “ $Z \rightarrow \nu\nu$  BG Estimations using Real Data”, ATLAS Trigger and Physics Week SUSY Working Group Meeting (May 2006), CERN, Switzerland
- [25] H.Okawa, K.Oe, S.Asai “ $Z \rightarrow \nu\nu$  BG Estimations with Data (Full Simulation Studies)”, ATLAS SUSY Working Group Meeting (July 2006), CERN, Switzerland
- [26] H.Okawa, K.Oe, S.Asai “Uncertainties of the Current Estimations of  $Z \rightarrow \nu\nu$  BG”, ATLAS SUSY Working Group Meeting (Sep. 2006), CERN, Switzerland
- [27] H.Okawa, K.Oe, S.Asai “No Lepton Mode BG Estimations with Data”, ATLAS Week SUSY Working Group Meeting (Oct. 2006), CERN, Switzerland
- [28] H.Okawa, O.Jinnouchi, S.Asai “ $Z \rightarrow ll$  Systematic Errors”, ATLAS SUSY Working Group Phone Meeting (Oct. 2006), CERN, Switzerland
- [29] H.Okawa, Y.Tomishima, S.Asai “BG Estimation in No Lepton Mode and Dilepton Mode”, ATLAS Trigger and Physics Week SUSY Working Group Meeting (Nov. 2006), CERN, Switzerland
- [30] H.Okawa, K.Oe, S.Asai “Estimation of  $Z/W$  BG in No Lepton Mode”, ATLAS SUSY Working Group Meeting (Jan. 2007), CERN, Switzerland

- [31] H.Okawa, Y.Tomishima, S.Asai, T.Sarangi, B.Mellado, T.Lari, U.Sanctis “Summary of Comparison on Dilepton Mode”, ATLAS SUSY Working Group Phone Meeting (March 2007), CERN, Switzerland
- [32] H.Okawa, K.Oe, Y.Tomishima, S.Asai “MC Method for No Lepton Mode BG and Summary on Dilepton Mode Studies”, ATLAS Trigger and Physics Week (March 2007), CERN, Switzerland
- [33] S.Kawasaki, T.Sanuki, S.Sonoda, M.Hino, M.Kitagich: “Development of a pixel detector for ultra cold neutrons”, Joint Meeting of Pacific Region Particle Physics Communities (Oct. 2006)
- [34] T.Nakamura, Y.Honda, Y.Inoue, T.Hino: “Production and Installation Policy of IP-BPM”, Third ATF2 Project Meeting (Dec. 2006), KEK, Tsukuba, Japan
- [35] H.Yoda: “Status of BSM Gamma Detector”, Third ATF2 Project Meeting (Dec. 2006), KEK, Tsukuba, Japan

## 招待講演

- [36] S.Komamiya: “The Summary of the Workshop”, International Workshop on Linear Collider Physics and Detectors (Feb. 2007), IHEP, Beijing, China
- [37] S.Komamiya: “Impact of LHC and ILC to Elementary Particle Physics and Cosmology”, International Symposium on Astronomy and Astrophysics of Extreme Universe, (March 2007), RIKEN, Saitama, Japan
- [38] T.Sanuki: “Cosmic ray data and their interpretation: about BESS experiment”, XIV International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (Aug. 2006), Weihai

## (国内会議)

## 一般講演

- [39] 大川英希: 「LHC 加速器における ATLAS 検出器を用いた超対称性粒子の探索」, 第2回 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム (2006年11月), 東京大学, 東京
- [40] 大川英希, 麻植健太, 富島佑允, 浅井祥仁, 小林富雄, 駒宮幸男: 「ATLAS 実験における超対称性事象のバックグラウンドの評価」, 日本物理学会 (2007年3月), 首都大学東京, 東京
- [41] 園田真也: 「半導体の薄膜蒸着試験」, 京都大学原子炉実験所 学術講演会 (2007年1月), 京都大学原子炉実験所, 大阪
- [42] 園田真也: 「超冷中性子用 CCD 検出器の耐久性評価」, 日本物理学会 (2007年3月), 首都大学東京, 東京
- [43] 中村友哉, 本田洋介, 井上洋一, 日野徹, 田内利明, 佐貫智行, 駒宮幸男: 「ATF2 最終収束系のための空洞型ビーム位置モニター」, 日本物理学会 (2007年3月), 首都大学東京, 東京

- [44] 依田博太郎: 「ATF2 衝突点ビームサイズモニタにおけるガンマ線検出器の開発」, 日本物理学会 (2007年3月), 首都大学東京, 東京

## 招待講演

- [45] 駒宮幸男: 「加速器で解明する宇宙と素粒子の謎」, 第9回東京大学理学部公開講演会 (2006年4月) 東京大学教養学部
- [46] 駒宮幸男: 「国際リニアコライダー計画と素粒子・宇宙の研究」, 国際経済政策調査会 (2007年3月) ホテルメトロポリタン 仙台

## (セミナー)

- [47] 駒宮幸男: 「ILC で解明する宇宙と素粒子の謎」, (2006年4月) 広島大学
- [48] 駒宮幸男: 「ILC で解明する宇宙と素粒子の謎」, (2006年5月) 神戸大学
- [49] 駒宮幸男: 「ILC で解明する宇宙と素粒子の謎」, (2006年5月) 筑波大学
- [50] 駒宮幸男: 「ILC で解明する宇宙と素粒子の謎」, (2006年6月) 東北大学
- [51] 駒宮幸男: 「ILC で解明する宇宙と素粒子の謎」, (2006年7月) 京都大学
- [52] 駒宮幸男: 「ILC で解明する宇宙と素粒子の謎」, (2006年7月) 岡山大学
- [53] 駒宮幸男: 「ILC で解明する宇宙と素粒子の謎」, (2006年11月) お茶の水女子大学
- [54] 駒宮幸男: 「ILC で解明する宇宙と素粒子の謎」, (2006年11月) 早稲田大学
- [55] 駒宮幸男: 「宇宙創生の謎に迫る国際リニアコライダー計画」, 九州大学物理学教室特別講演会 (2006年11月) 九州大学
- [56] 駒宮幸男: 「素粒子物理: 革命前夜のエネルギーフロンティア加速器実験」, 東北大学物理学教室「物理の最前線」(2006年10月) 東北大学
- [57] 駒宮幸男: 「素粒子物理学の展望」, 第7回高エネルギー宇宙物理連絡会研究会 (2007年3月) 東京大学宇宙線研究所

## 2.3 衰輪研究室

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

## 2.3.1 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ーボソンであり、物質や電磁場とはほとんど相互作用しないと考えられている。予想される質量範囲はまだ広いが、もし 1eV オーダーであれば太陽がよいアクシオン源となることが知られている。

我々は太陽由来の太陽アクシ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 の超伝導コイルと PIN フォトダイオード X 線検出器を備え、仰角  $\pm 28^\circ$ 、方位角はほぼ全域において天体を追尾することのできるアクシオンヘリオスコープ (Tokyo Axion Helioscope) を開発した。この装置は、太陽起源のアクシオンを磁場領域で光子へと変換 (逆プリマコフ変換) し、その光子を PIN フォトダイオードで捉えるものである。これまでの観測ではアクシオン由来と考えられる有意な事象は捕えられていないが、質量 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。

現在は 1-2eV 程度の質量のアクシオン探索のために低温高密度ヘリウムガスを利用した装置のアップグレードを行っている。このアップグレードは、ヘリウムガスを磁場領域に詰めることで光子に仮想的な質量を持たせ、より大きな質量のアクシオンを捉えることを可能にするが、eV オーダーの質量領域探索の実験ではヘリウムガスの圧力を様々な値に設定する必要に迫られることになる。そのために我々はガス圧自動制御装置の製作を行い、現在までに低温高密度のヘリウムの自動制御、及び装置から発生する強磁場へ耐性を示すことに成功している。この実験により、大統一理論 (GUT) が予想するアクシオンの質量、結合定数の領域の実験的検証が、このような実験としては初めて行える予定である。

同じ仕組みの少し大規模な装置 CAST が、欧州原子核研究機構 (CERN) において 2002 年より実験を始めてわれわれを追いかけているが、彼らもまだこの領域には到達できていない。

### 2.3.2 暗黒物質探索実験

我々はこれまで LiF および NaF をターゲットにした極低温熱量計型検出器 (ボロメータ) や放射性不純物の少ない  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  シンチレータを用いた、暗黒物質候補の超対称性ニュートラリーノ直接探索実験を東京大学宇宙線研究所の神岡宇宙素粒子研究施設で行なってきた。これらの実験は、すべて原子核中の核子のスピン期待値が大きいとされるフッ素-19 を含むため、原子核のスピンに依存した (SD, spin dependent) 相互作用を通して暗黒物質を検出するのに特化した検出器である。探索の結果、暗黒物質は未発見ではあるが、物質との相互作用の SD-断面積に対して世界最高水準の制限をつけてきた。これらの検出器の大きさはすべておよそ数十グラムに過ぎない。このことは、現在の世界の最高感度の暗黒物質探索実験と競うには、決して何トンもの大質量の

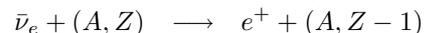
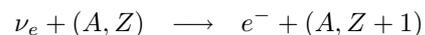
検出器は必要でないことを示している。

現在の状況は、暗黒物質と検出器物質との相互作用断面積がきわめて小さいために、その信号が放射線バックグラウンドに埋もれてしまっていると考えられる。したがって、現在より厳しい上限値を与えるためには放射線バックグラウンドイベントを減らすことがもっとも重要である。バックグラウンドを減らさないで検出器の質量を大きくすることは、単にバックグラウンドイベントを増加させるだけで、暗黒物質による微弱な信号が埋もれたままである状況は変わらないので、まったく無意味である。現在は、 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  シンチレータでバックグラウンドイベントを減少させるための検出技術の開発研究、およびエネルギー閾値を下げるための開発研究を行っており、神岡における暗黒物質探索実験は休止中であるが、開発研究の成果ができれば再開する予定である。

### 2.3.3 レーザー共鳴イオン化質量分析法によるニュートリノ検出

太陽ニュートリノのうち p-p 反応によるものや原子炉の放出しているような低エネルギー (MeV 程度あるいはそれ以下) の電子ニュートリノ・反電子ニュートリノの有効な検出手段は、現在のところ有機液体シンチレータと放射化学的手法に限られると言って良い。そのうち、塩素やガリウムをターゲットとした従来の放射化学的手法ではニュートリノ捕獲による生成核が適当な半減期を持つ必要があり、使えるターゲットには制限がある。エネルギー閾値の低い、もしく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、低エネルギー太陽ニュートリノあるいは原子炉からの反電子ニュートリノの精密観測が可能になる。特に、原子炉実験では KamLAND 実験が成功したことを受けて、混合角  $\theta_{13}$  の測定など、さらに精密なニュートリノ振動の検証ができる意義は大きい。

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



のように原子番号が  $\pm 1$  だけ異なる別の元素に転換される。この原子を LASER を用いて選択的に共鳴イオン化する。まず、原子の基底状態から中間の励起状態まで LASER 光により励起させ、次に別の又は同じ LASER 光により原子をイオン化させる。最初の基底・励起状態間のエネルギーレベル差は各元素に特有なものなので、LASER 光の波長をその元素のエネルギーレベル差に合わせることでその元素のみを選択的にイオン化させることができる。イオン化された元素は、Q-Mass Spectrometer (四重極質量分析計、QMS) もしくは Time of Flight Mass Spectrometer (TOF 質量分析計) により同位体識別を行うことで不純物と分けることができる。このレーザー共鳴イオン化と質量分析計による同位体識別をセットにした微量元素検出法をレーザー共鳴イオン化質量分析法 (RIMS) という。

RIMS 手法の微量元素検出能力を検証するためにアルカリ金属元素であり共鳴イオン化を行いやすいカリウムに着目し、(図 2.3.16) に示すように黒鉛のつぼ中で炭酸カリウムを 900 度程度に加熱して得られた微量カリウム原子を RIMS により検出した。用いたレーザーは 404.7nm 波長可変 CW の外部共振器型半導体レーザーで、回折格子に取り付けられているピエゾ素子にかかる電圧を少しずつ変えることでレーザー波長の微調整を行った。質量分析計には四重極質量分析計 (QMS) を用いた。同位体シフトによる  $^{39}\text{K}$  と  $^{41}\text{K}$  のレーザー共鳴波長の違いから、ピエゾ素子にかかる電圧を調節して  $^{39}\text{K}$  と  $^{41}\text{K}$  の分離を行うことができた。また、(図 2.3.16) のセットアップでの検出効率は  $2 \times 10^{-12}$  と極めて低い値となったが、パルスレーザーなどの大強度レーザーの利用と、Atom Buncher もしくは超音速分子線バルブ (PSV) による試料の局在化によりこの効率を大幅に改善できると考えている。

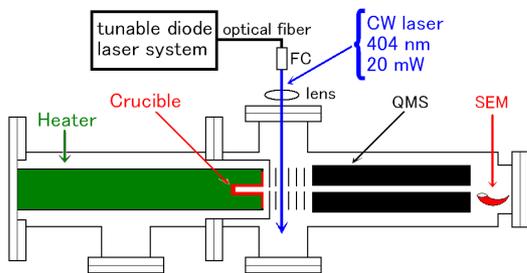


図 2.3.16: RIMS を用いた微量カリウム原子検出

今後は、検出効率に重点を置いてレーザー共鳴イオン化質量分析器を完成させていくつもりである。

### 2.3.4 原子炉ニュートリノモニター

原子炉格納容器の外側に置いて、原子炉の熱出力あるいは核燃料の燃焼状況などの運転状況をモニターする装置を開発している。核分裂反応の際に放出される反電子ニュートリノ (以下「ニュートリノ」と略記する) をプラスチックシンチレータにより検出し、その検出率とエネルギースペクトルにより原子炉運転状況をモニターする。ニュートリノは炉心から格納容器の外側までの遮蔽物をほとんど素通りするので、通常の放射線のほとんどない人間の作業する場所でモニター可能である。

IAEA (国際原子力機関) が NPT (核兵器不拡散条約) 締約国の原子力活動に対し、平和的利用から核兵器製造等の軍事的目的に転用されないことを確保することを目的としておこなわれる保障措置システムとして、ニュートリノによる原子炉運転モニターが有力な手段である

一般に原子炉ニュートリノを検出するには、有機液体シンチレータを使う。シンチレータ中に含まれる陽子 (水素原子核) に対してニュートリノが衝突して生成される陽電子と中性子を遅延同時計数法に

より検出する方法がとられている。中性子を検出するために、中性子を吸収してガンマ線を放出するガドリニウムを液体シンチレータに混ぜる。ニュートリノの反応断面積はきわめて小さいので、常識的には莫大な量のシンチレータが必要とされる。しかし、十分近距離ではそこそこの大きさの検出器でも十分である。たとえば熱出力 3GW の原子炉の炉心から 30 メートル程度の場所に設置すれば、有効体積 1 立方メートル程度の検出器でも一日に数百から数千個 (検出器の効率に依存する) のニュートリノを検出することができる。

この検出率より熱出力のモニターが可能である。また、検出ニュートリノ数が十分に確保でき、かつそのエネルギースペクトルがある程度の分解能で測定できるならば、燃料棒中のプルトニウムの量も相応の精度で推定できる可能性がある。新しい核燃料にはプルトニウム - 239 は含まれないが、原子炉の運転を続けるうちに燃料棒中のウラン - 238 がプルトニウム - 239 へと転換されることによりプルトニウム - 239 は増加してゆくが、本来のウラン - 235 が燃焼して発生するニュートリノとプルトニウム - 239 の燃焼によるニュートリノでは前者の平均のエネルギーの方が高いことと、熱出力あたりの放出ニュートリノ数も (燃料原子数が同じならば) 前者の方が多いことにより、ニュートリノのエネルギースペクトルを知れば、原理的には燃料中のそれらの量が推定できるわけである。

しかし、ガドリニウム入りの有機液体シンチレータは性能の長期安定性に問題があること、また可燃性液体であるので発電用原子炉では原子炉建屋内への持ち込みに規制を受ける場合があること、可搬性を持たせることがむずかしいこと、などいくつかの問題点がある。これに対して、われわれは、液体シンチレータの代わりにプラスチックシンチレータを使用して上記の諸問題を回避しようとしている。プラスチックシンチレータは、有機液体シンチレータと類似の性能を有し、確立した技術により性能が均質で寸法の大きな物が市販されているので大変都合が良い。ガドリニウムは、ニュートリノ反応の生成物である中性子を吸収して高エネルギーガンマ線を放出するのでニュートリノ検出には重要な要素であるが、液体シンチレータを使用する場合のように混入するのではなく、ガドリニウム箔をブロック状のプラスチックシンチレータの間にはさむことで同様な性能が得られることが、既にわれわれによるコンピュータシミュレーションで判明している。

原子炉ニュートリノモニターは、ニュートリノ振動実験にも有用である。ニュートリノ混合角  $\theta_{13}$  の測定のための原子炉近距離 ( $\sim \text{km}$ ) でのニュートリノ実験が世界でいくつか計画されているが、このような実験ではニュートリノ検出率の測定誤差をおよそ 1% 以下にしなければならぬ。そのため、原子炉ニュートリノ振動実験では、ニュートリノ振動が無視できるような原子炉のなるべく近くに検出器を設置し、原子炉ニュートリノの絶対量を測定する。その際、小型で安全で可搬性があり原子炉建屋の中に設置できる原子炉ニュートリノモニターが使えれば、原子炉 1 基ごとの建屋の中で原子炉の至近距離にこれを設置して、より正確なニュートリノ量の測定が

可能となる。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Iwata, Y. Inoue, M. Minowa: A new method of alpha ray measurement using a Quadrupole Mass Spectrometer, arXiv:0704.1944

(学位論文)

- [2] 太田良介: 太陽アクシオン探索用ヘリウムバッファ中のガス密度自動制御装置の開発、平成 18 年 3 月修士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻。  
 [3] 林寛仁: 粒子検出器としてのレーザー共鳴イオン化質量分析器の開発、平成 18 年 3 月修士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻。

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [4] M. Minowa: Dark Matter Searches, Talk at the Informal Meeting, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2006) Kyoto, 5 August 2006.

(国内会議)

一般講演

- [5] 蓑輪 眞: 低エネルギーニュートリノ実験の方法、ビッグバンセンター夏の研究会、鬼怒川 2006 年 9 月 3 日。  
 [6] 秋本祐希: Tokyo Axion Helioscope で使用する安全弁の He 温度における動作確認とリーク量測定、日本物理学会 2006 年秋季大会、奈良女子大学 2006 年 9 月 20 日。  
 [7] 太田良介: 太陽アクシオン探索に用いる He ガス管中の密度安定化について、日本物理学会 2006 年秋季大会、奈良女子大学 2006 年 9 月 20 日。  
 [8] 岩田圭弘: ニュートリノ検出のためのレーザー共鳴イオン化質量分析法を用いた微量カリウム原子検出 I、日本物理学会 2006 年秋季大会、奈良女子大学 2006 年 9 月 21 日。  
 [9] 林寛仁: ニュートリノ検出のためのレーザー共鳴イオン化質量分析法を用いた微量カリウム原子検出 II、日本物理学会 2006 年秋季大会、奈良女子大学 2006 年 9 月 21 日。  
 [10] 岩田圭弘: レーザー共鳴イオン化質量分析法を用いたニュートリノ検出、第 2 回 21 世紀 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム、東京大学本郷キャンパス、2006 年 11 月 6 日。  
 [11] 井上慶純: Axion Search、埼玉大学大学院理工学研究科素粒子研究室セミナー、埼玉大学 2006 年 12 月 8 日。

- [12] 岩田圭弘: 微量カリウム原子検出によるレーザー共鳴イオン化質量分析器の開発、第 13 回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 2007 年 2 月 26 日。

- [13] 太田良介: 太陽アクシオン望遠鏡テストランによる He 密度制御試験、日本物理学会 2007 年春季大会、首都大学東京南大沢キャンパス 2007 年 3 月 25 日。

- [14] 中田量子: プラスチックシンチレータを用いた小型反電子ニュートリノ検出器の開発、日本物理学会 2007 年春季大会、首都大学東京南大沢キャンパス 2007 年 3 月 25 日。

- [15] 水本哲矢: PIN フォトダイオードの X 線検出に関する特性、日本物理学会 2007 年春季大会、首都大学東京南大沢キャンパス 2007 年 3 月 27 日。

- [16] 林寛仁: ニュートリノ検出のためのレーザー共鳴イオン化質量分析法の開発、日本物理学会 2007 年春季大会、首都大学東京南大沢キャンパス、2007 年 3 月 27 日。

(セミナー)

- [17] 蓑輪 眞: 暗黒物質探索実験、名古屋大学物理学教室 ORIUM-COE「若手分野横断セミナー」、名古屋大学 2006 年 7 月 27 日。

## 2.4 相原研究室

当研究室では、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の B ファクトリー加速器を使った実験 ( Belle 実験 )、茨城県東海村で建設中の J-PARC 加速器を使った長基線ニュートリノ振動実験 ( T2K 実験 )、新型光検出器 ( HPD ) の開発、さらに、国立天文台すばる望遠鏡に搭載する超広視野 CCD カメラ ( Hyper Suprime-Cam ) によるダークエネルギーの研究、などを行っている。今年度は、 Belle 実験で 1 名の博士と T2K 実験の準備研究により修士 1 名が誕生した。博士論文は、理学系研究科研究奨励賞 ( 博士 ) を受けた。

### 2.4.1 B 中間子のフレーバー変換中性カレント崩壊の精密測定

小林・益川理論がクォークに働く弱い相互作用の CP 非対称の起源であることが明らかになった今、 B ファクトリーにおける研究の主題は、 CP 非対称現象をプローブとする新しい物理、すなわち小林・益川理論を含む素粒子の標準理論の枠組みに収まらない、より根源的な物理の探索に移りつつある。当研究室は、この新しい物理の探索を、 B 中間子崩壊のうち、 Flavor Changing Neutral Currents ( FCNCs ) によって引き起こされる崩壊の精密測定によって行っている。 B ファクトリーにおける研究の主題は、 CP 非対称現象をプローブとする新しい物理、すなわち小林・益川理論を含む素粒子の標準理論の枠組みに収まらない、より根源的な物理の探索に移りここで、 FCNCs とは、  $b \rightarrow s\gamma$ 、  $b \rightarrow sl^+l^-$  (  $l$  は  $e$  または  $\mu$  )

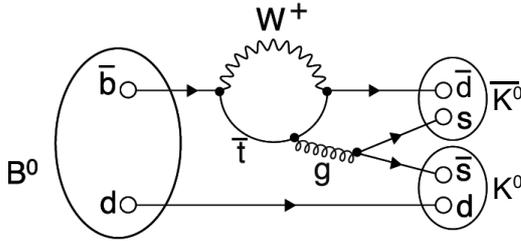


図 2.4.17:  $b \rightarrow dg$  過程を含むプロセスである  $B$  中間子が二つの  $K_s$  中間子に崩壊する過程。

$b \rightarrow sg$  ( $g$  はグルーオン)、 $b \rightarrow dg$  などの素過程で表される、クォークの種類 (flavor, フレーバー) が  $b$  から  $s$  あるいは  $d$  に変換する中性カレント反応 (反応の始状態の電荷と、終状態の粒子の電荷の総和が等しく、電荷のネットな流れがない反応) すなわち、フレーバー変換中性カレントの総称である。

$b$  クォークが  $d$  クォークを含む終状態へ崩壊する過程である  $b \rightarrow dg$  (図 2.4.17) は、 $b$  クォークが  $s$  クォークを含む終状態へ崩壊する過程である  $b \rightarrow sg$  過程とは異なる  $CP$  位相を持ち、新しい角度から標準理論を超える物理の探索を行うことができる。 $b \rightarrow sg$  過程に関しては、これまでに Belle グループ、および、米国スタンフォード加速器センター (SLAC) の BaBar グループにより、様々な測定が行われてきた。それに対して、 $b \rightarrow dg$  過程は分岐比の大きさが  $b \rightarrow sg$  過程の分岐比に比べて約 4% と非常に小さく、解析のために大量のデータ量を必要とするため、測定が困難であった。今回 Belle グループは、4 億 4 千 9 百万の  $B \cdot \bar{B}$  中間子対を用いて解析を行い、 $B$  中間子が二つの  $K_s$  中間子に崩壊する反応の分岐比を  $(0.87^{+0.25}_{-0.20} \pm 0.09) \times 10^{-6}$  と測定し、 $5.9\sigma$  の信頼度で  $B$  中間子が二つの  $K_s$  中間子に崩壊する反応を発見した。また、直接的  $CP$  対称性の破れの大きさを、 $A = -0.58^{+0.73}_{-0.66} \pm 0.04$  と測定した。現在、時間依存の  $CP$  非対称性の測定を行うために、解析手法の改良を行っている。さらに、 $b \rightarrow dg$  FCNC プロセスによって引き起こされる他の崩壊モードとして、 $B^+ \rightarrow \bar{K}^{*0} K^+$  過程についても、解析を進めている。

$B$  中間子がストレンジネスを含むハドロンとレプトン対 (電子・陽電子対、またはミューオン・反ミューオン対) へ崩壊する電弱崩壊の精密測定を進めている。Belle グループでは、これまでに 1 億 5 千 2 百万の  $B \cdot \bar{B}$  中間子対を解析することによって、その分岐比を  $(4.11 \pm 0.83^{+0.85}_{-0.81}) \times 10^{-6}$  と決定した。この値を使って、いくつかの超対称性モデルに制限を与えることができた。現在、統計量を 4 倍以上に増やして、解析を進めている。

## 2.4.2 中性 $B$ 中間子の $\rho\pi$ 崩壊における $CP$ 非対称の精密測定

中性  $B$  中間子が  $\rho$  中間子と  $\pi$  中間子に崩壊するモード、 $B^0 \rightarrow (\rho\pi)^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  過程における  $CP$  非対称の精密測定を行い、ユニタリティ三角形の角度の一つ  $\phi_2$  の測定を行った。ここで、 $B^0 \rightarrow (\rho\pi)^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  過程は、その運動学を記述する“ダリッツプロット”と時間発展とを併用して解析すると、 $\phi_2$  を離散的な不定性なしに決めることが原理的に可能である。この離散的な不定性がないという性質は、同様に  $\phi_2$  を測定可能である  $B \rightarrow \pi\pi$  や  $B \rightarrow \rho\rho$  崩壊過程を用いた解析にはない、この解析手法に特有のものである。

今回 4 億 4 千 9 百万の  $B \cdot \bar{B}$  中間子対を用いて  $B \rightarrow \rho\pi$  崩壊過程の解析を行った。選別された  $971 \pm 42$  事象を用いて、この崩壊過程における  $CP$  非対称性を測定し、さらに  $B^\pm \rightarrow \rho^+\pi^0, B^\pm \rightarrow \rho^0\pi^\pm$  崩壊過程の崩壊分岐比と  $CP$  非対称性の情報とこの解析結果を組み合わせ、アイソスピン解析を行うことで、標準理論と矛盾しない  $\phi_2$  の 68.3% 信頼区間として  $68^\circ < \phi_2 < 95^\circ$  を得た (図 2.4.18)。また、この解析により、 $B^0 \rightarrow \rho^0\pi^0$  崩壊過程の時間依存する  $CP$  非保存パラメータを、世界で初めて測定した。

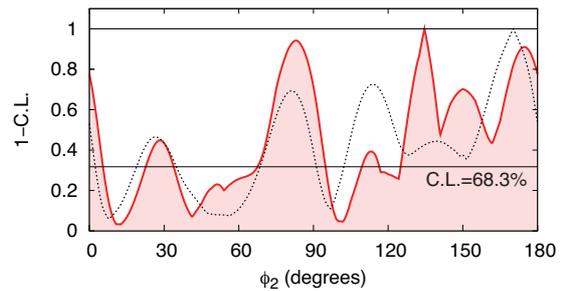


図 2.4.18:  $B \rightarrow \rho\pi$  崩壊過程の解析で測定された  $\phi_2$  の角度の信頼度分布

## 2.4.3 Belle 検出器用パイプライン読み出しモジュールの開発

KEK-B 加速器は 2007 年 1 月、Crab Cavity を導入した。これによって、近い将来従来の約 2 倍のルミノシティを達成することが見込まれている。このとき、従来の読み出し系ではデッドタイムが大きくなってしまったため、読み出しモジュールをパイプライン化して、高トリガー条件にも耐えうる読み出しシステムを構築することが急務である。このような要請から、パイプライン読み出しモジュール“COPPER” (Common Pipelined Platform for Electronics Readout) の開発を行った。今回は、Belle 検出器のセントラルドリフトチェンバー (CDC) の読み出しシステムに COPPER を導入する作業を行い、CDC のデッドタイムを従来の約 1/10 に削減することに成功した。また、

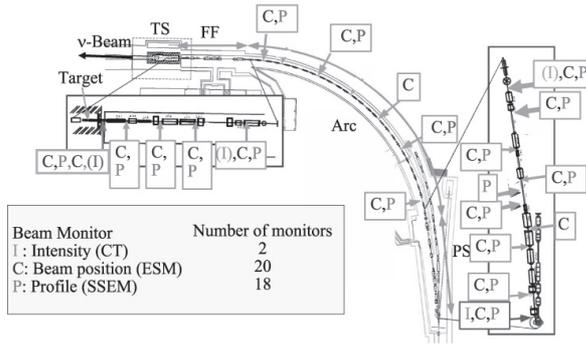


図 2.4.19: J-PARC ニュートリノ実験用取りだしビームラインとビームモニター配置

COPPER は各モジュールが CPU を持つため、多彩なオンライン処理が可能であるのも利点の一つである。その特性を生かして COPPER 上でデータ処理を行い、下流に送るデータサイズを最大で約 50% 減らすことに成功した。COPPER を用いることでシステム中の CPU ノード数が増えるのが技術的な挑戦であったが、従来 Belle 実験で用いられてきたコントロール技術<sup>TM</sup> NSM<sup>TM</sup> (Network Shard Memory) が、簡単な拡張だけで約 100 個の CPU ノードを扱えることが今回実証された。今後、CDC 以外の検出器の読み出しについても、順次 COPPER を適用していく予定である。

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

次世代のニュートリノ振動実験である東海-神岡間長基線ニュートリノ振動実験に向けて、原研東海 J-PARC 実験施設にニュートリノ実験用ビームラインを建設中である。このビームラインは陽子シンクロトロンから取り出された大強度の陽子ビームをターゲットまで輸送するための陽子ビームライン (一次ビームライン) と、ターゲットで生成される荷電  $\pi$  及び  $K$  中間子の崩壊によって  $\mu$  ニュートリノビームを生成するための二次ビームラインから成る。2009 年 4 月のビームコミッショニングに向けて現在ニュートリノビームラインの建設が進められており、その中で本研究室では特にその一次陽子ビームラインの陽子ビームモニターに関連した部分を担当している。

#### 2.4.5 ビームプロファイルモニター

一次陽子ビームラインにおけるビーム光学の理解のためにビームプロファイルモニターをビームライン中に 18 台設置し、ビームの調整時にビームの中心位置およびビームの拡がりを測定する。ビームプロファイルモニターには厚さ  $5 \mu\text{m}$  のチタン箔を最小 1mm

幅のストリップ状に切断して用いた Segmented Secondary Emission Monitor (SSEM) を用いる。ビームがストリップ状にセグメント化されたチタン箔を通過する際の二次電子放出量に応じた電流を各ストリップ毎に測定することにより、ストリップを配置した方向のビームプロファイルを観測する。このビームプロファイルモニターは、ビームと直接接触し大きなビームロス及びモニター自身の劣化を引き起こすため、遠隔操作で必要時のみビームライン内へ挿入するための駆動機構を持たせる必要がある。とくにビームを神岡方向に約 90 度曲げるビームライン部には超電導磁石が用いられるため、この部分のビームプロファイルモニターの駆動機構は低温・真空・放射線環境下で安定に動作する必要がある。本年度はこの駆動機構の設計・試作を行い駆動機構を真空に保った上で液体窒素で冷却しその動作試験を行った。その結果  $-184^\circ\text{C}$  及び  $3 \times 10^{-2} \text{Pa}$  の温度および真空度での駆動機構の動作を確認した。現在実機用にデザインを修正し実際の超電導設備を用いた低温・真空環境下での長期動作試験を準備中である。モニターセンサー部はデザインを最終的に固め、2 台分のビームプロファイルモニターを本年度製作した。

#### 2.4.6 ビーム位置モニター

実験データ取得中にビームの安定性を常時監視するためにビーム位置モニターとして、4 極静電型モニター (ESM) を用いる。4 極 ESM は 2 対計 4 枚の互いに向かい合った電極板をビームダクトの内周に配置し、陽子ビームが通過した際ビームダクトに対して電極板に誘起される電荷を測定する。それぞれ向かい合った電極板から得られる信号の非対称度からビームに対して垂直 2 方向のビーム中心位置に焼き直す。ビーム位置モニターはビームライン中 20 台設置し、ビームの中心位置変化を常時監視する。本年度はモニター実機デザインを確立し、2 台分の ESM の製作を行った。京大化学研究所の電子ビームラインを用いて製作した ESM の位置精度の評価を行った結果約  $60 \mu\text{m}$  のビーム中心位置精度が得られることを確認した。また本年度は得られた電気信号とビームの位置を関連づけるためのビーム位置校正装置の製作を行った。現在ビーム位置モニターの大量生産に向けて校正手法の開発を行っている。

#### 2.4.7 ビームラインシミュレーション

ターゲットにおけるビーム位置および拡がりの精度が最適になるようビームのシミュレーションを行い、ビームライン内ビームモニターの配置を決定した。得られるビーム位置とビームの拡がりから自動的にビームライン内磁石の電流値を修正するフィードバックシステムを構築する予定である。

### 2.4.8 次世代水チェレンコフ検出器のためのハイブリッド光検出器開発

当研究室では、次世代大口径光検出器 Hybrid Photo-Detector (HPD) を、次世代メガトン級水チェレンコフ実験用光検出器として開発を行っている。大口径 HPD は、従来の光電子増倍管 (PMT) より、優れた時間分解能を持ち、かつ安価に製作できる可能性を持つ。このため、大口径 HPD は、日本、アメリカ、ヨーロッパなどでさかんに検討されている次世代メガトン級水チェレンコフ検出器において、現在使用されている PMT に代わるデバイスとして期待されている。当研究室は、浜松ホトニクス、東大宇宙線研、KEK 素核研システムエレクトロニクスグループと共同で 13 インチ HPD の試作に成功し、基本性能を確認した。以下に、簡単に HPD の動作原理と得られた基本性能を説明する。

図 2.4.20 に HPD 動作概念図を示す。HPD は光電面とアバランシェダイオード (AD) から構成されている。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) に打ち込み増幅する。光電面と AD の間に、10~20keV の高印加電圧をかけることにより、光電子あたり数千の二次電子が生成される。さらに、個々の二次電子は、AD のアバランシェ増幅により数十倍の電子に増幅される。二段の増幅機構により、最終的に約  $O(10^5)$  の増幅が得られ、一光電子が検出可能となる。HPD は、この動作原理により、三つの重要な特性を PMT に比べてもたすことが期待される。一つ目は、第一段の電子増倍過程における増幅率が大きく、かつ増幅率のばらつきが小さいため、波高分解能が PMT に比べてよくなる。二つ目は、電子増幅過程に PMT のようなダイノードを含んでいないため、電子走行時間のばらつきが基本的に存在せず、時間分解能の優れた大口径の光検出器の作成が可能である。三つ目は、部品数が PMT の 1/10 ですし、HPD を安価でクオリティコントロールが容易に作成できる可能性があること、である。われわれは、13 インチ HPD の試作器を 12kV の印加電圧で動作させることにより、5 光電子までの波高分離 (図 2.4.21)、一光電子で 190ps の時間分解能を確認した。表 2.4.1 に、HPD と PMT の性能評価の結果をまとめる。最近、高電圧電源ラインの改良を行い、20kV の HPD 印加電圧をかけることが可能になった。今後、20kV 印加電圧での HPD の基本性能を検証する予定である。

HPD は PMT に比べて優れた性能を持っているが、実用化にあたっては、解決しなくてはならない問題が残っている。そのひとつに、PMT に比べて約 1/100 という低い電子増幅がある。この問題を解決するためには、HPD 用低ノイズ読み出し回路の開発が必要である。われわれは、最新のデジタル信号処理技術をもちいた、低ノイズプリアンプ、低消費電力高速サンプリング、デジタル信号処理、からなる読み出し回路の開発を行っている。図 2.4.22 は、デジタル信号処理用読み出し回路の試作器である。今後、ASIC を用いた低ノイズプリアンプと低消費電力高速サンプリング (アナログメモリーセル) をのせたテストボードを搭載し、動作確認を行う予定で

ある。

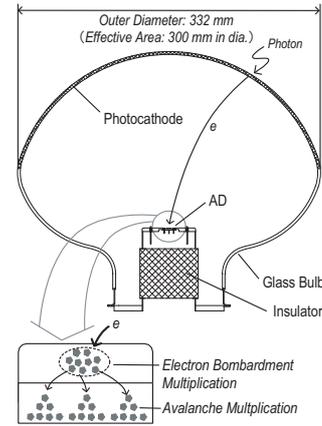


図 2.4.20: 大口径 HPD 動作概念図

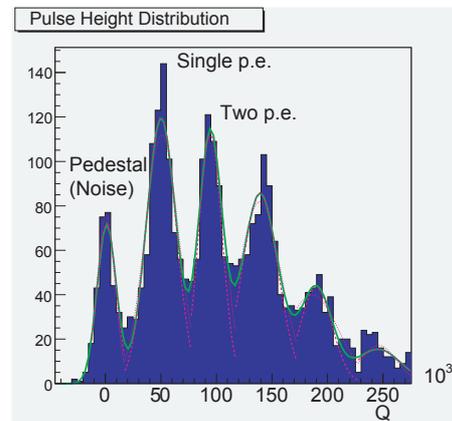


図 2.4.21: HPD 測定波高分布図

### 2.4.9 観測宇宙論によるダークエネルギーの研究

2003 年、WMAP の観測結果によって、我々の宇宙は 73% のダークエネルギー、23% のダークマターで占められ、20 世紀の素粒子物理学が解明した物質階層であるバリオンは、わずか 4% にすぎないことが明らかになった。このように、“数値”はわかってきたが、ダークマターとダークエネルギーに関する“理解”はまだほとんど進んでいない。本研究室では、このダークエネルギーの解明をめざして、超広域撮像探査実験計画を推進している。この実験において、国立天文台と共同で、すばる望遠鏡の主焦点に、広視野 3.1 平方度 1.4 ギガピクセルの CCD カメラ (Hyper Suprime-Cam) を製作・設置する。この新装置を用いて、最低 1000 平方度の広域探査を行い、探査天域

表 2.4.1: 口径 13 インチの HPD と PMT の性能比較

Parameters	HPD	PMT
電子増幅	$O(10^5)$	$O(10^7)$
時間分解能@1p.e.	190ps	1400ps
波高分解能@1p.e.	44%	70%
立ち上がり時間	1ns	6ns
パルス幅	2.2ns	10ns
ダイナミックレンジ (p.e.=光電子)	3000 p.e.	2000 p.e.

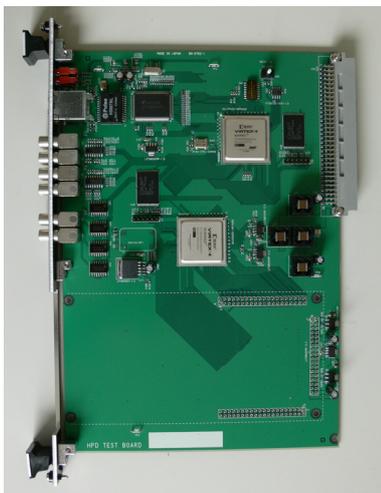


図 2.4.22: デジタル信号処理用読み出し回路試作器 (FineNet)

に含まれる 1.5 億個程度の銀河の形状解析から、「弱い重力レンズ効果」による系統的形状歪みを検出し、遠方銀河と我々の間に介在する（ダークマターを含めた）全質量の分布を求め、宇宙の「質量分布図」を作成する。さらに、宇宙大規模構造の形成と進化、銀河の個数分布と形状進化などの観測的宇宙論の研究を進めることによって、ダークエネルギーの正体に迫る。

#### 2.4.10 国際リニアコライダー用検出器の開発

現在、世界では超高エネルギー（500GeV 以上）の電子・陽電子リニアコライダー（International Linear Collider）を用いた実験将来計画のための研究開発が行われている。当研究室では、シリコン技術を駆使した検出器 Silicon Detector (SiD) を SLAC, Fermilab,

ANL などと共同で開発している。さらに、この検出器に必要な超高磁場（5 テスラ）ソレノイドの開発を KEK の低温グループとともに進めている。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Z. Natkaniec *et al.*, “Status of the Belle silicon vertex detector,” Nucl. Instrum. Meth. A **560**, 1 (2006).
- [2] G. S. Varner *et al.*, “Development of the Continuous Acquisition Pixel (CAP) sensor for high luminosity lepton colliders,” Nucl. Instrum. Meth. A **565**, 126 (2006).
- [3] H. Nakayama *et al.*, “Development of a 13-in. Hybrid Avalanche Photo-Detector (HAPD) for a next generation water Cherenkov detector,” Nucl. Instrum. Meth. A **567**, 172 (2006).
- [4] N. Gabyshev *et al.* [Belle Collaboration], “Study of decay mechanisms in  $B^- \rightarrow \Lambda b/c^+ \text{ anti-p}$  pi- decays and observation of low-mass structure in the  $\Lambda b/c^+ \text{ anti-p}$  system,” Phys. Rev. Lett. **97**, 242001 (2006).
- [5] M. Friedl *et al.*, “Belle silicon vertex detector for the super B factory,” Nucl. Instrum. Meth. A **569**, 37 (2006).
- [6] S. Stanic *et al.*, “Recent progress in the development of a B-factory monolithic active pixel detector,” Nucl. Instrum. Meth. A **568**, 181 (2006).
- [7] H. Aihara *et al.*, “Belle SVD2 vertex detector,” Nucl. Instrum. Meth. A **568**, 269 (2006).
- [8] A. Somov *et al.*, “Measurement of the branching fraction, polarization, and CP asymmetry for  $B_0 \rightarrow \rho^+ \rho^-$  decays, and determination of the CKM phase  $\phi(2)$ ,” Phys. Rev. Lett. **96**, 171801 (2006) [arXiv:hep-ex/0601024].
- [9] L. M. Zhang *et al.* [BELLE Collaboration], “Improved constraints on  $D_0$  - anti- $D_0$  mixing in  $D_0 \rightarrow K^+ \pi^-$  decays at Belle,” Phys. Rev. Lett. **96**, 151801 (2006) [arXiv:hep-ex/0601029].
- [10] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Study of  $B^+ \rightarrow D(\text{CP}) K^+ \pi^-$  and  $D^*(\text{CP}) K^+ \pi^-$  decays,” Phys. Rev. D **73**, 051106 (2006) [arXiv:hep-ex/0601032].
- [11] J. Schumann *et al.* [Belle Collaboration], “Evidence for  $B \rightarrow \eta' \pi$  and improved measurements for  $B \rightarrow \eta' K$ ,” Phys. Rev. Lett. **97**, 061802 (2006) [arXiv:hep-ex/0603001].
- [12] A. Ishikawa *et al.*, “Measurement of forward-backward asymmetry and Wilson coefficients in  $B \rightarrow K^* l^+ l^-$ ,” Phys. Rev. Lett. **96**, 251801 (2006) [arXiv:hep-ex/0603018].
- [13] Y. Yusa *et al.* [BELLE Collaboration], “Search for neutrinoless decays  $\tau \rightarrow l h h$  and  $\tau \rightarrow l V_0$ ,” Phys. Lett. B **640**, 138 (2006) [arXiv:hep-ex/0603036].

- [14] F. J. Ronga *et al.* [BELLE Collaboration], “Measurements of CP violation in  $B^0 \rightarrow D^{*-} \pi^+$  and  $B^0 \rightarrow D^- \pi^+$  decays,” Phys. Rev. D **73**, 092003 (2006) [arXiv:hep-ex/0604013].
- [15] K. Ikado *et al.*, “Evidence of the purely leptonic decay  $B^- \rightarrow \tau^- \text{anti-}\nu/\tau^-$ ,” Phys. Rev. Lett. **97**, 251802 (2006) [arXiv:hep-ex/0604018].
- [16] T. Hokuue *et al.* [Belle Collaboration], “Measurements of branching fractions and  $q^{*2}$  distributions for  $B \rightarrow \pi l \nu$  and  $B \rightarrow \rho l \nu$  decays with  $B \rightarrow D^{(*)} l \nu$  decay tagging,” Phys. Lett. B **648**, 139 (2007) [arXiv:hep-ex/0604024].
- [17] L. Widhalm *et al.*, “Measurement of  $D^0 \rightarrow \pi l \nu$  ( $K l \nu$ ) form factors and absolute branching fractions,” Phys. Rev. Lett. **97**, 061804 (2006) [arXiv:hep-ex/0604049].
- [18] A. Poluektov *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of  $\phi(3)$  with Dalitz plot analysis of  $B^+ \rightarrow D^{(*)} K^{(*)+}$  decay,” Phys. Rev. D **73**, 112009 (2006) [arXiv:hep-ex/0604054].
- [19] F. Fang *et al.*, “Search for the  $h/c$  meson in  $B^+ \rightarrow h/c K^+$ ,” Phys. Rev. D **74**, 012007 (2006) [arXiv:hep-ex/0605007].
- [20] P. Krokovny *et al.* [BELLE Collaboration], “Resolution of the quadratic ambiguity in the CKM angle  $\phi(1)$  using time-dependent Dalitz analysis of  $\text{anti-}B^0 \rightarrow D(K^0(S) \pi^+ \pi^-) h^0$ ,” Phys. Rev. Lett. **97**, 081801 (2006) [arXiv:hep-ex/0605023].
- [21] Y. Miyazaki *et al.* [BELLE Collaboration], “Search for lepton flavor violating  $\tau^-$  decays with a  $K^0(S)$  meson,” Phys. Lett. B **639**, 159 (2006) [arXiv:hep-ex/0605025].
- [22] C. H. Wu *et al.*, “Study of  $J/\psi \rightarrow p \text{ anti-}p$ ,  $\Lambda \text{ anti-}\Lambda$  and observation of  $\eta/c \rightarrow \Lambda \text{ anti-}\Lambda$  at Belle,” Phys. Rev. Lett. **97**, 162003 (2006) [arXiv:hep-ex/0606022].
- [23] R. Chistov *et al.* [BELLE Collaboration], “Observation of new states decaying into  $\Lambda/c^+ K^- \pi^+$  and  $\Lambda/c^+ K^0(S) \pi^-$ ,” Phys. Rev. Lett. **97**, 162001 (2006) [arXiv:hep-ex/0606051].
- [24] G. Gokhroo *et al.*, “Observation of a near-threshold  $D^0 \text{ anti-}D^0 \pi^0$  enhancement in  $B \rightarrow D^0 \text{ anti-}D^0 \pi^0 K$  decay,” Phys. Rev. Lett. **97**, 162002 (2006) [arXiv:hep-ex/0606055].
- [25] J. Dragic *et al.*, “Measurement of branching fraction and direct CP asymmetry in  $B^0 \rightarrow \rho^0 \pi^0$  decays,” Phys. Rev. D **73**, 111105 (2006).
- [26] R. Kumar *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of  $B^+ \rightarrow \chi/c l \pi^+$  and search for direct CP violation,” Phys. Rev. D **74**, 051103 (2006) [arXiv:hep-ex/0607008].
- [27] S. Blyth *et al.* [BELLE Collaboration], “Improved measurements of color-suppressed decays  $\text{anti-}B^0 \rightarrow D^0 \pi^0$ ,  $D^0 \eta$ ,  $D^0 \omega$ ,  $D^{*0} \pi^0$ ,  $D^{*0} \eta$  and  $D^{*0} \omega$ ,” Phys. Rev. D **74**, 092002 (2006) [arXiv:hep-ex/0607029].
- [28] A. Drutskoy *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of inclusive  $D/s$ ,  $D^0$  and  $J/\psi$  rates and determination of the  $B/s^{(*)} \text{ anti-}B/s^{(*)}$  production fraction in  $b$  anti- $b$  events at the Upsilon(5S) resonance,” Phys. Rev. Lett. **98**, 052001 (2007) [arXiv:hep-ex/0608015].
- [29] Y. Ushiroda *et al.* [Belle Collaboration], “Time-dependent CP asymmetries in  $B^0 \rightarrow K^0(S) \pi^0$  gamma transitions,” Phys. Rev. D **74**, 111104 (2006) [arXiv:hep-ex/0608017].
- [30] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the near-threshold  $e^+e^- \rightarrow D^{(*)\pm} D^{*\mp}$  cross section using initial-state radiation,” Phys. Rev. Lett. **98**, 092001 (2007) [arXiv:hep-ex/0608018].
- [31] K. S. Park *et al.* [Belle Collaboration], “Study of the charmed baryonic decays  $\text{anti-}B^0 \rightarrow \Sigma/c^{++} \text{ anti-}p \pi^-$  and  $\text{anti-}B^0 \rightarrow \Sigma/c^0 \text{ anti-}p \pi^+$ ,” Phys. Rev. D **75**, 011101 (2007) [arXiv:hep-ex/0608025].
- [32] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “The first observation of  $\tau^+ \rightarrow \Phi K^+ \nu$  decay,” Phys. Lett. B **643**, 5 (2006) [arXiv:hep-ex/0608026].
- [33] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Improved measurements of branching fractions and CP asymmetries in  $B \rightarrow \eta h$  decays,” Phys. Rev. D **75**, 071104 (2007) [arXiv:hep-ex/0608033].
- [34] K. F. Chen *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of time-dependent CP violation in  $B^0 \rightarrow \eta' K^0$  decays and improved measurements of CP asymmetries in  $B^0 \rightarrow \Phi K^0$ ,  $K^0(S) K^0(S) K^0(S)$  and  $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$  decays,” Phys. Rev. Lett. **98**, 031802 (2007) [arXiv:hep-ex/0608039].
- [35] P. Urquijo *et al.*, “Moments of the electron energy spectrum and partial branching fraction of  $B \rightarrow X/c e \nu$  decays at Belle,” Phys. Rev. D **75**, 032001 (2007) [arXiv:hep-ex/0610012].
- [36] T. Mori *et al.* [Belle Collaboration], “High statistics study of  $f_0(980)$  resonance in  $\gamma \gamma \rightarrow \pi^+ \pi^-$  production,” Phys. Rev. D **75**, 051101 (2007) [arXiv:hep-ex/0610038].
- [37] A. Garmash *et al.* [Belle Collaboration], “Dalitz analysis of three-body charmless  $B^0 \rightarrow K^0 \pi^+ \pi^-$  decay,” Phys. Rev. D **75**, 012006 (2007) [arXiv:hep-ex/0610081].
- [38] Q. L. Xie *et al.*, “Search for  $B^+ \rightarrow J/\psi \eta' K^+$  and  $B^0 \rightarrow J/\psi \eta' K^0(S)$  decays,” Phys. Rev. D **75**, 017101 (2007) [arXiv:hep-ex/0610084].
- [39] A. Sokolov *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of the decay  $\text{Upsilon}(4S) \rightarrow \text{Upsilon}(1S) \pi^+ \pi^-$ ,” Phys. Rev. D **75**, 071103 (2007) [arXiv:hep-ex/0611026].
- [40] O. Tajima *et al.* [Belle Collaboration], “Search for invisible decay of the  $\text{Upsilon}(1S)$ ,” Phys. Rev. Lett. **98**, 132001 (2007) [arXiv:hep-ex/0611041].

- [41] C. Schwanda *et al.* [BELLE Collaboration], “Moments of the hadronic invariant mass spectrum in  $B \rightarrow X/c l \nu$  decays at Belle,” *Phys. Rev. D* **75**, 032005 (2007) [arXiv:hep-ex/0611044].
- [42] N. Satoyama *et al.* [Belle Collaboration], “A search for the rare leptonic decays  $B^+ \rightarrow \mu^+ \nu$  and  $B^+ \rightarrow e^+ \nu$ ,” *Phys. Lett. B* **647**, 67 (2007) [arXiv:hep-ex/0611045].
- [43] C. M. Jen *et al.*, “Improved measurements of branching fractions and CP partial rate asymmetries for  $B \rightarrow \omega K$  and  $B \rightarrow \omega \pi^0$ ,” *Phys. Rev. D* **74**, 111101 (2006).
- [44] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Observation Of A Charmoniumlike State Produced In Association With A J/Psi In E+ E- Annihilation At S\*\*1/2 Approx. 10.6-Gev,” *Phys. Rev. Lett.* **98**, 082001 (2007).
- [45] Y. Miyazaki *et al.* [BELLE Collaboration], “Search for lepton flavor violating tau- decays into  $l- \eta$ ,  $l- \eta'$  and  $l- \pi^0$ ,” *Phys. Lett. B* **648**, 341 (2007) [arXiv:hep-ex/0703009].
- [46] A. Zupanc *et al.*, “Improved measurement of  $\bar{B} \rightarrow D_s^- D^+$  and search for  $B \rightarrow D_s D_s$  at Belle,” *Phys. Rev. D* **75**, 091102 (2007) [arXiv:hep-ex/0703040].
- (国内雑誌)
- [47] 須藤靖、高田昌広、相原博昭：宇宙の暗黒エネルギーを探る，物理学会誌，解説，2007年2月号，p83.
- (学位論文)
- [48] 博士論文，日下暁人：Measurement of CP-Violating Asymmetries in the Neutral B Meson Decaying to the  $\rho^0$  State Using a Time Dependent Dalitz Plot Analysis.
- [49] 修士論文，山田剛大：Research and Development of Segmented Secondary Emission Beam Monitors for J-PARC Neutrino Beamline
- (著書)
- [50] 相原博昭：素粒子の物理、東京大学出版会、2006年4月
- [51] 相原博昭：物理学の挑戦、「物質世界の起源—反物質はどこへ行ったか」(日本物理学会編集)、日本評論社、2006年6月
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [52] H. Aihara, “Status of T2K and ILC in Japan,” Fermilab User’s Meeting, Fermilab, May 31, 2006.
- [53] H. Aihara, “B Physics,” PDG 50th Anniversary Festivities, Lawrence Berkeley National Laboratory, Sep. 23, 2006.
- [54] H. Aihara, “Development of Large-Aperture Hybrid Photo-Detector and Readout System,” 2nd International Workshop on a Far Detector in Korea for the J-PARC Neutrino Beam,” July 13-14, 2006. Seoul national University
- [55] A. Kusaka, for Belle and BaBar collaborations, “ $\phi^2/\alpha$  and  $\phi^3/\gamma$ ”, Rencontres de Moriond ElectroWeak Interactions and Unified Theories 2007, La Thuile, Italy. (March 2007)
- [56] H. Kakuno: “New Physics searches in B decays”, Flavor Physics and CP Violation 2006, Apr. 9-12, Vancouver, Canada
- [57] H. Kakuno: “T2K beam profile monitor”, 6th International workshop on Neutrino Beams and Instrumentation, Sep. 4-9, Geneva, Switzerland
- [58] N. Hastings: “T2K beam position monitor”, *ibid.*
- [59] T. Abe: “T2K proton beam handling and failure analysis”, *ibid.*
- [60] H. Nakayama: “Commissioning a Pipelined Data Acquisition System for the Belle Central Drift Chamber” IEEE Nuclear Science Symposium, San Diego, Oc. 2006.
- 一般講演
- (国内会議)
- 招待講演
- [61] 相原博昭：「半導体素子増幅による光検出器」、シンポジウム「日本の未来を拓く先端計測分析技術の最前線」平成18年9月5日、経団連会館、東京
- [62] 相原博昭：「可視領域微弱光検出の現状と応用」第3回高度計測技術の発展と埋没，国際高等研究所，2007年1月9日
- [63] A. Kusaka, on behalf of Belle collaboration, “ $\phi^2$  at SuperKEKB”, International Workshop on B Factories and New Measurements (BNM2006), Tsukuba, Japan (September 2006)
- [64] M. Tanaka: “Large aperture HPD R&D status and future for HK” Workshop on Next generation Nucleon decay and Neutrino detectors 2006 (NNN06), Seattle, USA, September 21-23, 2006
- [65] T. Abe: “The recent R&D status of a large photocathode HAPD” Joint Meeting Of Pacific Region Particle Physics Communities (DPF And JPS 2006) Honolulu, Hawaii, USA, October 29 - November 3, 2006
- 一般講演
- [66] 中山浩幸 “Installation of CDC COPPER,” Belle TRG/DAQ Workshop, (KEK, 2007年3月)
- [67] 中浜優: “Measurements of  $\sin 2\phi_1$  in  $b \rightarrow c \bar{c} b$  processes at Belle,” 4th International Workshop on the CKM Unitary Triangle (CKM2006) December 12-16, 2006 Nagoya University, Nagoya, Japan

- [68] 中山浩幸:パイプライン読み出し (COPPER) を用いた Belle CDC 用新データ収集システムの導入報告, 日本物理学会春季大会,(首都大学東京,2007年3月)
- [69] 中浜優:”Belle 実験における  $B^0K_sK_s$  崩壊を用いた CP 非対称性の研究” *ibid.*
- [70] 阿部利徳:”大口径 HAPD の開発” *ibid.*
- [71] 日下暁人:”時間依存性と Dalitz plot を用いた  $B \rightarrow \rho\pi$  崩壊過程における CP 非対称度の測定”, 13th ICEPP Symposium in 白馬, 長野県白馬村 (2007年2月)
- [72] 阿部利徳:”大口径 HAPD の開発 ”第二回次世代光センサーに関するワークショップ 浜松, 2006年12月7日-8日
- [73] 相原博昭:”海外におけるダークエネルギー観測計画の状況”, 「超広視野撮像/分光器で切り開く銀河天文学と観測的宇宙論」研究会、平成18年11月7,8日、東京大学理学部化学講堂
- [74] 相原博昭:”Online/Offline DAQ について” Hyper Suprime-Cam をめぐるサイエンス検討会、2007年3月12-14日、仙台市作並
- [75] 相原博昭:”SiD Detector Concept,” 学術創成「ILC 測定器」第1回研究会 2006年12月20-22日, KEK

#### その他

- [76] H.Aihara, ”Neutrino Programs in Korea/Japan,” DOE/NSF Joint Particle Physics Project Prioritization Panel (P5), Fermilab, Apr.18, 2006.
- [77] H.Aihara, ”Dark Energy Programs in Japan,” DOE/NSF Joint Particle Physics Project Prioritization Panel (P5), SLAC, Apr.20, 2006.
- [78] H.Aihara, ”KEKB/Belle Status,” DOE/NSF Joint Particle Physics Project Prioritization Panel (P5), SLAC, Apr.21, 2006.
- [79] A.Kusaka, “ Measurement of CP-Violating Asymmetry in  $B^0 \rightarrow \rho\pi$  Decay Using a Time-Dependent Dalitz Plot Analysis at Belle ”, High Energy Physics Seminar, University of Chicago, U.S.A. (October 2006)

#### 受賞

- [80] 日下暁人:平成18年度理学系研究科研究奨励賞(博士)

## 3 物性理論

### 3.1 和達研究室

統計力学と物性論における基礎的問題を中心に、興味ある現象の発見・解明と新しい解析手法の開発をめざす。分野と方法にとらわれずにより自由な発想で研究を進め、普遍的法則を確立したい。

#### 3.1.1 ボーズ・アインシュタイン凝縮

スピノル凝縮体中のバックグラウンドを持った物質波ブライトソリトン

ボーズ・アインシュタイン凝縮体 (BEC) による物質波ブライトソリトンは高い安定性とコヒーレンスを有し、量子情報処理の素子の候補として注目を集めている。特に、光学トラップ中で実現される内部自由度を持った原子気体 BEC は、多成分チャンネルが利用できることから、応用により適していると考えられる。超微細スピン  $F = 1$  状態にある BEC のダイナミクスは 3 成分グロス・ピタエフスキ方程式で記述されるが、我々はこれまでの研究で、次元かつ一様な系のときにこの方程式系が、適当な結合定数の調節の下で、 $2 \times 2$  行列型の非線形シュレディンガー (NLS) 方程式と等価な可積分模型に帰着することを見出し、 $F = 1$  スピノル凝縮体中のソリトン伝播を逆散乱法によって厳密に解析した。その過程で同時に、二葉リーマン面の導入により、無限遠方で定数に収束する境界条件の下で行列型 NLS 方程式の逆散乱法を定式化した。

本年度はこれらの手法を組み合わせ、更に解析を進めた。すなわち、上述の拡張された逆散乱法を自己収束相互作用型の可積分模型に適用し、バックグラウンドを有する一般のブライトソリトン解を考察した。凝縮体を有限領域に閉じ込める通常の実験では、ソリトンは凝縮体によるバックグラウンド上を伝播すると考えられ、ここで想定した状況はより現実にマッチしたものとなっている。1 ソリトン解を明示的に書き下し、両無限遠方の境界値が  $SU(2)/U(1)$  の変換を受けるドメインウォール (DW) 型/位相シフト (PS) 型の二種に分類した。スピン密度のプロフィールから DW (PS) 型の磁気的性質が強磁性 (極性) であることが示唆され、束縛状態に対応する離散固有値が純虚数の場合については、実際に全スピンを計算することで磁気状態を厳密に分類した。数学的には今回得た 1 ソリトン解はより一般的な条件下での NLS 方程式の解であり、フリーパラメータの特殊

な極限では先行研究で得られているソリトン解を再現することを確認した。さらに 2 ソリトンの衝突の様子を観察し、DW 型の関わる衝突においては、搬送される (ネットで) ノンゼロのスピンの影響によってパートナーのソリトンに内部自由度間の遷移が生じることを見た [22, 33, 38, 53]。図 3.1.1 に DW 型と PS 型の衝突の一例を示す。3 つの超微細準位のうち、0 成分と +1 成分に対する秩序変数の包絡ソリトン  $|\phi_0|^2$ 、 $|\phi_{+1}|^2$  が描かれている ( $|\phi_{-1}|^2$  の振る舞いは  $|\phi_{+1}|^2$  とほぼ同様)。衝突領域  $t = 0$  の前後でドメインウォールは波形を保つが、一方でパートナーの PS 型ソリトンにおいては、 $\pm 1$  成分から 0 成分へと原子集団がスイッチングすることがわかる。

以上の結果は、バックグラウンドを持たないブライトソリトン及びダークソリトンに対する過去の我々の解析結果とコンシステントであり、スピン自由度を持った物質波ソリトンについて更なる知見を得た。

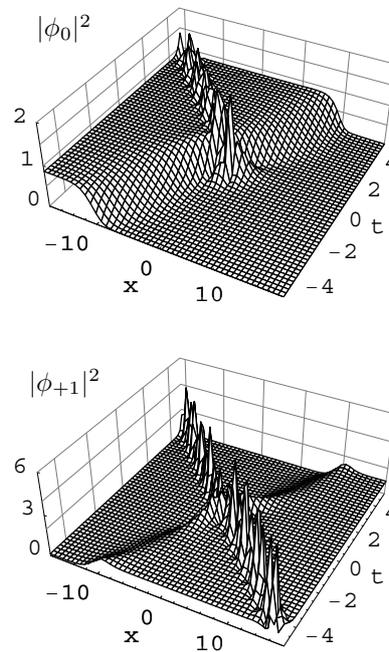


図 3.1.1: 2 ソリトンの衝突における内部自由度間遷移

#### フェッシュバハ分子の生成効率

トラップされた冷却原子気体に、フェッシュバハ共鳴を適用することで、原子間の s 波散乱長を磁場によってコントロールすることが可能である。この技術を用いることで、2004 年には、フェルミ原子間の引力を制御し、BCS から BEC への対凝縮が観測された。最近になり、このフェッシュバハ共鳴を用いて、分子を生成しようという試みがなされている。特に、異種原子からなる分子の生成は、その電気双極子モーメントを用いて量子コンピューターへの応

用が期待されている。

同種原子間の分子の生成効率については、これまでに、Hodbyらによる実験があり、Williamsらによる運動論をもとにして、定性的に実験とあう議論がなされていた [9, 16, 23, 29]。Wiemanらのグループが、2006年の夏、ボゾンである Rb85 と Rb87 間のフェッシュバツハ共鳴を観測し、この異種原子からなるフェッシュバツハ分子の生成効率について報告した。彼らの実験では、温度が低くなるにつれ、生成効率が高くなるが、ある温度からプラトーが生じ、その後、生成効率が減少する傾向を示していた。Williamsらの理論を適用することで、我々は、実験で得られた生成効率の振る舞いを定性的に再現し、プラトーの原因が Rb87 の凝縮であるという理解を得た。さらに、他の量子統計性をもった原子からなるフェッシュバツハ分子の生成効率を、同じ枠組みで調べた。その結果、生成効率の最大値には、用意された 2 成分の原子数の比とそれらの原子の量子統計性とが重要であるという結果を得た。さらに、生成効率の振る舞いでみられたプラトーは、原子が凝縮するような温度領域では、必ず現れるものであることが分かった。[23, 34, 40, 54]

### 3.1.2 多粒子系

#### $\delta$ 関数型気体

1 次元量子多体系の厳密解は、Bethe 仮説法により系統的に求めることができる。この手法は 1967 年に Yang と Gaudin により内部自由度を持つ系に対しても拡張されている (一般化された Bethe 仮説法)。1 次元デルタ関数気体は、従来は数理的な模型ととらえられることが多かったが、近年は冷却原子気体の擬 1 次元的な閉じ込め条件下における実効ハミルトニアンとして、再び活発に研究されている。とりわけ、2004 年に実験でも観測されている BCS-BEC クロスオーバー現象は、ボース気体とスピン偏極が 0 の引力フェルミ気体との間に見出される対応関係により、厳密解を用いて理解できる [10]。

一般に、スピン偏極 (混合比) が任意の場合に、2 成分系の絶対零度における基底状態は、2 種類の擬運動量 (もしくは、ラピディティとも呼ばれる) の分布関数に対する積分方程式系で記述される。しかしながら、これらの方程式を解析的に解く手法は知られていなかった。我々は独自の展開法を提唱し、2 成分のデルタ関数気体として考えうる 3 つの場合、すなわち、(i) スピン-1/2 引力フェルミ気体 [17, 28, 36, 49]、(ii) スピン-1/2 斥力フェルミ気体 [36, 50]、(iii) ボース・フェルミ混合気体 [31, 51]、について、厳密解を明示的に計算した。1 次元とはいえ、これら 3 つの場合における解は、統計性を反映した興味深い性質を持つことを明らかにした [20]。

### 3.1.3 可積分系

#### 有限自由度古典可積分系の構成と解析

「Mumford 系」は有限自由度の古典力学系で、超楕円曲線をスペクトル曲線に持つ。特に、等位集合は超楕円曲線の Jacobi 多様体のアフィン部分と同型である。2001 年に中屋敷と Smirnov は、このアフィン Jacobi 多様体の特異コホモロジー群に Mumford 系の「古典的観測量の空間を可換な保存量の作用で割った商空間」(以下「空間」と略記) という新しい解釈を与え、コホモロジーの計算を行った。我々は、[1] において、even Mumford 系と Prym 系という Mumford 系の類似物に中屋敷らの方法を適用し、等位集合のコホモロジーの計算を行った (この場合はアフィン Jacobi 多様体の補集合をより詳しく解析する必要がある)。また、野海-山田系という Painlevé 方程式の高階拡張と Mumford 系との関係を発見し、その関係を用いて前者の保存極限が代数的完全可積分であることを証明した。

Beauville は 1990 年に Mumford 系を (超楕円曲線とは限らない) 一般のスペクトル曲線を持つように拡張した。我々はこの方法を応用し、[2] において even Mumford 系の拡張を新しく構成した。また [3] では、Mumford 系及び even Mumford 系の拡張系の Poisson 構造を解析し、これらの系が多重 Hamilton 構造を持つことを明らかにした。

#### A 型アフィン・ヘッケ代数によるループ模型の一般化

2000 年に Razumov と Stroganov によって、異方性パラメータ  $-1/2$  における XXZ スピン鎖の基底状態の波動関数に交代符号行列の総数や FPL の総数といった組み合わせ論的量が現れるといった一連の予想 (RS 予想) が提出された。これらの予想は、 $O(1)$  ループ模型の場合に拡張され、現在、その予想の中の総和則と呼ばれるものは証明されている。しかし、未だに様々な課題が残されている。

本年度は、 $A_k$  型アフィン・ヘッケ代数 (AHA) を用いて 円柱上の  $O(1)$  ループ模型の一般化に取り組んだ [32, 37, 45, 52]。代数的には我々の発見した円柱関係式 (cylindric relations) で特徴付けられる AHA を用い、幾何的には円柱上で定義されている模型である。AHA の二通りの表現、スピン表現と道 (path) で張られる状態による表現を構成した。後者は特に  $O(1)$  ループ模型でのリンクパターン空間の拡張となっている。path 表現を構成するために、Young の  $q$ -対称子を平行四辺形タイリング (rhombus tiling) によって取り扱う新しい方法を導入した。変数  $q$  が  $-1$  の冪根のときに、path 表現上でレベル  $1-k+1/k$  の量子 Knizhnik-Zamolodchikov 方程式の解を得た。  $k$  個のシューア関数の積による総和則の類似物も得た。

## 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 1 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坂本を中心とするグループの研究により分かっており、解説を行った [30, 63]。この結果は特異ベクトルに関する新しい結果を導く。また冪和対称多項式と Jack 多項式に関する公式を予想することができる。その一部として Hanlon-Stanley-Stembridge の公式を含む。後者の公式は Ha-Haldane により Calogero-Sutherland 模型の厳密な動的相関関数を導出するときに要となった公式である。相関関数の計算の主要部に使用される公式が Virasoro 代数に起源を持つ公式であることが分かった点は興味深い。

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

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

もともとの KKR 全単射の定義は純粋に組み合わせ論的な方法によっているが、写像の表現論的な意味付けを探る試みが長く続けられてきた。今回我々は、アフィン量子群の結晶基底の理論を用いることで、この問題の決着をみた [11, 12, 18, 42, 35, 39, 62, 64, 65]。すなわち組み合わせ  $R$  行列のみを用いて KKR 全単射と同値な写像を構成した。証明ではアフィン組み合わせ  $R$  行列の構造を臙装配位に導入することが鍵となる。これらの結果は箱玉系と呼ばれる超離散ソリトン系の逆散乱法とも見ることができ、KKR 全単射と箱玉系が同一の理論的枠組みで扱えるようになった。なお、以上の結果は一般の非例外型アフィ

ソリー代数についても拡張でき、類似の表式を予想できた。

## 超離散タウ関数と組み合わせの表現論

Fermi 型明示公式による Kostka 多項式の表示では、多項式各項の冪として現れる整数は臙装配位を変数として持つ整数値関数であり、チャージ関数と呼ばれている。チャージ関数を用いると、臙装配位に関連した超離散タウ関数を定義できる [15, 35, 39, 46, 55, 65]。これらのタウ関数は KP 階層からの極限として構成でき、超離散 Hirota-Miwa 方程式の解を与える。またタウ関数は結晶基底のエネルギー関数と一致し、代数的な特徴づけを持つ。応用として、KKR 全単射の区分線形な明示公式の導出、および箱玉系の一般解の構成をすることができる。更に周期的な場合に適用すると、多変数テータ関数の超離散類似を定義することにより、 $sl_2$  周期系に対する一般解を構成できる [13, 14, 19, 35, 39, 48]。我々の超離散テータ関数は通常のテータ関数と同様擬周期性を持っている。これらの公式は代数幾何学への応用が期待される。

## 3.1.4 結び目理論・低次元トポロジー

Jones, Witten による量子不変量の発見以降、結び目・3次元多様体の様々な不変量が提出されてきたが、これら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。本年度は量子不変量と  $A$  多項式との関係について主に研究し、その結果、ツイスト結び目の色つき Jones 多項式の極限から  $A$  多項式が得られること [6]、また、量子 dilog 関数を用いて定義された多様体上の分配関数から  $A$  多項式が得られることを明らかにした [7]。さらに、あるザイフェルト多様体の Witten 不変量の解析も詳細に行い、多様体の基本群および保型形式との関連性を明らかにした。[4]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Rei Inoue and Takao Yamazaki: Cohomological study on variants of the Mumford system, and integrability of the Noumi-Yamada system, *Comm. Math. Phys.*, **265**, pp 699 - 719 (2006).
- [2] Rei Inoue, Yukiko Konishi and Takao Yamazaki: Jacobian variety and integrable system — after Mumford, Beauville and Vanhaecke, *J. Geom. Phys.*, **57**, pp 815 - 831 (2007).
- [3] Rei Inoue and Yukiko Konishi: Multi-Hamiltonian structures on Beauville's integrable system and its variant, *SIGMA*, **3**, 007, 16 pages (2007).
- [4] K. Hikami: On the Quantum Invariant for the Spherical Seifert Manifold, *Commun. Math. Phys.* **268**, 285-319 (2006)

- [5] K. Hikami: Quantum Invariants, Modular Forms, and Lattice Points II, *J. Math. Phys.* **47**, 102301-32 pages (2006)
- [6] K. Hikami: Asymptotics of the colored Jones polynomial and the  $A$ -polynomial, *Nucl. Phys. B*, in press
- [7] K. Hikami: Generalized volume conjecture and the  $A$ -polynomials: the Neumann–Zagier potential function as a classical limit of partition function, *J. Geom. Phys.*, in press.
- [8] K. Hikami: Hecke type formula for unified Witten–Reshetikhin–Turaev invariant as higher order mock theta functions, *IMRN*, in press.
- [9] S. Watabe, T. Nikuni, Nicolai Nygaard, James E. Williams, and Charles W. Clark: Adiabatic Phase Diagram of an Ultracold Atomic Fermi Gas with a Feshbach Resonance, *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 76, No. 6, (2007) in press.
- [10] M. Wadati and T. Iida: BCS-BEC Crossover in One-Dimensional Integrable Model, *Phys. Lett. A*, **360**, 423–428 (2007).
- [11] A.Kuniba, M.Okado, R.Sakamoto, T.Takagi, Y.Yamada, Crystal interpretation of Kerov-Kirillov-Reshetikhin bijection, *Nuclear Physics*, B740, 299-327 (2006).
- [12] R.Sakamoto, Crystal interpretation of Kerov-Kirillov-Reshetikhin bijection II. Proof for sln case, *J. Algebraic Combinatorics*, in press.
- [13] A.Kuniba, R.Sakamoto, The Bethe ansatz in a periodic box-ball system and the ultradiscrete Riemann theta function, *Journal of Statistical Mechanics*, Institute of Physics, P09005, pp1-12, (2006).
- [14] A.Kuniba, R.Sakamoto, Combinatorial Bethe ansatz and ultradiscrete Riemann theta function with rational characteristics, *Lett. Math. Phys.*, in press.
- [15] A.Kuniba, R.Sakamoto, Y.Yamada, Tau functions in combinatorial Bethe ansatz, preprint.
- (会議抄録)
- [16] S. Watabe, T. Nikuni, Nicolai Nygaard, James E. Williams, and Charles W. Clark: Adiabatic Phase Diagram of a Degenerate Fermi Gas with a Feshbach Resonance, “International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2006)”, *Journal of Low Temperature Physics*, in press
- [17] T. Iida and M. Wadati: Exact Analysis of a One-dimensional Attractive  $\delta$ -Function Fermi Gas with Arbitrary Spin Polarization, “International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2006)”, *J. Low. Temp. Phys.*, in press.
- [18] R.Sakamoto, Kerov-Kirillov-Reshetikhin 全単射のクリスタルによる解釈と箱玉系, 第9回代数群と量子群の表現論研究会会議事録, pp75-103, (2007).
- [19] A.Kuniba, R.Sakamoto, 周期箱玉系と超離散リーマンテータ関数, *RIMS Kokyuroku*, in press.
- (学位論文)
- 博士論文
- [20] 飯田: Exact Analysis of One-Dimensional  $\delta$ -Function Gases at Zero Temperature.
- [21] 内山: Exact Analysis on Nonequilibrium Properties of One-Dimensional Stochastic Processes
- 修士論文
- [22] 黒崎: Matter-Wave Bright Solitons with a Finite Background in Spinor Condensates.
- [23] 渡部: Conversion Efficiencies of Feshbach Molecules with Equilibrium Theory
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [24] M.Wadati, Dark solitons in the  $F=1$  Bose-Einstein condensates, *Laser Physics 2006*, July 23-28, 2006, Lauzanne, Switzerland
- [25] M.Wadati, One-dimensional delta-function fermions with imbalanced spin populations, 21 COE international conference on “Perspectives in Nonlinear Physics”, November 20-22, 2006, Tokyo
- [26] M.Wadati, Japanese Pioneers in Nonlinear Sciences, 21 COE international conference on “Perspectives in Nonlinear Physics”, November 20-22, 2006, Tokyo
- [27] M.Wadati, Solitons in the  $F=1$  Bose-Einstein condensates, International conference on “Perspectives of Soliton Physics”, February 16-17, 2007, Tokyo
- 一般講演
- [28] T. Iida and M. Wadati: Exact Analysis of a One-dimensional Attractive  $\delta$ -Function Fermi Gas with Arbitrary Spin Polarization, “International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2006)”, August 1–6, 2006, Kyoto.
- [29] Shohei Watabe, Tetsuro Nikuni, Nicolai Nygaard, James E. Williams, Charles W. Clark: “Adiabatic phase diagram of degenerate Fermi gas with a Feshbach resonance” (同上)
- [30] R.Sakamoto, Jack symmetric functions and representations of the Virasoro algebra, (“Discrete Mathematics & Representation Theory”, Department of Mathematics, University of California Davis, USA, 6 Oct. 2006.)
- [31] T. Iida: Exact Solution of One-Dimensional Bose-Fermi Mixture, (COE21 QUESTS “Perspectives in Nonlinear Physics”, Univ. of Tokyo, 2006年11月)

- [32] K. Shigechi:  $A_k$  generalization of the  $O(1)$  loop model on a cylinder (同上)
- [33] T. Kurosaki: Matter-Wave Bright Solitons with a Finite Background in  $F = 1$  Spinor Bose-Einstein Condensates, (同上)
- [34] Shohei Watabe, Tetsuro Nikuni and James E. Williams: “Conversion efficiencies of heteronuclear Feshbach molecules” (同上)
- [35] R.Sakamoto, Crystal interpretation of Kerov-Kirillov-Reshetikhin bijection and N-soliton solution of the box-ball systems (同上)
- [36] T. Iida: One-Dimensional Delta-Function Fermions with Imbalanced Spin Populations (“Perspectives of Soliton Physics”, 2007 年 2 月)
- [37] K. Shigechi: Generalized Loop Models and Affine Hecke Algebras (同上)
- [38] T. Kurosaki: Propagation of General Bright Solitons in  $F = 1$  Spinor Condensates (同上)
- [39] R.Sakamoto, Crystal interpretation of Kerov-Kirillov-Reshetikhin bijection and N-soliton solution of the box-ball systems (同上)
- [40] Shohei Watabe, James E. Williams and Tetsuro Nikuni: “Conversion efficiency of heteronuclear Feshbach molecules” (“American Physical Society March Meeting 2007”, Denver, U.S.A., March 5-9, 2007)
- (国内会議)
- 招待講演
- [41] 井上 玲: Mumford system の仲間と拡張, 研究集会「代数群と量子群の表現論」, タナベ名古屋研修センター, 2006 年 5 月.
- [42] R.Sakamoto, Crystal interpretation of Kerov-Kirillov-Reshetikhin bijection, (同上)
- [43] 和達、非線形科学の発展、慶應義塾大学理工学部、6 月 21 日、2006 年
- [44] 樋上: 量子不変量と保型形式に関連した話題、日本数学会 2006 年度秋期総合分科会、大阪市立大学、2006 年 9 月.
- [45] 茂地: Combinatorial aspects of  $O(1)$ -loop models, (数理解析研究所 京都大学 2006 年 10 月)
- [46] R.Sakamoto, Tau functions for KKR map and box-ball system, (“Integrable Systems and Combinatorics”, Graduate School of Engineering Science, Osaka University, 21 Feb. 2007).
- 一般講演
- [47] 井上 玲, 小西 由紀子, 山崎 隆雄: Jacobian variety and integrable system — after Mumford, Beauville and Vanhaecke, 日本数学会 2006 年度秋期総合分科会, 大阪市立大学, 2006 年 9 月.
- [48] A.Kuniba, R.Sakamoto, T.Takagi, A.Takenouchi, Bethe ansatz in a periodic box-ball system and Riemann theta function (同上)
- [49] 飯田, 和達: 1 次元スピン-1/2 デルタ関数引カフェルミ気体 (日本物理学会秋季大会, 千葉大学, 2006 年 9 月)
- [50] 飯田, 和達: 1 次元スピン-1/2 デルタ関数斥カフェルミ気体 (日本物理学会春季大会, 鹿児島大学, 2007 年 3 月)
- [51] 飯田, 和達: 1 次元 Bose-Fermi 混合気体の厳密解 (同上)
- [52] 茂地、内山: 円柱状  $O(1)$  ループ模型の  $A$  型アフィンヘッケ代数による一般化 (同上)
- [53] 黒崎、和達:  $F = 1$  スピノル型 GP 方程式における一般ブライツソリトン解の逆散乱法による構成 (同上)
- [54] 渡部昌平, James E. Williams, 二国徹郎: 異種原子によるフェッシュバツハ分子の生成効率 (同上)
- [55] A.Kuniba, R.Sakamoto, Y.Yamada, Tau functions in combinatorial Bethe ansatz, ”日本数学会春季大会”, Saitama University, 30 Mar. 2007.
- (セミナー)
- [56] Rei Inoue: Integrability of the Mumford systems, and affine Jacobi varieties, 国立成功大学 (台湾), 2006 年 5 月.
- [57] 和達、Ultra-cold Bose gas in 1D and matter wave solitons, 慶應義塾大学理工学部数理科学科、2006 年 6 月
- [58] 井上 玲: Mumford 系の拡張について, 代数解析セミナー, 慶應義塾大学, 2006 年 6 月.
- [59] 井上 玲: Jacobi 多様体と可積分系, COE 数理科学特別セミナー, 慶應義塾大学, 2006 年 11 月.
- [60] 樋上: WRT invariant for Seifert manifolds and modular forms, 東京大学数理科学研究科トポロジーセミナー (2006 年 11 月)
- [61] Rei Inoue: The space of observables for classical integrable systems with algebra-geometric method, Statistisches Seminar, Bergische Universität Wuppertal(ドイツ), 2007 年 2 月.
- [62] R.Sakamoto, Crystal interpretation of Kerov-Kirillov-Reshetikhin bijection, ”東京無限可積分系セミナー”, Graduate School of Mathematical Science, University of Tokyo, Komaba, 2006 年 4 月
- [63] R.Sakamoto, Jack symmetric functions and representations of the Virasoro algebra, Gunma National College of Technology, 20 Oct. 2006.
- [64] R.Sakamoto, Crystal interpretation of Kerov-Kirillov-Reshetikhin bijection, Department of Mathematics, Tsukuba University, 16 Nov. 2006.
- [65] R.Sakamoto: Kerov-Kirillov-Reshetikhin bijection and box-ball system, Department of Mathematics, Kobe University, 19 Mar. 2007.

## 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、ゲージ対称性が自発的に破れる。一方、面白い物質構造から面白い物性物理をさぐったり、物質設計を行うことがもう一本の柱となる。

### 3.2.1 超伝導

非連結フェルミ面における電子間斥力からの超伝導

高温超伝導銅酸化物の模型と考えられる斥力 Hubbard 模型は、スピン揺らぎ媒介により  $O(0.01t)$  の転移温度  $T_C$  ( $t \sim$  バンド幅  $\sim 10000$  K) を持つ超伝導をもつと考えられ、銅酸化物の  $T_C \sim 100$  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。これを、フェルミ面形状やバンド分散を上手くとることにより克服する可能性について様々な検討を行った [10, 11, 12, 24, 42]。また、高島はこの観点も含めて解析するために、汎関数線り込み群法を検討している。

長距離斥力からの超伝導

近年、有機導体やルテニウム酸化物においてスピン・トリプレット超伝導（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。Hubbard (on-site 斥力) 模型においてはスピン揺らぎが支配的であり、そのためトリプレット超伝導は一般的に実現しにくい、という有田・青木の理論がある。我々はこの観点から、隣接 site 間斥力（これは電荷揺らぎを増強する）を取り入れた拡張 Hubbard 模型の超伝導を議論してきた。一方、長距離クーロン相互作用をする電子気体では電荷揺らぎが支配的であり、希薄な場合に超伝導になるという理論的予測がある。そこで、大成（現在名大）、有田（現在理研）、黒木（電通大）、青木は、拡張 Hubbard 模型の斥力を  $1/r$  クーロン型に近づけたとき、電子気体での超伝導にどのようにつながるかを調べた [1]。

多軌道系における超伝導

遷移金属酸化物のような強相関電子系を考えると、スピン、電荷とともに重要になり得るのが軌道の自由度である。興味は多軌道に特有な交換相互作用（フント結合）が磁性、超伝導に与える効果であるが、モット転移を記述できる利点をもつ動的平均場 (DMFT) + 量子モンテカルロ (QMC) 法を多軌道模型に適用すると、フント結合のために、負符号問

題や、演算子の非可換性のため  $SU(2)$  対称性を保てない、等の困難があった。そこで、酒井、有田、青木は、摂動展開を出発点とする多軌道 DMFT を提案していた。しかし、負符号をさらに軽減したり、現実重要な 3 軌道系を扱うためには工夫が必要である。そこで、酒井、有田、Held (Max-Planck 研)、青木は、摂動展開アルゴリズムと Trotter 分解を組み合わせた新しい QMC 法を開発し、DMFT を実行した [2, 27, 32]。これを軌道選択型 Mott 転移の可能性が議論されている 3 軌道系  $Sr_2RuO_4$  に適用すると、準粒子状態密度及び有効質量が実験と良く一致することを示した (図 3.2.2)。中間結合領域では近藤ピークが立ち、これは  $SU(2)$  対称性を保ったとき初めて現われるので、LDA+DMFT 法においても重要である。

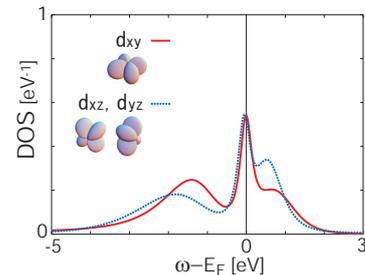


図 3.2.2: Quasiparticle density of states for  $Sr_2RuO_4$  obtained with DMFT for a three-orbital, rotationally invariant Hamiltonian [2].

さらに酒井、有田、青木 [38] は、この方法を単立方及び面心立方格子上の 2 軌道 Hubbard 模型に適用して、遷移金属（典型的に Ni）の遍歴強磁性の起源を探った。その結果、従来の見解とは異なり格子構造とフント結合の両方が金属強磁性に本質的であることを示した。これは、T 行列近似などを超えた、金属強磁性の理解への新しい知見である。

酒井は以上の成果を博士論文にまとめた [48]。

電子・電子斥力と電子・フォノン相互作用が共存する系での超伝導

強い電子・フォノン相互作用が強い電子・電子相互作用と共存する系は、様々な相の競合が期待され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、Hubbard-Holstein 模型が調べられてきた。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もたれるが、電子間相互作用 ( $U$ )、フォノン・エネルギー ( $\hbar\omega$ )、電子フォノン相互作用 ( $\lambda$ ) の三者が同程度の場合を扱うのは、adiabatic 近似などの極限操作が許されず、困難であった。そこで手塚、有田、青木は、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線り込み群 (DMRG) を用いて解析した。( $U, \hbar\omega, \lambda$ ) のパラメータ空間において、SDW 相（電子・電子由来）と

CDW 相 (電子・フォノン由来) の中間に興味もたれるが、我々は電子構造において、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ていた [28]。本年度は、この相図を詳しく見るために、手塚は先ず DMRG における新しい初期化法を開発し [3, 29, 39]、得られるエネルギーが著しく改善され、Hubbard 模型のような電子模型にも適用できることを示した。これを用いて手塚、有田、青木は、相図を実際求めた (図 3.2.3) [15, 28, 43]。

手塚は以上の成果を博士論文にまとめた [47]。

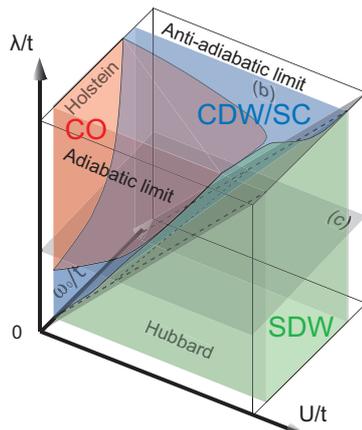


図 3.2.3: Phase diagram for the Holstein-Hubbard model that has both electron-electron ( $U$ ) and electron-phonon ( $\lambda$ ) interactions, with  $\omega$  the phonon frequency and  $t$  the electron hopping [47].

### 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の物質設計

非磁性元素からなる物質で強磁性体を作れるかという問題は、電子相関の基本的なチャレンジといえる。平坦なバンドをもつ格子の上の斥力 Hubbard 模型においては、或る条件が満たされた場合強磁性が実現することが Mielke や田崎によって厳密に証明されている。有田、諏訪 (日立基礎研)、黒木、青木は、この条件を満たさせ易いのは奇数員環からなる有機高分子であろうという観点から、局所スピン密度第一原理計算と、Hubbard 模型計算の両面建てで、新有機物 (五員環高分子 polyaminotriazole) および関連物質が合成できれば平坦バンドが実現し、適当な電子密度において強磁性が実現する可能性を指摘していた。この物質は本学化学教室の西原研究室において、現在オリゴマーまでの合成に成功し、物性を測定中である [40, 41]。

### 3.2.3 炭素系の物性

#### グラフェン (単原子層グラファイト) の物理

最近、原子一層のグラファイト (グラフェン) における特異な整数量子ホール効果が実験的に観測され、興味を集めている。この蜂の巣格子においては、バンド分散が質量ゼロの Dirac 粒子と同じであるために、様々な興味深い物理現象が期待される。初貝 (本学工、現在筑波大)、福井 (茨城大)、青木は、グラフェン量子ホール効果のトポロジカルな面に注目し、以下を示した [4, 13, 16, 33]: (a) Zero-mass Dirac 粒子は、蜂の巣格子に特有ではなく、diagonal transfer  $t'$  を導入し正方格子  $\leftrightarrow$  蜂の巣格子  $\leftrightarrow$  フラックス格子の間を連続移行させても残り、特異量子ホール効果は robust に存在し続ける。(b) 蜂の巣格子で Dirac 的な分散は、Brillouin 帯 corner 近傍のみに有るが、特異量子ホール効果 ( $\sigma_{xy} = (2N + 1)(e^2/h)$ ,  $N$ : 整数) は有限のエネルギー領域 (van Hove 特異点) まで続く。(c) 一般に、量子ホール効果においてバルク・トポロジカル量子数がエッジ・トポロジカル量子数と一致するためにバルク、エッジどちらでも等しいホール伝導度となることが示されているが、蜂の巣格子の特異量子ホール効果においても、この「バルク-エッジ対応」が成立している (図 3.2.4)。(d) 以上の全ての robustness は、量子ホール効果のトポロジカル量子数としての性質から理解される。

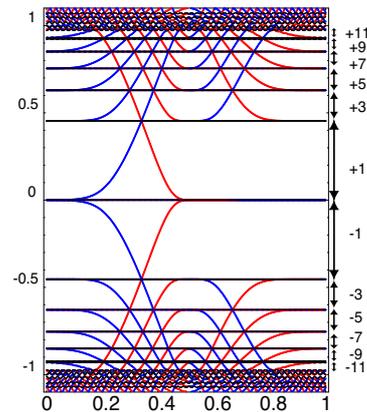


図 3.2.4: Energy spectrum against the wavenumber (horizontal axis). We can identify the number of the edge states, which are curves connecting the Landau levels (horizontal lines), with the quantum Hall number from a topological argument [4].

また江澤は、グラフェンにおける量子ホール効果を、2層グラフェンの場合も含めて解析し、特異量子ホール効果の物理的起源に対して、磁場中の zero-mass Dirac 方程式における超対称性の観点からの解釈を与えた [49]。

### カーボン ナノチューブにおける共鳴伝導と軌道磁性

最近、単層カーボン ナノチューブ (CN) に電流を流すと軌道磁気モーメントが発生することが、磁場中のバンドの変化から間接的に観測された。辻、高城 (現在物性研) 青木は、CN に実際に電極を接続して有限のバイアス電圧を課したときの、非平衡状態での電流を非平衡グリーン関数を用いて初めて計算した [5, 14, 30, 34, 44]。その結果、CN の円周方向に巨大なループ電流が流れ (図 3.2.5、巻頭カラー口絵も参照)、それに伴い大きな軌道磁性が生じることを見出した。物理的には、一般に分子に電流を流した際に縮退軌道に共鳴すると分子内に大きなループ電流が流れることが中西・塚田により示されているが、CN のバンド構造においては (円周の時計周りと反時計周りの伝播に対応した) 2 重縮退があり、この準位と共鳴した場合に (一種の Fano 効果により) 大きなループ電流および軌道磁性が発生する。

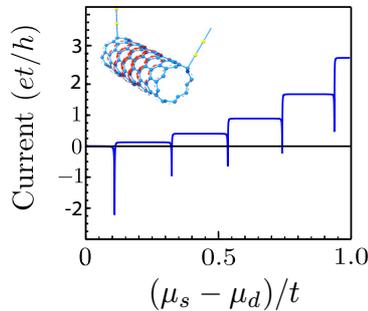


図 3.2.5: Current flowing around the tube vs bias voltage in a nanotube attached to electrodes). [5]

### カーボン ナノリボンの電子構造

リボン状 (有限幅) のグラフェン (カーボン ナノリボン) にも興味もたれているが、江澤は、カーボン ナノリボンの構造を分類した上で、それらの電子状態を系統的に調べ、半導体的な場合と半金属 (zero gap) の場合がどのように生じるか、特に zero gap が、リボン幅と構造を特徴付けるパラメータ空間で一定のパターンをもって現われることを見出した [6, 7, 17, 31]。

江澤はこの成果を、上記のグラフェンの仕事とともに修士論文にまとめた [49]。

### 3.2.4 強相関電子系における非平衡・非線形現象

モット絶縁体のような強相関電子系における非平衡・非線形の現象は、開拓の余地の大きい興味深い問題である。強電場中ではモット絶縁体は絶縁破壊

を起こすが、岡、有田、青木は、そこでの多体状態の間の非断熱的量子遷移に対する描像を与えた [25]。

### 強レーザー光下での強相関電子系の振る舞い

ポンブプローブ分光法などの進歩により、光によって励起された電子系の高速度現象に対する興味が高まっている。このため、岡等は光で強励起された電子の初期過程として重要なソリトン、ダークソリトンの衝突過程を時間依存 DMRG を用いて解析した [35]。特に、ソリトン・ダークソリトン衝突の場合はより大きな確率で消滅することが分かった。これは一次元導体における主要な散逸機構が電荷からスピン系へのエネルギーの拡散であることを示唆している。

### 強電場下の電荷秩序系での非平衡過程

より大域的に強相関電子系の励起状態の時間発展を理解するために、岡は今村 (生産研) とともに、熱浴と接触した sine-Gordon モデルの電場下での振舞いを調べた [36]。その結果、I-V 特性が冪関数になり、この系の電流揺らぎの時間依存性から、非平衡統計力学系において知られている KPZ ユニバーサリティに属することが確認された。この対応の背景には電場下でのキルク・アンチキルクの生成・消滅過程がある。岡は整合電荷秩序系の非線形伝導の理論にも着手した [37]。

### 3.2.5 分数量子ホール効果

分数量子ホール効果は、クーロン斥力相互作用する電子を 2 次元に閉じこめ強磁場を加えた場合に発現し、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、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、特異な「強相関極限」にあるため多彩な量子相転移が起きる。青木研では、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、本年度初貝、福井、青木は、上記のグラフェンの整数量子ホール効果の研究の発展として、これに電子相関を入れた場合の量子相の研究に着手した。

### 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  $\sim 80 \text{ \AA}$ ) 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)、青木等は提案してきた。最近、樽茶グループ (本学工) の実験において

励起スペクトルの詳細が観測され始めた。Maksym、青木は、西、羽田野、樽茶、Austing(カナダ National Research Council)、Kouwenhoven( Delft 大 )の実験家との共同研究として、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が実験結果と非常に良く一致することを示した。[8, 18]

この「電子分子」では、量子数によっては、複数の電子配置が縮退することが群論的に示されるが、Maksym、有田、青木は、このような状態を、有限 Hubbard 模型にマップして解析し、複数の多体状態の量子力学的重ね合わせであることを示した [19]。

### 3.2.6 ヘテロ界面の電子物性

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

#### 金属/有機物界面における金属誘起状態

半導体/金属界面では、界面に発生する金属誘起ギャップ状態 (MIGS) が生じることが知られているが、最近、実験(木口(現在北大)等)と理論(有田等)の共同研究により絶縁体/金属界面にも存在することが示されていた。木口等はさらに、有機絶縁体/金属界面(アルカン/銅)における MIGS の観測に成功し、有田、谷田(富士通)、青木はこれに対する第一原理計算を行って実験結果を再現すると同時に、基板を強磁性金属(Ni)にすれば有機物をスピン偏極させ得ることを理論的に予言した [20, 26]。

#### 極性面における金属・絶縁体転移および磁性

極性面(イオン結晶で、陰(又は陽)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 数層で金属的極性界面が実現し、実験と整合することを示した。界面での金属・絶縁体転移や界面強磁性の可能性も議論した [21]。

### 3.2.7 周期的ナノ構造の電子状態

#### アルカリ金属吸蔵ゼオライト

ゼオライトは、(ケージと呼ばれる)隙間の多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

イトでの強磁性が約 10 年前に実験的に発見されたが、その発現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”)の並びのような単純な電子構造と考えて良いか、(ii) 強磁性等の多体効果が期待できるほど強相関電子系か、である。青木、有田は、野末等とともに、この系の第一原理計算を初めて行い、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 の集合と見なす描像(図 3.2.6)を支持すること、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強磁性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した [22]。

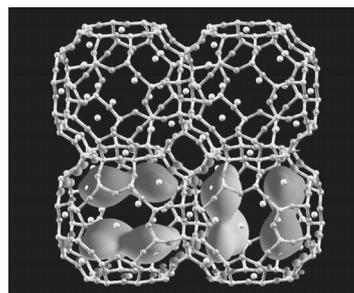


図 3.2.6: Crystal structure (ball-and-stick model) and a typical “superatom” wavefunction depicted with contour surfaces in K-doped zeolite.[22].

#### 周期的極小曲面上の電子

青木等は、 $C_{60}$  ゼオライトのような系を、周期的極小曲面上の電子の量子力学として考えてきた。この理論的枠組みにベクトル・ポテンシャルを加えることにより、本年度は、森本、岡、青木は、螺旋面を取り上げ、外部磁場を加えた場合に、特徴的な量子ホール効果類似の効果が起きることを示した。

### 3.2.8 その他

桂(現在本学工)と青木は、超対称性(SUSY)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 [9]。

総合報告としては、青木は、電子相関における物質設計 [42]、強相関系における斥力からの異方的ペアリング超伝導 [10, 11, 24]、強相関系におけるスピン・トリプレット超伝導 [12]、金属/有機物ヘテロ界面の電子状態 [26, 46]、強相関系に対する大規模数値計算 [数値的方法としては FLEX(揺らぎ交換近似) DMFT、DCA(DMFTのクラスター近似への拡張) DMRG][45]、物理学における位相 [23]、等のテーマで講演、解説を行った。

助手の有田の理化学研究所転出(2006年4月)に伴い、岡隆史が助手に着任している。青木研究室の森本高裕(学部4年、現在M1)に2006年度理学部奨励賞、酒井志朗(D3、現在本学工PD)に理学系研究科奨励賞が授与された。

<報文>

(原著論文)

- [1] S. Onari, R. Arita, K. Kuroki, H. Aoki: Superconductivity from long-range interaction — a crossover between the electron gas and the lattice model, *Phys. Rev. B* **73**, 014526 (2006).
  - [2] Shiro Sakai, Ryotaro Arita, Karsten Held and Hideo Aoki: Quantum Monte Carlo study for multi-orbital systems with preserved spin and orbital rotational symmetries, *Phys. Rev. B* **74**, 155102 (2006).
  - [3] M. Tezuka: An improved initialization procedure for the density-matrix renormalization group, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **76**, 053001 (2007).
  - [4] Yasuhiro Hatsugai, Takahiro Fukui and Hideo Aoki: Topological analysis of the quantum Hall effect in graphene — Dirac-Fermi transition across van Hove singularities and the edge vs bulk quantum numbers, *Phys. Rev. B* **74**, 205414 (2006).
  - [5] Naoto Tsuji, Shigehiro Takajo and Hideo Aoki: Large orbital magnetic moments in carbon nanotubes generated by resonant transport, *Phys. Rev. B* **75**, 153406 (2007).
  - [6] M. Ezawa: Peculiar width dependence of the electronic properties of carbon nanoribbons, *Phys. Rev. B* **73**, 045432 (2006).
  - [7] M. Ezawa: Peculiar band gap structure of graphene nanoribbons, *Physica status solidi (c)* **4**, 489 (2007).
  - [8] Y. Nishi, P.A. Maksym, D.G. Austing, T. Hatano, L.P. Kouwenhoven, H. Aoki and S. Tarucha: Intermediate low spin states in a few-electron quantum dot in the  $\nu \leq 1$  regime, *Phys. Rev. B* **74**, 033306 (2006).
  - [9] Hoshio Katsura and Hideo Aoki: Exact supersymmetry in the relativistic hydrogen atom in general dimensions — supercharge and the generalized Johnson-Lippmann operator, *J. Math. Phys.* **47**, 032301 (2006).
- (国際会議録(招待講演))
- [10] Hideo Aoki: Superconductivity in highly correlated systems, in H. Akai, A. Hosaka, H. Toki and F. B. Malik (eds): *Condensed Matter Theories* Vol. **21** (Nova Science, 2007), Chapter 14.
  - [11] Hideo Aoki: Fermiology and interaction in unconventional superconductors — triplet versus singlet pairs, *Physica C* **437-438**, 11-16 (2006).

- [12] Hideo Aoki: Triplet superconductivity — spin vs charge fluctuations and fermiology, *Physica B* **374-375**, 229 (2006).
- [13] Hideo Aoki, Takahiro Fukui and Yasuhiro Hatsugai: Topological aspects of quantum Hall effect in graphene, *Int. J. Modern Phys. B* **21**, 1133 (2007).
- [14] Naoto Tsuji, Shigehiro Takajo and Hideo Aoki: Large magnetic moments generated from loop currents in carbon nanotube attached to electrodes a theoretical picture, *Int. J. Modern Phys. B* **21**, 1198 (2007).

(国際会議録(一般発表))

- [15] Masaki Tezuka, Ryotaro Arita and Hideo Aoki: Density-matrix renormalization group study of phase diagram in systems with strong electron-electron and electron-phonon interactions, *AIP Conf. Proc.* **850**, 551 (2006).
- [16] Y. Hatsugai, T. Fukui and H. Aoki: Topological aspects of graphene — Dirac fermions and the bulk-edge correspondence in magnetic fields, *Proc. Int. Conf. on Graphene*, Dresden, 2006, in press.
- [17] M. Ezawa: Electronic properties of carbon nanoribbons and peculiar width dependence, *Proc. Int. Conf. on Physics of Semiconductors*, Vienna 24-28 July 2006.
- [18] P. A. Maksym and H. Aoki: Electron-molecules in quantum dots — Transitions between electron-molecule states in electrostatic quantum dots, *Proc. Int. Conf. on Quantum Dots*, Chamonix, 1-6 May 2006 [*Phys. stat. sol. (c)* **3**, 3798 (2006)].
- [19] Peter A. Maksym, Ryotaro Arita and Hideo Aoki: Spin configuration in the electron molecule in few-electron quantum dots in strong magnetic fields — superposition of multiple configurations, *Int. J. Modern Phys. B* **21**, 1643 (2007).
- [20] M. Kiguchi, G. Yoshikawa, K. Saiki, R. Arita and H. Aoki: Metal induced gap states at tetratetracontane/Cu interface, *Proc. Int. Conf. on Formation of Semiconductor Interfaces [Journal de Phys. IV]* **132**, 199 (2006).

(国内雑誌)

- [21] 木口 学、有田亮太郎、斉木幸一朗、青木秀夫：イオン結晶の極性表面は可能か？ 分子線エビタキシーによる MgO 極性表面の実現と第一原理電子状態計算、*固体物理* **41**, 13 (2006)。
- [22] 有田亮太郎、青木秀夫、野末泰夫：アルカリ金属を吸蔵したゼオライトの電子状態 — 「超原子」結晶、*日本物理学会誌*、出版予定。
- [23] 青木秀夫：物理学における位相、*数理科学* 2007年6月号、p.5。

<学術発表>

(国際会議)

招待講演 (会議録掲載以外)

- [24] Hideo Aoki: Strongly correlated electrons (COE symposium *Physics of strongly correlated systems — from neutron stars to cold atoms*, Tokyo, 19 Jan 2007).
- [25] Takashi Oka: Dielectric breakdown of a Mott insulator — correlated system out of equilibrium (*Int. Symposium on Anomalous Quantum Materials (ISAQM)*, Okinawa, 23-27 June 2006).
- [26] Hideo Aoki: Organic-metal interfaces as a playground for manipulating electron correlation effects — a theoretical view (*Int. Symposium on Theories of Organic/Metal Interfaces*, Osaka, 16 Jan 2007).

一般講演 (会議録掲載以外)

- [27] Shiro Sakai, Ryotaro Arita, Karsten Held and Hideo Aoki: Quantum Monte Carlo study of the multiorbital Hubbard model with spin and orbital rotational symmetries (*ISAQM2006*, Okinawa, 23-27 June 2006).
- [28] Masaki Tezuka, Ryotaro Arita and Hideo Aoki: Can the electron-electron and electron-phonon interactions work cooperatively for superconductivity? (*ISAQM2006*, Okinawa, 23-27 June 2006).
- [29] Masaki Tezuka: A new warm-up procedure for the density-matrix renormalization group (APS March Meeting, Denver, March 2007).
- [30] Naoto Tsuji, Shigehiro Takajo and Hideo Aoki: Nonequilibrium giant loop currents and orbital magnetism in carbon nanotubes (APS March Meeting, Denver, March 2007).
- [31] M. Ezawa: Peculiar band gap structure of carbon nanoribbons (*14th Int. Conf. on Superlattices, Nano-Structures and Nano-Devices*, Istanbul, July-Aug. 2006).

(国内会議一般発表)

- [32] 酒井志朗, 有田亮太郎, Karsten Held, 青木秀夫: Study of ruthenates with the dynamical mean-field theory preserving spin rotational symmetry (日本物理学会, 千葉, 23-26 Sept 2006).
- [33] 初貝安弘, 福井隆裕, 青木秀夫: グラフェン量子ホール効果のトポロジカル量子数 — ディラック・フェルミ・クロスオーバーとエッジ状態 (日本物理学会, 千葉, 23-26 Sept 2006).
- [34] 辻 直人, 高城重宏, 青木秀夫: カーボンナノチューブにおける共鳴伝導と軌道磁性 (日本物理学会, 千葉, 23-26 Sept 2006).
- [35] 岡 隆史, 青木秀夫: 一次元強相関電子系における電子・正孔強励起の衝突・消滅過程 (日本物理学会, 千葉, 23-26 Sept 2006).
- [36] 岡 隆史, 今村卓史: 一次元整合 CDW の非線形伝導と KPZ ユニバーサリティー (日本物理学会, 千葉, 23-26 Sept 2006).

- [37] 岡 隆史: 整合電荷秩序系の非線形伝導の理論 (日本物理学会, 千葉, 23-26 Sept 2006).
- [38] 酒井志朗, 有田亮太郎, 青木秀夫: Effects of lattice structure and Hund's coupling on metallic ferromagnetism: study with the dynamical mean-field theory (日本物理学会, 鹿児島, 18-21 March 2007).
- [39] 手塚真樹: 密度行列繰り込み群 (DMRG) の高速な初期化方法の提案 (日本物理学会, 鹿児島, 18-21 March 2007).
- [40] 圓谷志郎, 池田進, 浜田剛志, 大島紀一, 山野井慶徳, 西原 寛, 青木秀夫, 有田亮太郎, 諏訪雄二, 黒木和彦, 齋木幸一朗: ジメチルアミノピロロールオリゴマー薄膜の構造および電子状態 (日本物理学会, 鹿児島, 18-21 March 2007).
- [41] 大嶋紀一, 浜田剛志, 長谷川雄大, 山野井慶徳, 西原 寛, 有田亮太郎, 諏訪雄二, 黒木和彦, 青木秀夫: 平坦バンド強磁性体として分子設計されたオリゴ [1-(N,N-ジメチルアミノ)ピロロール] の電気化学的・磁気的性質 (日本化学会, 春の学会, 2007).

(セミナー・研究会)

- [42] 青木秀夫: 電子相関における物質設計 (東工大理学部化学教室談話会, 12 Oct. 2006).
- [43] 手塚真樹, 有田亮太郎, 青木秀夫: 電子間斥力と電子・フォノン相互作用共存系の相図と超伝導 (「有機・無機ヘテロ界面 - 新奇構造と物性」ワークショップ, 東大, 6 Mar 2007).
- [44] 辻 直人, 高城重宏, 青木秀夫: カーボンナノチューブにおける巨大ループ電流の理論 - 分子ソレノイド (「有機・無機ヘテロ界面 - 新奇構造と物性」ワークショップ, 東大, 6 Mar 2007).
- [45] 青木秀夫: 強相関電子系に対する大規模数値計算 - FLEX, DMFT, DCA, DMRG (物性研短期研究会「計算物性科学におけるスーパーコンピュータ利用の現状と展望」, 11 Dec 2006).
- [46] 青木秀夫: 有機・無機ヘテロ系の物質設計と理論的展望 (「有機・無機ヘテロ界面 - 新奇構造と物性」ワークショップ, 東大, 6 Mar 2007).

(学位論文)

- [47] Masaki Tezuka: Superconductivity in the coexistence of electron-electron and electron-phonon interactions (博士論文, 2006年12月).
- [48] Shiro Sakai: Theoretical study of multi-orbital correlated electron systems with Hund's coupling (博士論文, 2006年12月).
- [49] Motohiko Ezawa: Electronic properties of graphene related materials (修士論文, 2007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、相互作用が競合するフラストート系での遅い緩和現象と量子アニーリング、スピנקロスオーバーを示す系でのエネルギー構造や運動、量子固体などいろいろな構造を持つ量子系での新奇な量子状態、エネルギー構造、さらに変動する外場のもとでのダイナミクス、量子カオスの問題などを研究した。

### 3.3.1 スピנקロスオーバー錯体における協力現象の研究

従来、相転移の研究は局在磁性の相転移の問題として、格子点の上に大きさの決まったスピンがある場合を中心に研究が進められてきた。しかし、近年注目を集めている光による状態スイッチ現象で中心的な役割をするスピנקロスオーバーと呼ばれる現象では、スピンの大きさ自身がハイスピン(HS)と呼ばれる大きなスピンを持つ状態からロースピン(LS)と呼ばれる小さなスピンを持つ状態へ圧力、磁場、温度などいろいろな外部パラメータによって変化する。このような系での相転移は通常の磁性体でない新しい協力現象を示し、たいへん興味深いものである。

通常、高温でHS状態、低温でLS状態となり、光スイッチ現象が調べられる低温ではHS状態は熱力学的には不安定であると考えられてきた。低温で光によって励起されたHS状態(LIESST)は、分子自身もつマイクロな準安定性で支えられると考えられてきた。しかし我々は、これまで熱力学的にもHS状態が準安定になることがあることを見だし、その機構の理論的構造を明らかにしてきた。小西、所はこの機構が、スピנקロスオーバー相転移に加えて光磁性相転移を示すプルシャンブルー類似体でも成立することを明らかにし、2つの相転移の相乗効果、相転移への磁場効果などを明らかにした。また、分子レベルの準安定状態と熱力学的な準安定状態の違いを表す現象として緩和現象の初期状態依存性を明らかにした。[8, 13, 25, 28, 34, 52] 熱力学的な準安定状態の場合、HSからLSへの緩和が非単調になりうることを示し(図3.3.7)、対応する実験を提案している。所は、対応する物質であるRbFeからなるプルシャンブルー類似体でスピン状態の温度変化を詳しく調べ、Feベースの錯体の中で世界最大のヒステリシスループをもつ物質を発見し、さらにそこで低温に準安定状態があることを発見した。[3, 5, 27, 38, 39, 48, 49, 51] この研究は、化学教室の大越研との共同研究である。また、スピン状態と秩序と磁性相転移の関係についても研究を進めた。[6, 9, 14]

低温の平衡状態であるLS状態から、光によって励起する過程あるいはその状態からの緩和現象は熱平衡状態の理論では記述できず、動的な過程を記述する非平衡統計力学的な方法が必要となる。そこではやはり分子レベルの準安定状態と熱力学的な準安定状態の相乗効果が重要な役割をする。従来、多く

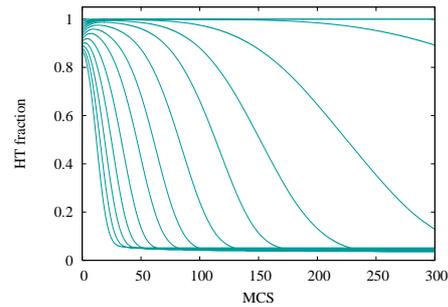


図 3.3.7: 熱力学的準安定状態がある場合のいろいろな初期値からの秩序変数の緩和

の理論が提案され現象が解析されてきているが、我々は個々の分子のエネルギー構造を保ちつつ、分子間の相互作用を取り入れた解析手法を導入し、動的過程で現れる協力現象、動的相転移現象を調べた。[38]

スピנקロスオーバー相転移の相互作用は従来の相転移でよく調べられたイジングスピン系の短距離相互作用が用いられてきたが、スピン状態に応じた分子の体積依存に起因する弾性エネルギーの効果からくる新しいタイプの相互作用の効果を調べるため、スピンを格子に束縛しない新しいタイプの分子動力学[11, 67, 37] およびモンテカルロ法[66]を開発し、スピנקロスオーバー相転移の圧力依存性などを明らかにしてきている。

### 3.3.2 相互作用間の競合がある系での遅い緩和現象

相互作用が不均一な系では状態がエネルギーの谷間に捕まり、秩序形成が非常に遅くなることが知られている。特に、スピングラスやランダム強磁性体などでの秩序相の緩和現象は詳しく調べられてきた。しかし、相互作用間の競合がある系では、たとえエネルギー的なバリアーが無くても非常に遅い緩和現象が存在することが明らかになってきた。田中は状態密度に大きな偏りがあるためエントロピー的な原因で系の秩序形成が非常に遅くなることを相互作用間の競合がある飾りボンド系で発見し、その機構を明らかにしてきた。[12, 24, 29, 50]

#### 巨視的に縮退した状態の中での緩和現象

エントロピーに起因する遅い緩和は、相互作用間の競合のため基底状態に巨視的な縮退を持つ系でも起こる。その典型的な例であるかごめ格子反強磁性体では、巨視的な縮退のため通常有限温度では相転移を示さない。しかし、スピが一軸的な異方性をもつイジング的ハイゼンベルグかごめ格子反強磁性体では巨視的な縮退の中に磁気的な構造が現れその対

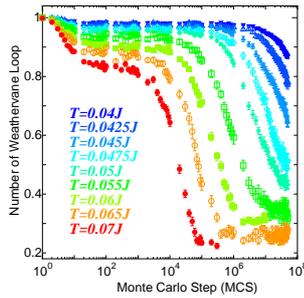


図 3.3.8: イジング的ハイゼンベルグかごめ反強磁性体の異常強磁性相における風見鶏ループの数の緩和

称性の破れによって相転移が有限温度で起こることが知られている。田中は、そのような場合、秩序相でも巨視的な縮退が残り、その中でエントロピー的に有利な状態が選択される過程が存在することを発見し、秩序相の中の巨視的な縮退の指標の一つである風見鶏ループの数をを用いてその過程を定量的に調べ、その特徴を明らかにした。[15, 23, 29, 30, 58, 65] (図 3.3.8)。

#### 急激な温度変化に伴う緩和現象

相互作用の競合のため異なる秩序形態が存在する場合、温度を急激に変化させると状態は新しい温度の平衡状態へ直接緩和せず、しばしば非単調な変化を示す。このような現象を系の時間発展演算子の固有値問題として捉え、その機構を明らかにした。

### 3.3.3 新奇な量子状態の研究

複雑な相互作用をもつ量子状態は、系のパラメータによって異なる巨視的な状態を示す。この現象は量子相転移と呼ばれ詳しく調べられてきている。典型的な例としての横磁場イジングモデルでは、量子揺らぎとしての横磁場大きさに伴って秩序・無秩序相転移を示す。臨界横磁場のスピンの大きさ  $S$  依存性や掃引磁場のもとで示す動的磁化過程についても研究を進めている。[20, 68, 57]

#### 量子固体

量子系の特徴である超流動や超伝導などの非対角長距離秩序と、固相形成に対応する対角長距離秩序の共存(超固体状態)は興味深い問題である。最近、ヘリウム 4 の超固体性を示唆する実験が報告され、特に注目されるようになってきている。このような超固体の存在条件に関し、山本は相互作用の競合の効果、一つのサイトに複数個の粒子が入ることのできるソフトコア効果、系の相互作用が空間的に不均一である効果などに

ついて調べた。特に、ソフトコアの場合、固体状態における粒子の流動形態に 2 つパターンがあることを見だし、それに応じて超流動成分が変化することを明らかにした。また従来は 2 次元系を中心に研究が進められてきたが、3 次元立方格子上でも超固体状態が存在することを確認した。[2, 26, 35, 41, 45, 54, 59, 64]

#### スパイラル構造を持つ磁性体での電気伝導

一次元スピン系で、フラストレーションやチャロチンスキー・守谷相互作用がある場合、スパイラルな磁気構造が現れることが知られている。田中は、そのような系で電子の運動を考えると、スピン軌道相互作用のため電子の運動に影響が現れ、特にスパイラルの周期が格子と非整合の場合局在現象が現れることを発見した [10, 32, 56]。

#### 外場によるエネルギーギャップ操作

量子状態を外部から操作する場合、異なる状態間の擬交差エネルギーギャップが重要な役割をする。ミクロな磁性クラスターでは横磁場によって擬交差エネルギーギャップの有無を制御することができるが、肘井は、その機構をスピンのパリティの観点から考察し、二次の異方性の場合のギャップ消失の機構を明らかにした。さらに、振動的な磁場をかけた場合にも実効的なエネルギー準位が同様な振る舞いをすることをフロケ演算子の固有値の観点から考察した [47]。

### 3.3.4 量子ダイナミックスの解明と制御

量子力学のコヒーレントな運動は、古典的にはないいろいろな特徴を備えており、その積極的制御は新しい情報操作(量子情報)において重要な役割をする。われわれはこれまで、動的な外場に対する量子力学的応答をミクロな立場から研究し、離散準位系の状態変化における Landau-Zener 理論の役割、またそこでの散逸効果などを調べてきた。[21, 22, 36, 39, 53, 58, 69] 量子ダイナミックスの機構、制御に関する統一的な理論的基礎付けを進めるため、JST のクレストプロジェクトとして「量子多体協力現象の解明と制御」を進めている。[60] また、量子力学における個別事象の観測に関する研究を進めている。[4, 7]

#### ドメイン壁によるスピン波の散乱

イジング異方的な一次元量子スピン系では境界条件を反平行にとると有限の幅をもつドメイン壁が現れることが知られている。このようなドメイン壁が動的に安定なこと、また、そこにスピン波を入射した場合の様子をシュレディンガー方程式を直接解く

ことで調べた。スピン波の縦波はドメイン壁を越えて伝搬するが、横波はほぼ完全に反射されることが明らかになった。この研究は、オランダのグローニンゲン大学のドラーツ博士のグループとの共同研究である。[2]

#### 相互作用間の競合がある系での量子アニーリング

上で述べた相互作用間の競合があり遅い緩和を示す系で真の基底状態を見つけることは、高温の状態から温度を徐々に下げていく従来の温度アニーリングでは困難である。そこで、田中は量子力学的な効果によって基底状態を探索する量子アニーリングの方法を適用することで、エントロピー起源の遅い緩和がある場合にも有効に基底状態を見いだすことができることを明らかにした [12]。また、田中と平野は系のエネルギー準位を調べ量子アニーリングのプロセスを量子力学の断熱定理の観点から明らかにした。[31]

#### ポテンシャルによる粒子捕捉、運搬の機構

レーザー冷却したアトム系の光格子や超音波などで周期的なポテンシャルを課した半導体などポテンシャル井戸にトラップした粒子を、ポテンシャル井戸を運動させることで制御する際の量子効果は興味深い問題である。ポテンシャル井戸の時間変化に伴う捕捉粒子の時間的な変化を变化の大きさの関数として求め、さらに位置のエネルギー（化学ポテンシャル）の異なる2つの領域の間を移動させる場合、粒子を運び上げる途中に起こるトンネル効果のため捕捉が失敗する過程と速く移動することの非断熱遷移の競合のため最適な移動速度があることを示した。また、ゆっくり加速した場合の断熱変化などについても調べた。さらに、多数個のフェルミ粒子をからなる場合にフェルミレベルの効果についても明らかにした。[42, 43, 44]

#### 磁場のあるカオスの量子古典対応

古典系では、カオスは正のリアプノフ指数で特徴付けられる。一方で量子系ではそのような量がない。量子系では、相当する古典系がカオスであることが、エネルギー準位の統計性に反映され、ランダム行列のそれと一致するということが約20年前に予想された。齊藤はこのような普遍的な量子古典対応の問題を解析的に示す試みを行ってきており、磁場のあるカオス系に摂動を加えたときの、スペクトラルフォルムファクターの半古典解析において、エンカウンターと呼ばれる構造を持つ古典周期軌道を数え上げ、ランダム行列理論と半古典解析の結果が完全に一致することを示した。[18, 40] 一連の研究はカオスの量子古典対応が示されただけでなく、カオスが絡む他の現象にも手法を応用できるという点でも重要であると考えられる。

#### 外部自由度と結合した非断熱遷移理論

離散準位系の量子状態変化においては、ランダウゼナー理論が重要な役割を演じる。また量子制御の見地からも重要である。齊藤はサーキット QED と呼ばれる、超伝導回路で組まれたキュービットと1つの調和振動子が相互作用している系において、シングルフォトンを生じさせるための簡単な原理を非断熱遷移確率を厳密に導出することにより解析した [16, 33]。この延長としてキュービットが任意のスペクトル密度を持つ環境と結合したときの、絶対0度での遷移確率を厳密に導出することに成功した。これにより注目する2準位系がどの程度量子散逸を受けるかを、非断熱遷移を実験的に見ることで測ることができることになった [17, 46]。

#### <受賞>

- [1] 所裕子: 第87日本化学会春季年会優秀講演賞, 社団法人日本化学会, (2007年4月)

#### <報文>

#### (原著論文)

- [2] S. Yuan, H. De Raedt and S. Miyashita: Quantum Dynamics of Spin Wave Propagation through Domain Walls, *J. Phys. Soc. Jpn.* **75**, 084703 (2006).
- [3] H. Tokoro, T. Matsuda, S. Miyashita, K. Hashimoto and S. Ohkoshi: Crystal Structures of Photo-induced Phase and Rapidly-cooled Phase in  $\text{Rb}_{0.73}\text{Mn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{0.91} \cdot 1.4\text{H}_2\text{O}$  Prussian Blue Analog, *J. Phys. Soc. Jpn.* **75**, 085004 (2006).
- [4] H. De Raedt, K. De Raedt, K. Michielsen and S. Miyashita: Efficient data processing and quantum phenomena: Single-particle systems, *Compt. Phys. Comm.* **174**, 803 (2006).
- [5] H. Tokoro, S. Miyashita, K. Hashimoto and S. Ohkoshi: Huge thermal hysteresis loop and a hidden stable phase in a charge-transfer phase transition of  $\text{Rb}_{0.64}\text{Mn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{0.88} \cdot 1.7\text{H}_2\text{O}$ , *Phys. Rev. B* **73**, 172415 (2006).
- [6] M. Nishino, K. Boukheddaden, S. Miyashita and F. Varret: Dynamical properties of Photoinduced Magnetism and Spin-Crossover phenomena in Prussian Blue Analogs -photoinduced thermal hysteresis of magnetization-, *Solid State Phenomena* **112**, 73 (2006).
- [7] K. De Raedt, K. Keimpema, H. De Raedt, K. Michielsen and S. Miyashita: A local realist model for correlations of the singlet state, *Euro. Phys. J. B* **53**, 139 (2006).
- [8] Y. Konishi, H. Tokoro, M. Nishino and S. Miyashita: Magnetic properties and metastable states in spin-crossover transition of Co-Fe Prussian blue analogues, *J. Phys. Soc. Jpn.* **75**, 114603 (2006).
- [9] M. Nishino, K. Boukheddaden, S. Miyashita and F. Varret: Clustering of high-spin molecules in

- spin-crossover systems and magnetic ordering in temperature cycling processes, *Phys. Rev. B* **74**, 214416 (2006).
- [10] S. Tanaka, H. Katsura and N. Nagaosa, Electron Localization or Delocalization in Incommensurate Helical Magnets, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 116404 (2006).
- [11] K. Boukheddaden, S. Miyashita, and M. Nishino: Elastic interaction among transition metals in one-dimensional spin-crossover solids, *Phys. Rev. B* **75**, 094112 (2007).
- [12] Shu Tanaka and Seiji Miyashita: Quantum Annealing Effect on Entropic Slowing Down in Frustrated Decorated Bond System, *J. Mag. Mag. Mat.*, **310**, e468 (2007).
- [13] Y. Konishi, H. Tokoro, M. Nishino, and S. Miyashita: Numerical Study on Structure of Metastable States in Prussian Blue Analogues and Their Dynamical Aspects, *J. Mag. Mag. Mat.*, **310**, 1613 (2007).
- [14] M. Nishino, K. Boukheddaden, S. Miyashita and F. Varret: Magnetic ordering in relaxation processes from photoinduced magnetic state in Prussian blue analogs *J. Mag. Mag. Mat.*, **310**, 1455 (2007).
- [15] Shu Tanaka and Seiji Miyashita: Slow Relaxation Process in Ising like Heisenberg Kagome Antiferromagnets due to Macroscopic Degeneracy in the Ordered State, *J. Phys. Condens. Matter*, **19**, 145256 (2007).
- [16] K. Saito, M. Wubs, S. Kohler, P. Hanggi and Y. Kayanuma: Quantum state preparation in circuit QED via Landau-Zener tunneling, *Europhysics Letters* **76**, 22 (2006).
- [17] M. Wubs, K. Saito, S. Kohler, P. Hanggi, Y. Kayanuma: Gauging a quantum heat bath with dissipative Landau-Zener transitions, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 200404 (2006).
- [18] T. Nagao, S. Muller, P. Braun, K. Saito, S. Heusler and F. Haake: Semiclassical theory for parametric correlation of energy levels, *J. Phys. A: Math. Theor.* **40**, 47 (2007).
- (学位論文)
- [19] 山本啓介、修士論文、「ボーズモデルにおける対角秩序と非対角秩序の共存についての研究」
- (著書)
- [20] 宮下精二『量子スピン系』岩波書店 pp1-138.  
< 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [21] Seiji Miyashita: Magnetism in Nano-Scale Systems, ISSP International Workshop and Symposium on Computational Approaches to Quantum Critical Phenomena,( Kashiwa, 2006 Jul.).
- [22] Seiji Miyashita: Magnetic structure in inhomogeneous systems and time-dependent systems, ISSP International Workshop and Symposium on Computational Approaches to Quantum Critical Phenomena,(Kashiwa, 2006 Aug.).
- [23] Shu Tanaka and Seiji Miyashita,: Slow Relaxation Process in Ising like Heisenberg Kagome Antiferromagnets due to Macroscopic Degeneracy in the Ordered State, Highly Frustrated Magnetism 2006 (HFM2006), (Osaka, 2006 Aug.) .
- [24] Shu Tanaka and Seiji Miyashita: Quantum Annealing Effect of Entropic Slowing down in Decorated Bond System , International Conference on Magnetism, (Kyoto, 2006 Aug.).
- [25] Yusuke Kohisi, Hiroko Tokoro and Seiji Miyashita: Numerical Study on Structure of Metastable States in Prussian Blue Analogues and Their Dynamical Aspects, International Conference on Magnetism, (Kyoto, 2006 Aug.).
- [26] Keisuke Yamamoto, Masahiko Sakamoto and Seiji Miyashita: Metastability in quantum dynamical motion, International Conference on Magnetism, (Kyoto, 2006 Aug.).
- [27] Hiroko Tokoro: Temperature -and photo- Induced Phase Transitions in Rubidium Manganese Hexacyanoferrate, International Workshop Phase transition and Dynamical properties of Spin Transition Materials PDSTM2006, (Tokyo, 2006 Nov.).
- [28] Yusuke Konishi: Magnetic properties and Metastable States in the Spin Transition of Co-Fe Prussian Blue Analogues, International Workshop Phase transition and Dynamical properties of Spin Transition Materials PDSTM2006, (Tokyo, 2006 Nov.).
- [29] Seiji Miyashita: The Slow Relaxation in Highly Frustrated Systems, 21st COE 5th International Conference Perspectives in Nonlinear Physics, (Tokyo,2006 Nov.).
- [30] Shu Tanaka and Seiji Miyashita: Slow Relaxation due to Macroscopic Degeneracy in the Easy-Axis Type Anisotropic Heisenberg Kagome Spin System, 21st COE 5th International Conference Perspectives in Nonlinear Physics, (Tokyo,2006 Nov.).
- [31] Masaki Hirano, Shu Tanaka and Seiji Miyashita: Adiabatic Transition of Transverse Ising Model and Quantum Annealing, 21st COE 5th International Conference Perspectives in Nonlinear Physics, (Tokyo,2006 Nov.).
- [32] Shu Tanaka, Hosho Katsura and Naoto Nagaosa: Electron Localization or Delocalization in Incommensurate Helical Magnets, Second International Symposium on Nanometer-Scale Quantum Physics nanoPHYS'07, (Tokyo, 2007 Jan.).
- [33] Keiji Saito: Landau-Zener Tunneling in an Environment: Its Variety and Universality, Perspectives in Nonlinear Physics, 21st COE 5th International Conference (Tokyo, 2006 Nov.).

- [34] Yusuke Konishi, Hiroko Tokoro, Masamichi Nishino and Seiji Miyashita: Magnetic Properties and Metastable States in Spin Transition, 21st COE 5th International Conference Perspectives in Nonlinear Physics, (Tokyo, 2006 Nov.).
- [35] Keisuke Yamamoto, Synge Todo and Seiji Miyashita: Superfluidity in Solid Structure, 21st COE 5th International Conference Perspectives in Nonlinear Physics, (Tokyo, 2006 Nov.).
- 招待講演
- [36] Seiji Miyashita: Quantum dynamics in molecular magnets, Satellite Symposium of XIIth International Congress of Quantum Chemistry Material-oriented Quantum Chemistry (MOQC), (Osaka, 2006 May.).
- [37] Seiji Miyashita: Phase transition and dynamics of the spin-crossover phenomena, U.S.-Japan Bilateral Seminar Simulations of Complex Behavior from Simple Models, (Hawaii, 2006 Jul.).
- [38] Seiji Miyahsita: Structure of Stable States in Spin-Crossover Type Phase Transitions ?Thermodynamic Metastability and Atomic Metastability -, International Workshop Phase transition and Dynamical properties of Spin Transition Materials (PDSTM2006), (Tokyo, 2006 Nov.).
- [39] Seiji Miyahsita: Phase transition and dynamics in molecular materials, Asia Academic Seminar on Molecular and Supramolecular Materials with Designed Functions, (Pune, India, 2007 Feb.).
- [40] Keiji Saito: Heat transport in quantum systems, Dynamical Chaos and Non-equilibrium Statistical Mechanics: From Rigorous Results to Applications in Nano-Systems, (Singapore, 2006 Sep.).
- (国内会議)
- 一般講演
- [41] 宮下精二: Quantum ordering structures in inhomogeneous systems -Super-solid state in the interface region-, 特定領域研究 スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理 A01&A05 研究項目合同ワークショップ, (那須, 2006年7月).
- [42] 宮下精二: 光格子にトラップされた粒子系の BEC-solid の動的性質, 量子シミュレーション研究会, (東京, 2006年9月).
- [43] 宮下精二: ポテンシャル井戸による粒子捕捉、運搬の量子ダイナミクス, 量子シミュレーション研究会, (東京, 2006年9月).
- [44] 宮下精二: ポテンシャル井戸による粒子移送, 量子シミュレーション研究会, (京都, 2007年3月).
- [45] 宮下精二: ソフトコアボーズ模型での超固体状態, 量子シミュレーション研究会, (京都, 2007年3月).
- [46] 齊藤圭司: 非断熱位相制御による量子状態操作とデコヒーレンス, 量子シミュレーション研究会, (京都, 2007年3月).
- [47] 肘井敬吾: 分子磁性体における量子状態制御の可能性, 量子シミュレーション研究会, (京都, 2007年3月).
- [48] 所裕子, 宮下精二, 橋本和仁, 大越慎一: RbMnFe シアノ錯体における可視光可逆光磁性, 第56回錯体化学討論会 (広島, 2006年9月).
- [49] 所裕子, 松田智行, 宮下精二, 橋本和仁, 大越慎一: RbMnFe シアノ錯体における電荷移動相転移と光磁性, 日本化学会第87春季年会 (吹田, 2007年3月).
- [50] 田中 宗, 宮下精二: エントロピー的に凍結する系における量子アニーリングの実時間発展, 日本物理学会 秋季大会 (千葉, 2006年9月).
- [51] 所 裕子, 宮下精二: RbMnFe シアノ錯体における可視光可逆光磁性現象, 日本物理学会 秋季大会 (千葉, 2006年9月).
- [52] 小西優祐, 宮下精二 他: 電荷移動を起こす物質における準安定状態の構造とその磁場依存性, 日本物理学会 秋季大会 (千葉, 2006年9月).
- [53] 宮下精二, 肘井敬吾, 齊藤圭司: 掃引磁場下での磁化過程における量子遷移と熱遷移, 日本物理学会 秋季大会 (千葉, 2006年9月).
- [54] 山本啓介, 宮下精二: 超固体状態実現における on-site repulsion の効果, 日本物理学会 秋季大会 (千葉, 2006年9月).
- [55] 田中 宗, 宮下精二: 容易軸異方性のあるカゴメ格子におけるスピン構造形成と動的物性, 日本物理学会 秋季大会 (千葉, 2006年9月).
- [56] 桂法称, 田中宗, 永長直人: 非整合らせん磁性体における電子状態の局在-非局在, 日本物理学会 秋季大会 (千葉, 2006年9月).
- [57] 肘井敬吾, 野村清英: 4体相互作用を持つ量子スピン梯子系における相転移とユニバーサルティークラス, 日本物理学会秋季大会 (千葉, 2006年9月).
- [58] 宮下精二: 動的性質に関する計算物理 量子断熱変化からエントロピー誘起秩序化過程まで, 東大物性研短期研究会「計算物質科学におけるスーパーコンピュータ利用の現状と展望」(柏, 2006年12月).
- [59] 宮下精二: ODLRO in a solid structure, 特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」平成18年度研究成果報告会 (淡路, 2006年12月).
- [60] 宮下精二: 動的な外場に関する量子応答 (量子多体協力現象の解明と制御), 第2回量子情報ワークショップ (箱根, 2006年12月).
- [61] 齊藤圭司: 熱輸送系における熱交換揺らぎの大偏差特性, 日本物理学会 春季大会 (鹿児島, 2007年3月).
- [62] 田中 宗, 平野真樹, 宮下精二: 量子ゆらぎが引き起こすフラストレートスピン系における相関関数のリエントラント現象, 日本物理学会 春季大会 (鹿児島, 2007年3月).
- [63] 平野真樹, 田中 宗, 宮下精二: 量子アニーリングにおける断熱エネルギー準位構造と量子ダイナミクス, 日本物理学会 春季大会 (鹿児島, 2007年3月).

- [64] 山本啓介, 藤堂眞治, 宮下精二: He 固体上の超流動成分についての Softcore Bose Hubbard Model による解析, 日本物理学会 春季大会 (鹿児島, 2007 年 3 月).
- [65] 田中 宗, 宮下精二: カゴメ格子反強磁性体における低温秩序状態の発生とスピン構造形成に及ぼす異方性パラメータの影響, 日本物理学会 春季大会 (鹿児島, 2007 年 3 月).
- [66] 小西優祐, 所 裕子, 西野正理, 宮下精二: 協力的スピントロスオーバー現象における弾性エネルギー効果 - 定圧シミュレーション -, 日本物理学会 春季大会 (鹿児島, 2007 年 3 月).
- [67] 西野正理, K. Boukheddaden, 宮下精二, F. Varret, 大野隆央: 光誘起相転移を示すスピントロスオーバー化合物の二次元弾性モデルによる体積および圧力変化の解析, 日本物理学会 春季大会 (鹿児島, 2007 年 3 月).

#### 招待講演

- [68] 宮下 精二: ナノサイズ構造における物性評価での量子モンテカルロ法と量子ダイナミクス, ナノサイエンス実証研究 第 4 回公開シンポジウム (岡崎, 2006 年 4 月).
- [69] 宮下精二: 単分子磁性体の量子ダイナミクスとエネルギーギャップ構造, 東大物性研短期研究会「量子スピン系の物理」(柏, 2006 年 11 月).

#### (セミナー)

齊藤圭司: "Non-adiabatic quantum tunneling in a qubit: exact solution and its application" (理研 2006 年 6/30)

### 3.4 小形研究室

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

#### 3.4.1 高温超伝導の理論

##### 強相関電子系での超伝導相関

典型的な高温超伝導体のモデルである  $t$ - $J$  モデルについて、高温展開の手法を用いて超伝導相関関数を調べた。分配関数  $Z$  を  $1/k_B T$  のべき乗で展開するという高温展開においては、絶対零度への外挿が常に問題になるが、我々は、より高次の次数まで計算を進め、さらに超伝導相関長を調べることによ

て、低温領域での超伝導相関の発達を精度よく評価することができた。その結果、 $d_{x^2-y^2}$ -波のチャンネルに関して実効的に引力相互作用があることを示した。またドーピング依存性に関しては、高温超伝導体の実験と一致する領域において  $d$  波超伝導相関が発達することが明らかになった。さらに、超伝導相関が発達し始める特徴的な温度は  $J/2$  にスケールするということも分かった。これらの結果と変分モンテカルロ法の最近までの結果を含め、高温超伝導に関するレビューをまとめている。[19]

##### モット金属絶縁体転移と超伝導

高温超伝導は、モット絶縁体に動けるキャリアを導入することによって発現するので、超伝導と絶縁体との関係は強相関電子系での最も興味ある研究の 1 つである。これを理解するために、ハバードモデルを用いて金属絶縁体転移と超伝導の関係を明らかにした。とくに電子相関を十分考慮した波動関数を仮定して変分法によって基底状態を調べた。この方法は、強相関領域で有効な手段であると考えられている。その結果、1 次相転移としての金属絶縁体転移が実現することを示した。得られた絶縁体状態では、スピンを持つ 2 つの電子が占有されたサイトと、ホールのサイトは束縛状態を作っており、 $t$ - $J$  モデルでよく記述される状況となる。また波動関数中には超伝導相関があるが、相互作用のために絶縁体となっている状態であることもわかった。したがって、この状態にキャリアを導入したものが高温超伝導であると考えられる。一方、電子相関が弱い領域では、通常の BCS 型の  $d$  波超伝導状態が実現すると考えられる。[7, 21, 40, 56, 64]

##### 乱れた強相関電子系における磁性と超伝導

磁性と超伝導の臨界領域において乱れが引き起こす微視的不均一性とその影響を調べた。高温超伝導体のようにコヒ-レンス長が短い非  $S$ -波超伝導では、電子の波動関数の局在を伴わなくとも、乱れによって容易に微視的な不均一性が生じる。この時、乱れに対して通常用いられる摂動理論 (CPA、ボルン近似、 $T$  行列近似など) は破綻するため乱れを非摂動的に考慮する必要がある。そこで、空間依存性のあるグリーン関数法を臨界揺らぎの理論に適用する手法を開発して計算した。その結果、競合する秩序の空間的共存と熱揺らぎの増強を示した。一方、コヒ-レンス長が長い場合や  $S$  波超伝導の場合には、超伝導反強磁性転移は均一相の一次転移となる。この定性的な違いが高温超伝導体の超伝導絶縁体転移の電子-ホール非対称性を決定していることを指摘した。[15, 34, 36, 45, 50]

### 3.4.2 コバルト酸化物における異方的超伝導

2次元三角格子上の超伝導体であるコバルト酸化物  $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$  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ている。これに関してレビューをまとめた。[9]

#### $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ の多軌道型超伝導

コバルト酸化物超伝導体において、Co の  $t_{2g}$  軌道の自由度が重要な役割を果たしている可能性を指摘し、多軌道型超伝導体に特有の物性や現象および超伝導発現のメカニズムについて調べた。まず、バンド計算の結果に基づいて、この物質を記述する多軌道ハバードモデルを構築し、FLEX 近似 (揺らぎ交換近似) および摂動計算による解析を行なった。この結果、軌道縮退が本質的に重要であり新しい発展を含むことがわかった。さらにこの物質では、 $c$  軸長によって超伝導と磁性状態など、物性が大きく変わることが実験で明らかになっているが、このことを理解するためのモデルを構築した。具体的には、酸素原子も考慮した多バンドの強束縛モデルを作り、 $c$  軸長の変化による影響をホッピングパラメータの変化と結晶場ポテンシャルの変化として取り入れるというモデルを構築した。[6, 46, 57] このモデルを基に、超伝導発現機構を詳しく調べたところ、スピン三重項超伝導が出現するパラメータ領域と、新たに拡張  $s$  波超伝導が出現するパラメータ領域が非常に接近して存在することが明らかになった。この結果から、実験で見られている磁気的性質、比熱の温度依存性、臨界磁場の大きさなどが矛盾無く説明できることを示した。[10, 11, 48, 55, 59, 62, 97]

### 3.4.3 有機導体に関する理論

有機導体 (分子性導体) において電荷秩序状態がしばしば見出されている。この新しい秩序状態近傍での電荷の自由度に着目し、それが引き起こす特異な現象や超伝導に関する研究を行なっている。

#### 幾何学的フラストレーションによる量子融解

有機導体における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。もし  $V$  どの間に幾何学的フラストレーションの効果があると、2つの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。この場合、電荷秩序が融解する可能性がある。これについて有限系のハミルトニアンを厳密対角化によって調べた。その結果、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、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。[8] これらに関する理

論的研究を網羅したレビューをまとめた。[4]

#### 有機導体における特異な電荷秩序と超伝導

$\theta$ -型有機導体は、伝導面が2次元異方的三角格子を組んだ系であり、多くの系において電荷秩序が見出されている。その1つである  $\theta$ -(BEDT-TTF) $_2X$  という物質群では、格子が三角格子的であるために最近接相互作用  $V$  にフラストレーションが生じる。我々は平均場近似 [2] および変分モンテカルロ法を用いて [3]、電荷秩序状態およびそれがフラストレーションによって量子融解したあとの金属状態を詳しく調べた。今までは電荷秩序状態として、ストライプ型のものが考えられてきたが、最近提唱された3倍周期を持つ電荷秩序状態も広いパラメータ領域で安定化することを見出した。さらに量子融解した後の金属状態では、これらのパターンの異なる電荷秩序がエネルギー的に拮抗していることがわかった。この場合、強い電荷揺らぎを用いたスピン3重項  $f$  波超伝導が実現可能であることを変分モンテカルロ法によって見出した。[3] また、飛び移り積分の異方性  $t_c/t_p$  によって一連の物質群を統一的に理解出来る描像が得られた [3, 37, 43] この研究成果をまとめた論文は、Journal of the Physical Society of Japan から表彰された。[1]

#### 擬一次元電子系の特異なふるまい

有機導体の中には、1次元鎖が弱く結びつきあって擬一次元電子系を形成している物質群もある。このような系は1次元と3次元(2次元)の中間的な次元性を持つので、朝永・ラッティンジャー液体とフェルミ液体とのクロスオーバーが期待されている。そのような次元性やクロスオーバーの影響が実験でどのように現れるのかを理解するため、 $N$  本鎖くりこみ群という手法の開発を進め、擬一次元系のより詳細な計算が行えるようにした。まず、この手法を用いて磁化率の温度依存性における次元性(圧力)の効果調べ、乱雑位相近似に基づく比較的簡単な予想に反し、次元性により磁化率が減少することを示した。[12, 30, 44]

さらに同手法を用いて、擬1次元系における超伝導機構、特にスピンゆらぎと次元性の効果について明らかにした。ある超伝導相が何らかの秩序相近傍に現れたとき、その超伝導は秩序相のゆらぎを媒介して実現していると考えられる場合がある。この場合、ゆらぎの振幅は秩序相から離れるにつれ小さくなるため、超伝導転移温度  $T_c$  も秩序相から離れるにつれ下がることが期待される。しかし (TMTTF) $_2\text{SbF}_6$  という有機導体においては、秩序相から離れても  $T_c$  が上昇し続けるという奇妙なふるまいが観測された。我々はこの問題に対し、上記  $N$  本鎖くりこみ群を用いて調べた。その結果、擬一次元系においては次元性の効果によって超伝導相関が増大することがわかり、これが (TMTTF) $_2\text{SbF}_6$  の実験を説明することを指摘した。[13, 32, 52, 68, 87, 93]

### 有機導体における新奇なスピン液体状態

擬二次元三角格子を有する  $\kappa$ -(ET)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub> は、絶縁体相の NMR や磁化率測定から、極低温まで磁気秩序を持たず、さらにスピンギャップも生じないという「ギャップレススピン液体」であると考えられ、非常に注目を集めている。この物質は三角格子に近い強いフラストレーションを持つ。この系が完全な三角格子スピン系だとすると、基底状態は 120° 構造と呼ばれる長距離秩序状態を持つはずである。一方、仮に磁気秩序が無いとしても「d+id」状態と呼ばれるスピンギャップを持つ状態が安定となるため、この物質の「ギャップレススピン液体」は説明できない。我々は、この系がもつ一次元的異方性に着目し、異方的三角格子ハイゼンベルグモデルを RVB 平均場近似によって調べた。一次元鎖極限からのアプローチを行うと、鎖間相互作用が小さいときには系はほとんど独立した一次元鎖のように振舞う。そのため一粒子励起スペクトルの持つギャップは非常に小さく、さらにフラストレーションのために、鎖間相互作用が増大しても励起スペクトルの形状は一次元的異方性を強く残すことを示した。[14, 38, 72, 82, 88]

### 3.4.4 異方的超伝導体の理論

#### 空間反転対称性が破れた系の磁性と超伝導

CePt<sub>3</sub>Si という空間反転対称性の破れた系で超伝導が発見され、注目を集めている。このような系では偶パリティと奇パリティのペアリングが混じることが知られている。この系を調べるためにまず、CePt<sub>3</sub>Si の電子構造を記述するハバードモデルを構成し、乱雑位相近似による解析を行なった。その結果、 $s+p$ -波という状態と、 $p+d+f$ -波という 2 つの超伝導状態が安定であることがわかった。これは、空間反転対称性がない系の超伝導に対する初めての微視的理論である。また、CePt<sub>3</sub>Si では超伝導と反強磁性が共存するが、この物質が示す多くの異常物性の原因は、この反強磁性との共存にあることを示した。 $s+p$ -波を仮定し状態密度、比熱、 $1/T_1T$ 、 $H_{c2}$ 、非線型磁化率を計算した結果は実験結果を矛盾なく説明することがわかった。さらに、CeRhSi<sub>3</sub>、CeIrSi<sub>3</sub> で期待される圧力依存性、磁場依存性、多重超伝導転移を示した。[16, 74]

#### ルテニウム酸化物の高磁場中での新しい状態

スピン 3 重項超伝導体であると考えられているルテニウム酸化物 Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> において、低温高磁場での  $H_{c2}$  近傍に新しい相があるのではないかとことが実験的に言われている。この相については今まで理論的に理解されていなかったが、我々はスピン 3 重項超伝導特有の新しい状態ではないかと考え、微視的なモデルを用いて調べた。スピン  $S=1$  の 3 重項超伝導のクーパー対には内部自由度があり、Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> ではスピンが面内を向いていると考えられている。

この場合を  $\hat{z}$  と表す。高磁場中では超伝導秩序変数の対称性は  $k_y \hat{z}$  という状態であると一般に考えられているが、弱いスピン軌道相互作用と状態密度のフェルミ面近傍での傾きがある場合、新しく  $k_y(\hat{z} - i\alpha\hat{y})$  という状態が安定化するという事を見出した。これは相転移ではなくクロスオーバーとなるが、この変化が実験で見られている比熱の 2 重ピーク構造を説明するのではいかと考えられる。[42, 91] さらに低磁場領域における磁化のキックが、秩序変数の軌道部分の変化に伴う二次相転移に起因するものであることを明らかにした。[47, 70] また、高磁場の新しい状態を実験的に検出するための物理量の提案を行なった。[70]

#### 不純物バンド超伝導におけるアンダーソン局在と超伝導揺らぎ

ボロンを添加したダイヤモンドにおける超伝導が発見され、不純物バンド系での超伝導が注目を集めている。一方、アンダーソン局在と超伝導の競合による超伝導絶縁体転移は長年の理論的課題である。そこでまず、準位統計のスケーリング解析によって、金属絶縁体転移が起こる領域を決定した。さらに、局在によって超伝導のメソスコピック揺らぎと熱揺らぎが同時に強く増強され、その結果超伝導が抑制されることを示した。この機構による超伝導絶縁体転移は大きな擬ギャップを伴う。状態密度を計算した結果から、NMR、STM 等による超伝導絶縁体転移の観測可能性を示し、ドーピング量・不純物・圧力を変えることによる実験的検証を提案した。[75]

### 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

#### カゴメ格子におけるキャリアドープの効果

フラストレーションのある系に対して伝導を担うキャリアを導入すると、RVB 状態などの興味深い現象が起こりうることが分かってきている。そこで、二次元系の中でも、最もフラストレーションが強いと考えられているカゴメ格子について、キャリアドープの効果を調べた。その結果、強いフラストレーションのために、三角格子や他のフラストレーションを持つ格子と比較して、カゴメ格子ではより顕著に RVB 状態や強磁性などの特異な現象が現れることが分かった。[33, 53]

#### 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が、格子が正三角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。[49, 54, 79, 95] このモンテカルロシミュレーションは、ALPS [35, 94] 上に実装して解析を行っている。

### フラストレーションを持つハバードモデルの基底状態

フラストレーションを持つハバードモデルの基底状態では、強い量子効果によって新奇な量子状態が実現し得ることが様々な研究によって明らかになってきている。このような系では短距離相関が重要であると思われるが、それを厳密に取り扱う事ができる量子クラスターの方法 (variational cluster approach) を用い、正方格子上の  $t$ - $t'$  ハバードモデルを調べた。その結果、 $t/t'$  が小さな領域では反強磁性相が、 $t/t'$  が大きな領域ではコリニアールと呼ばれる磁気的秩序相が現れ、その中間のパラメータ領域で磁気秩序を持たない絶縁体相が現れることがわかった。さらに、磁気秩序を持たない相からコリニアール相への転移は一次転移であることを示した。[81]

### 3.4.6 近藤効果や重い電子系に関する理論

#### 量子ドットでの近藤効果

量子ドットに導線 (リード) をつないだ系は、新しい近藤効果の系として非常に興味を持たれている。例えば、スピン分極したリード (強磁性リード) を量子ドットに結合するとスピン依存性をもつ電荷揺らぎによってドットのエネルギー準位が分裂し、近藤効果が弱まる事が理論的に予測されている。このことは、実験において微分コンダクタンスのゼロバイアス異常の分裂として観察されている。ドットの左右に結合した強磁性リードの分極方向が、お互いに平行か反平行の場合は既に調べられているが、これを任意の角度の場合に拡張し、スピン分裂の大きさ  $\delta$  および近藤温度  $T_K$  の表式をスケールリング法によって解析的に導出した。この結果、 $\delta$  は左右のリードの分極方向の中間方向を量子化軸として生じ、リードの分極率を  $p$  とすると  $p \cos(\theta/2)$  に比例することを示した。また  $\delta \ll T_K$  の場合には、 $p \cos(\theta/2)$  の増加とともにドット中のスピンゆらぎが抑制されるので、 $T_K$  も低下することがわかった。さらに、スレーブ・ボソン平均場近似を用いて  $\delta$  に対する  $T_K$  の依存性を調べ、近藤共鳴が  $\delta$  によって分裂し  $T_K$  が低下することを明らかにした。これは近藤効果が弱ま

ることを意味している。[17, 39]

### 重い電子系の量子臨界点における反強磁性転移とフェルミ面のトポロジカル転移

重い電子系物質である  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  や  $\text{CeCu}_{6-x}\text{Au}_x$  では、従来の量子臨界点に関する Moriya-Hertz-Millis 理論では説明できない現象が数多く見られており、新たな描像の必要性が議論されている。我々は特に量子臨界点でホール係数が不連続に変化するという実験事実に着目し、近藤格子模型に変分モンテカルロ法を適用して基底状態の相転移を解析した。その結果、広いパラメータ領域で反強磁性転移とフェルミ面のトポロジーが変化するという新たな転移の存在が確認できた。[18, 71, 80, 89] これは実験結果ともよく整合していると考えられる。

### 3.4.7 2次元 $^3\text{He}$ に関する理論

グラファイト上に吸着された  $^3\text{He}$  の系は、非常によくコントロールされた純粋2次元のフェルミオン系として実験的に精力的に調べられてきている。この系は下地のグラファイトの蜂の巣格子を反映して、2次元三角格子をなしていると考えられている。さらに、He 間の強い斥力相互作用により、低次元強相関フェルミオン系の典型的な例となっていると思われる。これに関していくつかの研究を開始した。

#### 固体相でのスピン液体

グラファイト上の He の密度をコントロールして、ちょうど2次元面上に稠密に He が並ぶ状況を作ることができる。このとき系は理想的な二次元三角格子を組むスピン系となると考えられる。しかし、実験では三角格子ハイゼンベルグモデルで予想されるようなスピンの長距離秩序を持たないことが観測されている。その代わりに、スピン液体的な振舞いが見られており、理論的解明が求められている。我々は  $^3\text{He}$  の下地のポテンシャルを考慮したモデルを考え、高温展開の方法や厳密対角化の方法により、有限温度の状態を調べた。その結果、実験で見られるスピン液体的な振舞い、特に比熱や帯磁率の異常な振舞いを再現し得ることを示した。[85]

#### 二次元 $^3\text{He}$ における多スピン交換相互作用の効果

He では従来のハイゼンベルグ型の交換相互作用以外に、リング状の多スピン交換相互作用 (リング交換) が重要であると考えられている。そこで、我々は三角格子  $t$ - $J$  モデルに新たにリング交換の項を加えたモデルを数値的厳密対角化によって調べた。18 サイトまでの結果を総合すれば、モット絶縁体に少量の正孔を注入した系では、リング交換によってフェ

ルミ液体とは異なるスピン・電荷分離的ふるまいを示す“新しい量子液体”が現れることを見出した。さらに正孔を注入すると、リング交換の影響は弱まって通常のフェルミ液体に戻ると考えられる。この新しい量子液体は、最近スピン・質量(電荷)分離的ふるまいが観測される二次元  $^3\text{He}$  の新奇的な状態に対応していると考えられる。[77]

<受賞>

- [1] H. Watanabe and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 063702 (2006). J. Phys. Soc. Jpn. “Papers of Editor’s Choice” (2006年6月).

<報文>

(原著論文)

- [2] M. Kaneko and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 014710 (2006). “Mean-Field Study of Charge Order with Long Periodicity in  $\theta$ -(BEDT-TTF) $_2X$ ”
- [3] H. Watanabe and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 063702 (2006). “Novel Charge Order and Superconductivity in Two-Dimensional Frustrated Lattice at Quarter Filling”
- [4] H. Seo, J. Merino, H. Yoshioka and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 051009 (2006). “Theoretical Aspects of Charge Ordering in Molecular Conductors”
- [5] R. Shindou, K-i. Imura, and M. Ogata: Phys. Rev. B **74**, 245107 (2006). “Characterization of two-dimensional fermionic insulating states”
- [6] M. Mochizuki and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 113703 (2006). “Deformation of Electronic Structures Due to  $\text{CoO}_6$  Distortion and Phase Diagrams of  $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ”
- [7] H. Yokoyama, M. Ogata and Y. Tanaka: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 114706 (2006). “Mott Transitions and d-Wave Superconductivity in Half-Filled-Band Hubbard Model on Square Lattice with Geometric Frustration”
- [8] H. Seo, K. Tsutsui, M. Ogata and J. Merino: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 114707 (2006). “Charge Fluctuations in Geometrically Frustrated Charge Ordering System”
- [9] M. Ogata: J. Phys.: Condens. Matter **19**, 145282 (2007). “A new triangular system:  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$ ”
- [10] M. Mochizuki and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 013704 (2007). “ $\text{CoO}_2$ -Layer-Thickness Dependence of Magnetic Properties and Possible Two Different Superconducting States in  $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ”
- [11] M. Mochizuki, H. Q. Yuan and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 023702 (2007). “Specific Heat and Superfluid Density for Possible Two Different Superconducting States in  $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ”
- [12] Y. Fuseya, M. Tsuchiizu, Y. Suzumura and C. Bourbonnais: J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 014709 (2007). “Role of Interchain Hopping in the Magnetic Susceptibility of Quasi-One-Dimensional Electron Systems”
- [13] Y. Fuseya, M. Ogata: submitted to J. Phys. Soc. Jpn.. “Increase of Superconducting Correlation due to Dimensional Change in Quasi-One-Dimensional Conductors”
- [14] Y. Hayashi and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 053705 (2007). “Possibility of Gapless Spin Liquid State by One-dimensionalization”
- [15] Y. Yanase: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 124715 (2006). “Superconducting Fluctuation and Pseudogap in Disordered Short Coherence Length Superconductor”
- [16] Y. Yanase and M. Sigrist: J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 043712 (2007). “Non-centrosymmetric Superconductivity and Antiferromagnetic Order: Microscopic Discussion of  $\text{CePt}_3\text{Si}$ ”
- [17] D. Matsubayashi and M. Eto, Phys. Rev. B **75**, 165319 (2007). “Spin splitting and Kondo effect in quantum dots coupled to noncollinear ferromagnetic leads”
- [18] H. Watanabe and M. Ogata: arXiv:0704.1722, submitted to Phys. Rev. Lett.. “Fermi Surface Reconstruction without Breakdown of Kondo Screening at Quantum Critical Point”
- [19] M. Ogata and H. Fukuyama: submitted to Rep. Prog. Phys. “The  $t$ - $J$  model as a mechanism of the oxide high- $T_c$  superconductors”

(会議抄録)

- [20] M. Ogata, H. Yokoyama, Y. Yanase, Y. Tanaka, and H. Tsuchiura: The 7th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2004) (Sitges, 2004), J. Phys. Chem. Solids **67**, 37-40 (2006). “Kinetic energy pairing and condensation energy in cuprates”
- [21] H. Yokoyama, Y. Tanaka, and M. Ogata: (SNS2004) J. Phys. Chem. Solids **67**, 47-49 (2006). “Stability of superconductivity and antiferromagnetism in two-dimensional Hubbard model with diagonal transfer”
- [22] T. Watanabe, H. Yokoyama, Y. Tanaka, J. Inoue, and M. Ogata: (SNS2004) J. Phys. Chem. Solids **67**, 95-98 (2006). “Pairing Symmetry and Ferromagnetism in the  $t$ - $J$  model on a Triangular Lattice”
- [23] T. Watanabe, H. Yokoyama, Y. Tanaka, J. Inoue, and M. Ogata: (SNS2004) J. Phys. Chem. Solids **67**, 112-114 (2006). “Effect of Next-Nearest-Neighbor Transfer on Superconductivity and Antiferromagnetism in Two-Dimensional  $t$ - $J$  Model”

- [24] C. Hotta, M. Ogata and H. Fukuyama: *Physica B* **378-380**, 710-711 (2006). Proceedings of the International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2005) (Vienna, July 26-30, 2005). “Ground state properties of the one-dimensional quarter-filled strongly correlated electrons interacting with  $S = 1/2$  Kondo spins”
- [25] Y. Yanase, M. Mochizuki and M. Ogata: *Physica B* **378-380**, 873-874 (2006). Proceedings of SCES 2005. “Role of Spin-Orbit Interaction on the Superconductivity in  $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ : Phase Diagram under the Magnetic Field”
- [26] M. Mochizuki, Y. Yanase and M. Ogata: *Physica B* **378-380**, 875-877 (2006). Proceedings of SCES 2005. “Magnetic fluctuation and pairing instability controlled by the  $\text{CoO}_6$  distortion in the sodium cobalt oxide”
- [27] Y. Tanaka and M. Ogata: *Physica B* **378-380**, 317-318 (2006). Proceedings of SCES 2005. “Spin susceptibility of one-dimensional extended Hubbard model at quarter filling”
- [28] H. Watanabe and M. Ogata: *Physica B* **378-380**, 569-570 (2006). Proceedings of SCES 2005. “Charge order, spin order and superconductivity in two-dimensional electron systems: Effect of nearest-neighbor Coulomb interaction”
- [29] T. Koretsune and M. Ogata: *Physica B* **378-380**, 323-324 (2006). Proceedings of SCES 2005. “Effective mass divergence in the infinite- $U$  Hubbard model”
- [30] Y. Fuseya, M. Tsuchiizu and Y. Suzumura: *J. Low Temp. Phys.* **142**, 507-510 (2006). “Magnetic Susceptibility in Normal States of Quasi-One-Dimensional Superconductors”
- [31] M. Tsuchiizu, Y. Fuseya, Y. Suzumura and C. Bourbonnais: *J. Low Temp. Phys.* **142**, 651-654 (2006). “Dimensionality Effect in Quasi-One-Dimensional Mott Insulators”
- [32] Y. Fuseya, M. Tsuchiizu and Y. Suzumura: *J. Mag. Mag. Mat.* **310**, 1128-1129 (2007). “Role of Fluctuations in Density Wave and Superconductivity of Quasi-One-Dimensional Conductors”
- [33] T. Koretsune and M. Ogata: *J. Mag. Mag. Mater.* **310** e286-e288 (2007). “Magnetic properties of doped Kagome antiferromagnet”
- [34] Y. Yanase and M. Ogata: to appear in *J. Mag. Mag. Mat.* “Role of Disorder in the Multi-Critical Region of d-wave Superconductivity and Antiferromagnetism”
- [35] F. Albuquerque et al. (ALPS collaboration): International Conference on Magnetism 2006 (ICM2006) (Kyoto, 2006, August 20–25), *J. Magn. Magn. Mater.* **310**, 1187 (2007). “The ALPS project release 1.3: open source software for strongly correlated systems ”
- [36] Y. Yanase and M. Ogata: To appear in *Physica C*. “Disorder-induced microscopic inhomogeneity in the multi-critical region of d-wave superconductivity and antiferromagnetism”
- (国内雑誌)
- [37] 渡部洋、小形正男: *固体物理* **42**, 185-191 (2007). 「有機導体における新奇な電荷秩序と超伝導」
- (学位論文)
- [38] 林 勇太: “RVB Mean Field Analysis of Heisenberg Model on Anisotropic Triangular Lattice” (異方的三角格子 Heisenberg モデルの RVB 平均場による解析) (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)
- [39] 松林大介: “Spin splitting and Kondo effect in quantum dots coupled to noncollinear ferromagnetic leads” (Noncollinear な強磁性リードと結合した量子ドットにおけるスピン分裂と近藤効果) (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [40] M. Ogata: The International Symposium on Anomalous Quantum Materials 2006 and the 5th Asia-Pacific Workshop, (ISAQM2006) (Okinawa, 2006, 6.23-6.27) “Mott Transition and Superconductivity in the Two-Dimensional  $t-t'-U$  Hubbard model”
- [41] M. Mochizuki and M. Ogata: (ISAQM2006) (Okinawa, 2006, 6.23-6.27) “Band Structure, Spin-Charge Fluctuations and Superconductivity in the Sodium Cobalt Oxide”
- [42] M. Udagawa, Y. Yanase and M. Ogata: (ISAQM2006) (Okinawa, 2006, 6.23-6.27) “Determination of multiple superconducting phase diagram of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ ”
- [43] H. Watanabe and M. Ogata: (ISAQM2006) (Okinawa, 2006, 6.23-6.27) “Anomalous Charge Order and Superconductivity in Organic Conductor  $\theta\text{-(ET)}_2\text{X}$ ”
- [44] Y. Fuseya, M. Tsuchiizu, Y. Suzumura and C. Bourbonnais: The International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals (ICSM 2006), (Dublin Ireland, 2006, 7.2-7.7) “Effect of Interchain Hopping on Magnetic Susceptibility of Q1D Organic Conductors”
- [45] Y. Yanase: 8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M2S-HTSC-VIII) (Dresden, July 9-14 2006) “Role of Disorder in the Multi-Critical Region of d-wave Superconductivity and Antiferromagnetism”

- [46] M. Mochizuki and M. Ogata: (M2S-HTSC-VIII) (Dresden, July 9-14 2006) “Effects of  $\text{CoO}_6$  distortion on spin-charge fluctuations and superconductivity in the Sodium Cobalt Oxide”
- [47] M. Udagawa, Y. Yanase, M. Ogata : (M2S-HTSC-VIII) (Dresden, July 9-14 2006) “Quasiclassical study of multiple superconducting phase diagram of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ ”
- [48] M. Mochizuki and M. Ogata: First international workshop on the physical properties of lamellar cobaltates (July 16-20 2006, Orsay, France) “Effects of  $\text{CoO}_6$  distortion on spin-charge fluctuations and superconductivity in the Sodium Cobalt Oxide”
- [49] R. Igarashi and M. Ogata: International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2006 (HFM2006) (Osaka, Japan, August 15-19, 2006). “Frustration effect in a two-dimensional antiferromagnetic XY spin model”
- [50] Y. Yanase: 17th International Conference on Magnetism (ICM2006) (Kyoto, 2006, August 20-25) “Role of disorder in the multi-critical region of d-wave superconductivity and anti-ferromagnetism”
- [51] M. Mochizuki and M. Ogata: (ICM2006) (August 20-25 2006, Kyoto, Japan) “Theoretical study on the phase diagram of the bilayer sodium cobalt oxides”
- [52] Y. Fuseya, M. Tsuchiizu and Y. Suzumura: (ICM2006) (Kyoto, 2006, August 20-25) “Role of Fluctuations in Density Wave and Superconductivity of Quasi-One-Dimensional Conductors”
- [53] T. Koretsune and M. Ogata: (ICM2006) (Kyoto, 2006, August 20-25) “Magnetic properties of doped Kagomé antiferromagnet”
- [54] R. Igarashi and M. Ogata: (ICM2006) (Kyoto, 2006, August 20-25) “Frustration effect in a two-dimensional antiferromagnetic XY spin model”
- [55] 望月維人、小形正男：2007 APS March Meeting ( Denver Colorado 2007年3月5-9日 ) “Phase Diagrams, Thermodynamic Quantities and Possible Two Different Superconducting States of Multiorbital Superconductor  $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ”
- 招待講演
- [56] M. Ogata: KIAS-APCTP Workshop on “Quantum Materials” (Seoul, Korea, July 19-22, 2006). “Mott transition and superconductivity in the Hubbard model and  $t$ - $t'$ - $J$  model”
- [57] M. Ogata: International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2006 (HFM2006) (Osaka, Japan, August 15-19, 2006). “Superconductivity on a Triangular Lattice: Theories and Experiments in  $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ”
- [58] M. Ogata: First Swiss Japan Workshop on the applications and on new developments in muon spectroscopy on novel materials (KEK, Japan, September 28-29, 2006). “Theories for Strongly Correlated Superconductors”
- [59] M. Ogata: 5th International Conference on “Macroscopic Quantum Phenomena in Complex Striped Matter” (Rome, Italy, December 17-22, 2006). “Magnetic properties and possible two different superconducting states in cobaltates”
- [60] M. Ogata: CREST Workshop on “Charge Dynamics in High Temperature Superconductors” (Tokyo, February 23-25, 2007) “Projected wavefunction for strongly correlated electrons”
- [61] “Multi-orbital superconductivity and multi-component order parameter in  $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ ” Youichi Yanase First International workshop on the physical properties of lamellar cobaltates, Paris, France, July 2006
- [62] M. Mochizuki: Max-Planck institut für Physik Komplexer System, International focus workshop on Mobile Fermions and Bosons on Frustrated Lattice (January 11-13 2007, Dresden, Germany) “Exotic superconductivity on the triangular lattice in  $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ : Theories and experiments”
- (国内会議)
- 一般講演
- [63] 小形正男：日本物理学会、千葉大学 2006, 9.23-9.26 (秋季大会) 24pZG-2 “ $t$ - $J$  モデルにおける次近接ホッピング  $t'$  を決める要因とその効果”
- [64] 横山寿敏、小形正男、田仲由喜夫：日本物理学会、千葉大学 2006, 9.23-9.26 (秋季大会) 24aZQ-3 “ダブルロン-ホロン束縛機構によるモット転移の性質”
- [65] 望月維人、小形正男：日本物理学会、千葉大学 2006, 9.23-9.26 (秋季大会) 25pZL-9 “Co 酸化物超伝導体の電子構造： $\text{CoO}_2$  面の厚みとの関係”
- [66] 望月維人、小形正男：日本物理学会、千葉大学 2006, 9.23-9.26 (秋季大会) 25pZL-10 “Co 酸化物超伝導体の相図：二つの超伝導相と磁気秩序相”
- [67] 望月維人、小形正男：日本物理学会、千葉大学 2006, 9.23-9.26 (秋季大会) 25pZL-11 “Co 酸化物超伝導体の比熱、磁場侵入長、その他の物理量”
- [68] 伏屋雄紀、小形正男：日本物理学会、千葉大学 2006, 9.23-9.26 (秋季大会) 23pYF-14 “擬一次元電子系におけるスピンゆらぎと超伝導ゆらぎ”
- [69] 田仲由喜夫、伏屋雄紀、三宅和正、河野浩：日本物理学会、千葉大学 2006, 9.23-9.26 (秋季大会) “奇周波数ペア超伝導状態のトンネル効果の理論”
- [70] 宇田川将文、柳瀬陽一、小形正男：日本物理学会、千葉大学 2006, 9.23-9.26 (秋季大会) 24pZL-7 “ $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  磁場中非ユニタリ状態の実験的検出について”
- [71] 渡部洋、小形正男：日本物理学会、千葉大学 2006, 9.23-9.26 (秋季大会) 23pZL-8 “近藤格子型における大きなフェルミ面と小さなフェルミ面の問題：変分モンテカルロ法による解析”
- [72] 林勇太、小形正男：日本物理学会、千葉大学 2006, 9.23-9.26 (秋季大会) 26aYB-10 “異方的三角格子における低エネルギースピンの励起”

- [73] 小形正男：日本物理学会、鹿児島大学 2007, 3.18-3.21 (春季大会) 18pXE-4 “変則的  $t-t'-J$  モデルにおける超伝導”
- [74] 柳瀬陽一、M. Sigrist：日本物理学会、鹿児島大学 2007, 3.18-3.21 (春季大会) “反強磁性と共存する空間反転対称性の破れた超伝導の微視的解析：CePt<sub>3</sub>Si への適用”
- [75] 柳瀬陽一：日本物理学会、鹿児島大学 2007, 3.18-3.21 (春季大会) “不純物バンド超伝導における次元クロスオーバー：B-doped ダイヤモンドへの適用”
- [76] 田仲由喜夫、伏屋雄紀、三宅和正、河野浩：日本物理学会、鹿児島大学 2007, 3.18-3.21 (春季大会) “奇周波数超伝導状態における準粒子状態”
- [77] 伏屋雄紀、小形正男：日本物理学会、鹿児島大学 2007, 3.18-3.21 (春季大会) 21pRD-7 “三角格子  $t-J$  型におけるリング交換相互作用の効果”
- [78] 土浦宏紀、小形正男：日本物理学会、鹿児島大学 2007, 3.18-3.21 (春季大会) 20aXE-9 “銅酸化物超伝導体の磁束芯における状態密度に見られる小ピーク”
- [79] 五十嵐亮、小形正男：日本物理学会、鹿児島大学 2007, 3.18-3.21 (春季大会) 19pWA-2 “2次元古典 XY モデルにおけるフラストレーション”
- [80] 渡部洋、小形正男：日本物理学会、鹿児島大学 2007, 3.18-3.21 (春季大会) 19pXE-14 “重い電子系の量子臨界点におけるホール係数とフェルミ面の変化”
- [81] 吉川俊彦、小形正男：日本物理学会、鹿児島大学 2007, 3.18-3.21 (春季大会) 20aWB-3 “フラストレートした二次元ハバード模型電子系の基底状態の研究”
- [82] 林勇太、小形正男：日本物理学会、鹿児島大学 2007, 3.18-3.21 (春季大会) 18pRA-12 “異方角三角格子 Heisenberg モデルの RVB 平均場解析 - 長距離相互作用の効果 - ”
- [83] 湯川英美、小形正男：日本物理学会、鹿児島大学 2007, 3.18-3.21 (春季大会) 21aRA-8 “ $\theta$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub> MM'(SCN)<sub>4</sub> ( $M = \text{Rb, Cs}$ ,  $M' = \text{Zn, Co}$ ) における 2種類の電荷秩序状態の安定性”
- [84] 横山寿敏、小林憲二、小形正男：特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A01 班・A05 班合同ワークショップ (那須ビューホテル 2006, 7.27-7.29) “Variational Monte Carlo study of Mott transitions in two dimensions”
- [85] 是常 隆、宇田川将文、小形正男：特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A01 班・A05 班合同ワークショップ (那須ビューホテル 2006, 7.27-7.29) “From the triangular lattice to the kagomé lattice: Double peak structures and low energy excitations”
- [86] 伏屋雄紀、小形正男：特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A01 班・A05 班合同ワークショップ (那須ビューホテル 2006, 7.27-7.29) “Effect of the dimensionality in spin- and superconducting fluctuations”
- [87] 伏屋雄紀：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」新物性の理論研究会 (東京大学理学部 2006, 11.23-11.24) “超伝導, 密度波, 磁化率における次元性効果”
- [88] 林勇太、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」新物性の理論研究会 (東京大学理学部 2006, 11.23-11.24) “異方角三角格子ハイゼンベルグ模型の RVB 平均場による解析”
- [89] 渡部洋、小形正男：新しい物理を生む新物質 若手の会 (琵琶レイクオーツカ 2006, 12.18-19) “重い電子系の量子臨界点におけるホール係数とフェルミ面の変化”
- [90] 伏屋雄紀：特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A04 班研究会 (淡路夢舞台国際会議場 2006, 12) “奇周波数超伝導の存在可能性”
- [91] 宇田川将文、柳瀬陽一、小形正男：特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A04 スピン三重項超伝導小研究会 (淡路夢舞台国際会議場 2006, 12) “Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> における超伝導多重相について”
- [92] 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 —」2006 年度 成果報告会 (東京大学弥生講堂 2007, 1.5-1.7) “Co 酸化物の電子状態と超伝導”
- [93] 伏屋雄紀：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 6 回シンポジウム (北海道大学 2007 1.11-1.13) “擬次元系における超伝導機構 スピンゆらぎと次元性 ”
- [94] 五十嵐亮、藤堂眞治：ナノ統合拠点産学連携推進研究説明会 (東京 機械振興会館, 2007, 1.23). “ALPS プロジェクト：量子格子模型のためのオープンソースソフトウェア”
- [95] 五十嵐亮、小形正男：次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開発第 1 回公開シンポジウム (岡崎コンファレンスセンター 2007, 3.5-3.6) “2次元古典 XY モデルにおけるフラストレーション”

## 招待講演

- [96] 小形正男：特別推進研究「4次元空間中性子探査装置の開発と酸化物高温超伝導機構の解明」東北大学金属材料研究所共同利用基盤研究合同ワークショップ「高温超伝導体における特異な電子状態と物性」(東北大学金研 IFCAM セミナー室 2006, 11.7-11.8) “Effect of  $t'$  and impurity effects in  $t-J$  model”
- [97] 望月維人：日本応用磁気学会第 24 回化合物新磁性材料研究会「強磁性相関を内在する超伝導体の最近の話題」(学習院大学目白キャンパス, 2007 年 3 月 2 日) “多軌道型超伝導体 Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub> · yH<sub>2</sub>O における超伝導と磁性相関”

## (セミナー)

- [98] “Microscopic theory on the multi-component superconducting order parameter in Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> and Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub> · yH<sub>2</sub>O” Y. Yanase, M. Mochizuki, M. Udagawa and M. Ogata ETH-Zurich, Switzerland, 2006 April
- [99] “Non-centrosymmetric Superconductivity and Antiferromagnetic Order: Microscopic Discussion of CePt<sub>3</sub>Si” Y. Yanase and M. Sigrist ETH-Zurich, Switzerland, 2006 December

- [100] “Illuminating views on non centrosymmetric superconductivity” Y. Yanase CEA-Grenoble, France, 2007 January
- [101] “Non-centrosymmetric Superconductivity and Antiferromagnetic Order: Microscopic Discussion of CePt3Si” Y. Yanase and M. Sigrist Max-Planck Institute Stuttgart, Germany 2007 January
- [102] 望月維人：第 21 回原研・兵庫県大合同コロキウム（兵庫県 SPring8, 2007 年 2 月 13 日）“水和 Co 酸化物  $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$  における Co 三角格子上の多軌道型超伝導”
- [103] 伏屋雄紀：大阪大学，三宅研究室セミナー “Role of Fluctuations in Density Wave and Superconductivity of Quasi-One-Dimensional Conductors”
- [104] 伏屋雄紀：物性研究所，上床研究室セミナー “擬一次元系におけるスピンゆらぎと超伝導ゆらぎ”

### 3.5 常行研究室

第一原理分子動力学法など基本原理に基づく計算機シミュレーションは，観測や実験からは得られない物性情報を得たり，あるいは実験に先じた予言を行うことを可能にする。当研究室では主にそのような計算物理学的手法を開発しながら，物性物理学の基礎研究を行っている。電子相関の強い系や 2 成分量子系を取り扱うための新しい第一原理電子状態計算手法の開発，超高压下など極限条件下の結晶構造探索と物性予測，固体表面の構造・電子状態・化学反応機構，水素を含む固体の量子効果，強誘電体の電子物性などが主要な研究テーマである。

#### 3.5.1 固体表面の電子状態と化学反応

##### シリコン表面の有機化学

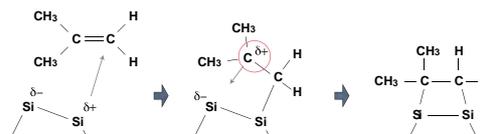
Si(001) 清浄表面では，表面再構成によって主に高さ方向の非対称を持つシリコンダイマーが列をなして規則的に並んだ構造があらわれる。各シリコンダイマーの down サイトには系の最高占有準位 (HOMO) を構成する軌道が，up サイトには系の最低非占有準位 (LUMO) を構成する軌道が位置している。これらのサイトはそれぞれ Lewis の酸・塩基としての性質を持っており，そこでは求電子のおよび求核的な化学反応が起こる。例えば，孤立電子対を持つ様々な分子が down サイトに対して配位結合を行ない，あるいは水素原子の解離に至る。また，不飽和結合を持つ有機化合物の環状付加反応もこの表面における典型的な化学吸着プロセスのひとつである。

アルケン分子も環状付加反応によって安定した Si-C 結合を形成するが，その反応経路上に前駆状態（最終的な吸着状態への入口となる弱い吸着状態）が存在することを昨年度までの研究で明らかにしてきた。2006 年度は，C=C 二重結合を挟んで非対称な構造を持つアルケン分子が「吸着方向の選択性」を示す

という物性研究所の吉信グループからの実験報告を受け，第一原理計算による解析を行なった。

その結果，前駆状態の構造が既に非対称なものであり，それが立体障害ではなく純粋に電子論的な効果によるものであることを見いだした。そのメカニズムは有機化学において有名な選択則である「マルコフニコフ則」の考え方を表面系に拡張するものであり，アルケン分子/Si(001) 表面系の環状付加反応についてこれまで知られている「吸着サイトの選択性」や「幾何異性の保存性」と並ぶ「吸着方向の選択性」という基本概念の提案につながった（図 3.5.9）

(a) cycloaddition on Si(001)



(b) HX addition in liquid phase: Markovnikov's rule

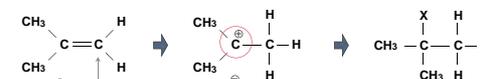


図 3.5.9: (a) Si(001) 表面における非対称アルケン分子の環状付加反応プロセスと，(b) 液相での非対称アルケン分子へのハロゲン化水素の付加反応プロセス（マルコフニコフ則）。

電場中での「有機分子/シリコン表面」吸着系の電子状態

シリコン電極上に化学吸着した有機分子の電気伝導特性を理解するための重要な要素として，シリコン表面と有機分子の結合が原子レベルでどのように規定されるか，およびその電子状態に対する電場や不純物の影響はどのように現れるかを知ることが挙げられる。

最近，縮退半導体としての n 型 Si(111) 表面を長鎖アルキル分子で化学修飾した系において，水銀電極を用いた I-V 特性の測定結果が特徴的な非対称性を示すことが物性研究所の吉信グループによって報告された。そこでドーバントを考慮した系を設定して，ESM 法 + 第一原理計算の枠組みで電場の効果を調べ，真空側に突き出したアルキル鎖に局在する状態のエネルギーシフトが電子の伝達経路に影響を与えたとする解釈を支持する結果を得つつある。前年度までに得られた知見と併せると，これは孤立電子対など適当な電子構造を持つ部位を導入することで分子伝導の I-V 特性をデザインできる可能性を示唆しており，今後の発展が興味深い。

### 3.5.2 ペロブスカイト型強誘電体の不純物効果

ATiO<sub>3</sub> (A=Sr, Ba 及びその混合体) で示されるペロブスカイト型酸化物は、コンデンサ等の電子部品セラミックス材料の原料として産業上重要な役割を担っている。基礎物性的な面では SrTiO<sub>3</sub> の量子常誘電特性などの解明が様々な研究機関によって進められているが、ペロブスカイト型酸化物へドーブした微量添加元素が及ぼす効果については未解明の点が数多く残されている。我々はこれらペロブスカイト型酸化物における水素不純物や、Ti サイト置換による物性変化の第一原理計算による解明を進めている。

今年度は水素不純物に関して計算中にセルに導入する仮想的なキャリア量が計算結果に及ぼす影響の検討を進めた。ペロブスカイト中の酸化物イオンとプロトンが形成する OH 結合振動数は従来報告されている第一原理計算の結果では低く見積られる事が知られていたが、我々は計算に用いるセルを最も安定な価数にしてポテンシャル表面を求めることにより、極めて実験結果に近い OH 伸縮振動数等を求める事が可能になることを示した。さらに、格子間水素が拡散する際の拡散障壁エネルギー (中性条件の計算では 0.7eV) は最安定なチャージによって 0.2eV 程度上昇することを確認したが、これは同時に検討を進めた水素原子核の量子効果による拡散障壁の低下量とほぼ等しいことを示し、従来報告されていた中性条件における拡散障壁の計算が実験結果とよく一致していたのは、両者がよく打ち消しあっていたためであると予想した。

また、Ti サイト置換として SrTiO<sub>3</sub> 中の微量 Mn 置換に関する計算を進めた。古くから ESR 測定によって SrTiO<sub>3</sub> 中に微量ドーブされた Mn<sup>2+</sup> 濃度はアレニウスプロットによって良く表現される事知られていたが、この現象の理由は未だ解明されていない。我々は MnO<sub>6</sub> 酸素八面体の 3 次元等方向的な Tilting 歪によって Mn の e<sub>g</sub> 対称性軌道エネルギーが低下し、Mn の価数が 4 価から 2 価に有効に変化することを第一原理計算から示した。また、これらの Tilting 歪の熱励起によって Mn 価数が変化するモデルを考案し、このモデルによって実験的に測定されている Mn<sup>2+</sup> 濃度変化が良く説明できることを示した。

### 3.5.3 超高压下の物質変化

#### YH<sub>3</sub> の絶縁体金属転移

昨年より引き続き、YH<sub>3</sub> の圧力誘起絶縁体金属転移の第一原理的研究を行った。YH<sub>3</sub> は常圧では絶縁体であるが、加圧により金属へと転移する。その転移の前で Y 原子は fcc 格子を組んだまま変化しないために、金属化の原因については水素位置の変位および単純なバンドギャップクローザーの 2 つが考えられるが、局所密度近似 (LDA) の範囲内での密度汎関数法 (DFT) による第一原理計算では、加圧による水素位置の変位は見られず、水素は対称性の高い

格子間サイトである八面体サイトおよび四面体サイトに存在することがわかった。この結果からは、少なくとも完全結晶の YH<sub>3</sub> においては、加圧による水素原子の変位にともなう構造変化が絶縁体金属転移を引き起こすことは考えにくい。今後、水素欠陥の効果などの見積りが課題である。

### 3.5.4 タンパク質の電子状態

近年、密度汎関数法やフラグメント MO 法などの量子化学的手法を用いた、タンパク質の大規模電子状態計算の試みが報告されるようになり、将来的には生体反応や生体物質機能の電子論に基づく理解につながるものと期待されている。そこで我々は、複雑なタンパク質の電子状態を理解する手段として、タンパク質の構成ユニットであるアミノ酸の分子軌道を用いた電子状態解析手法を開発している。本年はその最初の試みとして、アミノ酸分子の HOMO, LUMO 準位近傍の分子軌道の線形結合によって、短いポリペプチドの HOMO, LUMO 準位近傍の軌道がどの程度の精度で展開できるかを確かめた。その結果、ペプチド結合の寸断された単純なアミノ酸分子の軌道を用いると展開精度が悪いが、ペプチド結合部位を含むようにポリペプチドから切り出した擬アミノ酸分子の軌道を使えば展開精度が良く、また展開結果の解釈も容易であることが明らかになった。これはポリペプチドの HOMO, LUMO 近傍にペプチド結合由来の軌道が現れるためである。

### 3.5.5 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

当研究室では電子相関効果を考慮した電子状態計算手法であるトランスコリレイティッド (TC) 法を固体系に適用してきた。TC 法は 1969 年に Boys と Handy によって初めて提案され、従来は原子・分子系に多く適用されてきた方法である。TC 法において波動関数は、相関波動関数  $F\Phi$  で表される。 $\Phi$  はスレーター行列式であり、 $F$  はジャストロウ関数  $F = \exp[-\sum_{i<j} u_{ij}]$  である。ここで  $u_{ij}$  はジャストロウ因子と呼ばれる 2 体関数である。多体ハミルトニアン  $H$  を相似変換することにより有効ハミルトニアン  $H_{TC} = F^{-1}HF$  が得られ、これを用いることにより、多体積分を行うことなく 3 体積分まで必要な積分を全て計算することができる。この有効ハミルトニアンのエネルギー分散を最小化することで、TC 法における 1 電子軌道および軌道エネルギーが求められる。この軌道エネルギーに関しては、ハートリーフォック (HF) 法と同様にクーブマンズの定理が成り立つため、全エネルギー計算と同時に固体のバンド構造を求めることが可能である。これまでに、TC 法により求めた固体の半導体のバンドギャップは HF 法の結果を大きく改善していることを報告している。

今年度は、双直交形式による TC 法の再定式化を行い、ハバードモデルを用いてテスト計算を行った。また第一原理 TC 法により得られる全エネルギーの信頼性について検討を行った。具体的にはバルクシリコンおよびダイヤモンドにおいて HF および TC 法による全エネルギーのセルパラメーター依存性を比較し、体積弾性率を求めた。図 3.5.10 に、ダイヤモンドの TC 法による全エネルギーのセルパラメーター依存性を示す。この図より得られる格子定数は 6.60 Bohr であり、実験値と 3% 程度の誤差で格子定数が求められた。この結果は、TC 法による固体の構造最適化が可能であることを示している。また、バルクシリコンおよびダイヤモンドの体積弾性率は、HF 法では 115, 524 GPa, TC 法では 102, 501 GPa となった。実験値はそれぞれ 99.2 および 443 GPa であり、電子相関効果を考慮した TC 法の結果は、HF 法の結果を改善することが示された。今年度の研究によって TC 法の特徴である「波動関数理論により、電子相関を考慮した固体の全エネルギーとバンド構造が計算できる」という点の数値的検証が終了した。今後は、計算コストを下げる方法を開発していくと同時に、具体的な系に適用していく予定である。

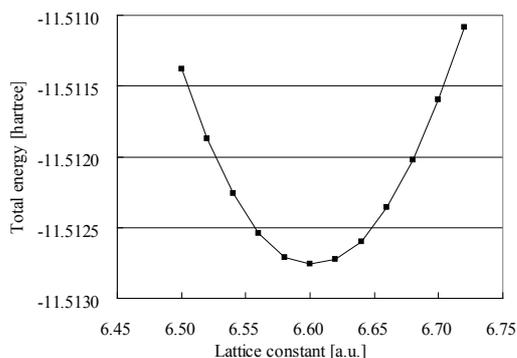


図 3.5.10: TC 法で求めたダイヤモンド全エネルギーのセルパラメーター依存性

#### 第一原理計算に基づくモデルハミルトニアン構築

我々はこれまで非経験的に固体のモデルハミルトニアンを構築するための方法論(ダウンフォールディング)の開発を行ってきた。現在、開発されたプログラムを用いて遷移金属カルコゲナイド・ゼオライト・分子性固体など学会で精力的に研究されている様々な系のモデル構築を行っている。我々は単に模型を構築するばかりでなく、得られた模型が本当に信頼できるかどうかを査定することも重要な課題と考え、模型に対して実際にスペクトルなどの実験観測を計算するプログラムの開発を行い、モデルの結果が実験を再現できるか入念に調べている。本年度は特に半導体の電子励起スペクトルについて先のダウンフォールディングに基づく研究を行った。

基底状態の記述として一体理論が良い近似となる

半導体のような場合においても、励起状態では多体相関が本質的であり、例えば励起スペクトルを一体理論に基づいて計算すると、低エネルギー領域でのスペクトル強度がかなり小さく見積もられることが知られている。これは、電子励起にともなう電子正孔間相互作用の取り込みが一体理論では欠落していることに起因しており、スペクトル評価におけるこの効果の取り込みが必須となる。本研究では、固体の電子励起状態を single configuration interaction (s-CI) 近似のもとで計算するプログラムを開発し、電子正孔間相互作用を考慮した光学吸収スペクトルの計算を行った。テスト系として GaAs を選び、この物質の complete neglect differential overlap 模型を ab initio 計算に基づいて作った。電子正孔間相互作用の大きさは模型内のクーロン相互作用パラメータの値に敏感なので、模型の励起スペクトルが実験を再現できるかどうかをみることによってダウンフォールディング手続きのチェックを行うことができる。s-CI スペクトルはほぼ完全に実験を再現する一方で、クーロン相互作用パラメータを 0.5 及び 1.5 倍だけ様にスケールさせて計算したスペクトルは実験を再現しなかった。このことから ab initio 計算より決められたパラメータは実験を再現する上で適切な値であることが分かった。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Yamashita, S. Yamamoto, K. Mukai, J. Yoshinobu, Y. Harada, T. Tokushima, T. Takeuchi, Y. Tanaka, S. Shin, K. Akagi and S. Tsuneyuki, Direct observation of site-specific valence electronic structure at the SiO<sub>2</sub>/Si interface, Phys. Rev. B, 73, (2006) 045336.
- [2] Y. Suwa, M. Fujimori, S. Heike, Y. Terada, Y. Yoshimoto, K. Akagi, O. Sugino and T. Hashizume, Formation of dihydride chains on H-terminated Si(100)-2x1 surfaces: Scanning tunneling microscopy and first-principles calculations, Phys. Rev. B, 74, (2006) 205308.
- [3] H. Kagoshima, M. Uematsu, K. Akagi, S. Tsuneyuki, T. Akiyama and K. Shiraiishi, Mechanism of oxide deformation during silicon thermal oxidation, Physica B, 376, (2006) 407.
- [4] Kazuma Nakamura, Ryotaro Arita, Yoshihide Yoshimoto, and Shinji Tsuneyuki: 「First-principles calculation of effective onsite Coulomb interaction of 3d transition metals: Constrained local density functional approach with maximally localized Wannier function」, Phys. Rev. B 74, 235113 (2006).
- [5] R. Sakuma and S. Tsuneyuki, Electronic Structure Calculations of Solids with a Similarity-Transformed Hamiltonian, J. Phys. Soc. Jpn. 75 (2006) 103705.
- [6] K. Sodeyama, K. Miyamoto, H. Nakai, Non-Born-Oppenheimer effects predicted by translation-free nuclear orbital plus molecular orbital method, Chem. Phys. Lett., 421 (2006) 72.

- [7] Keitaro Sodeyama, Hiroaki Nishizawa, Minoru Hoshino, Masato Kobayashi, Hiromi Nakai, Hybrid treatment combining the translation- and rotation-free nuclear orbital plus molecular orbital theory with generator coordinate method: TRF-NOMO/GCM, Chem. Phys. Lett., 433 (2007) 409.
- [8] K.Oguchi, M.Nagao, H.Emeyama, T,Katayama, Y.Yamashita, K.Mukai, K.Akagi and S.Tsuneyuki, Regioselective Cycloaddition Reaction of Alkene Molecules with the Asymmetric Dimer on Si(100) c(4x2), J. Am. Chem. Soc., 129 (2007) 1242.
- (国内雑誌)
- [9] 常行真司「計算物理(物性編)第2回,第4回,第6回,第8回,第10回,第12回」,パリテイ Vol.21, No.5, 47(2006); No.7, 51 (2006); No.9, 58 (2006); No.11, 58 (2006); No.1, 94 (2007); No.3, 54 (2007).
- [10] 常行真司「水素の第一原理計算」, 固体物理 vol.41 (11), 823 (2006).
- [11] 加藤浩之, 赤木和人「表面反応から探る水分子反応: 水素結合の役割」, 固体物理 vol.41 (11), 795 (2006).
- (学位論文)
- [12] (修士論文)佐縁馬寛「双直交形式を用いたトランスコリレイティッド法の開発とハバードモデルへの応用」, 東京大学.
- [13] (修士論文)小堀知輝「LCMO法に基づくタンパク質の電子状態モデル」, 東京大学.
- [14] Rei Sakuma (佐久間怜), Pressure-Induced Insulator-Metal Transition in  $\text{YH}_3$ : First-Principles Study.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [15] Kazuto Akagi and Shinji Tsuneyuki: Organic molecules on Si(100) in electric field : a first-principles approach, CREST workshops on physics of single molecules; Transport properties of single molecules, atomic wires and DNA, Shonan, Japan, May 16, 2006.
- [16] Kazuto Akagi and Shinji Tsuneyuki: Regioselective Chemisorption of Alkene Molecules on Si(100) Clean Surface, The 10th ISSP International Symposium on Nanoscience at Surfaces (ISSP10), Kashiwa, Japan, October 11, 2006.
- [17] Michiko Tanaka, Shinnosuke Furuya and Satoshi Watanabe: Capacitance and Conductance of Atomic Point Contacts, The University of Tokyo International Symposium and The Tenth ISSP International Symposium on Nanoscience at Surfaces, The Institute for Solid State Physics (Kashiwa), Japan, Oct. 9-13, 2006.
- [18] S. Tsuneyuki, R. Sakuma, K. Sodeyama and H. Saenma: A Wave-Function Approach to Correlated Electrons in Solids, International Workshop on First Principles Calculation of Correlated Electrons, University of Tokyo, Nov. 30, 2006.
- [19] K. Nakamura, Y. Yoshimoto, R. Arita, M. Imada, and S. Tsuneyuki: Optical Absorption Spectrum by Single Excitation Configuration Interaction Method, International Workshop on First Principles Calculation of Correlated Electrons, University of Tokyo, Nov. 30, 2006.
- [20] K. Nakamura, M. Mochizuki, and R. Arita: Ab initio Analysis for Geometrically Frustrated System: A study of  $\text{NiGa}_2\text{S}_4$ , International Workshop on First Principles Calculation of Correlated Electrons, University of Tokyo, Nov. 30, 2006.
- [21] Keitaro Sodeyama, Rei Sakuma and Shinji Tsuneyuki: Total energy calculations of solids using the transcorrelated method, International Workshop on First Principles Calculation of Correlated Electrons (FPCCE), University of Tokyo (Hongo Campus), Japan, Dec. 1, 2006.
- [22] S. Tsuneyuki, K. Sodeyama and H. Saenma: Transcorrelated Method Applied to the Hubbard Model, International Conference on Quantum Simulators and Design (QSD2006), Higashi-Hiroshima, Japan, December 4-6, 2006.
- [23] Kazuto Akagi and Shinji Tsuneyuki: Regioselectivity of Organic Molecules on Si(100) Clean Surface, International Conference on Quantum Simulators and Design (QSD2006), Higashi-Hiroshima, Japan, December 4, 2006.
- [24] R. Sakuma, K. Sodeyama, and S. Tsuneyuki: Transcorrelated Method: Use of a Similarity-Transformed Hamiltonian in Electronic Structure Calculations, International Conference on Quantum Simulators and Design, Hiroshima, Japan, December 3-6, 2006.
- [25] K. Nakamura, Y. Yoshimoto, R. Arita, M. Imada, and S. Tsuneyuki: Optical Absorption Spectrum by Single Excitation Configuration Interaction Method, International Conference on Quantum Simulators and Design, Hiroshima University, Dec. 3, 2006.
- [26] K. Nakamura, M. Mochizuki, and R. Arita: Ab initio Analysis for Geometrically Frustrated System: A study of  $\text{NiGa}_2\text{S}_4$ , International Conference on Quantum Simulators and Design, Hiroshima University, Dec. 4, 2006.
- [27] Shinnosuke Furuya and Satoshi Watanabe: Ab Initio Study of Electric Properties of Atomic Chains, International Conference on Quantum Simulators and Design, Hiroshima University (Higashi-Hiroshima), Japan, Dec. 3-6, 2006.
- [28] Kazuto Akagi and Shinji Tsuneyuki: Regioselectivity of Organic Molecules on Si(100) Clean Surface, Gordon Research Conference on Chemical

- Reactions at Surfaces, Ventura, USA, February 13, 2007.
- [29] K. Nakamura, Y. Yoshimoto, R. Arita, M. Imada, and S. Tsuneyuki: Optical Absorption Spectrum by Single Excitation Configuration Interaction Method, 2007 March Meeting, the American Physical Society, Denver, Mar. 5, 2007.
- [30] R. Sakuma, K. Sodeyama, and S. Tsuneyuki: Band structure calculations using the transcorrelated method, 2007 APS March Meeting, Denver, Colorado, March 5-9, 2007.
- [31] Keitaro Sodeyama, Rei Sakuma and Shinji Tsuneyuki: Total energy calculations using the transcorrelated method: wavefunction approach for solids, MAR07 Meeting of The American Physical Society, Colorado (Denver), USA, March 6, 2007.
- [32] Michiko Tanaka, Shinnosuke Furuya and Satoshi Watanabe: First-Principles Analyses of Capacitance and Conductance of Atomic Point Contacts, American Physical Society Annual March Meeting, Denver, United States of America, Mar. 5-9, 2007.
- 招待講演
- [33] S. Tsuneyuki: 'Transcorrelated method: A new first-principles theory for solids', Computational Science Workshop (CSW2006), Tsukuba, Japan, Apr. 17-19, 2006.
- [34] Kazuto Akagi and Shinji Tsuneyuki: Organic Chemistry on Si(001) Surface: Toward Well-Defined Interface International Symposium on Theories of Organic/Metal Interfaces 2007 (ISTOMI'07), Osaka, Japan, January 17, 2007.
- (国内会議)
- 一般講演
- [35] 中井浩巳, 星野稔, 宮本開任, 袖山慶太郎, 桐生大義, 西澤宏晃: 「NOMO 法の高精度化と応用」, 日本コンピュータ化学会 2006 春季年会, 東京工業大学(大岡山), 2006 年 6 月 1 日.
- [36] 佐久間怜, 常行真司, 「希土類水素化物の圧力誘起電子相転移」, 科学研究費補助金 特定領域研究「次世代量子シミュレータ・量子デザイン手法の開発」ミニワークショップ大規模・高精度電子状態計算手法に関する研究会, 大阪大学産業科学研究所, 2006 年 7 月 13-14 日.
- [37] 赤木和人, 大谷実, 杉野修, 常行真司: 「吸着子・表面間の軌道混成への電場の影響の第一原理計算による評価」, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 千葉大学(千葉県), 2006 年 9 月 24 日.
- [38] 西澤宏晃, 袖山慶太郎, 中井浩巳: 「TRF-NOMO/GCM 法の開発と応用」, 分子構造総合討論会 2006, グランシップ(静岡), 2006 年 9 月 21 日.
- [39] 中村和磨, 有田亮太郎, 吉本芳英, 今田正俊, 常行真司: 「Single CI 計算による固体の光学吸収スペクトル」, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 千葉大学, 2006 年 9 月 24 日.
- [40] 中村和磨: 「現実物質のモデルハミルトニアンをいかに非経験的に構築するか?」, 理研シンポジウム第二回電子複雑系科学研究会「電子複雑系の機能と物性開拓」, 理化学研究所, 2006 年 9 月 24 日.
- [41] 佐久間怜, 小谷岳生, 三宅隆, 常行真司, 「YH<sub>3</sub> の圧力誘起絶縁体金属転移: 第一原理計算」, 第 47 回高圧討論会, 熊本市産業文化会館, 2006 年 11 月 9-11 日.
- [42] 赤木和人, 常行真司: 「Si(001) 表面における不飽和炭化水素の化学吸着とマルコフニコフ則: 第一原理計算によるアプローチ」, 第 25 回吸着分子セミナー・第 7 回表面エレクトロニクス研究会(滋賀県), 2006 年 12 月 8 日.
- [43] 常行真司: 「トランスコリレイティッド法に基づく電子状態計算」物性研究所短期研究会「計算物性科学におけるスーパーコンピュータ利用の現状と展望」, 物性研究所(柏市), 2006 年 12 月 11-13 日.
- [44] 古家真之介, 渡邊聡: 「第一原理計算による金属原子鎖の電気伝導解析」, 物性研究所短期研究会「計算物性科学におけるスーパーコンピュータ利用の現状と展望」, 物性研究所(柏市), 2006 年 12 月 11-13 日.
- [45] 中村和磨: 「配置間相互作用に基づく固体の電子状態計算」, 機構長裁量経費研究会「次世代を担う若手研究者共同研究ネットワークの構築 分子研共同利用装置・大型計算機を軸とした分野横断型研究の新展開」, 分子科学研究所, 2007 年 1 月 23 日.
- [46] 常行真司, 佐久間怜, 袖山慶太郎: 「Transcorrelated Method Applied to the Hubbard Model」, 第二回「電子状態計算における電子相関の諸問題」研究会, 北海道大学(札幌), 2007 年 2 月 14 日.
- [47] 袖山慶太郎, 佐久間怜, 常行真司: 「Total energy calculation of solids in the framework of wavefunction approach by the transcorrelated method」, 第二回「電子状態計算における電子相関の諸問題」研究会, 北海道大学(札幌), 2007 年 2 月 15 日.
- [48] 古家真之介, 常行真司: 表面構造シミュレーションのための弾性格子グリーン関数法プログラムの作成, 次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開発 第 1 回公開シンポジウム, 自然科学研究機構(岡崎市), 2007 年 3 月 5-6 日.
- [49] 赤木和人, 常行真司: 「アルケン分子 / Si(001) 表面系の化学吸着における「マルコフニコフ則」」, 日本物理学会 2007 年春季大会, 鹿児島大学(鹿児島県), 2009 年 3 月 21 日.
- [50] 佐久間怜, 常行真司: 「平面波基底によるハイブリット法 HSE の実装と希土類水素化物への適用」, 日本物理学会 2006 年度春季大会, 鹿児島大学, 2007 年 3 月 18-21 日.
- [51] 袖山慶太郎, 佐久間怜, 常行真司: 「トランスコリレイティッド法を用いた固体の全エネルギー計算」, 日本物理学会 2007 年春季大会, 鹿児島大学(鹿児島県), 2007 年 3 月 19 日.

- [52] 佐縁馬寛, 袖山慶太郎, 佐久間怜, 常行真司: 「双直交トランスコリレイティッド法の開発とそのハバードモデルへの応用」, 日本物理学会 2007 年春季大会, 鹿児島大学 (鹿児島), 2007 年 3 月 21 日.
- [53] 田中倫子, 古家真之介, 渡邊聡: 「原子点接触構造のキャパシタンスとコンダクタンス」, 日本物理学会 2007 年春季大会, 鹿児島大学 (鹿児島市), 2007 年 3 月 18-21 日.

#### 招待講演

- [54] 常行真司: 「新計算手法と京速」, 筑波大学計算科学研究センター主催 第二回「計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム「計算科学の戦略と次世代スーパーコンピュータ」(つくば国際会議場), 2006 年 4 月 4 日.

#### (セミナー)

- [55] 常行真司: 「強誘電体の第一原理計算: ベリー位相とその応用」, 東工大応用セラミックス研究所セミナー, 2007 年 3 月 1 日.

ジャー総和則が破れているのと対照的な結果である [17] .

## 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 線磁気円二色性などの手法により、固体電子物性の研究を行っている。とくに、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している。具体的には、遷移金属酸化物、磁性半導体などが示す金属-絶縁体転移（モット転移、電荷・軌道整列、アンダーソン転移）、高温超伝導、巨大磁気抵抗、巨大熱電能の機構解明と、これらの物質が作る界面・ナノ構造の新奇電子状態の探索と解明をめざす。実験室における極紫外・軟 X 線光源を用いた測定のために、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、パークレー放射光施設、台湾放射光で共同利用実験・共同研究を行っている。

#### 4.1.1 高温超伝導

銅酸化物における高温超伝導現象は、その発見以来 20 年間、膨大な研究がなされてきたが、機構解明に至っていない。この世紀の難問の解決に向けて、光電子分光、とくに角度分解光電子分光（angle-resolved photoemission spectroscopy: ARPES）は非常に重要な役割を果たしている。

#### 超伝導ギャップと擬ギャップの区別

不足ドープ領域の高温超伝導体において、超伝導臨界温度  $T_c$  より高温側で開く擬ギャップの起源と超伝導との関係の解明は長い間課題となってきた。高温超伝導体  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  の光電子スペクトルの詳細な温度依存性を測定し、超伝導ギャップは擬ギャップよりはるかに小さいことを見出した [21]。高温超伝導体  $\text{Bi2212}$  の ARPES 測定より、超伝導ギャップはブリルアン域の対角線付近に、擬ギャップはそれとは 45 度離れた方向に開くことを明らかにした [15]。

#### フェルミ面のラッティンジャー総和則

$\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  の ARPES を系統的に測定し、フェルミ面の面積が全伝導電子数に等しいというラッティンジャー総和則が近似的に満たされていることを見出した。これは、多くの高温超伝導体でラッティン

#### フェルミアークの振舞いと物性

擬ギャップが開くことによって残されたフェルミ面の一部でアーク状の部分の ARPES スペクトルの解析から、不足ドープ領域で電子比熱係数、ホール係数、超流体密度がホールドープ量に比例して増大することを説明した [20]。

#### 4.1.2 強相関遷移金属酸化物

遷移金属酸化物は、高温超伝導の他にも金属-絶縁体転移、巨大磁気抵抗、スピン・電荷・軌道・格子の自由度の絡んだ現象など非常に多彩な物性を示す。光電子分光により、これらの物質のバンド構造・フェルミ面、電荷・軌道・格子の揺らぎなど、多くの重要な知見を得ることができる。

#### ペロブスカイト型 Mn 酸化物における化学ポテンシャル・シフトとスペクトル強度の移動

ドープしたホールが低温でストライプ状に整列することで知られる  $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$  について、系統的な光電子分光測定を行った「ストライプ」状揺らぎの周期がホール濃度とともに変化する高温領域で、予測された化学ポテンシャル・シフトとスペクトル強度の移動が観測された [10]。

#### 単結晶薄膜を用いたペロブスカイト型 Fe 酸化物の電子構造

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、温度変化に伴う電子構造の変化を高精度で調べた [2]。また、ARPES 測定を行って得られたバンド構造はタイト・バインディング近似バンド構造とよい一致を示したが、計算に比べ全体にフェルミ準位から遠ざかる方向にシフトし、強いポーラロン効果によるホールの局所を示唆した [11]。

#### 4.1.3 酸化物界面

強相関物質をはじめとする酸化物がつくる界面は、それぞれの物質にはない新しい物性・機能を発現し、これらを理解することが将来の「酸化物エレクトロニクス」の実現にとって必要である。光電子分光・軟 X 線吸収分光を用いることによって、界面の電子状態を明らかにできる。

#### モット絶縁体 - バンド絶縁体界面の金属状態

強い電子相関により電子が局在したモット絶縁体  $\text{LaTiO}_3$  (電子配置  $d^1$ ) と通常のバンド絶縁体  $\text{SrTiO}_3$  (電子配置  $d^0$ ) の界面に金属状態が出現することが、電子顕微鏡による観察と理論計算から示唆されていたが、これを光電子分光により観測し証明した [8] .

#### $\text{LaAlO}_3/\text{LaVO}_3$ 多層膜構造における電荷再構成

ともに極性をもつ  $\text{LaAlO}_3$  層と  $\text{LaVO}_3$  層の界面で、 $V$  の価数が増加することを内殻光電子分光の測定により見出した . この増加は  $\dots/\text{AlO}_2/\text{LaO}/\text{VO}_2/\text{LaO}/\dots$  では起こるが  $\dots/\text{LaO}/\text{VO}_2/\text{LaO}/\text{AlO}_2/\dots$  では起こらず、静電ポテンシャルの発散を抑える電荷再構成モデルで解釈された [16] .

#### 酸化物 $p$ - $n$ 接合のビルトイン・ポテンシャルの観測

酸化物  $p$ - $n$  接合である  $\text{NiO}/\text{ZnO}$  界面におけるビルトイン・ポテンシャルを、イオンスパッタと内殻光電子スペクトル測定を組み合わせた新しい方法で求め、 $I$ - $V$  特性を説明するバンド・ダイアグラムを得た [12] .

#### 強誘電体薄膜における強誘電性の消失限界

電子デバイスの高度集積化に伴い、強誘電性がどのくらい小さなサイズまで維持されるかが重要となっている . 強誘電体  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$  薄膜の光電子分光スペクトルの温度変化が膜厚約 2.5 nm 以下で消失することを見出し、 $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$  の強誘電性臨界膜厚が約 2.5 nm であると結論した [26] .

#### 4.1.4 半導体スピントロニクス

従来の半導体エレクトロニクスにスピンの自由度を導入する「半導体スピントロニクス」の実現には、室温で強磁性を示す半導体の開発が必要不可欠である . 軟 X 線磁気円二色性 ( x-ray magnetic circular dichroism: XMCD ) を用いた元素・磁気応答選択的な電子状態の研究は、強磁性半導体の開発に重要な役割を果たす .

#### Co をドーブした $\text{TiO}_2$ の室温強磁性

$\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$  の  $\text{Co}$   $2p$  内殻吸収スペクトルの XMCD を室温で測定し、強磁性を担っているのが  $\text{Co}$  金属ではなく  $\text{Ti}$  原子を置換した  $\text{Co}$  イオンであることを明らかにした [9] .

#### 熱拡散により Mn をドーブした GaN

GaN に Mn 金属を蒸着し熱拡散させた試料について、イオンスパッタと内殻光電子分光測定により深さ方向分析を行った . 試料深部に Mn 原子が拡散し、希薄磁性半導体  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{N}$  中の Mn イオンに似た電子状態になっていることを見出した . GaN 基板に  $p$  型を用いた場合は、わずかながら室温で強磁性が見られた [25] .

#### 弱い強磁性を示す V ドープ ZnO

弱い強磁性を示す  $\text{Zn}_{1-x}\text{V}_x\text{O}$  試料の XMCD 測定を行い、 $V$  原子の一部が常磁性に、大部分は反強磁性状態にあることを見出した . これらの結果は、マクロな磁化測定とも定量的にコンシステントであった [19] .

< 報文 >

(原著論文)

- [1] O. Rader, M. Lezaic, S. Blugel, A. Fujimori, A. Kimura, N. Kamakura, A. Kakizaki, S. Miyanishi and H. Akinaga: Spin-Polarized Surface State of  $\text{MnSb}(0001)$ , *New J. Phys.* **7** (2005) 111–1–10.
- [2] H. Wadati, A. Chikamatsu, R. Hashimoto, M. Takizawa, H. Kumigashira, A. Fujimori, M. Oshima, M. Lippmaa, M. Kawasaki, and H. Koinuma: Temperature-Dependent Soft X-Ray Photoemission and Absorption Studies of Charge Disproportionation in  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* **75** (2006) 054704–1–6; cond-mat/0410202.
- [3] M. Naeem, S. K. Hasanain, M. Kobayashi, Y. Ishida, A. Fujimori, S. Buzby and S.I. Shah: Effect of Reducing Atmosphere on the Magnetism of  $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$  ( $0 \leq x \leq 0.10$ ) Nanoparticles, *Nanotechnology* **17** (2006) 2675–2680; cond-mat/0512597.
- [4] H. Yagi, T. Yoshida, A. Fujimori, Y. Kohsaka, M. Misawa, T. Sasagawa, H. Takagi, M. Azuma and M. Takano: Chemical Potential Shift in Lightly-Doped to Optimally-Doped  $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ , *Phys. Rev. B* **73** (2006) 172503–1–4.
- [5] A. Chikamatsu, H. Wadati, H. Kumigashira, M. Oshima, A. Fujimori, N. Hamada, T. Ohnishi, M. Lippmaa, K. Ono, M. Kawasaki and H. Koinuma: Band Structure and Fermi Surface of  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$  Thin Films Studied by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, *Phys. Rev. B* **73** (2006) 195105–1–7; cond-mat/0503373.
- [6] S-i. Fujimori, A. Fujimori, K. Shimada, T. Narimura, K. Kobayashi, H. Namatame, M. Taniguchi, H. Harima, H. Shishido, S. Ikeda, D. Aoki, Y. Tokiwa, Y. Haga and Y. Onuki: Direct Observation of Quasi-Particle Band in  $\text{CeIrIn}_5$ : Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy Study, *Phys. Rev. B* **73** (2006) 224517–1–5; cond-mat/0602296.

- [7] H. Kumigashira, A. Chikamatsu, R. Hashimoto, M. Oshima, T. Ohnishi, M. Lippmaa, H. Wadati, A. Fujimori, K. Ono, M. Kawasaki, H. Koinuma: Robust  $Ti^{4+}$  States in  $SrTiO_3$  Layers of  $La_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3/SrTiO_3/La_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$  Junctions, *Appl. Phys. Lett.* **88** (2006) 192504-1-3; cond-mat/0510501; *selected for Virtual Journal of Nano Science and Technology*.
- [8] M. Takizawa, H. Wadati, K. Tanaka, M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, K. Shibuya, T. Mihara, T. Ohnishi, M. Lippmaa, M. Kawasaki, H. Koinuma, S. Okamoto and A. J. Millis: Photoemission from Buried Interfaces in  $SrTiO_3/LaTiO_3$  Superlattices, *Phys. Rev. Lett.* **97** (2006) 057601-1-4; cond-mat/0603333.
- [9] K. Mamiya, T. Koide, A. Fujimori, H. Tokano, H. Manaka, A. Tanaka, H. Toyosaki, T. Fukumura and M. Kawasaki: Indication of Intrinsic Room-Temperature Ferromagnetism in  $Ti_{1-x}Co_xO_{2-\delta}$  Thin Film: An X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study, *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 062506-1-3; cond-mat/0603149.
- [10] K. Ebata, H. Wadati, M. Takizawa, A. Fujimori, Y. Tomioka and Y. Tokura: Chemical Potential Shift and Spectral-Weight Transfer in  $Pr_{1-x}Ca_xMnO_3$  Revealed by Photoemission Spectroscopy, *Phys. Rev. B* **74** (2006) 064419-1-6; cond-mat/0606356.
- [11] H. Wadati, A. Chikamatsu, M. Takizawa, R. Hashimoto, H. Kumigashira, T. Yoshida, T. Mizokawa, A. Fujimori, M. Oshima, M. Lippmaa, M. Kawasaki, and H. Koinuma: Strong Localization of Doped Holes in  $La_{1-x}Sr_xFeO_3$  from Angle-Resolved Photoemission Spectra, *Phys. Rev. B* **74** (2006) 115114-1-5; cond-mat/0603333.
- [12] Y. Ishida, H. Ohta, M. Hirano, A. Fujimori and H. Hosono: Potential Profiling of the Nanometer-scale Charge Depletion Layer in  $n$ -ZnO/ $p$ -NiO Junction Using Photoemission Spectroscopy, *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 153502-1-3; cond-mat/0604549.
- [13] H. Wadati, T. Yoshida, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, H. Eisaki, Z.-X. Shen, T. Mizokawa and A. Fujimori: Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy of Perovskite-Type Transition-Metal Oxides and their Analyses using Tight-Binding Band Structure, *Phase Transitions* **79** (2006) 617-635; cond-mat/0603642.
- [14] R.J.O. Mossaneck, M. Abbate and A. Fujimori: Cluster Model Calculations of the Coherent Spectral Weight Transfer in the Bandwidth-Controlled  $Ca_{1-x}Sr_xVO_3$  Series, *Phys. Rev. B* **74** (2006) 155127-1-5; cond-mat/0606253.
- [15] K. Tanaka, W.S. Lee, D.H. Lu, A. Fujimori, T. Fujii, Risdiana, I. Terasaki, D. J. Scalapino, T.P. Devereaux, Z. Hussain and Z.-X. Shen: Distinct Fermi-Momentum Dependent Energy Gaps in Deeply Underdoped  $Bi2212$ , *Science* **314** (2006) 1910-1913; cond-mat/0612048.
- [16] Y. Hotta, H. Wadati, A. Fujimori, T. Susaki and H. Y. Hwang: Electronic Structure of the Mott Insulator  $LaVO_3$  in a Quantum Well Geometry, *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 251916-1-3; cond-mat/0607547.
- [17] T. Yoshida, X.J. Zhou, K. Tanaka, Z. Hussain, Z.-X. Shen, A. Fujimori, S. Komiya, Y. Ando, H. Eisaki, T. Kakeshita and S. Uchida: Systematic doping evolution of the underlying Fermi surface of  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ , *Phys. Rev. B* **74** (2006) 224510-1-5; cond-mat/0510608.
- [18] Y.-H. Lin, R. Zhao, C.-W. Nan, M. Kobayashi, Y. Ooki and A. Fujimori: Enhancement of Ferromagnetic Properties of NiO:Fe Thin Film by the Li Doping, *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 202501-1-3.
- [19] Y. Ishida, J.I. Hwang, M. Kobayashi, Y. Takeda, K. Mamiya, J. Okamoto, S.-I. Fujimori, T. Okane, K. Terai, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Fujimori, A. Tanaka, H. Saeki, T. Kawai and H. Tabata: Soft X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of Weakly Ferromagnetic  $Zn_{1-x}V_xO$  Thin Film, *Appl. Phys. Lett.* **90** (2007) 022510-1-3; cond-mat/0609173.
- [20] T. Yoshida, X. J. Zhou, D. H. Lu, S. Komiya, Y. Ando, H. Eisaki, T. Kakeshita, S. Uchida, Z. Hussain, Z.-X. Shen and A. Fujimori: Low-Energy Electronic Structure of the High- $T_c$  Cuprates  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  Studied by Angle-resolved Photoemission Spectroscopy, *J. Phys.: Condens. Matter* **19** (2007) 125209-1-23; cond-mat/0610759.
- [21] M. Hashimoto, T. Yoshida, K. Tanaka, A. Fujimori, M. Okusawa, S. Wakimoto, K. Yamada, T. Kakeshita, H. Eisaki and S. Uchida: Distinct Doping Dependences of the Pseudogap and Superconducting Gap of  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  Cuprate Superconductors, *Phys. Rev. B* **75** (2007) 140503-1-4; cond-mat/0610758.
- [22] T. Yamasaki, K. Yamazaki, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, A. Fujimori, Z.-X. Shen, M. Ishikado and S. Uchida: Unmasking the Quasiparticle Dynamics in Cuprate Superconductors Using Low-Energy Photoemission, *Phys. Rev. B* **75** (2007) 140513-1-4; cond-mat/0603006.
- [23] D.D. Sarma, S. Ray, K. Tanaka, M. Kobayashi, A. Fujimori, P. Sanyal, H.R. Krishnamurthy and C. Das Gupta: Unconventional Magnetoresistance in  $Sr_2FeMoO_6$  from a Magnetic Tunnel Barrier Mechanism, *Phys. Rev. Lett.* **98** (2007) 157205; cond-mat/0311013; *selected for Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology*.
- [24] W. Meevasana, X.J. Zhou, S. Sahrakorpi, W.S. Lee, W.L. Yang, N. Mannella, T. Yoshida, Y.L. Chen, K. Tanaka, R.H. He, H. Lin, S. Komiya, Y. Ando, F. Zhou, W.X. Ti, J.W. Xiong, Z. X. Zhao, T. Sasagawa, T. Kakeshita, K. Fujita, S. Uchida, H. Eisaki, A. Fujimori, Z. Hussain, R.

- S. Markiewicz, A. Bansil, N. Nagaosa, J. Zaanen, T.P. Devereaux and Z.-X. Shen: Hierarchy of Multiple Many-Body Interaction Scales in High-Temperature Superconductors, *Phys. Rev. B*, in press.
- [25] J.I. Hwang, Y. Osafune, M. Kobayashi, K. Ebata, Y. Ooki, Y. Ishida, A. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, K. Kobayashi and A. Tanaka: Depth Profile High-Energy Spectroscopic Study of Mn-Doped GaN Prepared by Thermal Diffusion, *J. Appl. Phys.*, in press.; cond-mat/0703429.
- [26] Y.-H. Lin, K. Terai, H. Wadati, M. Kobayashi, M. Takizawa, J. I. Hwang, A. Fujimori, C.-W. Nan, G. Liu, S.-I. Fujimori, T. Okane, Y. Saitoh and K. Kobayashi: Stability of Ferroelectricity in Ultrathin Barium Strontium Titanate Films Studied by in-situ Resonant Photoemission Spectroscopy, *Appl. Phys. Lett.*, in press.
- (会議抄録)
- [27] K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, M. Higashiguchi, S.-i. Fujimori, Y. Saitoh, A. Fujimori, M.S. Kim, D. Hirata, T. Takabatake: High-Resolution Photoemission Study of CeRhX ( $X = \text{Sn, In}$ ), *Proceedings of the International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES'05)*; *Physica B* **378-380** (2006) 791-792.
- [28] T. Okane, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, K. Terai, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Fujimori, E. Yamamoto, Y. Haga and Y. Onuki: Soft X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of  $\text{UFe}_2$ , *ibid*; *Physica B* **378-380** (2006) 959-960.
- [29] S.-i. Fujimori, K. Terai, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saito, Y. Muramatsu, A. Fujimori, H. Yamagami, S. Ikeda, T. Matsuda, Y. Tokiwa, Y. Haga, E. Yamamoto, Y. Onuki: Soft X-Ray Synchrotron Radiation Photoemission Study on Uranium Compounds, *ibid*; *Physica B* **378-380** (2006) 995-996.
- [30] J. I. Hwang, Y. Ishida, M. Kobayashi, Y. Osafune, T. Mizokawa, A. Fujimori, Y. Takeda, K. Terai, S.-i. Fujimori, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Tanaka, T. Kondo, H. Munekata, M. Hashimoto, H. Tanaka, S. Hasegawa and H. Asahi: Photoemission and X-Ray Absorption Studies of the Electronic Structure of GaN-Based Diluted Magnetic Semiconductors, *Proceedings of 6th International Conference on Nitride Semiconductors*; *Phys. Stat. Solidi B* **243** (2006) 1696-700.
- [31] K. Shimada, M. Higashiguchi, S.-i. Fujimori, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Namatame, M. Taniguchi, T. Sasakawa, T. Takabatake: High-Resolution Photoemission Study of  $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{RhAs}$ : A Collapse of the Energy Gap in the Kondo Semiconductor, *Proceedings of 3rd Hiroshima Workshop – Novel Functional Materials with Multinary Freedom* –, *Physica B* **383** (2006) 140-141.
- [32] S.-i. Fujimori, K. Terai, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, K. Kobayashi, A. Fujimori, H. Yamagami, S. Ikeda, T. Matsuda, Y. Haga, E. Yamamoto and Y. Onuki: Band Structure and Fermi Surface of Uranium Compounds: Soft X-ray Angle-Resolved Photoemission Study, *5th International Symposium on Advanced Science Research in Celebration of the World Year of Physics 2005 – Advances in the Physics and Chemistry of Actinide Compounds (ASR '05)*; *J. Phys. Soc. Jpn.* **75** (2006) 99-100.
- [33] T. Okane, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, Y. Saitoh, J. Okamoto, K. Mamiya, Y. Muramatsu, A. Fujimori, A. Ochiai, Y. Haga, E. Yamamoto and Y. Onuki: Soft X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of Ferromagnetic Uranium Compounds, *ibid*; *J. Phys. Soc. Jpn.* **75** (2006) 105-106.
- [34] M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, K. Tanaka, D. Lu, Z.-X. Shen, S. Wakimoto, M. Okusawa and K. Yamada: Photoemission Study of Excess Oxygen-doped  $\text{La}_2\text{CuO}_{4.10}$ , *Proceedings of the 18th International Symposium on Superconductivity*, *Physica C* **445-448** (2006) 80-83.
- [35] Y. Ishida, A. Fujimori, H. Ohta and H. Hosono: Photoemission Study of  $\text{Na}_{0.8}\text{CoO}_2$  Epitaxial Thin Film with Large Thermoelectric Power, *Proceedings of the 24th International Conference on Low Temperature Physics*; *AIP Conference Proceedings* **850** (2006) 1215-1216.
- [36] M. Hashimoto, K. Tanaka, T. Yoshida, A. Fujimori, Z.-X. Shen, D. Lu, S. Ono and Y. Ando: Doping Evolution of the Electronic Structure in the Single-Layer Cuprate  $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_{6+\delta}$ , *ibid*; *AIP Conference Proceedings* **850** (2006) 513-514.
- [37] H. Wadati, A. Maniwa, H. Kumigashira, A. Fujimori, M. Oshima, M. Lippmaa, M. Kawasaki and H. Koinuma: *In-situ* Photoemission Study of  $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$  Epitaxial Thin Films, *Proceedings of International Conference on Magnetism 2006 (ICM 2006)*; *J. Magn. Magn. Mater.* **310** (2007) 1997-1999.
- [38] A. Chikamatsu, H. Wadati, H. Kumigashira, M. Oshima, A. Fujimori, T. Ohnishi, M. Lippmaa, K. Ono, M. Kawasaki, and H. Koinuma: *in-situ* Angle-Resolved Photoemission Study of Halfmetallic  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$  Thin Films, *ibid*; *J. Magn. Magn. Mater.* **310** (2007) 1030-1032.
- [39] K. Terai, K. Yoshii, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, Y. Saitoh, K. Ohwada, T. Inami, T. Okane, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Kobayashi, M. Kobayashi, A. Fujimori: Electronic Structure and Magnetism of  $\text{CaMn}_{1-x}\text{Ru}_x\text{O}_3$  Thin Films, *ibid*; *J. Magn. Magn. Mater.* **310** (2007) 1070-1072.
- [40] H. Kumigashira, R. Hashimoto, A. Chikamatsu, M. Oshima, H. Wadati, A. Fujimori, M. Lippmaa, M. Kawasaki and H. Koinuma: *In-situ* Photoemission Characterization of the Tunneling Barrier in

- La<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>MnO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub>/La<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>MnO<sub>3</sub> Tunneling Junctions, *ibid*; J. Magn. Magn. Mater. **310** (2007) 1997-1999.
- [41] S.-i Fujimori, Y. Saitoh, T. Okane, H. Yamagami, A. Fujimori, S. Ikeda, T.D. Matsuda, Y. Haga, E. Yamamoto, Y. Onuki: Band Structure and Fermi Surface of UPd<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> Studied by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, *ibid*; J. Magn. Magn. Mater. **310** (2007) e79-81.
- [42] K. Shimada, H. Higashiguchi, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, S.-I. Fujimori, Y. Saitoh, A. Fujimori, Y. Takata, S. Shin, K. Kobayashi, E. Ikenaga, M. Yabashi, K. Tamasaku, Y. Nishino, D. Miwa, T. Ishikawa, T. Sasakawa and T. Takabatake: High-Resolution Photoemission Study of the Hybridization Gap in the Kondo Semiconductor CeRhAs, *ibid*; J. Magn. Magn. Mater. **310** (2007) e57-58.
- [43] H. Kumigashira, R. Hashimoto, A. Chikamatsu, M. Oshima, T. Ohnishi, M. Lippmaa, H. Wadati, A. Fujimori, K. Ono, M. Kawasaki, H. Koinuma: *In-situ* Resonant Photoemission Characterization of La<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>MnO<sub>3</sub> Layers Buried in Insulating Perovskite Oxides, *Proceedings of the 50-th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials*, J. Appl. Phys. **99** (2006) 08S903-1-3.
- [44] K. Mamiya, T. Koide, Y. Ishida, Y. Osafune, A. Fujimori, Y. Suzuki, T. Katayama and S. Yuasa: Angle-Resolved Soft X-Ray Magnetic Circular Dichroism in a Monatomic Fe Layer Facing an MgO(001) Tunnel Barrier, *Rad. Phys. Chem.* **75** (2006)1872-1877.
- [45] J. I. Hwang, Y. Osafune, M. Kobayashi, K. Ebata, Y. Ooki, Y. Ishida, A. Fujimori, A. Tanaka, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh and K. Kobayashi: Depth Profile Study using X-Ray Photoemission Spectroscopy of Mn-Doped GaN Prepared by Thermal Diffusion of Mn, *Proceedings of 28th International Conference on Physics of Semiconductors*; AIP Conference Proceedings **893** (2007) 1225.
- [46] K. Horiba, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, H. Wadati, A. Fujimori, M. Lippmaa, M. Kawasaki, and H. Koinuma: Temperature-Dependence of the Electronic Structure of La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub> Thin Films Studied by *in situ* Photoemission Spectroscopy, *Proceedings of the 10-th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure (ICES-10)*; J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **156-158** (2007) 375-378.
- [47] T. Yoshida, X.J. Zhou, Z. Hussain, Z.-X. Shen, A. Fujimori, S. Komiya, Y. Ando, H. Eisaki and S. Uchida: Effect of Zn-Impurity Scattering in La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> Studied by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, *Proceedings of 8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity High Temperature Superconductors VIII (M<sup>2</sup>S-VIII)*; Physica C, in press.
- [48] M. Hashimoto, K. Tanaka, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Okusawa, S.Wakimoto, K. Yamada, T. Kakeshita, H. Eisaki and S. Uchida: Relationship between the Superconducting Gap and the Pseudogap: Temperature-Dependent Photoemission Study of La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> and La<sub>2</sub>CuO<sub>4.10</sub>, *ibid*; Physica C, in press.
- [49] M. Lindroos, V. Arpiainen, S. Sahrakorpi, R.S. Markiewicz, X.J. Zhou, T. Yoshida, W. L. Yang, T. Kakeshita, H. Eisaki, S. Uchida, A. Fujimori, Z. Hussain, Z.-X. Shen and A. Bansil: Existence of a Quasiparticle Remnant in Angle-Resolved Photoemission Spectrum of La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>, *ibid*; Physica C, in press.
- [50] K. Ebata, H. Wadati, M. Takizawa, K. Maekawa, A. Fujimori, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, Y. Tomioka, H. Kuwahara, Y. Tokura: Photoemission Study of Perovskite-Type Manganites with Stripe Ordering, *Proceedings of International Conference on Macroscopic Quantum Phenomena in Complex Striped Matter - Stripes 2006*; J. Supercond., in press.
- [51] M. Ikeda, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Unozawa, T. Sasagawa and H. Takagi: Angle-Resolved Photoemission Study of Lanthanide Substitution Effects in Electron-Doped High-*T<sub>c</sub>* Superconductors, *ibid*; J. Supercond., in press; cond-mat/0612660.
- (編著書)
- [52] 清水忠雄, 大苗敦, 小野嘉之, 藤森淳, 牧島一夫, 水野義之, 美宅成樹, 矢崎絢一, 湯川哲之編: 物理データ事典 (朝倉書店, 2006年)
- [53] H. Wadati, T. Yoshida and A. Fujimori: High-Resolution Photoemission Spectroscopy of Perovskite-Type Transition-Metal Oxides, in *Very High Resolution Photoelectron Spectroscopy*, edited by S. Hüfner (Springer-Verlag, Berlin) pp.327-346.
- (学位論文)
- [54] 和達大樹: Photoemission Studies of Perovskite-Type Transition-Metal Oxides in Epitaxial Thin Films (博士論文)
- [55] 黄鐘日: High-Energy Spectroscopic Studies of GaN-Based Diluted Magnetic Semiconductors (博士論文, 新領域創成科学研究科)
- [56] 前川考志: Photoemission Study of *d*<sup>0</sup> and *d*<sup>1</sup> Oxide Systems in Thin Films (修士論文)
- [57] 大木康弘: Photoemission Study of the Spinel-Type (Ni,Zn,Fe,Ti)<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Thin Films Exhibiting Photo-Induced Magnetism (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

- [58] K. Terai, Y. Takeda, S.I. Fujimori, Y. Saitoh, T. Okane, Y. Muramatsu, K. Kobayashi, and A. Fujimori: Laser Molecular-Beam Epitaxy System for *in-situ* Soft X-Ray Spectroscopy in SPring-8 at BL23SU, *9th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2006)* (Daegu, Korea, May 2006)
- [59] H. Wadati, A. Maniwa, I. Ohkubo, H. Kumigashira, A. Fujimori, M. Oshima, M. Lippmaa, M. Kawasaki and H. Koinuma: *In-situ* Photoemission Study of  $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$  Epitaxial Thin Films, *International Symposium on Anomalous Quantum Materials 2006*, (Okinawa, June 2006)
- [60] M. Hashimoto, K. Tanaka, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Okusawa, S. Wakimoto, K. Yamada, T. Kakeshita, H. Eisaki and S. Uchida: Relationship between Superconducting Gap and Pseudogap: Temperature-Dependent Photoemission Study of  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  and  $\text{La}_2\text{CuO}_{4.10}$ , *ibid.*
- [61] T. Yoshida, X.J. Zhou, Z. Hussain, Z.-X. Shen, A. Fujimori, S. Komiyama, Y. Ando, H. Eisaki and S. Uchida: Effects of Zn Impurities in  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  Studied by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, *8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity High Temperature Superconductors VIII (M<sup>2</sup>S-VIII)* (Dresden, July 2006)
- [62] M. Hashimoto, K. Tanaka, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Okusawa, S. Wakimoto, K. Yamada, T. Kakeshita, H. Eisaki and S. Uchida: Relationship between the Superconducting Gap and the Pseudogap: Temperature-Dependent Photoemission Study of  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  and  $\text{La}_2\text{CuO}_{4.10}$ , *ibid.*
- [63] J.-I. Hwang, Y. Osafune, M. Kobayashi, K. Ebata, Y. Ooki, Y. Ishida, A. Fujimori, A. Tanaka, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, K. Kobayashi: High-Energy Spectroscopic Study of Mn-Doped GaN Prepared by Thermal Diffusion of Mn, *28th International Conference on the Physics of Semiconductors* (Vienna, July 2006)
- [64] H. Wadati, A. Maniwa, H. Kumigashira, A. Fujimori, M. Oshima, M. Lippmaa, M. Kawasaki and H. Koinuma: *In-situ* Photoemission Study of  $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$  Epitaxial Thin Films, *International Conference on Magnetism 2006 (ICM 2006)* (Kyoto, August 2006)
- [65] H. Kumigashira, R. Hashimoto, A. Chikamatsu, M. Oshima, M. Lippmaa, H. Wadati, A. Fujimori, M. Kawasaki, and H. Koinuma: *in-situ* Photoemission Characterization of the Tunneling Barrier in  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3/\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$  Tunneling Junctions, *ibid.*
- [66] A. Chikamatsu, H. Wadati, H. Kumigashira, M. Oshima, A. Fujimori, T. Ohnishi, M. Lippmaa, K. Ono, M. Kawasaki, and H. Koinuma: *in-situ* Angle-Resolved Photoemission Study on Halfmetallic  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$  Thin Films, *ibid.*
- [67] S-i Fujimori, Y. Saitoh, T. Okane, K. Kobayashi, A. Fujimori, H. Yamagami, S. Ikeda, T. D. Matsuda, Y. Haga, E. Yamamoto and Y. Onuki: Band Structure and Fermi Surface of  $\text{UPd}_2\text{Al}_3$  Studied by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, *ibid.*
- [68] K. Terai, K. Yoshii, Y. Takeda, S.I. Fujimori, Y. Saitoh, K. Ohwada, T. Inami, T. Okane, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Kobayashi, M. Kobayashi and A. Fujimori: Electronic Structure and Magnetism of  $\text{CaMn}_{1-x}\text{Ru}_x\text{O}_3$  Thin Films, *ibid.*
- [69] A. Chikamatsu, H. Wadati, H. Kumigashira, M. Oshima, A. Fujimori, M. Lippmaa, K. Ono, M. Kawasaki and H. Koinuma: Temperature Dependence of Angle-Resolved Photoemission Spectra for Ferromagnetic  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  Thin Films, *Advances in Neutron, Synchrotron Radiation,  $\mu\text{SR}$  and NMR Researches* (Tokai, August 2006)
- [70] K. Horiba, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, H. Wadati, A. Fujimori, M. Lippmaa, M. Kawasaki and H. Koinuma: Temperature-Dependence of the Electronic Structure on  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  Thin Films Studied by *in situ* Photoemission Spectroscopy, *International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure (ICESS)* (Foz do Iguaçu, Brazil, September 2006)
- [71] G.W.J. Hassink, N. Nakagawa, M. Takizawa, H. Wadati, L. Fitting, Y. Takata, K. Horiba, M. Matsumami, S. Shin, M. Yabashi, K. Tamasaku, Y. Nishino, D. Miwa, T. Isikawa, T. Susaki, G. Rijnders, D.A. Muller, A. Fujimori, H.Y. Hwang, D.H.A. Blank: Electronic Effects in LTO/LAO Superlattices, *XIII International Workshop on Oxide Electronics* (Ischia, Italy, October 2006)
- [72] T. Yanagida, H. Tanaka, T. Kawai, Y. Saitoh, K. Takeda and A. Fujimori: Can Ce-doped Manganites be Electron-doped Ferromagnet?, *ibid.*
- [73] K. Ebata, H. Wadati, M. Takizawa, K. Maekawa, A. Fujimori, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, Y. Tomioka, H. Kuwahara and Y. Tokura: Photoemission Study of Mixed-Valence Manganites, *7-th Japan-Korea-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems* (SPring-8, October 2006).
- [74] G.S. Song, Y. Osafune, J.I. Hwang, M. Kobayashi, Y. Ooki, Y. Ishida, K. Ebata, A. Fujimori, H. Takahashi, J. Okabayashi, K. Kanai, K. Kubo and M. Oshima: Photoemission Study of Thermally Diffused Mn/GaAs(001) Interfaces, *ibid.*
- [75] M. Takizawa, M. Minohara, H. Kumigashira, D. Toyota, K. Maekawa, H. Wadati, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Oshima, M. Lippmaa, M. Kawasaki

- and H. Koinuma: Angle-Resolved Photoemission Study of SrVO<sub>3</sub> Thin Films, *ibid.*
- [76] M. Kobayashi, Y. Ishida, J.I. Hwang, A. Fujimori, Y. Takeda, K. Terai, S.-I. Fujimori, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, K. Kobayashi, A. Tanaka, H. Saito and K. Ando: X-Ray Absorption and Photoemission Spectroscopy Studies of the II-VI Diluted Magnetic Semiconductor Zn<sub>1-x</sub>Cr<sub>x</sub>Te, *ibid.*
- [77] S.I. Fujimori, T. Ohkochi, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagami, Y. Haga, E. Yamamoto and Y. Onuki: Dual Nature of U 5*f* Electrons in Heavy Fermion Superconductors UPd<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> and UNi<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>: An ARPES Study, *ibid.*
- [78] T. Ohkochi, S.-I. Fujimori, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagami, Y. Haga, E. Yamamoto and Y. Onuki: Electronic Structure of Itinerant Uranium Compound UB<sub>2</sub> Studied by Soft X-ray Angle Resolved Photoemission Spectroscopy, *ibid.*
- [79] T. Okane, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, Y. Saitoh, H. Yamagami, M. Kobayashi, A. Fujimori, T.D. Matsuda, E. Yamamoto, Y. Haga and Y. Onuki: X-Ray Absorption Magnetic Circular Dichroism Study at U *N*<sub>4,5</sub> and Cu *L*<sub>2,3</sub> Edges of UCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>, *ibid.*
- [80] K. Terai, K. Yoshii, Y. Takeda, S.I. Fujimori, Y. Saitoh, K. Ohwada, T. Inami, T. Okane, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Kobayashi, M. Kobayashi and A. Fujimori: Electronic Structure and Magnetism of CaMn<sub>1-x</sub>Ru<sub>x</sub>O<sub>3</sub> Thin Films, *ibid.*
- [81] M. Ikeda, T. Yoshida, M. Hashimoto, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Unozawa, T. Sasagawa and H. Takagi: Strong Antiferromagnetic Effects in the Electron-Doped High-*T*<sub>c</sub> Superconductor Sm<sub>2-x</sub>Ce<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>, *Kyoto Conference on Solid State Chemistry - Transition-Metal Oxides: Past, Present and Future* (Kyoto, November 2006).
- [82] K. Ebata, H. Wadati, M. Takizawa, K. Maekawa, A. Fujimori, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, Y. Tomioka, H. Kuwahara and Y. Tokura: Photoemission Study of Mixed-Valence Manganites, *ibid.*
- [83] K. Ebata, H. Wadati, M. Takizawa, K. Maekawa, A. Fujimori, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, Y. Tomioka, H. Kuwahara and Y. Tokura: Photoemission Study of Perovskite-Type Manganites with Stripe Ordering, *5-th International Conference on Macroscopic Quantum Phenomena in Complex Striped Matter - Stripes 2006* (Rome, December 2006).
- [84] M. Ikeda, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Unozawa, T. Sasagawa and H. Takagi: Angle-Resolved Photoemission Study of Lanthanide Substitution Effects in Electron-Doped High-*T*<sub>c</sub> Superconductors, *ibid.*
- [85] H. Wadati, A. Maniwa, H. Kumigashira, A. Fujimori, M. Oshima, M. Lippmaa, M. Kawasaki and H. Koinuma: Orbital States in La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub> Thin Films Studied by X-Ray Absorption Linear Dichroism, *2nd Indo-Japan Seminar "Novel Magnetic Materials and their Electronic Structures"* (University of Tokyo, March 2007).
- [86] K. Ebata, H. Wadati, M. Takizawa, K. Maekawa, A. Fujimori, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, Y. Tomioka, H. Kuwahara and Y. Tokura: Photoemission Study of Perovskite-Type Manganites with Stripe Ordering, *ibid.*
- [87] G.S. Song, Y. Osafune, J.I. Hwang, M. Kobayashi, Y. Ooki, Y. Ishida, K. Ebata, A. Fujimori, K. Kanai, K. Kubo, M. Oshima and J. Okabayashi: Photoemission Study of Thermally Diffused Mn/GaAs (001) Interfaces, *ibid.*
- [88] H. Kumigashira, A. Maniwa, A. Chikamatsu, H. Wadati, K. Horiba, M. Oshima, A. Fujimori, M. Lippmaa, M. Kawasaki, and H. Koinuma: *In-situ* Photoemission Study on Strain Controlled La<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>MnO<sub>3</sub> Thin Films, *ibid.*
- [89] A. Chikamatsu, H. Wadati, H. Kumigashira, M. Oshima, A. Fujimori, M. Lippmaa, K. Ono, M. Kawasaki and H. Koinuma, Temperature-Dependent Spectral Weight Transfer in La<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>MnO<sub>3</sub> Thin Films Studied by *in-situ* Photoemission Spectroscopy, *ibid.*
- [90] Y. Ishida, H. Ohta, M. Hirano, A. Fujimori and H. Hosono: Potential Profiling of the Nanometer-Scale Charge-Depletion Layer in *n*-ZnO/*p*-NiO Junction using Photoemission Spectroscopy *American Physical Society March Meeting* (Denver, March 2007).
- [91] K. Tanaka, W.S. Lee, D.H. Lu, A. Fujimori, T. Fujii, Risdiana, I. Terasaki, K. Fujita, M. Ishikado, S. Uchida, D.J. Scalapino, T.P. Devereaux, Z. Hussain and Z.-X. Shen: Distinct Fermi-Momentum Dependent Energy Gaps in Deeply Underdoped Bi2212, *ibid.*
- [92] W. Meevasana, X.J. Zhou, Z.-X. Shen, S. Sahrakorpi, A. Bansil, T. Yoshida, A. Fujimori, Y. Ando, F. Zhou, Z.X. Zhao, T. Sasagawa, K. Fujita and H. Eisaki: The Hierarchy of Multiple Many-Body Interaction Scales in High-Temperature Superconductors, *ibid.*
- [93] A. Bansil, S. Sahrakorpi, R.S. Markiewicz, M. Lindroos, V. Arpiainen, X.J. Zhou, T. Yoshida, W.L. Yang, T. Kakeshita, H. Eisaki, S. Uchida, A. Fujimori, Z. Hussain, Z.-X. Shen: Nature of the Quasiparticle Remnant in La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> (LSCO), *ibid.*
- 招待講演
- [94] A. Fujimori: Soft X-Ray Dichroism and Photoemission of Correlated Systems, *Scientific Opportunities with Taiwan Photon Source* (Hsinchu, Taiwan, April 2006).

- [95] A. Fujimori: XMCD Studies of Diluted Magnetic Semiconductors, *International Conference on Modern Materials & Technologies (CIMTEC 2006)* (Sicily, June 2006).
- [96] A. Fujimori: Doping and Temperature Evolution of Pseudogap and Superconducting gap in Underdoped Cuprates in the Presence of Fermi Arc, *8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High-Temperature Superconductors (M<sup>2</sup>S-HTSC-VIII)* (Dresden, July 2006).
- [97] A. Fujimori: Evolution of Fermi Surface/Arc and Pseudogap in the Two-Dimensional Cuprates near Mott Transition, *International Conference on Physics near the Mott Transition* (Bangalore, July 2006).
- [98] A. Fujimori: Photoemission and XMCD Studies of Magnetic Semiconductors, *4-th International Conference on Physics and Application of Spin-Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-IV)* (Sendai, August 2006).
- [99] A. Fujimori: Fermi Arc, Pseudogap, and Superconducting Gap in La-Cuprates, *International Conference on Magnetism 2006 (ICM 2006)* (Kyoto, August 2006).
- [100] A. Fujimori: Photoemission Spectroscopy of Oxide Interfaces *XIII International Workshop on Oxide Electronics* (Ischia, Italy, October 2006).
- [101] A. Fujimori: Photoemission Spectroscopy of Oxide Interfaces and Heterostructures, *7-th Japan-Korea-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems* (SPring-8, October 2006).
- [102] A. Fujimori: Oxygen *p*-Hole Character in Transition-Metal Oxides Revealed by Photoemission Spectroscopy, *Kyoto Conference on Solid State Chemistry - Transition-Metal Oxides: Past, Present and Future* (Kyoto, November 2006).
- [103] A. Fujimori: Spectroscopic Characterization of Ferromagnetic Semiconductors and their Heterostructures, *Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium* (Osaka, November 2006).
- [104] A. Fujimori: Fermi Arc, Pseudogap and Superconducting Gap in High- $T_c$  Cuprates Studied by ARPES, *5-th International Conference on Macroscopic Quantum Phenomena in Complex Striped Matter - Stripes 2006* (Rome, December 2006).
- [105] A. Fujimori: Strain and Polarity Discontinuity Effects on the Electronic Structure of Manganite Thin Films and Interfaces, *UBC-Tokyo Conference on Novel Quantum Matter* (University of British Columbia, February 2007).
- [106] A. Fujimori: Chemical Pressure Effects on the Fermi Surface and Band Structure of Electron-Doped Cuprate Superconductors *Workshop on Electronic Structure of Emerging Materials: Theory & Experiment* (Lonavala, India, February 2007).
- [107] A. Fujimori: ARPES Studies on Superconducting Gap in Cuprates, *CREST Workshop on Charge Dynamics in High Temperature Superconductors* (University of Tokyo, February 2007).
- (国内会議)
- 一般講演
- [108] 和達大樹, 摩庭篤, 大久保勇男, 組頭広志, 藤森淳, 尾嶋正治, Mikk Lippmaa, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: 電荷整列を抑制した  $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$  薄膜の *in-situ* 光電子分光, 日本物理学会秋の分科会(千葉大学, 2006年9月).
- [109] 和達大樹, 近松彰, 摩庭篤, 組頭広志, 藤森淳, 尾嶋正治, Mikk Lippmaa, 川崎雅司, 鯉沼秀臣:  $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ,  $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$  薄膜の *in-situ* 角度分解光電子分光, 同上.
- [110] 和達大樹, 摩庭篤, 組頭広志, 藤森淳, 尾嶋正治, Mikk Lippmaa, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: X線吸収の線二色性を用いたペロブスカイト型 Mn 酸化物薄膜の軌道状態の観測, 同上.
- [111] 滝沢優, 簗原誠人, 組頭広志, 豊田大介, 前川考志, 和達大樹, 藤森淳, 尾嶋正治, Mikk Lippmaa, 川崎雅司, 鯉沼秀臣:  $\text{SrVO}_3$  薄膜の角度分解光電子分光, 同上.
- [112] 江端一晃, 滝沢優, 前川考志, 和達大樹, 藤森淳, 桑原英樹, 富岡泰秀, 十倉好紀:  $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  の化学ポテンシャルシフトの温度依存性, 同上.
- [113] 前川考志, 滝沢優, 和達大樹, 藤森淳, 組頭広志, 尾嶋正治: Nbドーピングした  $\text{SrTiO}_3$  の角度分解光電子分光, 同上.
- [114] 池田正樹, 吉田鉄平, 橋本信, 藤森淳, 久保田正人, 小野寛太, 宇野沢圭一, 笹川崇男, 高木英典: ランタノイドを置換した電子ドーピング系高温超伝導体の角度分解光電子分光, 同上.
- [115] 黄鐘日, 小林正起, 藤森淳, 竹田幸治, 寺井恒太, 藤森伸一, 岡根哲夫, 齋藤祐児, 山上浩志, H.C. Jeon, T.W. Kang: 強磁性 GaN/GaMnN 超構造の共鳴光電子分光, 同上.
- [116] 小林正起, 黄鐘日, 石田行章, 藤森淳, 竹田幸治, 寺井恒太, 藤森伸一, 岡根哲夫, 齋藤祐児, 山上浩志, 小林啓介, 齋藤秀和, 安藤功児: II-VI 族磁性半導体  $\text{Zn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Te}$  の光電子分光と X線吸収分光, 同上.
- [117] 池田正樹, 吉田鉄平, 橋本信, 藤森淳, 久保田正人, 小野寛太, 宇野沢圭一, 笹川崇男, 高木英典: ランタノイドを置換した電子ドーピング系高温超伝導体の角度分解光電子分光, 同上.
- [118] 吉田鉄平, 橋本信, 池田正樹, 田中清尚, 藤森淳, X.-J. Zhou, N. Mannella, W.L. Yang, D.H. Lu, Z.-X. Shen, Z. Hussain, 小宮世紀, 安藤陽一, 永崎洋, 藤巻洋介, 内田慎一: アンダードーピング領域  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  における擬ギャップの異方性とフェルミアーク, 同上.

- [119] 大木康弘, 黄鐘日, 江端一晃, 宋敬錫, 小林正起, 藤森淳, 竹田幸治, 寺井恒太, 藤森伸一, 岡根哲夫, 齋藤祐児, 山上浩志, 田中新, 関宗俊, 川合知二, 田畑仁: 光誘起磁性を示すスピネル型  $(\text{Ni}, \text{Zn}, \text{Fe}, \text{Ti})_3\text{O}_4$  薄膜の共鳴光電子分光, 同上.
- [120] 橋本信, 吉田鉄平, 池田正樹, 藤森淳, 久保田正人, 小野寛太, 藤田和博, 内田慎一:  $\text{Bi}_2\text{Sr}_{1.6}\text{Ln}_{0.4}\text{CuO}_{6+\delta}$  ( $\text{Ln} = \text{La}, \text{Gd}$ ) の角度分解光電子分光, 同上.
- [121] 近松彰, 和達大樹, 組頭広志, 尾嶋正治, 藤森淳, Mikk Lippmaa, 小野寛太, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: *In-situ* 角度分解光電子分光電子による  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$  薄膜の電子状態; 温度依存性, 同上.
- [122] 近松彰, 和達大樹, 組頭広志, 尾嶋正治, 藤森淳, Mikk Lippmaa, 小野寛太, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: *In-situ* 角度分解光電子分光電子による  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$  薄膜の電子状態; 温度依存性, 同上.
- [123] 組頭広志, 橋本龍司, 近松彰, 尾嶋正治, 和達大樹, 藤森淳, Mikk Lippmaa, 川崎雅司, 鯉沼秀臣:  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3/\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$  スピントネル結合界面の *in-situ* 光電子分光, 同上.
- [124] 組頭広志, 滝沢優, 豊田大介, 尾嶋正治, 藤森淳, Mikk Lippmaa, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: *In-situ* 光電子分光による  $\text{SrTiO}_3/\text{SrRuO}_3$  ヘテロ界面の電子状態, 同上.
- [125] 摩庭篤, 近松彰, 和達大樹, 組頭広志, 藤森淳, 尾嶋正治, Mikk Lippmaa, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: 基板応力により物性を制御した  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$  薄膜の *in-situ* 光電子分光, 同上.
- [126] 竹田幸治, 藤森伸一, 岡根哲夫, 齋藤祐児, 山上浩志, 藤森淳, 稲見俊哉, 大和田謙二, 有田将司, 島田賢也, 生天目博文, 高島敏郎: Ce 化合物近藤半導体の軟・硬 X 線光電子分光, 同上.
- [127] 藤森伸一, 大河内拓雄, 岡根哲夫, 齋藤祐児, 藤森淳, 山上浩志, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 大貫惇睦:  $\text{UPd}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{UNi}_2\text{Al}_3$  のバンド構造とフェルミ面: 角度分解光電子分光, 同上.
- [128] 藤森伸一, 大河内拓雄, 岡根哲夫, 齋藤祐児, 藤森淳, 山上浩志, 岡田耕三, 池田修悟, 松田達磨, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 大貫惇睦: ウラン化合物の内殻光電子分光, 同上.
- [129] 大河内拓雄, 藤森伸一, 岡根哲夫, 齋藤祐児, 藤森淳, 山上浩志, 池田修悟, 松田達磨, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 大貫惇睦: 磁性ウラン系化合物  $\text{UTe}$ ,  $\text{UIn}_3$  の光電子分光, 同上.
- [130] 寺井恒太, 岡根哲夫, 竹田幸治, 藤森伸一, 齋藤祐児, 稲見俊哉, 山上浩志, 小林啓介, 島田賢也, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 小林正起, 藤森淳:  $\text{CaMn}_{1-x}\text{Ru}_x\text{O}_3$  薄膜の電子構造と磁性発現機構, 同上.
- [131] 岡根哲夫, 大河内拓雄, 竹田幸治, 藤森伸一, 齋藤祐児, 山上浩志, 藤森淳, 松田達磨, 山本悦嗣, 芳賀芳範, 大貫惇睦:  $\text{UCu}_2\text{Si}_2$  の XMCD によるメタ磁性状態の研究, 同上.
- [132] 岡根哲夫, 大河内拓雄, 竹田幸治, 藤森伸一, 齋藤祐児, 山上浩志, 藤森淳, 河村直巳, 鈴木基寛, 筒井智嗣, 青木大, 本間佳哉, 塩川佳伸, 山本悦嗣, 芳賀芳範, 大貫惇睦:  $\text{NpTGA}_5$  ( $T = \text{Co}, \text{Ni}$ ) の XMCD によるリガンドサイトの磁性状態の研究, 同上.
- [133] J. I. Hwang, M. Kobayashi, G. S. Song, A. Fujimori, Y. Takeda, K. Terai, S.-i. Fujimori, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Tanaka, C. S. Yang, H. J. Lin, D. J. Huang, C. T. Chen, H. C. Jeon and T. W. Kang: Resonant Photoemission and X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of  $\text{GaN}/\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{N}$  Digital Ferromagnetic Heterostructure, 第 11 回 半導体スピン工学の基礎と応用 (物性研, 2006 年 12 月).
- [134] G.S. Song, Y. Osafune, J.I. Hwang, M. Kobayashi, Y. Ooki, Y. Ishida, K. Ebata, A. Fujimori, H. Takahashi, J. Okabayashi, K. Kanai, K. Kubo and M. Oshima: Photoemission Study of Thermally Diffused  $\text{Mn}/\text{GaAs}(001)$  Interfaces, 同上.
- [135] 藤森淳: ARPES に基づいたフェルミ・アーケの常伝導物性と超伝導の理解, 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 -」2006 年度成果報告会 (東大, 2007 年 1 月).
- [136] 滝沢優, 簗原誠人, 組頭広志, 豊田大介, 前川考志, 和達大樹, 吉田鉄平, 藤森淳, 尾嶋正治, Mikk Lippmaa, 川崎雅司, 鯉沼秀臣:  $\text{SrVO}_3$  薄膜の角度分解光電子分光, 放射光学会合同シンポジウム (広島, 2007 年 1 月).
- [137] 池田正樹, 吉田鉄平, 橋本信, 藤森淳, 久保田正人, 小野寛太, 宇野沢圭一, 笹川崇男, 高木英典: ランタノイド置換した電子ドープ系高温超伝導体の角度分解光電子分光, 同上.
- [138] 近松彰, 和達大樹, 組頭広志, 尾嶋正治, 藤森淳, Mikk Lippmaa, 小野寛太, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: *In-situ* 光電子分光による強磁性  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  薄膜電子状態の温度依存性, 同上.
- [139] 摩庭篤, 近松彰, 和達大樹, 組頭広志, 尾嶋正治, 藤森淳, Mikk Lippmaa, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: エピタキシャル応力により物性を制御した  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$  薄膜の *in-situ* 放射光光電子分光, 同上.
- [140] 大河内拓雄, 藤森伸一, 岡根哲夫, 齋藤祐児, 藤森淳, 山上浩志, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 大貫惇睦: 軟 X 線角度分解光電子分光による遍歴ウラン系化合物  $\text{UB}_2$  の電子状態, 同上.
- [141] 藤森伸一, 大河内拓雄, 岡根哲夫, 齋藤祐児, 藤森淳, 山上浩志, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 大貫惇睦: 超伝導ウラン化合物の電子状態: 軟 X 線角度分解光電子分光実験, 同上.
- [142] 安齋太陽, 加茂剛, 藤田泰輔, 井野明洋, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 藤森淳, Z.-X. Shen, 石角元志, 内田慎一:  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  の結合および反結合バンドの低エネルギー励起角度分解光電子分光, 同上.
- [143] 加茂剛, 山崎健太郎, 山崎達也, 安齋太陽, 井野明洋, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 藤森淳, Z.-X. Shen, 藤田和博, 内田慎一:  $\text{Bi}_2\text{Sr}_{1.6}\text{La}_{0.4}\text{CuO}_{6+\delta}$  のノード準粒子の低エネルギー励起角度分解光電子分光, 同上.

- [144] 組頭広志, 滝沢優, 豊田大介, 尾嶋正治, 藤森淳, Mikk Lippmaa, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: *In-situ* 光電子分光による SrRuO<sub>3</sub> 薄膜の表面・界面電子状態, 同上.
- [145] 前川考志, 滝沢優, 和達大樹, 吉田鉄平, 藤森淳, 組頭広志, 尾嶋正治: 電子ドープした SrTiO<sub>3</sub> の角度分解光電子分光, 第2回放射光表面科学部会シンポジウム「放射光表面科学の最前線」(東大化学, 2007年1月).
- [146] 池田正樹, 吉田鉄平, 橋本信, 藤森淳, 久保田正人, 小野寛太, 宇野沢圭一, 笹川崇男, 高木英典: ランタノイド置換した電子ドープ系高温超伝導体の角度分解光電子分光, 同上.
- [147] 滝沢優, 簗原誠人, 組頭広志, 豊田大介, 前川考志, 和達大樹, 吉田鉄平, 藤森淳, 尾嶋正治, Mikk Lippmaa, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: SrVO<sub>3</sub> 薄膜の角度分解光電子分光, 同上.
- [148] 宋敬錫, 長船義敬, 小林正起, 石田行章, 黄鐘日, 江端一晃, 大木康弘, 藤森淳, 岡林潤, 金井謙, 久保光太郎, 高橋晴彦, 尾嶋正治: 熱拡散 Mn/GaAs(001) 界面の光電子分光, 同上.
- [149] 橋本信, 吉田鉄平, 池田正樹, 藤森淳, 久保田正人, 小野寛太, 藤田和博, 内田慎一: Bi<sub>2.0</sub>Sr<sub>1.6</sub>Ln<sub>0.4</sub>CuO<sub>6+δ</sub> (Ln = La, Gd) の角度分解光電子分光, 第24回 PF シンポジウム(物質構造科学研究所, 2007年3月).
- [150] 池田正樹, 吉田鉄平, 橋本信, 工藤諭, 藤森淳, 久保田正人, 小野寛太, 宇野沢圭一, 笹川崇男, 高木英典: 電子ドープ型高温超伝導体のフェルミ面とバンド構造に対する化学圧力効果, 同上.
- [151] 朝倉大輔, 小出常晴, 藤森淳, 齋藤秀和, 安藤功児: 希薄磁性半導体 Ga<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>As の Mn L 及び Ga L 吸収端 XMCD, 同上.
- [152] 近松彰, 和達大樹, 組頭広志, 尾嶋正治, 藤森淳, Mikk Lippmaa, 小野寛太, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: *In-situ* 光電子分光による La<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>MnO<sub>3</sub> 薄膜電子状態の温度依存性, 同上.
- [153] 江端一晃, 滝沢優, 前川考志, 和達大樹, 藤森淳, 桑原英樹, 富岡泰秀, 十倉好紀: Nd<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub>, Pr<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub> の光電子スペクトルにおける光照射効果, 日本物理学会春の分科会(鹿児島大学, 2007年3月).
- [154] 吉田鉄平, 橋本信, 藤森淳, 久保田正人, 小野寛太, 永崎洋: SrVO<sub>3</sub>, CaVO<sub>3</sub> のフェルミ面、バンド分散の観測, 同上.
- [155] 吉田鉄平, 橋本信, 池田正樹, 田中清尚, 藤森淳, X.-J. Zhou, N. Mannella, W. L. Yang, D. H. Lu, Z.-X. Shen, Z. Hussain, 久保田正人, 小野寛太, 小宮世紀, 安藤陽一, 永崎洋, 藤巻洋介, 内田慎一: La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> における擬ギャップとノード付近の電子状態の組成依存性, 同上.
- [156] 橋本信, 田中清尚, 池田正樹, 工藤諭, 八木創, 吉田鉄平, 藤森淳, D.H. Lu, Z.-X. Shen, 久保田正人, 小野寛太, 藤田和博, 内田慎一, 小野新平, 安藤陽一: Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2-x</sub>La<sub>x</sub>CuO<sub>6+δ</sub> の角度分解光電子スペクトルのホール濃度依存性, 同上.
- [157] 池田正樹, 吉田鉄平, 橋本信, 工藤諭, 藤森淳, 久保田正人, 小野寛太, 宇野沢圭一, 笹川崇男, 高木英典: 電子ドープ系高温超伝導体の角度分解光電子スペクトルのランタノイド置換による系統的変化, 同上.
- [158] 滝沢優, 和達大樹, G.W.J. Hassink, 高田恭孝, 堀場弘司, 松波雅治, 辛埴, 矢橋牧名, 玉作賢治, 西野吉則, 石川哲也, 須崎友文, G. Rijnders, 藤森淳, H.Y. Hwang, D.H.A. Blank: LaAlO<sub>3</sub>/LaTiO<sub>3</sub> 界面の光電子分光, 同上.
- [159] 工藤諭, 吉田鉄平, 橋本信, 池田正樹, 藤森淳, 鎌倉望, 久保田正人, 小野寛太, 石角元志, 内田慎一: Bi2212 の ARPES スペクトルの温度依存性, 同上.
- [160] 宋敬錫, 長船義敬, 小林正起, 石田行章, 黄鐘日, 江端一晃, 大木康弘, 藤森淳, 岡林潤, 金井謙, 久保光太郎, 高橋晴彦, 尾嶋正治: 熱拡散 Mn/GaAs(001) 界面の光電子分光: 同上.
- [161] 近松彰, 摩庭篤, 和達大樹, 組頭広志, 尾嶋正治, 藤森淳, 浜田典昭, 小野寛太, Mikk Lippmaa, 川崎雅司: 基板応力により物性を制御した La<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>MnO<sub>3</sub> 薄膜の *in-situ* 角度分解光電子分光, 同上.
- [162] 大河内拓雄, 藤森伸一, 岡根哲夫, 斎藤祐児, 藤森淳, 山上浩志, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 大貫惇睦: 軟 X 線角度分解光電子分光による遍歴ウラン系化合物 UB<sub>2</sub> の電子状態, 同上.
- [163] 安斎太陽, 加茂剛, 藤田泰輔, 井野明洋, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 藤森淳, Z.-X. Shen, 石角元志, 内田慎一: 低エネルギー放射光角度分解光電子分光による Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+δ</sub> の準粒子波数依存性, 同上.
- [164] 摩庭篤, 近松彰, 和達大樹, 組頭広志, 尾嶋正治, 藤森淳, Mikk Lippmaa, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: エピタキシャル応力を制御した La<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>MnO<sub>3</sub> 薄膜の *in-situ* 放射光光電子分光, 応用物理学会春季学術講演会(青山学院大学, 2007年3月).

## 招待講演

- [165] 藤森淳: 遍歴電子磁性化合物の電子構造: 光電子分光と XMCD, 日本金属学会分科会研究会「金属系シナジー化合物の遍歴電子制御による高機能化」第1回研究会「遍歴電子制御による高機能シナジー化合物の創製に向けて」(有馬温泉, 2006年4月).
- [166] 藤森淳: 磁性半導体と遷移金属酸化物の XMCD, PF 研究会「新 BL-16 高速スイッチング可変偏光アンジュレータービームライン放射光を利用した軟 X 線分光研究の新展開」(物質構造科学研究所, 2006年5月).
- [167] 藤森淳: 高温超伝導体のフェルミアーク, 日本物理学会秋の分科会, シンポジウム「20年を迎えた高温超伝導の現状と課題」(千葉大学, 2006年9月).
- [168] 藤森淳: 高温強磁性半導体および超構造の XMCD と軟 X 線散乱, 東北大通研共同プロジェクト研究会「スピンエレクトロニクスの新展開」(東北大学通研, 2006年9月).
- [169] 藤森淳: Fermi Arc, Pseudogap and Superconducting Gap Studied by ARPES, 金研ワークショップ「高温超伝導体における特異な電子状態と物性」(東北大金研, 2006年11月).

- [170] 藤森淳：希薄強磁性半導体と超構造の XMCD, 金研ワークショップ「強磁性半導体スピントロニクスの室温動作を目指して～構造と物性の理解～」(東北大金研, 2006年11月)。
- [171] 藤森淳：強相関物質界面の放射光分光, 理研シンポジウム「局所電子構造の理解に基づく物質科学の展開」(理研, 2006年11月)。
- [172] 藤森淳：高い熱電能を示す物質の光電子分光, 兵庫県立大学ワークショップ「遍歴電子シナジー化合物の物性とその応用」(兵庫県立大, 2006年11月)。
- [173] 藤森淳：固体分光から計算機科学への期待, 物性研短期研究会「計算物性科学におけるスーパーコンピュータ利用の現状と展望」(物性研, 2006年12月)。
- [174] 和達大樹：ペロブスカイト型酸化物の角度分解光電子分光, 第2回放射光表面科学部会シンポジウム「放射光表面科学の最前線」(東大化学, 2007年1月)。
- [175] 藤森淳：まとめ - 電子構造研究の立場から -, 日本物理学会春の分科会, シンポジウム「先端スペクトロスコピーが解き明かす遍歴電子磁性 - 新奇物性と応用への展開 -」(鹿児島大学, 2007年3月)。

#### セミナー

- [176] 藤森淳：Tanabe-Sugano ダイアグラムと CI クラスターモデルについてのコメント, 第17回「分子系の物性」(科学技術振興機構東京事務所, 2006年9月)
- [177] 藤森淳：モットハ・バード型  $d^1$  電子系の角度分解光電子分光, 物構研セミナー (物質構造科学研究所, 2006年2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、電子のもつ電荷とスピンそしてフォノン自由度が織りなす現象と秩序形成の探求を行っている。Cu 酸化物のドーピング、構造制御、そして電子輸送現象、遠赤外分光という物性測定を両輪として研究を遂行し、電荷・スピン・フォノン自由度のダイナミクスやそれらがつくり出す集団励起モードと高温超伝導発現との関係を調べている。特に  $\mu$ SR、中性子散乱、光電子分光、そして STM での国際共同研究を推進しており、世界的な研究ネットワークから数多くの epoch-making かつ新たな研究の流れを形成する成果を生産し続けている。これまでの、代表的な研究テーマと成果は、

- 1) 正孔ドーピング可能な梯子型 Cu 酸化物における超伝導相を含む電子相図の全貌を明らかにした (Phys. Rev. Lett. (1997)(1998)(1999)(2003)(2006). Science (2002))。
- 2) 高温超伝導秩序と競合するストライプ秩序を発見 (Nature (1995), Science (1999), Phys. Rev. Lett. (2000)(2001)(2002))

- 3) 高温超伝導体のナノスケール不均一性と超伝導準粒子の量子力学干渉により生ずるナノスケール現象の観測 (Nature (2000)(2001)(2002)(2003), Science (2002)(2005), Phys. Rev. Lett. (2000)(2005))。
- 4)  $T_c$  より高温の「正常状態」においても超伝導状態と同様に磁束が存在することの発見 (Nature (2000), Science (2003), Phys. Rev. Lett. (2002)(2005))。
- 5) 高温超伝導体におけるフォノンの寄与の再発見 (Nature(2001)(2003)(2006))。

研究の最終目標は、高温超伝導機構の解明と室温超伝導の可能性を明らかにすることである。発見後 20 年経った現在でもメカニズムが未解明なのは、高温超伝導発現におけるスピン・電荷・フォノン自由殿役割、複数の競合する秩序が自己組織的に作るような「構造」が高温超伝導をもたらしているのかがわかっていないためであると考えられる。それを明らかにする為、高温超伝導と競合する秩序の同定、そして競合を制御するパラメーターの追及を行う。これらは、室温超伝導実現への 1 つの道でもある。

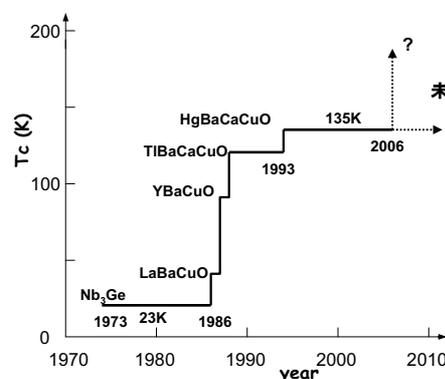


図 4.2.1: 超伝導体  $T_c$  の上昇の歴史 (1973 年以降)

### 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  $\text{CuO}_2$  面で起こる超伝導現象である。 $\text{CuO}_2$  面内では、Cu 原子が四方を酸素で囲まれ ( $\text{CuO}_2$  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。 $\text{CuO}_2$  ユニットを基本とする構造をもつ物質は高温超伝導体だけではない。 $\text{CuO}_2$  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、 $\text{Sr}_2\text{CuO}_3$  が存在する。 $\text{Sr}_2\text{CuO}_3$  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。Pr123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。

#### 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。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。超伝導秩序は明らかに電荷秩序と競合しており、高圧下で前者が後者に勝つと考えられる。

#### 4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相

##### 超伝導ゆらぎ

高温超伝導体と低温超伝導体との際立った違いの1つは、 $T_c$  以上の温度の正常状態でも観測される「擬ギャップ」である。この擬ギャップの起源は未だ明らかではないが、「擬ギャップ状態は電子対が形成されているがその位相の揃っていない状態である」というのが有力な考え方の1つである。低温超伝導体においても、 $T_c$  の近傍で「超伝導ゆらぎ」が観測されるが、 $T_c$  の直上の狭い温度領域に限られている。「ゆらぎ」領域では超伝導は短距離秩序として存在していると考えられる。このような場所に磁場をかけると、磁場は磁束(磁気ポルテックス)として存在するはずである。

我々は、Princeton 大学の Prof. Ong と共同の Nernst 効果の実験で磁束の存在を確認した。更に、マイクロな超伝導領域が応答していると考えられる反磁性をトルクを利用した高感度の磁化測定で観測した。Nernst 効果は試料の温度勾配によって生ずるホール

効果であるが、高温超伝導体で観測されたのは電荷キャリアの拡散に伴う Nernst 効果に比べ桁違いに大きなものである。正常状態での磁束は  $T_c$  よりかなり高い温度 ( $T_f$ ) まで観測できる。しかし、擬ギャップ温度  $T^*$  に比べると、 $T_f$  は低い。この結果から結論できるのは、高温超伝導状態は非常にゆらぎの強い状態であるということである。その原因は、 $\text{CuO}_2$  面の2次元性や  $T_c$  が高いことによる熱力学的ゆらぎだけではなく、量子力学的ゆらぎが大きいことにもある。量子力学ゆらぎは、高温超伝導体中のクーパー対密度が低温超伝導体 비해 1桁以上小さいことに起因している。一方、 $T_f$  と  $T^*$  が異なることは、擬ギャップの起源が超伝導ゆらぎとは別のところにある

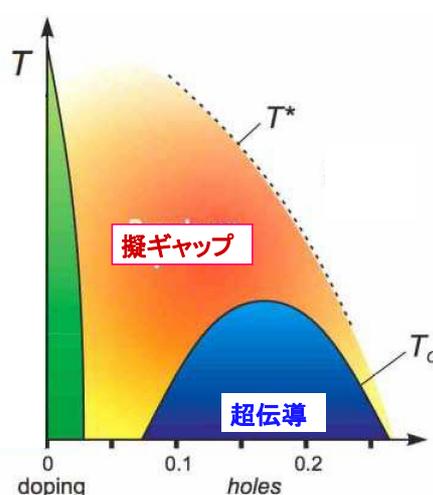


図 4.2.2: 高温超伝導体の電子相図

##### 秩序競合・共存

最近、「強相関電子系」と分類される Mn, Ni や Cu の酸化物内で電子が「ストライプ秩序」と呼ばれる全く新しい秩序を形成していることが明らかになった。ここでいう強相関とはクーロン相互作用が極限的に強く、電子がモット (Mott) 転移で局在するような状況を意味している。高温超伝導は、そのような2次元 Cu 酸化物に電荷キャリアを注入(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次的に配列してしまうという現象が発見されたのである。これがストライプ秩序と呼ばれるものである。一種の電荷秩序と考えてよいであろう。このストライプに挟まれた領域は元の(ドー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。

これまでのところ、ストライプ秩序は La 系高温超伝導体、 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ 、 $\text{La}_{2-x-y}\text{Nd}_y\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 、でのみ観測されている。しかし、Bi 系高温超伝導体に対する STM 観察(コーネル大学 J. C. Seamus Davis グループとの共同研究)で、類似の秩序が超伝導秩序と競合・共存している様子が見えてきた。

STM/STS では、 $T_c$  の上の正常状態だけではなく、 $T_c$  以下の超伝導状態でも、 $\text{CuO}_2$  面の一部(ナノメートルスケールの領域)に擬ギャップが観測された。超伝導秩序が局所的に壊れた磁束の芯近くでも擬ギャップが出現する。これらの擬ギャップ領域では、チェッカーボード状のトンネルコンダクタンスの空間変調パターンが観測される。同様な「パターン」は超伝導を外れた稀薄ドーピング域(スピングラス相と呼ばれる)でも観測されるので、STM 観測結果からは、超伝導とは別の秩序を表わしているようにみえる。

特殊な手法(トンネル非対称性)で詳細な構造をみると、ランダムに配向した一軸性のドメイン構造が見えてくる。各ドメインはナノメートルスケールの「ストライプ」のミニチュアのようなもので、これが電荷秩序(電子結晶)の破片だとすると「電子ガラス状態」が実現していることになる。これが「チェッカーボード」のパターンをつくり出す擬ギャップ相の空間構造といえる。このような「電子ガラス」組織が  $\text{CuO}_2$  を覆っていると同時に、その上を超伝導の準粒子が自由に飛びまわっていることも STM/STS で明らかになった。驚くべきことに超伝導秩序も  $\text{CuO}_2$  を覆っているのである。

STM や ARPES は試料表面の電子状態を調べるプローブであり、実験は殆んどの場合 Bi 系超伝導体( $\text{Bi2212}$ )に対して行われているので、結晶表面だけに現われる特殊な状態を見たもので、擬ギャップ状態の真の姿を捉えているのかという疑問があった。しかし、現在では、この疑問はほぼ解消している。擬ギャップは、ドーピングされた  $\text{CuO}_2$  面で実現する複数の状態のうちの一つであり、「擬ギャップ相」と呼ぶべきものとなる。その正体として、空間的にゆらいだストライプ秩序(電子液晶とも呼ばれている)、電子対が整列して結晶化したもの(電子結晶)、など様々な候補があげられているが決め手となる証拠が未だにない。

「擬ギャップ相」は超伝導秩序が形成される前、あるいは超伝導秩序が弱められた場所に出現していることがわかった。この意味では、La 系物質のストライプ秩序と同様、超伝導秩序と敵対する電子秩序であり、またその電荷秩序のパターンからストライプ秩序と「擬ギャップ相」とは密接な関係にあると想像できる。一方、ストライプ秩序に比べると「擬ギャップ」は超伝導秩序との相性ははるかに良い。超伝導ギャップと同じ d 波ギャップである。また、磁束芯の近くやドーピング量の少ない(アンダードーピング)領域の超伝導状態で、 $\text{CuO}_2$  面に「擬ギャップ相」が顔を出す。超伝導にとっては必ずしも破壊的な存在ではなく、両者は共存して高い  $T_c$  を保持しているようにみえる。どのような共存状態にあるかを明らかにすることが次の課題である。

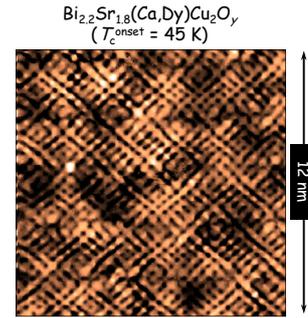


図 4.2.3: 擬ギャップ状態の空間構造(電子ガラス状態)

< 報文 >

(原著論文)

- [1] K. McElroy, G. -H. Gweon, S. Y. Zhou, J. Graf, S. Uchida, H. Eisaki, H. Takagi, T. Sasagawa, D. -H. Lee, and A. Lanzara: Elastic Scattering Susceptibility of the High Temperature Superconductor  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ : A Comparison between Real and Momentum Space Photoemission Spectroscopies, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 067005 (2006).
- [2] A. Rusydi, P. Abbamonte, H. Eisaki, Y. Fujimaki, G. Blumberg, S. Uchida, and G. A. Sawatzky: Quantum Melting of the Hole Crystal in the Spin Ladder of  $\text{Sr}_{14-x}\text{Ca}_x\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ , *Phys. Rev. Lett.* **97**, 016403 (2006).
- [3] B. J. Kim, H. Koh, E. Rotenberg, S. -J. Oh, H. Eisaki, N. Motoyama, S. Uchida, T. Tohyama, S. Maekawa, Z. -X. Shen, and C. Kim: Distinct spinon and holon dispersions in photoemission spectral functions from one-dimensional  $\text{SrCuO}_2$ , *Nature Physics* **2**, 397-401 (2006).
- [4] Jinho Lee, K. Fujita, K. McElroy, J. A. Slezak, M. Wang, Y. Aiura, H. Bando, M. Ishikado, T. Masui, J. -X. Zhu, A. V. Balatsky, H. Eisaki, S. Uchida, and J. C. Davis: Interplay of electron-lattice interactions and superconductivity in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ , *Nature* **442**, 546-550 (2006).
- [5] Q. Q. Liu, H. Yang, X. M. Qin, Y. Yu, L. X. Yang, F. Y. Li, R. C. Yu, C. Q. Jin, and S. Uchida: Enhancement of the superconducting critical temperature of  $\text{Sr}_2\text{CuO}_{3+\delta}$  up to 95K by ordering dopant atoms, *Phys. Rev. B* **74**, 100506(R) (2006).
- [6] A. Sugimoto, S. Kashiwaya, H. Eisaki, H. Kashiwaya, H. Tsuchiura, Y. Tanaka, K. Fujita, and S. Uchida: Enhancement of electronic inhomogeneities due to out-of-plane disorder in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+\delta}$  superconductors observed by scanning tunneling spectroscopy, *Phys. Rev. B* **74**, 094503 (2006).

- [7] T. Yoshida, X. J. Zhou, K. Tanaka, W. L. Yang, Z. Hussain, Z.-X. Shen, A. Fujimori, S. Sahrakorpi, M. Lindroos, R. S. Markiewicz, A. Bansil, Seiki Komiya, Yoichi Ando, H. Eisaki, T. Kakeshita, and S. Uchida: Systematic doping evolution of the underlying Fermi surface of  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ , *Phys. Rev. B* **74**, 224510 (2006).

(学位論文)

- [8] 平田靖透: 多層系高温超伝導体のジョセフソン・プラズマで見る層間結合 (修士論文)
- [9] 保房宏昭: ビスマス系高温超伝導体の臨界温度の向上 (修士論文)
- [10] 藤田和博: Interplay between Disorder and Nanoscale Electronic Heterogeneity in Copper Oxide Superconductors (銅酸化物超伝導における乱れとナノスケール電子不均一性の相互作用) (博士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [11] S. Uchida: Electron-Phonon Interaction and Isotope Effect in High- $T_c$  Cuprates (The 3rd Workshop on Electron-Phonon Interaction in Strongly Correlated Electron Systems, Hongo, Japan, January 12, 2006).
- [12] S. Uchida:  $T_c$  of Cuprate Superconductors: How high can  $T_c$  be raised and how low can  $T_c$  be reduced? (The 2nd Topical SCENET-2 Workshop and Chem-HTSC-X1 Workshop, Majorca, Spain, March 16, 2006).
- [13] S. Uchida: Probing Electronic Structure of Correlated Electron Materials at the Atomic Scale (DOE Workshop on the Basic Research Needs for Superconductivity, Arlington, USA, May 8, 2006).
- [14] S. Uchida: Effect of disorder on  $T_c$  and electronic inhomogeneity in high- $T_c$  cuprates (Kamerling Onnes Prize Lecture, The 8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors - M<sup>2</sup>S-HTSC VIII, Dresden, Germany, July 12, 2006).
- [15] S. Uchida: Effect of Disorder on  $T_c$  and Nanoscale Electronic Inhomogeneity in High- $T_c$  Cuprate Superconductors (9th Japanese-German Symposium on Collective Quantum Phenomenon in Strongly Correlated Electron Systems, Hikone, Japan, August 27, 2006).
- [16] S. Uchida: Phase Competition Induced by Disorder in the Apical-Oxygen Block, International Workshop on Electronic States and Disorder Effect in Cuprate Superconductors, Beijing, China, November 9, 2006).
- [17] C. Q. Jin and S. Uchida: Enhanced 95K High  $T_c$  by Improving Order State in the Monolayer  $\text{Sr}_2\text{CuO}_{3+\delta}$  superconductors (International Workshop on Electronic States and Disorder Effect in Cuprate Superconductors, Beijing, China, November 9, 2006).
- [18] S. Uchida: How to increase  $T_c$  in cuprates? (CREST Workshop on Charge Dynamics in High Temperature Superconductors, Tokyo, Japan, February 24, 2007).

一般講演

(国内会議)

招待講演

- [19] 内田慎一: 高温超伝導の課題のまとめ、日本物理学会 2006 年秋季大会 (千葉大学、2006 年 9 月)。
- 一般講演
- [20] 増井孝彦、藤田和博、永崎洋、田島節子、内田慎一: Sr サイト置換  $\text{Bi}2201$  のラマン散乱、日本物理学会 2006 年秋季大会 (千葉大学、2006 年 9 月)。
- [21] 藤巻洋介、小嶋健児、内田慎一: 梯子型銅酸化物の光学応答、日本物理学会 2006 年秋季大会 (千葉大学、2006 年 9 月)。
- [22] 神原浩、新見康洋、Clemens Winkelmann、石角元志、内田慎一、福山寛: Zn ドープ  $\text{Bi}2212$  における不純物束縛状態の走査トンネル分光、日本物理学会 2006 年秋季大会 (千葉大学、2006 年 9 月)。
- [23] 橋本信、吉田鉄平、池田正樹、藤森淳、久保田正人、小野寛太、藤田和博、内田慎一:  $\text{Bi}_{2.0}\text{Sr}_{1.6}\text{Ln}_{0.4}\text{CuO}_{6+\delta}$  (Ln=La, Gd) の角度分解光電子分光、日本物理学会 2006 年秋季大会 (千葉大学、2006 年 9 月)。
- [24] 吉田鉄平、橋本信、池田正樹、田中清尚、藤森淳、X. J. Zhou, N. Mannella, W. L. Yang, D. H. Lu, Z.-X. Shen, Z. Hussain、久保田正人、小野寛太、小宮世紀、安藤陽一、永崎洋、藤巻洋介、内田慎一:  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  における擬ギャップの異方性とフェルミアーク、日本物理学会 2006 年秋季大会 (千葉大学、2006 年 9 月)。
- [25] 岩澤英明、相浦義弘、齋藤智彦、吉田良行、永崎洋、阪東寛、岩瀬健、井野明洋、有田将司、島田賢也、生天目博文、谷口雅樹、増井孝彦、田島節子、内田慎一、D. S. Dessau:  $\text{Bi}2212$  の角度分解光電子スペクトルにおける酸素同位体効果、日本物理学会 2007 年春季大会 (鹿児島大学、2007 年 3 月)。
- [26] 工藤諭、吉田鉄平、橋本信、池田正樹、藤森淳、鎌倉望、久保田正人、小野寛太、石角元志、内田慎一:  $\text{Bi}2212$  の ARPES スペクトルの温度依存性、日本物理学会 2007 年春季大会 (鹿児島大学、2007 年 3 月)。
- [27] 橋本信、吉田鉄平、田中清尚、池田正樹、工藤諭、八木創、藤森淳、D.H. Lu、Z.-X. Shen、鎌倉望、久保田正人、小野寛太、藤田和博、内田慎一、小野新平、安藤陽一:  $\text{Bi}2\text{Sr}2-x\text{LaxCuO}6+$  角度分解光電子スペクトルのホール濃度依存性、日本物理学会 2007 年春季大会 (鹿児島大学、2007 年 3 月)。

- [28] 吉田鉄平、橋本信、池田正樹、田中清尚、藤森淳、Z.-J. Zhou、N. Mannella、W. L. Yang、D. H. Lu、Z.-X. Shen、Z. Hussain、久保田正人、小野寛太、小宮世紀、安藤陽一、永崎洋、藤巻洋介、内田慎一：La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>における擬ギャップとノード付近の電子状態の組成依存性、日本物理学会 2007 年春季大会（鹿児島大学、2007 年 3 月）。
- [29] 藤田和博、J. Lee、K. McElroy、M. Wang、J. A. Slezak、相浦義弘、阪東寛、石角元志、増井孝彦、J.-X. Zhu、A. V. Balatsky、永崎洋、内田慎一、J. C. Davis：非弾性トンネル分光による Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+</sub> の電子 - 格子相互作用、日本物理学会 2007 年春季大会（鹿児島大学、2007 年 3 月）。
- [30] 石角元志、小嶋健児、内田慎一：アンダードープ Bi<sub>2</sub>212 の光学応答 (II)、日本物理学会 2007 年春季大会（鹿児島大学、2007 年 3 月）。
- [31] 平田靖透、小嶋健児、石角元志、伊豫彰、永崎洋、内田慎一：水銀多層系銅酸化物高温超伝導体の c 軸光学応答、日本物理学会 2007 年春季大会（鹿児島大学、2007 年 3 月）。
- [32] 藤巻洋介、小嶋健児、内田慎一：梯子型銅酸化物の光学応答 II、日本物理学会 2007 年春季大会（鹿児島大学、2007 年 3 月）。
- [33] 安齋太陽、加茂剛、藤田泰輔、井野明洋、有田将司、生天目博文、谷口雅樹、藤森淳、Z.-X. Shen、石角元志、内田慎一：低エネルギー放射光角度分解光電子分光による Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+δ</sub> の準粒子波数依存性、日本物理学会 2007 年春季大会（鹿児島大学、2007 年 3 月）。
- [34] 藤原直樹、藤巻洋介、内田慎一、松本武彦、上床美也：定荷重 4 万気圧 NMR 装置の開発とスピンラダー系圧力誘起超伝導体 Sr<sub>2</sub>Ca<sub>12</sub>Cu<sub>24</sub>O<sub>41</sub> への適用、日本物理学会 2007 年春季大会（鹿児島大学、2007 年 3 月）。

### 4.3 長谷川研究室

4 月から修士課程 1 年生として芝崎剛豪、博士課程 1 年生として高瀬恵子が新しくメンバーに加わった。5 月には中国科学院物理研究所から何珂が博士研究員として着任した。12 月には 5 年間にわたって助手として活躍した松田巖が東京大学物性研究所助教授として転出した。その後任として 1 月から平原徹が助手に着任した。3 月には、山崎詩郎と沖野泰之が博士課程を修了し、山崎は物性研究所博士研究員に、沖野は企業に就職した。また、久保敬祐は修士課程を修了して企業に就職した。博士研究員の中山泰生は千葉大学先進科学研究教育センター・助教として、何珂は物性研究所博士研究員として、保原麗は物性研究所技術補佐員として転出した。

当研究室では、表面物性、特に「表面輸送」をキーワードにして実験的研究を行っている。おもにシリコン単結晶表面上に形成される種々の表面超構造や超薄膜を利用し、それらナノスケール低次元系に固有の電子状態や電子輸送特性を明らかにし、3 次元

結晶のバルク電子状態では見られない新しい現象を見出し、機能特性として利用することをめざしている。そのために、表面構造や原子層成長の制御・解析、表面電子状態、電子輸送特性、表面近傍での電子励起、エレクトロマイグレーションなどの表面質量輸送現象など、多角的に研究を行っている。また、これらの研究のために、新しい手法・装置の開発も並行して行っている。以下に、本年度の具体的な成果を述べる。

#### 4.3.1 表面電子輸送

##### ピスマス超薄膜の表面状態電気伝導

バルク Bi は半金属であり電気伝導度が低いが、表面状態は非常によい二次元金属になっていることが光電子分光法で明らかになったので、輸送特性においても表面状態が大きな寄与を果たしていることが予想される。そこで表面敏感なマイクロ 4 端子法電気伝導測定装置を用いて室温で Bi 超薄膜の電気伝導度の膜厚依存性を測定した。その結果、低膜厚 (6-10 BL) においては表面状態が確かに支配的であるが、膜厚増加とともにバルク (膜内部) の寄与が大きくなるのが分かった。この方法で見積もられた表面状態電気伝導度は表面に酸素を暴露して表面状態を壊したときの電気伝導度減少分から推定される値とよい一致を示した。さらに詳細なフェルミ面とバンド構造が分かっているのでボルツマン方程式を用いて電気伝導度が計算でき、その解析からも測定された Bi の表面状態電気伝導度が妥当であることが確認できた。さらに、低膜厚で表面状態電気伝導度の温度依存性を調べたところ 300 K から 10 K まで金属的な振る舞いを示した。またその温度依存性のグラフから得られた電子格子相互作用定数の値は光電子分光のピーク幅の温度依存性から得られる電子格子相互作用定数の値と概ね一致することを明らかにした。

##### Ge ナノドット層の電気伝導

Si 結晶表面の 2 原子層程度を酸化させ、その上に Ge を蒸着すると、下地 Si 基板に対してエピタキシャルおよび非エピタキシャルに成長した数ナノメートルサイズの Ge ナノドットが高密度に形成され、昨年度までにそのエネルギー状態を光電子分光法で明らかにしてきた。今年度は、このナノドット層の電気伝導度を温度可変マイクロ 4 端子プローブ法によって測定し、そこでの電気伝導メカニズムを明らかにした。エピタキシャルドットの下には極薄 Si 酸化膜に直径 1 nm 程度の小孔が存在し、ドットと Si 基板とが「連結」しているため、閉じ込めポテンシャル障壁が低下し、その結果、熱励起によってキャリアのやり取りがこの小孔を通じて起こるため、エピタキシャルドット層の電気伝導は、非エピタキシャルドット層に比べてはるかに高いことが分かった。[東京大学物理工学教室との共同研究]

### Si(111)-Au 表面超構造の電気伝導度とその温度依存性

1 原子層以下の Au 原子を Si(111) 表面に吸着させると吸着量や温度処理の違いによってさまざまな表面超構造が得られる。これらの Au 表面超構造の電気伝導度の温度依存性を室温から 10 K まで測定した。その結果、Au の蒸着量の増加による表面超構造の変化に応じて、電気伝導度の値は急速に上昇し、その温度依存性は冷却にしたがってホッピング伝導から弱局在型へ変化していくことがわかった。また表面超構造は一原子層の Au 膜より数桁高い電気伝導度を持つことがわかり、表面超構造特有の電子状態による電気伝導であるといえる。

### Si(111)- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面超構造の金属的伝導

$\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面超構造は光電子分光の測定から高い電子密度と大きなフェルミ波数を持つ表面状態を形成していることがわかっており、高い電気伝導度を持つことが予想されていた。そこで、この表面の電気伝導度の温度依存性の測定を行った結果、約  $700 \mu S/\square$  の高い電気伝導度と金属的な温度依存性が得られた。これにより、これまで 4 原子層程度が限界であった金属的な伝導を、特長的な電子状態を利用することで一原子層の系でも得ることに成功した。この表面上に極微量の過剰 In 原子を吸着させたりして乱れを導入すると電気伝導度は激減し絶縁体的な温度依存性となり、金属・絶縁体転移を起こすこともわかった。

### Na 吸着誘起による Si(111) $7 \times 7$ 表面の金属・絶縁体転移

Si(111)  $7 \times 7$  表面にアルカリ金属を吸着させた系は古くから盛んに研究されてきたが、最近、Na を室温で極微量吸着させることにより、この表面の金属的な表面状態 ( $s_1$ ) が抑制され、かつバンド湾曲の変化がないことが光電子分光測定により観測された。これを利用して、Na 吸着後と吸着前の表面電気伝導度の差を実測し、 $s_1$  状態のみによる電気伝導度を見積もることができる。その値は  $2 \sim 3 \mu S$  であり、Ioffe-Regel 条件との比較及び Mott のホッピングの理論から、 $s_1$  バンドによる伝導は、通常金属的な伝導ではなく、Hopping 伝導で説明できることを提案した。

### Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb 表面上の Pb 超薄膜の電子輸送

厚さがフェルミ波長程度の金属超薄膜では量子井戸状態が形成される。中でも Si(111) 表面上に成長した Pb 超薄膜では様々な物理量が強い量子サイズ効果を受けることが報告されてきた。当研究室でも電気伝導や光電子分光の測定を行うことでその物性

を調べてきた。今回は新たに、端子間隔が  $20 \mu m$  程度のマイクロ 4 端子を用いて 80 K で電気伝導度の膜厚依存性を測定したところ、低膜厚では半古典的な挙動から外れる振る舞いを見せた。これは過去に得た電気伝導度の振動が量子サイズ効果によることを裏付けるものであり、また光電子分光により得られた量子井戸状態のフェルミ面とバンド構造からポルツマン描像で計算した電気伝導度とも一致した。

### 4.3.2 表面ナノ構造

#### Bi 超薄膜の表面状態のスピン分裂の直接観測

昨年度はシリコン表面上に形成された Bi 超薄膜の高分解能光電子分光測定を行い、その電子状態に関する予備的実験を行った。そして理論計算との比較で Bi(111) 表面状態バンドが強いスピン軌道相互作用と反転対称性の破れのため Rashba 型のスピン軌道分裂をしていることが示唆された。本年度は上記の事実を実験的に確認するために広島大学において Bi 超薄膜の電子状態のスピン・角度分解光電子分光測定を行った。その結果、確かに表面状態バンドが波数空間でスピン分裂していることを直接観測した。理論の予想通り、表面状態のスピン構造は  $\Gamma$  点に対して反対称性を示し、スピン偏極率としては最大で 0.5 という値が得られた。室温での測定のため分解能が十分とはいえず、理論計算との比較により予想された同一バンド内のスピン偏極の変化を明確に捉えることはできなかったが、この点に関してはさらに低温で実験する予定である。[広島大学、物質材料研究機構、およびスペイン DIPC との共同研究]

#### 表面自由電子系における磁性不純物の影響

Si(111)  $7 \times 7$  表面に Ag を加熱蒸着して得られる Si(111)  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面超構造の電子状態は、金属的な放物線バンドをもつ理想的な二次元自由電子系として知られている。この系に、微量の磁性不純物を導入した場合、RKKY 相互作用や近藤効果、希薄磁性などの観点から非常に興味深い。今年度は、その基本的な性質を調べるため、Mn をこの表面に低温で低被覆率蒸着し、その原子構造及び電子状態を、走査トンネル顕微鏡及び光電子分光測定により調べた。その結果、この表面上に Mn が単原子程度の状態で点在し、表面バンドが分裂してフェルミ波数が大きくなることが観測された。これは、Mn から電荷移動が起こり、かつ、Mn により誘起された不純物バンドとの混成のためと考えられる。

#### 表面 Hume-Rothery 相

バルク固溶体の金属合金の中には、Cu-Zn 系で知られているように、電子数と原子数の割合によって結晶構造が決まるものがあり、それらは Hume-Rothery

型化合物(電子化合物)と呼ばれている。形成にはフェルミ球とブリルアン・ゾーン境界の接触が重要であることが分かっているものの、その安定性は現在でも議論されており、最近では準結晶との密接な関係も指摘されている。今までの研究から、 $\text{Si}(111)\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Ag}$  表面に低温蒸着により一価の金属(貴金属およびアルカリ金属)を0.1~0.2原子層追加蒸着することにより $\sqrt{21}\times\sqrt{21}$ 周期の超構造になることが知られており、かつ、その表面群すべて単位胞あたり3個の電子を有することが知られていた。今回、 $\text{Si}(111)$  清浄表面上に金原子を加熱蒸着し、その上に銀原子を追加蒸着し、その蒸着した原子の合計量が1.1~1.3原子層になるように、金原子と銀原子の割合を変えて表面群を作成し、RHEED, STM, マイクロ4端子電気伝導測定、および角度分解光電子分光で観測した。その結果、全ての表面において $21$ 周期が確認され、特に0.7 MLのAgと0.44 MLのAuの混合によって形成された $\sqrt{21}\times\sqrt{21}$ 相では、ユニットセル当たり3個の電子を有することが光電子分光の結果から得られた。これは、Auの代わりにAgを追加蒸着したときでも同様の結果となり、すなわち、Hume-Rothery 則にのっとる表面群であると結論付けた。

#### Si(111)-4×1-In 表面の金属・絶縁体転移における酸素原子吸着の影響

4×1-In 表面は  $m1$ ,  $m2$ ,  $m3$  と呼ばれる3つの擬1次元金属的な表面バンドを持つ。そこに酸素や水素の吸着によって点欠陥を故意に導入し、角度分解光電子分光法を用いてこれら3つのバンドの変化を観測した。すると、酸素の吸着によりバンドが束縛エネルギーの深い方にシフトすることが観測され、それにつれてフェルミ波数の増加が見られた。今後は120 K下の低温において見られるパイエルス絶縁相でのバンドギャップの大きさに対する気体吸着の効果を調べると共に、気体吸着による転移温度の推移をマイクロ4端子プローブ電気伝導測定を行う予定である。[韓国 Inha 大学との共同研究]

#### 4.3.3 新しい装置・手法の開発

##### グリーン関数 STM 装置の開発

液体 He 温度までの低温で動作可能な独立駆動型4探針 STM 装置を数年かけて開発している。この装置では、STM/STS や温度可変マイクロ4端子電気伝導測定に加え、「多探針 STS」の利を活かして、輸送現象の本質的な特性を表す遅延グリーン関数を実空間でマッピングすることが可能である。グリーン関数測定のためには、2本以上の探針を、試料とのトンネルコンタクトを維持した状態で電子のコヒーレント長以内まで近づけ、1つの探針に与えられた電気刺激に対する応答を他の探針で検出する必要がある。今年度は高精度なトンネル電流検出のために測定系の改良を行い、SEMによる吸収電流像を用いた多探

針アプローチ法も確立した。また、実際に試料として擬1次元金属的表面として知られる  $\text{Si}(111)\text{-}4\times 1\text{-In}$  を用い、正方配置のマイクロ4端子電気伝導測定を行った。その結果、表面超構造に固有の電気伝導度の異方性が実証され、その温度依存性が測定できた。そして個々の探針で原子分解能を持つ STM 像をとることに成功した。来年度は、室温から液体 He 温度までの温度範囲での各種表面や量子薄膜等の電気伝導度測定を行うとともに、最終目的である実空間における遅延グリーン関数のイメージングを目指す。

##### 金属被覆カーボンナノチューブ STM 探針の開発とその応用

我々の研究室では多探針 STM の探針間隔を電子の平均自由行程程度まで近づけるという目的で、大阪大学工学部片山研究室と共同で金属被覆カーボンナノチューブ (CNT) 探針を開発してきた。昨年度は CNT 探針の作成手法を確立し、非常に高い生産性や強度・伝導度を実現することが出来たが、それらを用いた電気伝導測定結果については不十分であった。そこで、今年度は複数の CNT 探針を用いたナノメータスケールの電気伝導測定を行った。独立駆動型4探針 STM 装置の内部でシリコン基板上にコバルトシリサイドナノワイヤを成長させて、それを試料として用いた。そのナノワイヤ上に PtIr 被覆 CNT 探針を接触させて、室温で4探針電気伝導測定を行うことに成功した。探針間隔と抵抗値の依存性は比例関係であり、一次元的な拡散伝導であった。最小探針間隔を約30 nm程度まで近づけたがこの関係は変わらなかった。室温でのコバルトシリサイド内部の電子の平均自由行程は6 nm程度であるため、妥当な結果である。コバルトシリサイドナノワイヤの測定を通じて、PtIr 被覆 CNT 探針を用いることで30 nm程度の領域まで再現性よく電気伝導測定が可能であることを示した。今後はより平均自由行程が長くなると考えられる半導体シリサイドナノワイヤの測定や CNT の測定、あるいは低温での測定を行う予定である。[大阪大学工学部での共同研究]

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われた。記して感謝いたします。

- ・科研費 基盤研究 S「グリーン関数 STM の開発とそれによるナノ電子輸送ダイナミクスの研究」(代表 長谷川修司)
- ・科研費 萌芽研究「新しい表面電気伝導測定法の開発：電子輸送中のフェルミ面測定」(代表 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 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 市川昌和)
- ・日本学術振興会 二国間交流事業(共同研究)(韓国)「半導体表面上の金属ナノ構造と電気伝導」(日本側代表 長谷川修司)
- ・日本学術振興会 日中韓フォーサイト事業「サブ 10

nm ワイヤ ; その新しい物理と化学」(日本側代表 長谷川修司)

< 報文 >

(原著論文)

- [1] N. Nagamura, I. Matsuda, N. Miyata, T. Hirahara, S. Hasegawa, and T. Uchihashi: *Quasi-quantum-wire states in an epitaxial Ag film on a one-dimensional surface superstructure*, Physical Review Letters **96**, 256801 (Jun 2006).
- [2] T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, Yu. M. Koroteev, P. M. Echenique, M. Saito, and S. Hasegawa: *Role of Spin-Orbit Coupling and Hybridization Effects in the Electronic Structure of Ultrathin Bi Films*, Physical Review Letters **97**, 146803 (Oct 2006).
- [3] S. Yoshimoto, Y. Murata, K. Kubo, K. Tomita, K. Motoyoshi, T. Kimura, H. Okino, R. Hobara, I. Matsuda, S. Honda, M. Katayama, and S. Hasegawa: *Four-Point Probe Resistance Measurements Using PtIr-Coated Carbon Nanotube Tips*, Nano Letters **7**, 956 (May 2007).
- [4] Y. Nakayama, I. Matsuda, S. Hasegawa, and M. Ichikawa: *Quantum regulation of Ge nanodot state by controlling barrier of the interface layer*, Applied Physics Letters **88**, 253102 (Jun 2006).
- [5] T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, Yu. M. Koroteev, and S. Hasegawa: *Quantum-well states in ultrathin Bi films from angle-resolved photoemission spectroscopy and first-principles calculations study*, Physical Review B **75**, 035422 (Jan 2007).
- [6] T. Hirahara, I. Matsuda, R. Hobara, S. Yoshimoto, and S. Hasegawa: *Direct measurement of the Hall effect in a free-electron-like surface state*, Physical Review B **73**, 235332 (Jun 2006).
- [7] C. Liu, I. Matsuda, M. D'angelo, and S. Hasegawa: *Self-Assembly of Two-Dimensional Nanoclusters: From Surface Molecules to Surface Superstructure*, Physical Review B **74**, 235420 (Dec 2006).
- [8] H. Konishi, Y. Murata, W. Wongwiriyan, M. Kishida, K. Tomita, K. Motoyoshi, S. Honda, and M. Katayama, S. Yoshimoto, K. Kubo, R. Hobara, I. Matsuda, S. Hasegawa, M. Yoshimura, J.-G. Lee and H. Mori: *High-yield synthesis of conductive carbon nanotube tips for multiprobe scanning tunneling microscope*, Review of Scientific Instruments **78**, 013703 (Jan 2007).
- [9] R. Hobara, N. Nagamura, S. Hasegawa, I. Matsuda, Y. Yamamoto, K. Ishikawa, and T. Nagamura: *Variable-Temperature Independently-Driven Four-Tip Scanning Tunneling Microscope*, Review of Scientific Instruments **78**, 053705 (May 2007).

- [10] R. Hobara, S. Yoshimoto, S. Hasegawa, and K. Sakamoto: *Dynamic electrochemical-etching technique for tungsten tips suitable for multi-tip scanning tunneling microscopes*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **5**, 94 (Apr 2007).

(国内雑誌)

- [11] 松田巖、保原麗、長谷川修司: 単原子ステップを通過する表面自由電子, 日本物理学会誌 **62**, 91 (Feb 2007).
- [12] 中山泰生, 松田巖, 長谷川修司, 市川昌和: 極薄 Si 酸化物上 Ge ナノドットの界面構造と閉じ込めポテンシャル, 表面科学 **27**, 523 (Sep 2006).
- [13] 劉燦華、松田巖、保原麗、長谷川修司: 吸着原子誘起の局在状態と表面自由電子ガスとの相互作用, 表面科学 **27**, 702 (Dec 2006).
- [14] 長谷川修司: マルチ探針走査型トンネル顕微鏡の開発と表面電子輸送, 真空 **49**, 642 (Nov 2006).
- [15] 毛塚博史、江尻有郷、長谷川修司: 物理オリンピックへの道 -物理チャレンジ 2005 から第 37 回国際物理オリンピックへの派遣まで-, 応用物理 **76**, 71 (Jan 2007).
- [16] 長谷川修司: 物理チャレンジから物理オリンピックへ, 大学の物理教育 **12**, 50 (Jul 2006).
- [17] 長谷川修司: 国際物理オリンピック 2006, パリティ **21**, 52 (Dec 2006).

(著書)

- [18] S. Hasegawa : *Multi-Probe Scanning Tunneling Microscopy* (Chap. II.7. in Vol. 1), in *Scanning Probe Microscopy -Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale-*, Eds. S. Kalinin and A. Gruverman (Springer, Jan 2007).
- [19] S. Hasegawa: *Multiprobe SPM* (Chap. 12), and *Characterization of Semiconducting Materials* (Chap. 18), in *Roadmap of Scanning Probe Microscopy*, ed. S. Morita, (Springer, Nov 2006)
- [20] 小間篤、青野正和、石橋幸治、塚田捷、常行真司、長谷川修司、八木克道、吉信淳 (編): 表面物性工学ハンドブック (第 2 版) (丸善, Jan 2007).
- [21] 勝本信吾、長谷川修司 (分担執筆): ナノテクのための物理入門 (第 12 章 ナノスケール系の電子状態と電気伝導)、菅原康弘、粉川良平 (編) (共立, Apr 2007) .

(学位論文)

- [22] 山崎詩郎: 表面超構造および超薄膜での局在・非局在電子輸送 (博士論文).
- [23] 沖野泰之: *Electronic transport through atomic wires and nanowires self-assembled on silicon surfaces* (博士論文) .
- [24] 久保敬祐: 表面 HUME-ROTHERY 相の発見 (修士論文) .
- [25] 永村直佳: *Electronic and Transport Properties of Metal Quantum Films on Si Surfaces*( 修士論文) .

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [26] S. Hasegawa: *Electronic Transport at Monatomic Layers and Atomic Chains on Silicon Surfaces*, 中華民國物理学会年会 2007, 2007 年 1 月 24 日 (国立中央大学, 台湾).
- [27] S. Hasegawa: *Growth and Properties of Metal Quantum Films on Silicon*, JSPS-KOSEF Asian Core Program -1st Japan-Korea Symposium on Surface Nanostructures- 2006 年 6 月 28 日 (宮城).
- [28] S. Hasegawa: *Modes of Electronic Transport in Surface- and Nano-Structures*, International Workshop on Energy Dissipation at Surfaces 2006 年 9 月 24 日 (Schlos Eichholz, Germany).
- [29] S. Hasegawa: *Electronic Transport at Monolayers and Atomic Chains on Silicon Surfaces The 13th International Conference on Solid Films and Surfaces*, 2006 年 11 月 9 日 (San Carlos de Bariloche, Argentina).
- [30] S. Hasegawa: *Multi-probe SPM, Present and Future*, 14th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, 2006 年 12 月 9 日 (伊豆熱川).
- [31] I. Matsuda: *Two-dimensional Hume-Rothery Phase of a Metallic Monolayer on the fcc(111) Semiconductor Surface*, The 10th ISSP International Symposium on Nanoscience at Surfaces (ISSP-10), 2006 年 10 月 13 日 (物性研, 柏)
- [32] T. Hirahara: *Electronic and transport properties of low-dimensional systems on a semiconductor surface*, The 11th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, 2007 年 3 月 9 日 (広島).

一般講演

- [33] Y. Nakayama, I. Matsuda, S. Yamazaki, S. Hasegawa, and M. Ichikawa: *Electronic Structure and Electric Conductivity of Ge Nanodots with Controlling Barrier*, The 24th European Conference on Surface Science, 2006 年 9 月 6 日 (Paris, France).
- **2006 MRS Fall Meeting**, 2006 年 11 月 26-30 日 (Boston, USA)
- [34] R. Hobarra, N. Nagamura, S. Yoshimoto, I. Matsuda and S. Hasegawa: *Development of a Low Temperature 4 Probe STM and Electrical Conductivity Measurement of One Dimensional Surface Super Structure*.
- [35] S. Yoshimoto, K. Kubo, H. Okino, R. Hobarra, I. Matsuda, Y. Murata, M. Kishida, H. Konishi, S. Honda, H. Okado, M. Katayama, and S. Hasegawa: *Four-Terminal Conductivity Measurement Using PtIr-Coated Carbon Nanotube STM Tips*,

- [36] N. Nagamura, I. Matsuda, T. Uchihashi, T. Hirahara, N. Miyata, C. Ohbuchi, and S. Hasegawa: *Quantum well states of ultra-thin Ag films prepared on one dimensional atomic array*.

- **The 10th ISSP International Symposium on Nanoscience at Surfaces (ISSP-10)**, 2006 年 10 月 11-13 日 (物性研, 柏)

- [37] T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, Yu. M. Koroteev, E. V. Chulkov, P. M. Echenique, M. Saito, S. Hasegawa: *Role of Spin-Orbit Coupling and Hybridization Effects in the Electronic Structure of Ultrathin Bi Films*.
- [38] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobarra, Z. He, P.A. Bennett, and S. Hasegawa: *Resistance of silicide nanowires epitaxially grown on Si(110)*.
- [39] N. Miyata, I. Matsuda, K. Horikoshi, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Oscillatory behavior of the charge transport through ultrathin Pb films*,
- [40] K. Takase, I. Matsuda, M. D'angelo, T. Hirahara, S. Hasegawa: *Metal-insulator transition of Si(111)7 × 7 by Na adsorption*.
- [41] S. Yamazaki, Y. Hosomura, I. Matsuda, R. Hobarra, and S. Hasegawa: *Metallic transport and metal-insulator transition on Si(111)-√7 × √3-In surface superstructure*.
- [42] N. Nagamura, I. Matsuda, T. Uchihashi, N. Miyata, T. Hirahara, S. Hasegawa: *Quasi one dimensional quantized states of ultra-thin Ag films on one dimensional structure Si(111)4 × 1-In*.
- [43] Y. Nakayama, I. Matsuda, S. Yamazaki, S. Hasegawa, M. Ichikawa: *Electric conductivity of Ge nanodot array on an oxidized Si surface*.

- **The Seventh Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces (RJSSS-7)**, 2006 年 9 月 19-21 日 (Vladivostok, Russia)

- [44] S. Hasegawa, N. Nagamura, I. Matsuda, T. Uchihashi, T. Hirahara, N. Miyata, C. Ohbuchi: *Anisotropic quantum well states in ultra-thin Ag films prepared on one-dimensional atomic array*.
- [45] I. Matsuda, K. Kubo, S. Yamazaki, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Electronic structure and electron transport of the Hume-Rothery-type phase on a semiconductor surface*.
- [46] S. Yamazaki, I. Matsuda, S. Hasegawa: *Increase of surface electrical conduction by In deposition on Si(111)-√3 × √3-Au surface*.

- **The 13th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-13)** 2006 年 11 月 6-10 日 (San Carlos de Bariloche, Patagonia, Argentina)

- [47] T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, Yu. M. Koroteev, P. M. Echenique, M. Sato, and S. Hasegawa: *Role of spin-orbit coupling and hybridization effects in the electronic structure of ultrathin Bi films.*
- [48] S. Yamazaki, Y. Hosomura, I. Matsuda, R. Hobar, and S. Hasegawa: *Electrical resistances of In/Si(111) surfaces: metallic transport on Si(111)- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In surface.*
- [49] H. Okino, I. Matsuda, S. Yamazaki, R. Hobar, and S. Hasegawa: *Temperature dependence of surface-state conductivity of Si(553)-Au.*
- [50] K. Takase, I. Matsuda, R. Hobar, and S. Hasegawa: *STM observation of Mn adatoms on Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag.*
- [51] K. Kubo, I. Matsuda, S. Yamazaki, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Atomic/electronic structures and phase transition of the Hume-Rothery-type phase on a silicon surface.*
- (国内会議)
- 招待講演
- [52] 長谷川修司: 多探針顕微鏡で見るナノの世界, 第44回茅コンファレンス, 2006年9月10日(福島).
- [53] 長谷川修司: 国際物理オリンピックに初参加, 平成18年度日本物理学会新潟支部 第35回例会, 2006年12月2日(長岡科技大, 新潟).
- [54] 保原麗, 長谷川修司: 低温型4探針STMの開発, 日本表面科学会 第54回表面科学研究会「最先端STM装置開発の現状と将来」, 2007年3月6日(東京大学).
- 一般講演
- [55] 長谷川修司: Making non-magnetic surface states magnetic, 東北大学通研プロジェクト研究会「ナノ半導体物理の構築とその作製・計測技術の開拓」2006年11月17日(仙台).
- [56] 毛塚博史, 北原和夫, 二宮正夫, 有山正孝, 並木雅俊, 長谷川修司, 江尻有郷: 物理チャレンジ2006および第37回国際物理オリンピック開催報告, 応用物理学会2007年春季第54回学術講演会, 2007年3月29日(青山学院大).
- 第44回茅コンファレンス  
2006年9月9-10日(福島).
- [57] 平原徹, 長尾忠昭, 松田巖, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, Yu. M. Koroteev, P. M. Echenique, 齋藤峯雄, 長谷川修司: Bi超薄膜の電子状態におけるスピン軌道相互作用と混成効果.
- [58] 山崎詩郎, 細村嘉一, 松田巖, 保原麗, 長谷川修司: 温度可変型 $\mu$ 4端子法によるIn単原子金属層の電気伝導測定.
- [59] 高瀬恵子, 松田巖, Marie D'angelo, 平原徹, 長谷川修司: Na吸着によるSi(111) $7 \times 7$ 表面の金属絶縁体変化.
- 2006年秋季 第67回応用物理学会学術講演会  
2006年8月29-9月1日(立命館大学).
- [60] 中山泰生, 松田巖, 山崎詩郎, 長谷川修司, 市川昌和: 極薄Si酸化膜上Geナノドットの閉じ込めポテンシャル高さに依存した電気伝導特性,
- [61] 本好謙司, 岸田優, 小西博文, 村田祐也, 富田一裕, 木村雄彦, 岡本一将, 松井良憲, 田川精一, 吉本真也, 久保敬祐, 保原麗, 松田巖, 長谷川修司, 本多信一, 片山光浩: カーボンナノチューブ探針による高アスペクト比構造のSTM観察.
- [62] 村田祐也, 岸田優, 小西博文, 本好謙司, 富田一裕, 木村雄彦, 吉本真也, 久保敬祐, 保原麗, 松田巖, 長谷川修司, 本多信一, 片山光浩: 金属被膜カーボンナノチューブ探針によるCoSi<sub>2</sub>ナノワイヤの電気伝導計測.
- [63] 保原麗, 永村直佳, 吉本真也, 松田巖, 長谷川修司: 4探針STMによる表面電気伝導の異方性測定とその温度依存性.
- [64] 毛塚博史, 北原和夫, 二宮正夫, 有山正孝, 並木俊雅, 長谷川修司: 物理チャレンジ2006と第37回国際物理オリンピック派遣状況.
- 日本物理学会2007春季大会  
2007年3月18-21日(鹿児島大学).
- [65] 高瀬恵子, 松田巖, 保原麗, 宮田伸弘, 長谷川修司: Mn吸着したSi(111) $3 \times 3$ -Ag表面のSTMおよび光電子分光測定.
- [66] 平原徹, 宮本幸治, 松田巖, 門野利治, 木村昭夫, 長尾忠昭, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, 喬山, 島田賢也, 生天目博文, 谷口雅樹, 長谷川修司: ビスマス表面状態のスピン角度分解光電子分光.
- [67] 宮田伸弘, 松田巖, 堀越孝太郎, 平原徹, 長谷川修司: Pb超薄膜の電子輸送の振動現象
- [68] 中山泰生, 山崎詩郎, 吉本信也, 保原麗, 沖野泰之, 平原徹, 松田巖, 長谷川修司, 市川昌和: 極薄Si酸化膜上Geナノドットの伝導機構の研究
- [69] 山崎詩郎, 松田巖, 平原徹, W. H. Choi, H. W. Yeom, 沖野泰之, 守川春雲, 長谷川修司: Si(111)表面上のAu膜の内殻光電子分光および電気伝導測定
- [70] 沖野泰之, 松田巖, 山崎詩郎, 保原麗, 長谷川修司: 金属蒸着したシリコン表面上の電気伝導度異方性.
- [71] 坂本克好, 河野勝泰, 名取晃子, 長谷川修司: In被覆Au探針を用いたエレクトロマイグレーションの観察.
- [72] 角田治哉, 平原徹, 松田巖, 長尾忠昭, 長谷川修司, 上野信雄, 坂本一之: ペンタセン超薄膜の電子構造
- [73] 原田勲, 長谷川修司, 杉山忠男, 毛塚博史, 江尻有郷, 田中忠芳, 鈴木亨, 山田達之輔: 物理チャレンジ・オリンピック日本委員会報告II. 国際物理オリンピック2007代表候補者教育訓練.

- [74] 江尻有郷, 原田勲, 長谷川修司, 杉山忠男, 毛塚博史, 田中忠芳, 鈴木亨, 山田達之輔: 物理チャレンジ・オリンピック日本委員会報告 III 国際物理オリンピック 2007 代表候補者訓練冬合宿・春合宿.
- 日本物理学会 2006 年秋季大会  
2006 年 9 月 22-25 日 (千葉大学).
- [75] 平原徹, 松田巖, 山崎詩郎, 宮田伸弘, 長尾忠昭 A, 長谷川修司: Si(111) 表面上 Bi(001) 超薄膜の表面状態電気伝導.
- [76] 山崎詩郎, 細村嘉一, 松田巖, 保原麗, 長谷川修司: In/Si(111)-  $7 \times 3$  表面超構造の金属伝導と絶縁体転移.
- [77] 高瀬恵子, 松田巖, Marie D'angelo, 平原徹, 長谷川修司: Si(111)  $7 \times 7$  表面上 Na 吸着に伴う金属 - 絶縁体転移とその電気伝導変化.
- [78] 江尻有郷, 長谷川修司, 鈴木亨, 毛塚博史, 杉山忠男, 田中忠芳, 北原和夫, 並木雅俊: 国際物理オリンピック (IPhO) と物理チャレンジ I - IPhO 選手派遣に至るまで - .
- [79] 鈴木亨, 長谷川修司, 杉山忠男, 江尻有郷, 毛塚博史, 山田達之輔, 北原和夫, 並木雅俊: 国際物理オリンピック (IPhO) と物理チャレンジ II. IPhO2006 日本選手の活躍日本物理学会 2006 年秋季大会, 2006 年 9 月 24 日、千葉大.
- 日本表面科学会 第 26 回表面科学講演大会  
2006 年 11 月 7-9 日 (大阪大学).
- [80] 宮田伸弘, 松田巖, 堀越孝太郎, 平原徹, 長谷川修司: Pb 超薄膜の電子輸送の振動現象.
- [81] 松田巖, 小林功佳, 平原徹, 宮田伸弘, 長谷川修司: 表面 Hume-Rothery 相の研究.
- [82] 中山泰生, 松田巖, 山崎詩郎, 長谷川修司, 市川昌和: 極薄 Si 酸化膜上の Ge ナノドットの電気伝導特性.
- (セミナー)
- [83] 長谷川修司: 表面の物理: ミクロとマクロをつなぐ舞台, 東北大学大学院理学研究科物理教室談話会「物理科学の最前線」2006 年 6 月 23 日 (東北大学, 仙台).
- [84] 長谷川修司: 家庭教育から世界にはばたく, 宇都宮市 P 連 B ブロック研修会講演会, 2006 年 9 月 22 日 (宇都宮).
- [85] S. Hasegawa: *Four-Tip Scanning Tunneling Microscope and Its Application to Transport Measurements at Nanometer Scale*, Forschungszentrum Juelich GmbH, 2006 年 9 月 29 日 (Juelich, Germany).
- [86] 長谷川修司: 表面・ナノ物理の現状と将来, 応用物理学会関西支部セミナー, 2006 年 11 月 24 日 (大阪大学, 吹田).
- (講義等)
- [87] 長谷川修司: 表面科学、兵庫県立大学理学部, 集中講義 2006 年 8 月 16-18 日.
- [88] 長谷川修司: 原子をみる、電子をみる、表面をみる - ナノワールドへの挑戦 -, 成蹊大学 国際教養科目「現代を生きる - 最先端科学の挑戦 ~ 医療からナノまで -」, 2006 年 12 月 8 日、12 月 15 日、12 月 22 日.
- [89] 長谷川修司, 松田巖, 永村直佳 (TA): 物理学実験 I (3 年生) 電子回折, 2006 年度冬学期 (本郷).
- [90] 長谷川修司: 固体物理学 II (学部 4 年生講義) 2006 年度冬学期 (本郷).
- [91] 長谷川修司: 物理学ゼミナール (学部 3 年生) 2006 年度冬学期 (本郷).

## 4.4 福山研究室

我々は、低温極限で現れる超流動、超伝導、強相関効果、磁気フラストレーション、量子ホール効果などさまざまな量子多体現象や相転移現象を実験的に研究している。とくに、これらの現象に対する空間次元の効果に注目し、新しい物理概念の発見とその機構解明を目指している。対象となる実験系は、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である。

我々の用いる実験手法は多岐に渡るが、他グループにないユニークかつ高性能な実験装置を自主開発して独自の実験を展開する、という一貫した方法論のもとに研究を進めている。例えば、100  $\mu\text{K}$  あるいはそれ以下の超低温に至る比熱測定装置や核磁気共鳴 (NMR) 測定装置を使った 2 次元ヘリウム 3 の研究、30 mK の温度で原子分解能をもち超高真空試料作成装置を併設した世界で唯一の超低温走査トンネル顕微鏡を使った 2 次元電子系や異方的超伝導体の走査トンネル分光実験などである。

### 4.4.1 2 次元フェルミ粒子系の強相関効果

グラファイト表面に物理吸着した単原子層ヘリウム  $3(^3\text{He})$  は、強く相互作用する 2 次元フェルミ粒子系のモデル物質である。この系の特徴は、乱れを導入することなく粒子密度 ( $\rho$ ) を広い範囲で変えて相関効果を自在にコントロールできる点である。我々は、これまでの熱容量や NMR 磁化測定から、吸着第 2 層目の 2 次元  $^3\text{He}$  には  $4/7$  局在相の他に合計 4 つの特徴的な量子相が存在することを明らかにした。ここで  $4/7$  局在相とは、第 1 層目に整合な 3 角格子構造をもつ整合相のことである。今年度は、低密度のフェルミ流体相と  $4/7$  局在相の中間密度域 ( $0.8 \leq n \leq 1$ :  $n \equiv \rho/\rho_{4/7}$ ) に存在する領域 II の性質を、熱容量データの定量的な再解析やスピン-スピン緩和時間 ( $T_2$ ) の測定を通じて詳しく調べた。ここで  $\rho_{4/7} = 6.80 \text{ nm}^{-2}$  は  $4/7$  局在相の密度である。なお、本研究では 1 層目を非磁性の  $^4\text{He}$  とした系で実験した。

### モット局在相にドープされた零点空格子点

零点空格子点 (ZPV) とは、結晶中を量子力学的に動き回ることによって絶対零度でも安定して存在する原子空孔のことで、Andreev と Lifshitz が 1969 年に理論的に予言した。ZPV の性質は、有限温度で熱励起によって形成され熱拡散で結晶中を移動する通常の原子空孔のそれとは大きく異なる。例えば、ZPV を含む固体は結晶の対称性を保ちながら量子流体としての性質 (絶対零度でも有限の流動性をもつ) も併せもった特異な量子状態である。ZPV は固体 He のような零点振動の大きな量子結晶中で発見される可能性が最も高いが、今日まで 3 次元固体 He では実験的に見出されていない。しかし、2 次元  $^3\text{He}$  の 4/7 局在相近傍の密度で我々が行った熱容量測定の実験データを詳しく解析したところ、ZPV が Mott 局在相に最大 20% ドープされた量子状態 (ZPV 相) が実現していることを示す定量的な証拠が見出された。すなわち、粒子密度を減少させると逆に増加する熱容量異常が 10 mK 以上に観測され、20–80 mK に緩やかなピークをもつ。この異常をピーク温度 ( $T_{\text{HT}}$ ) とピーク熱容量 ( $C_{\text{HT}}$ ) で規格化すると密度に依らず一つの曲線に乗る (図 4.4.4)。このユニバーサルな温度依存性は、3 角格子の格子点をホッピングする低密度のフェルミ粒子に対する熱容量の  $U = \infty$  Hubbard 模型の高温展開計算の結果 (図中の実線や破線) とよく一致する。この他、ピーク温度は  $(1 - n)$  によく比例している。以上の結果から、2 次元  $^3\text{He}$  の領域 II で ZPV 相が実現している可能性は非常に高いと考えている。

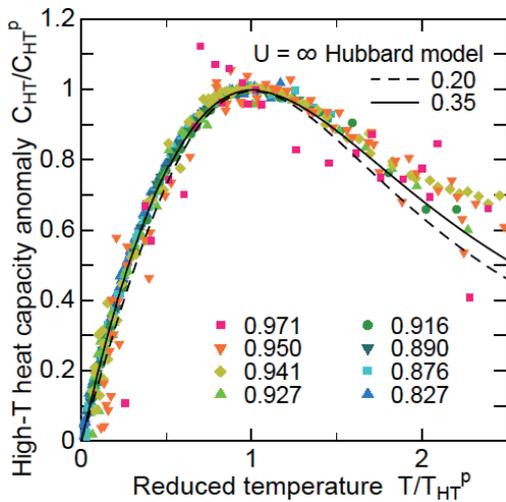


図 4.4.4: 2 次元  $^3\text{He}$  の局在相にドープされた零点空格子点をもたらす熱容量異常 ( $C_{\text{HT}}$ )。図中の数字は相対面密度  $n = \rho/\rho_{4/7}$ 。実線と破線は理論計算。

### 局在点近傍における 2 次元 $^3\text{He}$ のスピンドイナミクス

パルス NMR による 2 次元  $^3\text{He}$  の磁化と  $T_2$  の本格的な測定を開始した。とくにスピンエコー法を用いると静磁場の不均一性の影響を受けずに系固有の  $T_2$  を測定することができるので、4/7 局在相近傍における 2 次元  $^3\text{He}$  のスピンドイナミクスについて重要な知見を得ることができる。図 4.4.5(a) に局在点近傍の密度 ( $= 7.40 \text{ nm}^{-2}$ ) で測定された  $T_2$  の温度依存性を示す。20  $\leq T \leq$  200 mK の温度域では  $T_2$  はほとんど温度変化しない。ここでは、主に空格子点の運動や原子-原子交換がその大きさを決めていると考えられる。  $T \geq 500$  mK の高温で  $T_2$  が急速に長くなるのは、空格子点に代表される密度揺らぎが多数熱励起されるためと考えられる。これらの振る舞いは 3 次元バルクの固体  $^3\text{He}$  で知られているものと定性的に同じであるが、温度変化しない領域の  $T_2$  の大きさを面密度に対してプロットすると (図 4.4.5(b))、4/7 局在相の密度を極小点にした V 字型の振る舞いをするのが分かった。極小点より低密度側はドープされた ZPV による motional narrowing 効果、高密度側は 3 層目に形成され始めた  $^3\text{He}$  流体相と 4/7 局在相の間の層間交換相互作用による exchange narrowing 効果、としてそれぞれ半定量的に理解できる。なお、図 4.4.5(a) を見ると 1 mK 以下で  $T_2$  が大きく減少している。これは、交換相互作用程度の低温になってスピンの局所秩序が進むことによる  $T_2$  の減少と考えることもできる。しかし、 $^3\text{He}$  磁化の低温での成長とグラファイト基盤の単結晶子のモザイク角分布を反映した局所磁場の不均一性が原因で (局所スピンドイナミクス効果) で見かけの  $T_2$  が減少している可能性もある。この点を明らかにするには、今後より低静磁場のもとで (つまり  $^3\text{He}$  の磁化を小さく押さえて) 測定する必要がある。

### 4.4.2 走査トンネル分光法による 2 次元電子系の研究

#### 整数量子ホール状態のナノスケール観測

低温・高磁場中の 2 次元電子系で実現する量子ホール効果に関する研究は、これまでそのほとんどがマクロな輸送現象の測定に限られてきた。これに対して我々は、高配向熱分解グラファイト (HOPG) 表面の 2 次元電子系に注目し、超低温走査トンネル顕微鏡 (超低温 STM) を使って点欠陥周辺の局所状態密度 (LDOS) を走査トンネル分光 (STS) 測定してきた。その結果、ホール抵抗が量子化値をとる局在状態では 2 次元電子系が不純物の作る等ポテンシャル線に沿って磁気長程度 (数 nm) の幅をもって束縛運動すること、ランダウ準位に対応する試料-探針間のバイアス電圧のもとで STS 観測すると試料全体に広がった電子状態が観測されること、などを初めて明瞭に実空間観測することに成功した。とくに局在状態では LDOS は点欠陥直上で最大振幅をもち、その周囲に半径が磁気長程度のサテライトリングを形成するこ

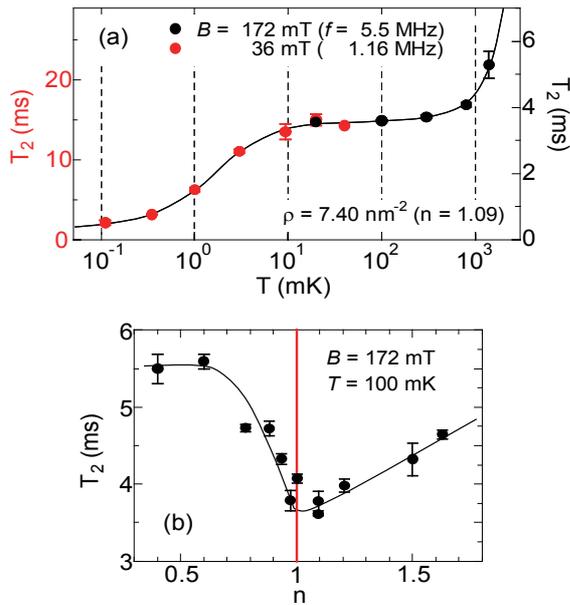


図 4.4.5: パルス NMR のスピンエコー法で求めた 2 次元  $^3\text{He}$  の  $T_2$  の (a) 温度依存性と (b) 面密度依存性。

とも分かった。この空間分布は、磁場中で  $1/r$  ポテンシャルに捕獲された 2 次元電子ガスに対する LDOS の計算結果と定量的に一致する。

今年度はこれらの研究を進展させて、Ar イオンスパッタの手法で HOPG 表面に点欠陥より大きい 10 nm 程度の径の欠陥を人工的に作成し、同様の測定を行った (図 4.4.6(a)(b))。その結果、点欠陥の場合と同様の LDOS 分布 (Type-I: 図 4.4.6(c)) の他に、別タイプのリング型 LDOS 分布 (Type-II: 図 4.4.6(d)) が観測された。Type-II は調和ポテンシャルに対する LDOS の計算結果と一致する。このことから、量子ホール効果における電子局在状態の空間分布は、ポテンシャルの関数型に強く依存することが分かった。イオンスパッタによってランダムに導入された欠陥は表面に複雑なポテンシャル分布を形成することも分かったが、局在状態から非局在状態への遷移の過程で、電子状態がポテンシャル等高線に沿って広がってゆく様子を捉えることもできた。

#### 半導体 2 次元電子系の STS 観測

分子線エピタキシャル (MBE) 成長法で n-GaAs(111)A 上に積層した InAs 薄膜には、電子蓄積層の形成により表面 2 次元電子系が実現することが知られている。我々は、超低温 STM を使った磁場中 STS 観測によって、グラファイト表面の 2 次元電子系に続いて、この 2 次元自由電子系でもランダウ量子化に伴う DOS のピーク構造の観測に成功した。こうしたピーク構造は 2 次元サブバンドが形成される  $-80 \leq V \leq 0$  mV

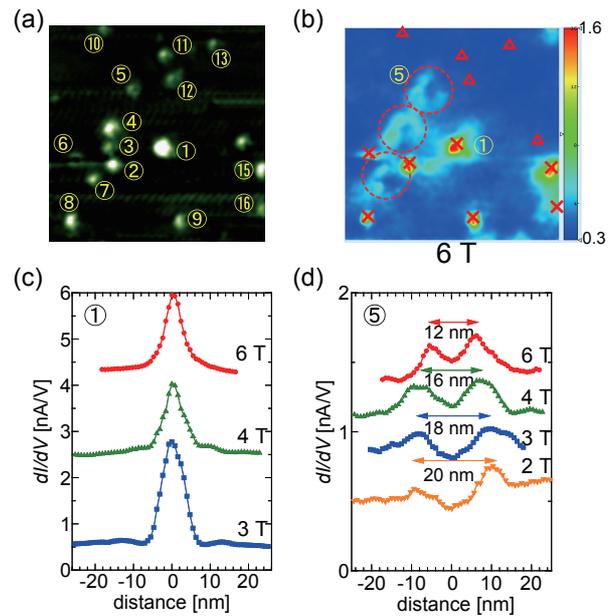


図 4.4.6: (a) Ar イオンスパッタ法で人工的に欠陥を形成した HOPG 表面の STM 像 ( $100 \times 100 \text{ nm}^2$ ,  $T = 30 \text{ mK}$ )。形成された全ての欠陥に番号を振っている。(b) ランダウ準位の谷のエネルギーにおける (a) と同じ領域の  $dI/dV$  像 ( $B = 6 \text{ T}$ )。クロス、破線丸、三角はそれぞれ局在状態の種類に応じた欠陥の位置を示している。欠陥 1(c) と欠陥 5(d) における  $dI/dV$  像の断面の磁場依存性。

の負のバイアス電圧範囲で観測された。一方、正のバイアス範囲では、磁場の大きさや InAs 薄膜の膜厚に依存しない約 60 mV 間隔の DOS 振動を観測した (図 4.4.7(a)(b))。

今年度はこの DOS 振動の起源を詳細に探った。まず、InAs 薄膜を MBE 成長させる基板を GaAs から InAs にするとこの振動は現れなかった。次に、GaAs 基板と InAs 薄膜との間にわずか 4 nm の非ドープ GaAs 層を挿入すると、振動間隔が半分になった (図 4.4.7(d))。これらの実験事実から、この DOS 振動が InAs 薄膜と GaAs 基板の界面に形成される転位 (正に帯電) の閉じ込めポテンシャルに影響を受けた Schottky 障壁を電子がトンネルする際の透過確率に起因したものであると結論した (図 4.4.7(e))。モデル計算の結果もこれを定量的に支持している。本研究は NTT 物性基礎研究所の量子固体物性研究グループとの共同研究である。

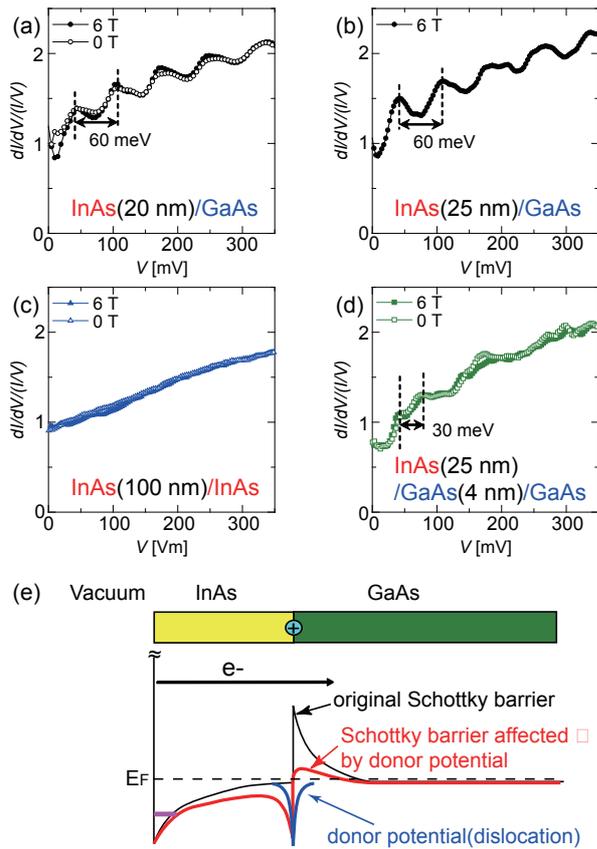


図 4.4.7: さまざまな InAs 薄膜表面におけるトンネル分光の測定結果。(a) InAs(20 nm)/GaAs(111)A、(b) InAs(25 nm)/GaAs(111)A、(c) InAs(100 nm)/InAs(111)A、(d) InAs(25 nm)/GaAs(4 nm)/GaAs(111)A。(e) InAs 薄膜と GaAs 基板の界面におけるポテンシャルの概念図。

#### 4.4.3 異方的超伝導体の STS 研究

##### Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の表面電子状態

内部スピン自由度をもつ  $p$  波スピン 3 重項超伝導物質 ( $T_c = 1.5$  K) として注目されている Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の表面電子状態を、超低温 STM/STS 法で詳細に研究した。これまで行った実験で、超高真空中 ( $< 1 \times 10^{-7}$  Pa) での劈開であっても劈開条件によって試料の表面電子状態が大きく変化することが分かっていた。すなわち、100 K 以下で低温劈開した場合、超伝導性とは無関係な大きな“常伝導ギャップ” ( $\Delta \sim 5$  meV) が観測され、その 1/10 程度と予想される超伝導ギャップは観測されない。一方、室温 (300 K) で劈開すると表面は乱れた電子状態となり、トンネルスペクトルは  $dI/dV \propto \sqrt{|E - E_F|}$  の形に激変する。これは不規則ポテンシャル中でのアンダーソン局在に 3 次元的な補正項を導入した場合の振る舞いとして理解

できる。

今回は次のような実験を行い、室温下の大きな熱エネルギーのもとで表面に原子レベルの乱れが生じ、これが表面電子状態を大きく変化させることを明瞭に示すことができた (図 4.4.8)。まず試料を  $T = 100$  K で劈開して、これを  $T = 42$  mK に冷却して良好な STM 原子像と常伝導ギャップが観測されることを確認する (図 4.4.8(a)(b))。次にその試料を超高真空を保ったまま室温まで昇温し、再び  $T = 45$  mK まで冷却して STM/STS 測定した結果が図 4.4.8(c)(d) である。高温での表面の乱れは他の研究者による光電子分光測定でも観測されており、表面酸素の熱活性化が原因であろうと考えられている。低温劈開した場合の“常伝導ギャップ”状態を含め、以上のような表面電子状態の敏感な変化は他の弱い層間結合をもつ層状物質では報告されていない。Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の劈開表面では層状ペロブスカイト構造が内包する不安定性を反映して、バルクの電子状態とは大きく異なる電子状態へと変化するものと考えられる。本研究は京都大学大学院理学研究科前野研究室との共同研究である。

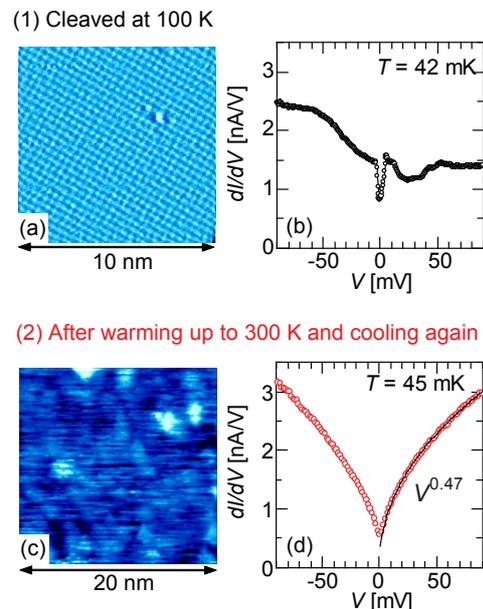


図 4.4.8: Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の表面電子状態の温度変化。  $T = 100$  K で劈開した試料の STM 像 (a) とトンネルスペクトル (b) (観測温度は  $T = 42$  mK)。  $\Delta \sim 5$  meV の常伝導ギャップが観測されている。その試料を超高真空を保ったまま室温まで昇温し、再冷却して測定したときの STM 像 (c) とトンネルスペクトル (d) ( $T = 45$  mK)。乱れた表面電子状態に変化していることが分かる。

## 銅酸化物高温超伝導体における不純物束縛状態

銅酸化物高温超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (Bi2212) は BiO-BiO 層間がファン・デル・ワールス力で弱く結合しているため、劈開によって容易に清浄表面を得ることができる。そのため、高温超伝導体のミクロな機構を探る目的で、これまで多くの STM 研究がなされてきた。例えば Cu 原子の一部を非磁性の Zn 不純物で置換した試料では、Zn が局所的に超伝導状態を破壊することによって、不純物周りに準粒子束縛状態が形成されることが STS 観測で知られている。この不純物束縛状態は超伝導ギャップの異方性を反映して 4 回対称の空間的分布をもち、フェルミエネルギー ( $E_F$ ) 付近の状態密度にピーク構造 (Near Zero Energy Peak: NZEP) をもたらす。NZEP の起源についてはこれまで大別して 2 通りの解釈があった。一つは不純物散乱による共鳴状態とする考え方、もう一つは Zn 不純物周囲に誘起される磁気モーメントが近藤効果を通じて準粒子の束縛状態を形成するという近藤共鳴状態の考え方である。

我々の超低温 STM は極低温だけでなく室温に至るまでの温度においても超高真空環境を維持できるよう設計されているので、この利点を活かして NZEP の温度変化を広い範囲で測定し、その起源の解明を目指した。図 4.4.9 に示すように、NZEP は近藤温度 ( $T_K \sim 15$  K) よりも十分高温の 52 K でも観測された。もし近藤共鳴状態が起源であるならば  $T \gg T_K$  では NZEP はほぼ消失すると考えられるので、我々の実験はその近藤共鳴説にとって否定的な結果を与えたことになる。NZEP の半値幅は温度の上昇とともに増加するが、これは熱的ブロードニング効果として説明可能である。本研究は当物理学教室内田研究室との共同研究である。

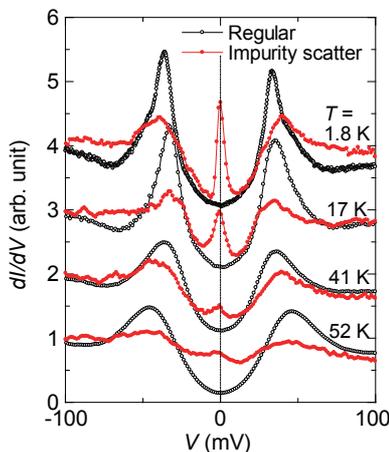


図 4.4.9: Zn-doped Bi2212 表面のトンネルスペクトルの温度変化。白抜丸のデータは Zn 不純物以外の場所で得られた通常の超伝導ギャップ、赤塗丸のデータは Zn 不純物ごく近傍で得られたもので、 $T = 52$  K でも NZEP が観測されている。

4.4.4 グラファイト層間化合物  $\text{C}_6\text{Yb}$  の超伝導

グラファイトの層間に異種の原子・分子が進入することで形成されるグラファイト層間化合物 (GIC) では、層間物質からの電荷移動によって多様な物性が現れる。しかし超伝導を示すものはそのうちごく一部で、超伝導の  $T_c$  もほとんどが 1 K 以下という極低温である。我々は最近発見された高い  $T_c$  ( $= 6.5$  K) をもつ GIC 物質  $\text{C}_6\text{Yb}$  に注目して、気相輸送法でバルク試料を合成して磁化測定と電気伝導度測定を行った。その結果、超伝導の異方性は小さく、3次元性が強い物質であることが分かってきた。また超高真空中でグラファイト表面に Yb を蒸着し、熱処理することで、“表面”GIC 試料を作成する試みも行っている。現在までのところ、低速電子線回折法で  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  の超格子構造の出現を確認しているが、STM ではこれに対応する表面 GIC 像はまだ観測できていない。

<受賞>

- [1] H. Kambara, T. Matsui, Y. Niimi, C. Winkelmann, and H. Fukuyama: Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy Experiments at Ultra-Low Temperatures, IMC16 Poster Award “Instrumentation and Techniques”, The 16th International Microscopy Congress : IMC16 (Sapporo Convention Center, Japan, September 3-8, 2006).

<報文>

(原著論文)

- [2] Y. Niimi, T. Matsui, H. Kambara, K. Tagami, M. Tsukada, and H. Fukuyama: Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy of the Electronic Local Density of States of Graphite Surfaces Near Monoatomic Step edges, *Physical Review B* **73**, 085421 (2006).
- [3] H. Kambara, Y. Niimi, K. Takizawa, H. Yaguchi, Y. Maeno, and H. Fukuyama: Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ , *AIP Conference Proceedings* **850**, 539-540 (2006).
- [4] S. Murakawa, H. Akisato, Y. Matsumoto, D. Tsuji, K. Mukai, H. Kambara, and H. Fukuyama: NMR Measurements on New Quantum Phases in 2D  $^3\text{He}$ , *AIP Conference Proceedings* **850**, 311-312 (2006).
- [5] Y. Niimi, H. Kambara, T. Matsui, D. Yoshioka, and H. Fukuyama: Real-Space Imaging of Alternate Localization and Extension of Quasi-Two-Dimensional Electronic States at Graphite Surfaces in Magnetic Fields, *Physical Review Letters* **97**, 236804 (2006).
- [6] Y. Niimi, T. Matsui, H. Kambara, and H. Fukuyama: STM/STS Measurements of Two-Dimensional Electrons Trapped around Surface Defects in Magnetic Fields, *Physica E* **34**, 100-103 (2006).

(国内雑誌)

松井朋裕, 神原 浩, 新見康洋, 福山 寛: 超低温・高磁場走査トンネル顕微鏡の開発とランダウ量子化の計測, 真空 49, 659-666 (2006).

(学位論文)

- [7] 新見康洋: Studies of Two-Dimensional Electron System at Graphite Surfaces by Scanning Tunneling Spectroscopy: 走査トンネル分光法によるグラファイト表面の2次元電子系の研究(博士論文)
- [8] 向 賢一: パルス NMR 法による2次元ヘリウム3の磁気基底状態の研究(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [9] Y. Niimi, H. Kambara, D. Yoshioka, and H. Fukuyama: Real-Space Imaging of Alternating Localized and Extended Electronic States at Graphite Surfaces, 4th International Conference on Scanning Probe Spectroscopy and 1st International Workshop on Spin-Polarized Scanning Tunneling Microscopy: SPS'06/SPSTM-1 (University of Hamburg, Germany, July 23-26, 2006).
  - [10] Y. Niimi, K. Kanisawa, H. Kojima, H. Kambara, Y. Hirayama, S. Tarucha, and H. Fukuyama: STM/STS Measurements of Two-Dimensional Electronic States in Magnetic Fields at Epitaxially Grown InAs(111)A Surfaces, International Conference on Nanoscience and Technology: ICN+T2006 (Basel, Switzerland, July 30-August 4, 2006).
  - [11] D. Tsuji, S. Murakawa, K. Mukai, Y. Matsumoto, H. Kambara, and H. Fukuyama: Heat capacity studies of new quantum phases at higher densities than the 4/7 phase in 2D  $^3\text{He}$  on graphite, International Symposium on Quantum Fluids and Solids: QFS2006 (Kyoto University, Clock Tower Centennial Hall, Kyoto, Japan, August 1-6, 2006).
  - [12] S. Murakawa, Y. Matsumoto, K. Mukai, D. Tsuji, H. Kambara, and H. Fukuyama: NMR Studies of Novel Quantum Phases in Monolayer Helium Three, International Symposium on Quantum Fluids and Solids: QFS2006 (Kyoto University, Clock Tower Centennial Hall, Kyoto, Japan, August 1-6, 2006).
  - [13] K. Mukai, D. Sato, S. Murakawa, D. Tsuji, H. Kambara, and H. Fukuyama: Pulsed-NMR Measurements of 2D  $^3\text{He}$  at Very Low Temperatures, International Symposium on Quantum Fluids and Solids: QFS2006 (Kyoto University, Clock Tower Centennial Hall, Kyoto, Japan, August 1-6, 2006).
  - [14] Y. Matsumoto, D. Tsuji, S. Murakawa, C. Bäuerle, H. Kambara and H. Fukuyama: Novel quantum states in extremely correlated 2D  $^3\text{He}$  near localization, International Symposium on Quantum Fluids and Solids: QFS2006 informal meeting (Kyoto University, Clock Tower Centennial Hall, Kyoto, Japan, August 1-6, 2006).
  - [15] Y. Matsumoto, D. Tsuji, S. Murakawa, H. Kambara and H. Fukuyama: Anomalous Coexistence of Heat Capacity Peaks near a Mott Localized Phase of Two-dimensional  $^3\text{He}$ , Highly Frustrated Magnetism 2006: HFM2006 (Osaka University, Icho Kaikan, Osaka, Japan, August 15-19, 2006).
  - [16] S. Murakawa, K. Mukai, D. Tsuji, Y. Matsumoto, H. Kambara and H. Fukuyama: NMR Studies of Novel Magnetic Phases in Monolayer Helium Three, The 17th International Conference on Magnetism: ICM2006 (Kyoto International Conference Hall, Kyoto, Japan, August 20-25, 2006).
  - [17] H. Kambara, T. Matsui, Y. Niimi, C. Winkelmann, and H. Fukuyama: Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy Experiments at Ultra-Low Temperatures, The 16th International Microscopy Congress: IMC16 (Sapporo Convention Center, Japan, September 3-8, 2006).
- 招待講演
- [18] H. Fukuyama: Recent Development in Liquid Helium, 21 Century COE Workshop "Strongly Correlated Many-Body Systems" – from Neutron Stars to Cold Atoms – (Koshiba Hall, University of Tokyo, Japan, January 19, 2007).
  - [19] H. Fukuyama: Scanning tunneling spectroscopy of thin graphites and their step edges, Graphene Workshop (University of Leiden, Leiden, The Netherlands, February 5-9, 2007).
- (国内会議)
- 一般講演
- [20] 佐藤大輔, 向 賢一, 村川 智, 辻 太輔, 神原 浩, 福山 寛: Pulsed-NMR studies of Two-dimensional  $^3\text{He}$  near Localization, 特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A01&A05 研究項目合同ワークショップ(那須ビューホテル, 2006年7月)
  - [21] 辻 太輔, 村川 智, 向 賢一, 松本洋介, 神原 浩, 福山 寛: Heat capacity studies of new quantum phases at higher densities than the 4/7 phase in 2D  $^3\text{He}$  on graphite, 特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A01&A05 研究項目合同ワークショップ(那須ビューホテル, 2006年7月)
  - [22] 新見康洋, 神原 浩, 小島治樹, 吉岡大二郎, 福山 寛: 表面欠陥に束縛された磁場で2次元電子系のSTM/STS観測 II, 日本物理学会 2006年秋季大会(千葉大学西千葉キャンパス, 2006年9月)
  - [23] 新見康洋, 蟹澤 聖, 小島治樹, 神原 浩, 平山祥郎, 樽茶清悟, 福山 寛: エピタキシャル成長させた InAs 薄膜上のトンネル分光測定, 日本物理学会 2006年秋季大会(千葉大学西千葉キャンパス, 2006年9月)
  - [24] 神原 浩, 新見康洋, Clemens Winkelmann, 石角元志, 内田慎一, 福山 寛: Zn ドープ Bi2212 における不純物束縛状態の走査トンネル分光, 日本物理学会 2006年秋季大会(千葉大学西千葉キャンパス, 2006年9月)

- [25] 佐藤大輔, 向賢一, 村川智, 辻太輔, 神原浩, 福山寛: Pulsed-NMR Studies of Monolayer  $^3\text{He}$  near the Mott Localization, 特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」平成18年度研究成果報告会(淡路夢舞台国際会議場, 2006年12月)
- [26] 辻太輔, 村川智, 向賢一, 松本洋介, 神原浩, 福山寛: Heat Capacity Measurements of Density Fluctuations in 2D  $^3\text{He}$ , 特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」平成18年度研究成果報告会(淡路夢舞台国際会議場, 2006年12月)
- [27] 神原浩, 矢口宏, 前野悦輝, 福山寛: STM/STS Studies of Surface Electronic States of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ , 特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」平成18年度研究成果報告会(淡路夢舞台国際会議場, 2006年12月)
- [28] 神原浩, 矢口宏, 前野悦輝, 福山寛: STM/STS study of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  – Search for an Anomalous Proximity Effect –, 特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A04 スピン三重項超伝導 小研究会(淡路夢舞台国際会議場, 2006年12月)
- [29] 河合直樹, 神原浩, 福山寛: グラファイト層間化合物  $\text{C}_6\text{Yb}$  の超伝導特性, 日本物理学会 2007年春季大会(鹿児島大学郡元キャンパス, 2007年3月)
- [30] 松本洋介, 辻太輔, 村川智, 神原浩, 福山寛: 2次元ヘリウム3にドーパされた零点空格子点の熱力学的観測, 日本物理学会 2007年春季大会(鹿児島大学郡元キャンパス, 2007年3月)
- [31] 向賢一, 佐藤大輔, 辻太輔, 神原浩, 福山寛: 2次元ヘリウム3の局在相近傍におけるパルスNMR測定, 日本物理学会 2007年春季大会(鹿児島大学郡元キャンパス, 2007年3月)

## 招待講演

- [32] 福山寛: Ring Exchanges in Solid  $^3\text{He}$ , 特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A01&A05 研究項目合同ワークショップ(那須ビューホテル, 2006年7月)
- [33] 村川智, 松本洋介, 向賢一, 辻太輔, 神原浩, 福山寛: Quantum Phase Diagram of a Strongly Correlated Two-Dimensional  $^3\text{He}$ , 特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A01&A05 研究項目合同ワークショップ(那須ビューホテル, 2006年7月)
- [34] 福山寛: Zero-Point Vacancies Doped into a Two-Dimensional Gapless Spin-Liquid, 特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」平成18年度研究成果報告会(淡路夢舞台国際会議場, 2006年12月)
- [35] 神原浩, 福山寛: LT-STM/STSで探る異方的超伝導体の電子状態, 第19回佐々木学術講演会(佐々木シンポジウム)(東京工業大学大岡山キャンパス, 2006年12月)
- [36] 神原浩, 福山寛: 超低温STM/STSによる二次元電子系・異方的超伝導体の研究, 日本表面科学会 第54

回表面科学研究会–最先端STM装置開発の現状と将来 – (東京大学本郷キャンパス 山上会館, 2007年3月)

- [37] 神原浩: ミリケルビン温度域の走査トンネル分光実験, 日本物理学会 2007年春季大会シンポジウム “最近の低温実験技術の進歩と新しい物理の展開” (鹿児島大学郡元キャンパス, 2007年3月)

(セミナー)

- [38] 神原浩, 松井朋裕, 新見康洋, 福山寛: 超低温走査トンネル分光でみる電子状態 – 2次元電子系と異方的超伝導 –, 東京大学理学部物理学教室 物性セミナー (東京大学本郷キャンパス, 2006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。9月に研富助手が着任した。

## 4.5.1 劈開表面に形成された2次元電子系

量子ホール効果などの2次元系における重要な輸送現象は、これまですべてデバイス中に閉じ込められた界面2次元系に対して行われてきた。一方、InAsやInSbの清浄表面に金属原子などを堆積させることにより表面にキャリアが誘起されることが光電子分光やSTSなどの測定からわかっていたが、面内伝導の測定は電極技術の困難などから行われていなかった。表面に形成された2次元電子系は、表面に堆積させる物質の自由度や走査型プローブ顕微鏡との相性の良さなどから非常に大きな可能性を持つ。近年、我々のグループにおいて、p型InAsを超高真空中で劈開して得られた清浄表面に金属を付着させて誘起した2次元電子系の面内電気伝導の測定手法が、粥川の初期の研究の後、辻と望月により確立され、Ag、GeまたはInを蒸着して得られた劈開表面では10テスラ付近の高磁場で整数量子ホール効果が観測された。本年度は、InSbの劈開表面に研究を拡張した。

## InSb 劈開表面 2次元電子系

InSbはInAsよりも有効質量がさらに小さく、量子ホール状態の実現にとって有利な条件をもっている。InSbの劈開表面の研究は本研究室で増田が最初に着手し、研究の道が大きく開かれたものの、劈開表面以外の部分を通じた並列伝導の影響を完全に除去するには至らず、完全な量子ホール効果を観測することはできなかった。本年度、日尾を中心とした表面処理方法の試行錯誤の末、銀およびセシウムを蒸着したInSb劈開表面において、整数量子ホール効果を観測することに成功した。2次元電子系の移動度は、InAsの場合よりも一桁程度高く、そのおかげ

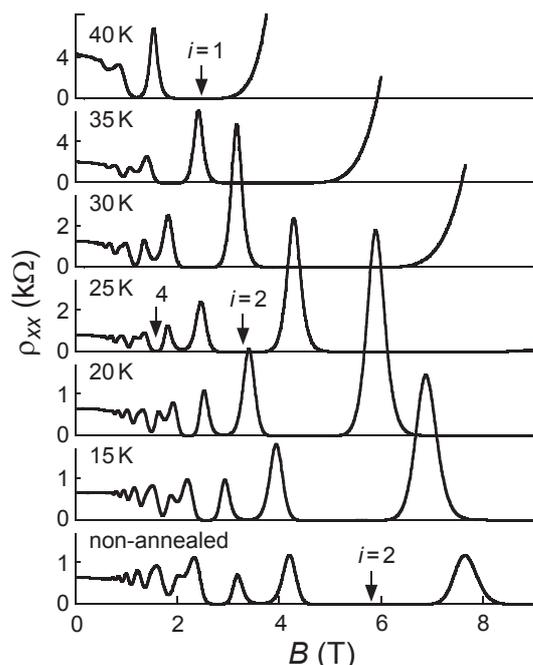


図 4.5.10: Ag を堆積させた InSb 劈開表面において観測された整数量子ホール効果。図には示していないが明瞭なホールプラトーも観測している。熱処理を繰り返す (from bottom to top) につれて電子濃度が下がり、Shubnikov-de Haas 振動が変化する。こうした熱処理効果は Cs を蒸着した場合や、InAs 劈開表面でも観測されている。

で 2 テスラ前後の低磁場でも量子ホール効果を観測することができた。いずれ、走査プローブ顕微鏡を用いた電流分布測定を行いたいと考えているが、低磁場での観測は実験上の制約を少なくするため、非常に重要である。

劈開表面に 2 次元電子を誘起するための表面ドナーの蒸着は、通常、試料が液体ヘリウム温度にあるときに行っている。Ag および Cs を蒸着した InSb 劈開表面において、10 ケルビンから 100 ケルビン程度の低温度領域での熱処理によって表面電子濃度や移動度が大きく変化することが、日尾と柘富の測定により明らかになった。温度をさらに上げると 2 次元伝導は消失する。試料の温度を上昇させることによって表面ドナーの吸着状態が変化したと考えられる。

### <sup>3</sup>He 冷凍機への拡張

InAs および InSb 劈開表面 2 次元系においては、極低温において新しい機構の超伝導などの新規な物性が期待される。これまでの研究は、<sup>4</sup>He 冷凍機を用いて 1.5 ケルビン程度の温度領域で行っていたが、新たに蒸着、劈開機構を組み込んだ <sup>3</sup>He 冷凍機を開

発し、松並と箕輪が組み上げと動作確認を行った。この装置には、さらに電子スピン共鳴やサイクロトロン共鳴を行うためにミリ波を導入することも可能である。今後、新しい量子状態の探索とともに、有効質量・g 因子などの基本的物量もおさえていく。

### 4.5.2 強相関 2 次元電子系

シリコンの電子系や GaAs の正孔系の低電子密度領域においては、粒子間の平均クーロンエネルギーがフェルミエネルギーよりも一桁程度大きくなる強相関 2 次元系が実現される。これらの系では、電子 (正孔) 密度をパラメーターとして金属・絶縁体転移が観測されるが、その機構は未解明であり、2 次元電子分野の重要なテーマとなっている。また電子間相互作用パラメーター  $r_s$  に対する有効質量、g 因子、スピン帯磁率などの依存性を調べるための理想的な系としても盛んに研究が行われている。我々のグループでは磁気抵抗効果の角度依存性からスピン自由度の重要性を明らかにする研究を先駆的に行ってきた。最近では、松並と大屋により電子スピン共鳴やサイクロトロン共鳴の測定にも研究の拡張が行われている。一方、強磁場下の 2 次元系に対しては、ストライプ相、分数量子ホール効果、ウィグナー結晶などを視野に入れた研究に着手している。本年度は、武蔵工大木先生と澤野博士より非常に高い移動度をもつ Si/SiGe 量子井戸試料を提供いただき、これに対して極低温強磁場中での抵抗測定を可能にするプロセス技術を当山が中心となり確立した。また、試料回転機構を組み込んだ希釈冷凍機と 15 テスラ超伝導磁石を組み合わせた測定を可能にするため、実験系の整備を行った。さらに予備的な測定をいくつか行った。

### シリコン 2 次元金属相におけるスクリーニング効果

金属領域における温度低下に伴う電気抵抗の急激な減少と、スピン偏極に伴う巨大な正の磁気抵抗効果を、不純物ポテンシャルのスクリーニング効果によって説明しようとする試みがいくつかある。電子・フォノン結合の測定からスクリーニング効果の重要性を明らかにするため、高移動度シリコンヘテロ接合試料に対して様々な電子温度・スピン偏極率における同結合の大きさを当山と西岡が調べた。スピン偏極率依存性の測定結果はスクリーニング効果を取り入れたモデルを支持するものであった。一方、ゼロ磁場でエネルギー緩和率を様々な電子温度について測定したところ、1 桁近い電子温度範囲にわたり電子温度の 5 乗に比例した振る舞いが観測された。ただし、モデルに依存する部分があるため、温度依存性のべきからスクリーニング効果に対する決定的な知見を得ることは難しい。今後の研究の発展が望まれる。

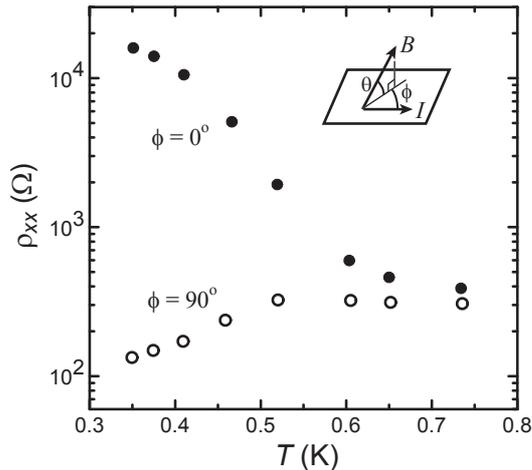


図 4.5.11: 2次元面からの磁場角度  $\theta$  が  $(n = 1, \uparrow)$  と  $(n = 0, \downarrow)$  のランダウ準位交差条件にあるとき、抵抗の大きな異方性が観測された。黒丸が磁場の面内成分と電流が平行な場合、白丸が垂直な場合の対角抵抗率の温度依存性を表す。

#### シリコン量子ホール系における異方的電気伝導

2次元面と磁場との角度を変えることにより、ランダウ準位間隔とゼーマンエネルギーとの比を制御することができる。 $(n = 1, \uparrow)$  のランダウ準位 ( $n$  はランダウ量子数、矢印は磁気モーメントの磁場に対する向きを表す) と  $(n = 0, \downarrow)$  のランダウ準位のエネルギーが一致する角度において、非常に大きな電気抵抗の異方性が當山によって観測された。磁場の面内成分と電流が直交する場合には、対角抵抗率は温度の低下とともに減少するのに対して、平行な場合には急激に増加する。この異方性は、磁場と2次元面との角度  $\theta$  をわずかに変えると消失する。実験結果は、 $(n = 1, \uparrow)$  と  $(n = 0, \downarrow)$  の共存状態が実現され、その境界線が面内磁場に直交する方向に大きく伸びていることを示唆する。また、磁場の面内成分と電流が直交するときの高抵抗状態において電流を増加させていくと、電圧が一定となるプラトー領域が広い電流範囲にわたり現れることがわかった。ストライプ状態 (スピン密度波) の形成の可能性も視野に入れ、今後、詳細に検証する。

#### 4.5.3 量子ホール系における電子スピン流と核スピン偏極による検出

量子ホール状態において電流は散逸を伴わないが、電流印加によるブレイクダウン状態や2つの量子ホール状態に挟まれた遷移領域においては、散逸が起こり電流は熱流を伴う。強磁場下の2次元系における熱流の空間分布は非常に興味深い研究対象であるが、熱流の観測が困難であり研究が限られてきた。本年

度は、小森を中心としてスピン自由度に着目した研究を行った。化学ポテンシャルがゼーマンギャップにあるとき、電子温度はスピン偏極率を支配し、熱流はスピン流により運ばれる。超微細相互作用によるフリップ・フロップ機構により、電子スピンの反転が動的な核スピン偏極として痕跡を残すため、核スピン偏極に伴う抵抗変化を測定することで電子スピン流の空間分布に関する知見を得ることができる。

#### 電子温度変化に伴う核スピン偏極

まず、電子温度変化に伴い核スピン偏極が誘起されることを実証するため、ランダウ準位充填率  $\nu = 3$  の量子ホール効果ブレイクダウン領域において実験を行った。電流方向に対してチャネル幅が段階的に変化する試料を用いた。電子の流れに対してチャネル幅が広がる場合には、電子温度の低下に伴う down から up への電子スピン反転が起こり、狭くなる場合には電子温度の上昇による up から down への電子スピン反転が起こると予想されたが、実際、これらに対応する動的な核スピン偏極に相当する抵抗変化が観測された。半導体2次元系における電子スピン反転に伴う動的核スピン偏極は、これまで、分数量子ホール系のスピン偏極非偏極遷移を用いたものとエッジ状態間遷移を用いたものが1ケルビン以下の極低温領域において盛んに研究されていたが、電子温度の変化を利用したものは今回が初めてである。我々の手法は液体ヘリウム温度でも使えるので、応用上の利点も大きい。

#### Ettingshausen 効果の研究

磁場中において電流と直交した方向に熱流が流れる現象は Ettingshausen 効果として知られている。奇数充填率  $\nu = 3$  の近傍において電流に直交した電子スピン流を検証し、かつ  $\nu$  に対する依存性を明らかにするために小森と佐久間 (旧姓: 山本) が実験を行った。電子スピン流がチャネル端にぶつかることによるスピン反転が核スピン偏極を引き起こす。これによるエッジ・バルクトンネリング確率の変化を検出するため、特別にデザインした試料を作製した。電流反転および磁場反転に対して電子スピン流の極性の反転が観測されたが、これはホール電場との関係が重要であることを示している。ホール電場に対する電子スピン流の極性は、 $\nu = 3$  を境に逆転した。このことは、散逸流を担う多数キャリアのスピンの電子スピン流の極性を決定していることを示唆する。

<受賞>

- [1] T. Mochizuki: IUPAP young author award, 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (Vienna, Austria), July 24-28, 2006.

<報文>

(原著論文)

- [2] Y. Kawano and T. Okamoto: Spatial imaging of noise voltages by a quantum Hall scanning elec-

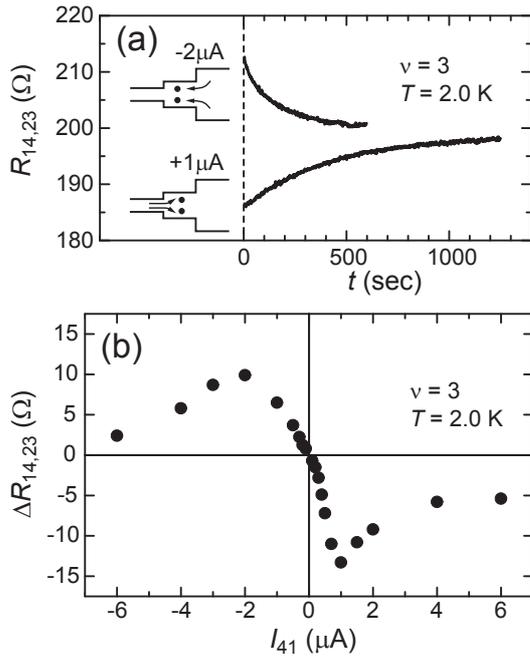


図 4.5.12: (a) 核スピン偏極を引き起こすために直流電流を流したあとの抵抗の時間変化。動的核スピン偏極が緩和して熱平衡状態に戻る振る舞いが観測された。(b)  $t = 0$  における熱平衡値からの変化を  $t < 0$  での直流電流に対してプロットしたもの。電流が大きすぎると電子温度が常に高いままとなり電子スピン反転が起こりにくくなる。

- trometer, Journal of Physics: Conference Series, **38**, 174-179 (2006).
- [3] Y. Tsuji, T. Mochizuki and T. Okamoto: Observation of the quantum Hall effect in cleaved InAs surfaces, Physica E **34**, 156-159 (2006).
- [4] J. Matsunami, M. Ooya and T. Okamoto: Electron spin resonance of the two-dimensional metallic state and the quantum Hall state in a Si/SiGe quantum well, Physica E **34**, 248-251 (2006).
- [5] K. Toyama, M. Ooya, T. Okamoto, Y. Hashimoto, S. Katsumoto and Y. Iye: Magnetoresistance in the strongly insulating regime of GaAs two-dimensional hole systems, Physica E **34**, 697-700 (2006).
- [6] J. Matsunami, M. Ooya and T. Okamoto: Electrically detected electron spin resonance in a high-mobility silicon quantum well, Physical Review Letters **97**, 066602-1-4 (2006) (also selected in Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology **14** (8), 2006).
- [7] K. Sawano, Y. Kunishi, Y. Shiraki, K. Toyama, T. Okamoto, N. Usami and K. Nakawaga: Magneto-

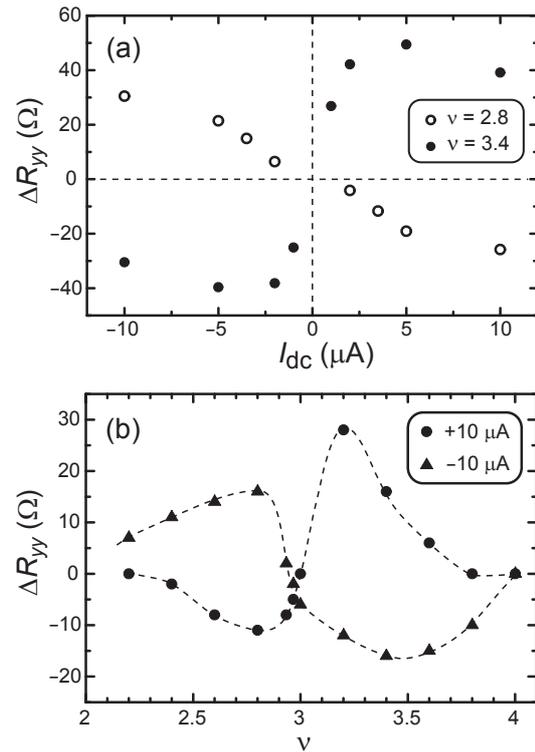


図 4.5.13: 電流に直交した電子スピン流により引き起こされた動的核スピン偏極による抵抗変化。大電流を切った直後に微小交流電流を用いて測定した。(a) 電流依存性。(b) ランダウ準位充填率依存性。

transport properties of Ge channels with extremely high compressive strain, Applied Physics Letters **89**, 162103-1-3 (2006).

- [8] Y. Komori and T. Okamoto: Dynamic nuclear polarization induced by hot electrons, Applied Physics Letters **90**, 032102-1-3 (2007).
- [9] A. Yamaguchi, T. Watanuki, R. Masutomi and H. Ishimoto: Pressure-induced ferromagnetic solid  $^3\text{He}$  layer on  $^4\text{He}$  preplated graphite, Physical Review B **75**, 092501-1-3 (2007).
- [10] K. Sawano, Y. Kunishi, K. Toyama, T. Okamoto, N. Usami, K. Nakagawa and Y. Shiraki: Fabrication of Ge channels with extremely high compressive strain and their magnetotransport properties, Journal of Crystal Growth (2007), in press.
- [11] R. Masutomi, M. Hio, T. Mochizuki and T. Okamoto: Quantum Hall effect at cleaved InSb surfaces and low-temperature annealing effect, Applied Physics Letters (2007), in press.

(会議抄録)

- [12] R. Masutomi, K. Kimura, S. Kobayashi, A. Yamaguchi, H. Ishimoto and H. Kojima: Dynamics of

- Magnetically Induced Superflow in Spin Polarized  $^3\text{He A}_1$ , AIP Conference Proceedings **850**, 85-86 (2006).
- [13] Ryuichi Masutomi, Takashi Ito, and Nobuhiko Nishida: Observation of Superconductor-insulator Transition Induced by Ge in Ultrathin a-Nb Film, AIP Conference Proceedings **850**, 963-964 (2006).
- [14] J. Matsunami, M. Ooya and T. Okamoto: Electron spin manipulation, detection, and relaxation in a high mobility silicon quantum well, Proceedings of the 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (July 24-28, 2006, Vienna, Austria), in press.
- [15] T. Mochizuki, Y. Tsuji, M. Hio and T. Okamoto: Magnetotransport of two-dimensional electrons at *in situ* cleaved InAs surfaces, Proceedings of the 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (July 24-28, 2006, Vienna, Austria), in press.
- (国内雑誌)
- [16] 岡本徹、辻幸秀、望月敏光: 半導体劈開表面の2次元電子系と量子ホール効果の観測, 固体物理 **41**, 339-344 (2006).
- (学位論文)
- [17] 小森陽介: 「量子ホール系における熱輸送現象の観測」(博士論文)
- [18] 日尾真之: 「InSb 劈開表面における2次元電子の形成と電気伝導」(修士論文)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [19] J. Matsunami, M. Ooya and T. Okamoto: Electron spin manipulation, detection, and relaxation in a high mobility silicon quantum well, 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (Vienna, Austria), July 24-28, 2006.
- [20] T. Mochizuki, Y. Tsuji, M. Hio and T. Okamoto: Magnetotransport of two-dimensional electrons at *in situ* cleaved InAs surfaces, 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (Vienna, Austria), July 24-28, 2006.
- [21] K. Sawano, K. Toyama, T. Okamoto, N. Usami, Nakagawa and Y. Shiraki: Fabrication of Ge channels with extremely high compressive strain and their magnetotransport properties, 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (Tokyo), September 3-8, 2006.
- (国内会議)
- 一般講演
- [22] K. Toyama, M. Ooya, J. Matsunami and T. Okamoto: Spin Polarization and Metal-Insulator Transition in Strongly Correlated 2D Systems, 特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A01 & A05 研究項目合同ワークショップ(那須)2006年7月27日-29日.
- [23] 国司侑吾, 澤野憲太郎, 當山清彦, 岡本徹, 宇佐美徳隆, 中川清和, 白木靖寛: Ge チャネル構造における正孔有効質量の歪み依存性, 第67回応用物理学会学術講演会(立命館大学)2006年8月29日-9月1日.
- [24] 澤野憲太郎, 當山清彦, 岡本徹, 国司侑吾, 宇佐美徳隆, 中川清和, 白木靖寛: Ge チャネル構造における散乱要因の歪み依存性, 第67回応用物理学会学術講演会(立命館大学)2006年8月29日-9月1日.
- [25] 小森陽介, 岡本徹: 量子ホール効果のブレイクダウンと核スピン偏極, 日本物理学会2006年秋季大会(千葉大学)2006年9月23日-26日.
- [26] 當山清彦, 西岡貴央, 岡本徹, 澤野憲太郎, 白木靖寛: 強相関シリコン2次元電子系におけるスクリーニング効果, 日本物理学会2006年秋季大会(千葉大学)2006年9月23日-26日.
- [27] 松並純也: 半導体二次元電子系とスピン, 第2回21世紀COE QUESTS RA若手交流シンポジウム.
- [28] T. Okamoto, K. Toyama, J. Matsunami and M. Ooya: Spin Polarization in Strongly Correlated 2D Systems in Semiconductors, 特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」研究成果報告会(淡路)2006年12月14日-16日.
- [29] 小森陽介, 岡本徹: 核スピン偏極を用いた量子ホール系におけるEttingshausen効果の観測, 日本物理学会2007年春季大会(鹿児島大学)2007年3月18日-21日.
- [30] 日尾真之, 枅富龍一, 望月敏光, 岡本徹: InSb 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2007年春季大会(鹿児島大学)2007年3月18日-21日.
- [31] 国司侑吾, 澤野憲太郎, 佐藤雄, 當山清彦, 岡本徹, 宇佐美徳隆, 中川清和, 白木靖寛: 歪み Ge チャネル構造における正孔有効質量の正孔密度依存性, 第54回応用物理学関係連合講演会(青山学院大学)2007年3月27日-30日.

## 4.6 島野研究室

島野研究室では、レーザー分光の手法を用いて、凝縮系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、基底状態、光励起状態における電子相関、多電子系の相転移ダイナミクスをプローブするために、可視光領域の光学応答に加えて、低エネルギー、テラヘルツ (THz) 周波数帯での電磁応答に着目している。本年度は、多体の電子相関が顕わに発現する系として、一次元電子系(カーボンナノチューブ)、光励起された半導体高密度電子正孔系、超伝導体、強相関マルチフェロイクス系を対象として以下の研究を進めた。

### 4.6.1 1次元電子系

#### カーボンナノチューブ

カーボンナノチューブは、1次元電子系を研究する上での候補物質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、バリステック伝導など特異な振る舞いが示されている。我々は、このナノチューブの基底状態における1次元的な伝導、光励起されたキャリアのダイナミクスを分光的手法により明らかにすることを目的として、その THz 分光を進めている。

本年度は、定常状態の線形分光から、単層カーボンナノチューブ (SWNT) のフェルミ面近傍での電子構造を調べることが目標とした。チューブ間伝導やチューブ接触によるギャップ生成の影響を除去するため、カーボンナノチューブをポリマー(セルロース)中に希薄分散した試料を用いた。後述する超短パルス 14fs のモード同期レーザーを用いた広帯域 THz 分光系を用いて、0.5THz から 20THz (15 $\mu$ m) に及ぶ広い範囲で、HiPco 法で合成された単層カーボンナノチューブ/ポリマー複合膜の複素誘電率スペクトルを決定することができた。得られた実効誘電関数から有効媒質理論を用いて、ポリマー中に分散したナノチューブの誘電関数を求めた結果、図に示すように HiPco カーボンナノチューブは低周波領域では巨大な正の誘電率を示すことを見出した。一方高周波 3THz 以上では誘電率実部は負になることがわかった。誘電関数スペクトルの形状から、観測された誘電応答は狭ギャップカーボンナノチューブによるものであると解釈された。

### 4.6.2 半導体高密度電子正孔系

半導体中に高密度に光励起された電子正孔系は、電子正孔対の密度、温度によって励起子ガス、電子正孔プラズマ、電子正孔液体といった多彩な相を示す。この光励起電子正孔系の相転移ダイナミクスを調べることを目的として、光励起 THz プローブ実験の構築を進めている。電子正孔プラズマ中の自由キャリア応答、励起子内部遷移が THz 帯に現れることを利用して、光励起直後の高温の電子正孔プラズマ相から低温励起子気体、あるいは電子正孔液体への相転移のダイナミクスを調べることができると期待される。本年度はまず、電子正孔液体が安定に存在する間接遷移型半導体 Si で、定常的な光励起下での THz 帯誘導吸収、励起子吸収測定を進めた。

### 4.6.3 超伝導

超伝導体の THz 周波数帯電磁応答は、超伝導ギャップの観測や準粒子励起のダイナミクスを調べる手段

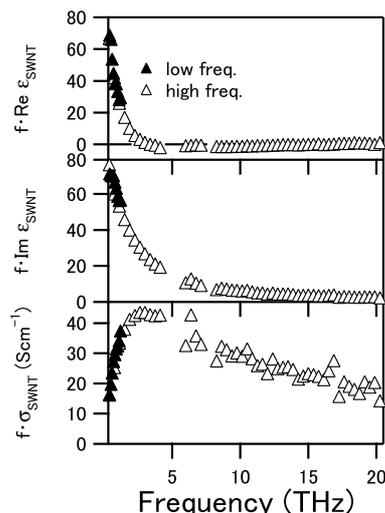


図 4.6.14: HiPco カーボンナノチューブの広帯域 THz 帯複素誘電率、伝導度スペクトル。ポリマー中の SWNT の体積分率 ( $f \sim 0.02$ ) 倍されている。低周波で非常に大きな誘電率を持つことがわかる。

を与えてくれる。磁束量子の振る舞いや光励起による超伝導相の破壊と回復を調べることも可能となる。本年度より金属超伝導体 NbN 薄膜のテラヘルツ分光を開始し、NbN 薄膜の透過測定から伝導度スペクトルを抽出することが可能となった。伝導度スペクトルには、超伝導転移温度 15K に対応する周波数  $2\Delta = 1.1$  THz に明瞭な BCS ギャップ構造が観測された。第二種超伝導体である NbN では、磁場印加により磁束量子が生成される。磁場増強に伴い、混合状態全体の伝導度スペクトルからは超伝導ギャップが消失していく様子が観測された。

### 4.6.4 マルチフェロイクス系

#### 強誘電反強磁性マンガン酸化物のスピンの観測

強誘電性と(反)強磁性が共存する物質、マルチフェロイクスは、強誘電秩序の磁場による制御、あるいは磁性の電場による制御といった新しい機構に基づくエレクトロニクス材料として期待されている。マルチフェロイクス系における強誘電秩序の発現にはスピン構造が本質的な役割を果たしているが、その微視的な発現機構は必ずしも明らかになっていない。スピン、電荷、格子の結合を微視的な観点から理解するためには、静的な誘電率測定、磁化測定に加えて、(反)強磁性秩序の発現にもなって現れるスピン波(マグノン)の観測、あるいは強誘電秩序消失に伴うソフトフォノンモードの観測といったダイナミカルな測定が有効である。この目的のもとに、マルチフェロイクス系のテラヘルツ分光を進めている。本年度は、強誘電反強磁性体  $\text{DyMnO}_3$  のスピン

波励起 (マグノン) の観測を行った。反強磁性秩序の発現に伴うマグノンの出現を THz 周波数帯に見出した。さらに強誘電転移温度以下での誘電応答との相関を詳細に調べた。

#### 4.6.5 新しい分光計測技術の開発

フェムト秒光パルスを用いたテラヘルツ時間領域分光法を中心とする新しい分光手法の開発を平行して進めている。本年度は低温・強磁場環境下での複素誘電関数、電気伝導度計測、高感度 THz エリプソメトリーによる磁気光学測定、広帯域 THz 分光法の開発を進めた。

#### 低温磁場環境下での THz エリプソメトリーと非接触ホール測定

THz 時間領域分光法による複素伝導度スペクトルの測定は、半導体、あるいは金属のキャリア濃度および移動度を非接触で計測することを可能とする。さらにスペクトル形状解析による緩和の周波数依存性などから電子散乱機構についてのより詳しい情報が得られる。しかしこの手法が有効となるのは、対象物質が観測領域に適切なスペクトル構造を持つ場合に限定される。たとえばキャリアの濃度、即ちプラズマ周波数が THz 帯より大きく外れている場合には、これらのパラメータ評価は困難である。この制限を克服し、キャリア濃度、移動度を広いパラメータ範囲で計測する手法として、THz 帯における磁気光学ファラデー効果、カー効果を利用した高感度非接触ホール測定法の開発を進めている。この手法では、物質に直線偏光が入射した際、非対角 (ホール) 伝導度の存在 (例えば磁場下でのキャリアのサイクロトロン運動) によって、透過光あるいは反射光の偏光面が回転する効果を利用する。偏光面の回転角と楕円率を計測することにより、ホール伝導度を決定することができる。回転角検出感度を高めることによって低キャリア濃度、低移動度の試料評価が可能となる。

本年度は、低温強磁場環境下でのテラヘルツエリプソメトリーを開発し、低温 1.6K、磁場は最大 7T の条件下でスペクトル計測を行うことが可能となった。動作確認実験として厚さ  $525\mu\text{m}$  の n 型 Si 基板を用いてサイクロトロン共鳴スペクトルの観測を行った (図)。さらに、THz 時間領域分光の特徴である電場振幅位相測定の利点を活かし、 $0.5\text{mrad}$  の高感度ファラデー回転角検出に成功した。同 Si 基板に対してこの手法を適用し、低キャリア濃度領域  $6 \times 10^{12}\text{cm}^{-3}$  までの評価が可能となった。

#### 超小型可搬汎用 THz 分光装置の開発

低温、強磁場環境下での THz 分光装置開発の一環として、測定を簡便に行うことができるよう可搬式

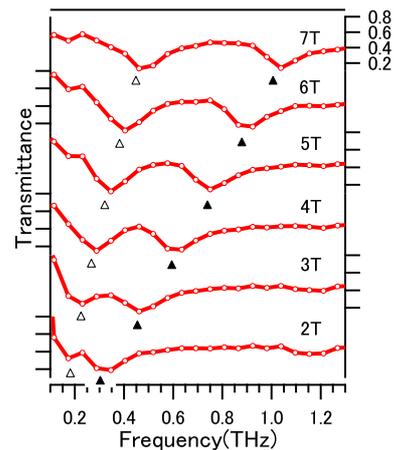


図 4.6.15: n 型 Si の磁場下透過スペクトル (50K)。二つの有効質量に対応するサイクロトロン共鳴吸収が観測される。

の超小型分光装置の開発を進めた。超小型装置は分光装置をまるごと低温・強磁場測定環境下に簡便に導入できるメリットがある。これまでも他グループで光ファイバーや THz 用 Si レンズと組み合わせた装置の開発が進められているが、今回我々は、より空間分解能の高い分光系の実現を目指し、数値計算による構造最適化のもと、反射光学系による色収差の無い超小型 THz 分光装置の開発に成功した。特に測定試料の直近に集光レンズを配置することで空間分解能の高い分光系が実現できたところに特徴がある。

図 1 に作成した分光装置 (サイズ:  $\phi = 20\text{mm} \times 61\text{mm}$ ) を示す。直径 25 mm のサンプル槽を持つクライオスタットにも導入できる大きさである。THz 波発生には ZnTe 非線形結晶あるいは GaAs ポウタイアンテナ、検出には同ダイポールアンテナを使用し、 $0.3\text{-}2.0\text{ THz}$  周波数範囲内で有効開口数 0.45 の高い空間分解能で定量的な THz 分光測定が行えることを示した。また、窓のない測定環境にも対応できるように、チタンサファイアレーザーから出力されるフェムト秒光パルスを光ファイバーで導き THz 光発生・検出のデモンストレーションを行った。なお、光ファイバー通過中の励起光の分散を補正するため、ファイバー導入前にプリズムペアで適切に補償を行っている。

このように高い有効開口数、ひいては高い測定空間分解能を実現できたのは、装置を小型化するに伴い測定試料の直近に集光レンズ (放物面鏡) を配置できたことによる。テストサンプルとしてシリコンに金を線路上にパターニングした試料の透過率イメージング測定を行ったところ、テラヘルツ波の波長程度の構造まで透過率イメージング測定が行え、2 倍の波長程度以上の構造では定量的な透過率を導き出すことも可能であることを示した。このように装置外部から THz 光を導く通常の分光系では測定装置系の制限から達成することが難しい高い空間分解能が

達成できた。この装置はより小さいサンプルの定量的な分光測定を行うのに特に適していると考えられる。

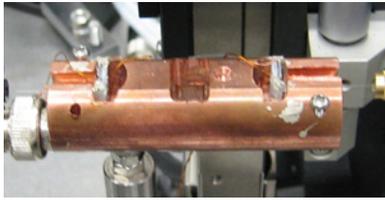


図 4.6.16: 超小型可搬汎用 THz 分光装置

#### 広帯域 THz 分光

超短光パルス 14fs のモード同期レーザーを用いた広帯域 THz 分光系を開発した。光学素子の群速度分散によるパルス幅の広がりを防ぐために全て反射光学系で構成された THz 分光系を構築した。THz 発生には ZnTe 結晶による光整流を利用し、検出には低温成長 GaAs ダイポールアンテナを用いることで、0.5THz(0.6mm) から 30THz(10 $\mu$ m) に及ぶ広範囲の複素誘電率計測が可能となった。

##### <受賞>

- [1] 渡邊 紳一, 第 22 回 (2007 年春季) 応用物理学会講演奨励賞, 「高空間分解能を有する超小型テラヘルツ分光装置の開発」(青山学院大学, 2007 年 3 月)

##### <報文>

##### (学位論文)

- [2] 西村久明, 「THz 時間領域分光法による単層カーボンナノチューブの遠赤外電磁応答の研究」, 修士論文, 2007 年 1 月

##### (会議抄録)

- [3] H. Nishimura, N. Minami, and R. Shimano: Broadband THz time-domain spectroscopy of single-wall carbon nanotubes, Proceedings of Quantum Electronics and Laser Science Conference 2007(in press).
- [4] Yohei Ikebe and Ryo Shimano: High sensitive terahertz Faraday rotation measurements of doped semiconductors, Proceedings of Quantum Electronics and Laser Science Conference 2007(in press).

##### <学術講演>

##### (国際会議)

##### 一般講演

- [5] N. Kida, Y. Ikebe, R. Shimano, Y. Yamasaki, T. Arima, and Y. Tokura: Electrodynamics at terahertz frequencies of a multiferroic perovskite magnetite American Physical Society, March Meeting 2007, (Denver, Colorado, March 2007)

##### (国内会議)

##### 一般講演

- [6] 西村久明, 島野 亮, 南 信次: 単層カーボンナノチューブ/ポリマー複合膜の THz 帯における複素誘電率計測, 日本物理学会 2006 年秋季大会, (千葉大学, 2007 年 3 月)
- [7] 西村久明, 島野 亮, 宮下香苗, 南 信次: 単層カーボンナノチューブ/ポリマー複合薄膜の THz 帯誘電率の温度依存性, 日本物理学会 2007 年春季大会, (鹿児島大学, 2007 年 3 月)
- [8] 渡邊 紳一, 島野 亮: 低温・強磁場下測定に向けた小型テラヘルツ分光装置の開発, 日本物理学会 2007 年春季大会, (鹿児島大学, 2007 年 3 月)
- [9] 貴田徳明, 池辺洋平, 島野亮, 山崎裕一, 有馬孝尚, 十倉好紀: テラヘルツ電磁波時間領域分光法を用いたマンガン酸化物強誘電体における磁気励起の観測, 日本物理学会 2007 年春季大会, (鹿児島大学, 2007 年 3 月)
- [10] 池辺洋平, 島野 亮: THz 時間領域分光法による n 型 Si の高感度ファラデー効果測定, 日本物理学会 2007 年春季大会, (鹿児島大学, 2007 年 3 月)
- [11] 渡邊 紳一, 島野 亮: 高空間分解能を有する超小型テラヘルツ分光装置の開発, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, (青山学院大学, 2007 年 3 月)
- [12] 渡邊 紳一, 島野 亮: モノリシック型小型テラヘルツ分光装置, 応用物理学 THz 電磁波技術研究会主催「テラヘルツ分光法」研究討論会, (加賀山代温泉, 2007 年 3 月)
- [13] 島野 亮: テラヘルツ時間領域分光法-固体分光の視点から-, 東京大学レーザーアライアンスシンポジウム (東京大学, 2006 年 12 月)

## 5 一般物理理論

### 5.1 宇宙理論研究室 (佐藤・須藤)

宇宙物理学は取り扱う対象が極めて多岐に渡っているのみならず、その方法論も多様であり非常に学際的な体系をなしている。実際、素粒子物理学、原子核物理学、プラズマ物理学、流体力学、一般相対性理論、などの基礎物理学を駆使して宇宙の諸階層の現象の本質的な理解にせまろうという点では、応用物理学的な色彩の濃い学問分野である。当教室の宇宙理論研究室では、佐藤教授、須藤教授、樽家助教、向山助教、および十数名の大学院学生、研究員が様々な宇宙物理の問題に取り組んでいる。研究室の活動は、「初期宇宙・相対論」、「観測的宇宙論」、「超新星・高密度天体」の3つの中心テーマを軸として行なわれており、研究室全体でのセミナーに加えて、それぞれのテーマごとのグループでのセミナーや論文紹介等、より研究に密着した活動も定期的に行なわれている。

我々の住むこの宇宙は今から 137 億年の昔、熱い火の玉として生まれた。膨張にともなう温度の降下によってハドロン、原子核、原子が形成され、さらにガスがかたまり銀河や星などの天体が形成され豊かな構造を持つ現在の宇宙が創られた。これが物理学に基づいて描きだされてきた現在の宇宙進化像である。しかし宇宙の進化には多くの謎が残されている。またさらに近年の技術革新の粋を用いた宇宙論的観測の爆発的進歩によって新たな謎も生じている。宇宙論のもっとも根源的謎はこの3次元の空間と1次元の時間を持った宇宙がいつに始まったかという問題である。「初期宇宙・相対論」は、1980年代に急速な発展を遂げたインフレーション理論に代表される、素粒子的宇宙論の進歩を基礎とし、さらにより根源的な問題として残されている宇宙の誕生・創生の研究を目的としている。当研究室では、最近の超紐理論の進展で中心的役割を担っているブレインを基礎とした相対論的宇宙論に取り組んでいる。重力の深い理解によって真の宇宙創生像を明かにすることを目標としている。

宇宙の誕生の瞬間を出発として宇宙の進化を説明しようとするのが素粒子的宇宙論の立場であるとすれば、「観測的宇宙論」は、逆に現在の宇宙の観測データを出発点として過去の宇宙を探ろうとする研究分野である。現在そして近い将来において大量に提供される宇宙論的観測データを理論を用いて正しく解釈する、さらにコンピュータシミュレーションを通じて、ダークマター、宇宙初期の密度揺らぎのスペクトル、宇宙の質量密度、膨張率、宇宙定数など宇宙の基本パラメータを決定することで現在の宇

宙像を確立するとともに宇宙の進化の描像を構築することが「観測的宇宙論」の目的である。このテーマに関して現在我々が具体的に取り組んでいる課題は、日米独国際共同観測プロジェクトであるスローンデジタルスカイサーベイを用いた宇宙論パラメータの決定、銀河・銀河団の空間分布の定量化、赤方偏移空間での銀河・クエーサー分布2体相関関数の探求である。また宇宙のバリオンの半分以上を占める“ダークバリオン”を酸素輝線によってサーベイする軟X線精密分光観測ミッション DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) を首都大学東京、名古屋大学、宇宙科学研究所、のグループとともに共同で推進しつつある。特に、数値シミュレーションを用いてその検出可能性とそれらの科学的意義を理論的に探求することが我々の担当である。このミッションが成功すれば、可視光での銀河の赤方偏移サーベイ、およびX線による銀河団観測とは相補的な新しい宇宙の窓が開かれることが期待できる。これらと同時に、国立天文台、プリンストン大学の共同研究者とともに、すばる望遠鏡を用いた太陽系外惑星の観測的・理論的研究を行っている。現時点で、系外惑星の分光観測を行っている国内では唯一のグループであり、食を起こしているトランジット惑星の大気と反射光の検出、さらには系外惑星のリングと衛星の検出を目指している。(http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/を参照)

質量の大きい星は進化の最終段階で中心にブラックホールもしくは中性子星を形成し超新星爆発を起こす。「超新星・高密度天体」を解明するにはニュートリノを中心とする素粒子の反応、中性子過剰原子核がいかに合体しながら核子物質へ移行するのが、さらに密度の上昇によりクオーク物質へと相転移を起こすかという基礎過程の研究が必要である。さらにこれらを組合せ一般相対論的な流体力学計算、爆発のシミュレーションを行なわなければならない。1987年、大マゼラン星雲中に起こった超新星1987Aからのニュートリノバーストが神岡の観測装置で観測された。これはニュートリノ天文学の始まりを告げる歴史的出来事であった。我々の研究室では爆発のエンジンとなる星のコアの重力崩壊、中性子星形成の2次元3次元流体シミュレーションを中心に研究を進めている。従来中性子形成の研究は球対称を仮定した研究が中心であったが実際の星は自転しており、遠心力の効果、対流、非等方な衝撃波の発生などが爆発に大きな寄与をしている。これらのシミュレーションとともに、実際の超新星ニュートリノの将来観測から得られる、超新星モデルあるいは素粒子モデルへの示唆・予言に関する研究も行なっている。また近年、超新星爆発との関連が示唆されているガンマ線バーストや、ガンマ線バーストが一つの候補天体となっている超高エネルギー宇宙線についての研究も進めている。

### 5.1.1 初期宇宙・相対論

#### 重力のヒッグス機構

ダークエネルギーは、現代宇宙論における最も興味深い謎の1つである。現在の宇宙の大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可能性を探るため、重力にヒッグス機構を応用することを提唱し、その性質についての研究を行なった。素粒子論においてヒッグス機構が果たしている役割を思い起こせば、これが重力法則を長距離で変更する恐らく唯一の方法であると予想される。実際、このシナリオでは、他の理論 (massive gravity や Dvali-Gabadadze-Porrati プレーンモデル等) が抱える問題 (巨視的スケールでの強結合によって生じる、制御不能な量子補正) を回避できることが分かっている。

具体的には、重力のヒッグス機構の最も簡単な例である「ゴースト場凝縮」について、非線形ダイナミクスや膨張宇宙での線形摂動を詳細に調べた [1, 4, 34, 35, 66, 90, 91, 92, 93, 100, 110, 161, 174, 175, 176, 177, 178, 182]。また、この理論の持つシフト対称性をゲージ化することで理論を拡張した。その性質を調べ、超弦理論の枠内で実現するシナリオを考察した [2, 36, 66, 90, 91, 92, 93, 177, 178, 182]。

#### 超弦理論における宇宙論

初期宇宙論において揺るぎない予言をするには、2つの立場がある。1つは、低エネルギー有効理論における対称性または対称性の破れのパターンを用いて、量子論的に安定な議論を展開することである。これは、上記の「重力のヒッグス機構」において採用した立場である。もう1つの立場は、超高エネルギーの基礎理論に立ち返って、そこから帰結される予言を引き出すことである。

最近、超弦理論における加速膨張宇宙の理解が目覚しく進展し、その枠内でインフレーションを議論する事が可能になりつつある。本研究では、超弦理論におけるワープしたコンパクト化 (KKLT シナリオ) で、新しいインフレーションのモデルを考察した [135, 162, 179, 180, 181]。

#### 二つの余次元を持つ宇宙モデルでの境界条件

超弦理論と類似の構造を備える、磁束によって支持される曲がった有限な大きさの二次元余次元を持つ六次元膜宇宙モデルにおいて、四次元膜上での重力相互作用および解そのものの動的安定性について調べた。この目的のために、まず二次元の余剰空間を持つ時空において膜の内外で二重に共変的な形式での境界条件を与えた。今回用いた定式化では必要な程度の数学的厳密性と可搬性が実現されており、今

後の同種の解析で幅広く応用できることが期待される。実際、上記の宇宙モデルに対して適用することで重力摂動のスペクトルの計算を行ない、二乗質量の正値性から時空の安定性を示した [9]。

#### 6次元プレーン宇宙モデルにおける de Sitter プレーンの安定性

6次元 Warped Flux Compactification プレーンモデルは、フラックスによるワープしたコンパクト2次元余剰空間の安定化の機構を含んだモデルである。このモデルではプレーン上の4次元宇宙を正の宇宙定数をもった de Sitter 時空にすることが可能であり、そのような場合についての時空の安定性を動のおよび熱力学的な面から調べた。動的安定性については、背景時空の線形摂動を考えスカラー・ベクトル・テンソル型に分離して解析した。この結果、4次元上の Hubble パラメータが大きくなり過ぎるとスカラーモードに不安定性が生じ、この不安定性が生じる領域では4次元の重力法則が再現されないことがわかった。また他方、時空の熱力学的な性質を cosmological horizon に付随するエントロピーを用いて調べた。この結果、先の動的に不安定なパラメータ領域では時空は熱力学的にも不安定であることを示し、今の6次元プレーンモデルにおいて時空の動的安定性と熱力学的安定性の間に対応があることを解析的に示した [37, 67, 70, 101, 111, 126, 136]。

#### Randall-Sundrum モデルにおけるインフレーション起源の背景重力波

5次元 Randall-Sundrum モデルにおける背景重力波の進化について、数値シミュレーションに基づいた解析を行った。高エネルギー宇宙にある背景重力波は、フリードマン方程式の補正に伴う宇宙膨張則の変更由来する増幅効果と、Kaluza-Klein モードの励起に伴う減衰効果を同時に受ける。本研究により、重力波が宇宙の地平線を横切った時期が輻射優勢だった場合は、上記の二つの効果が相殺し、得られるエネルギースペクトルが4次元の理論で予言されるものと同じになってしまうことを示した。また、Kaluza-Klein モードの励起量がバルク中を動くプレーンのローレンツファクターによって決まるといふ、状態方程式に依存しない法則があることを見出した。これにより、二つの効果の相殺は輻射優勢期の時にのみ起こることが分かった。[5, 52, 71]

#### 5次元プレーンインフレーションモデルにおける曲率揺らぎの進化

5次元 Randall-Sundrum モデルに基づくプレーンインフレーションモデルの一つである、Hawkins-Lidsey モデルを用いて、インフレーション中の曲率揺らぎと、プレーンに束縛されているインフラトン

の揺らぎの成長について、数値シミュレーションに基づく解析を行った。特に、初期時刻に5次元のバルク時空に揺らぎが存在しないことを仮定し、重力場が5次元的に振る舞う小スケールの揺らぎの振る舞いを調べた。シミュレーションの結果、揺らぎの波長が宇宙の地平線の大きさより小さい間、バルクに重力場の揺らぎを励起させていく代わりに、ブレーン上のインフラトンの揺らぎの振幅が減衰していくことが分かった。さらに、この減衰の効果は揺らぎの初期のスケールが小さいほど顕著であることも確かめられた。[6, 52, 63, 71]

### Randall–Sundrum モデルにおけるスカラー摂動の量子化

5次元 Randall–Sundrum モデルで一般的なスローロールインフレーションを考え、曲率揺らぎとブレーンに束縛されているインフラトンの揺らぎの量子論的な取り扱いを試みた。これは、インフレーション中の揺らぎの初期条件を与えるという意味で重要である。本研究では、揺らぎの振幅を求めるためにロンスキアンを用いた手法を新たに開発し、量子論的な観点から曲率揺らぎのパワースペクトルを半解析的に導いた。その結果、5次元のバルク時空が存在するために生じる揺らぎのパワースペクトルの補正が、従来の Stewart–Lyth 補正 (スローロールパラメータの1次の効果) と同程度であることが示された。[7]

### Randall–Sundrum 宇宙モデルにおけるインフレーションと原始ブラックホール

Randall–Sundrum 高次元宇宙モデルとインフレーションとの整合性を原始ブラックホールを通じて調べるべく、インフレーションに由来するスカラー揺らぎを種として形成される原始ブラックホールの質量関数を導出した。質量関数が計算できれば、ブラックホールの Hawking 輻射によって生じる粒子のスペクトルと宇宙線の観測との整合性から、インフレーション期の宇宙の状態、とくにスカラー揺らぎのスペクトルに対する制限が得られる。Randall–Sundrum 宇宙モデルにおいては宇宙が四次元の場合に比べ小さなスケールの揺らぎに対応する原始ブラックホールの蒸発を観測していることになるため、大規模構造での観測値で規格化したスペクトルの冪指数は四次元よりも小さくなくてはならないことが示された [8, 53, 72, 73, 102, 112]。

### Holographic QCD

有限温度、有限密度におけるゲージ理論の相構造は理論の性質を理解する上で非常に重要である。我々は漸近的 AdS 時空に probe D-brane を導入する事により、基本表現に属する粒子の相構造を解析した。そ

の結果、バリオン密度が有限である限りそれがどんなに小さな値であっても必ずメソンのマスキャップが消え連続スペクトラムになる事、低密度領域では熱力学的に一次相転移が存在するのに対し高密度領域では相転移が消失すること、相図の中に不安定領域が存在する事が分かった。[26]

### Holographic Surface Operator

ストリング理論を dual なゲージ理論で書き表すためにはすべてのゲージ不変な operator と対応するストリングの関係を突き止める必要がある。我々は't Hooft-Wilson operator の次元拡張に相当する Surface operator において、この対応関係を調べた。まず、全ての Half-BPS Surface operator に dual な漸近的 AdS 超重力解を構成した。さらにゲージ理論の全ての情報が超重力解に再現される事を明らかにし、超重力解に現れる conical singularity がゲージ理論では対称性の回復に伴う singularity に対応する事、両者の S-duality が一致する事を突き止めた。[141]

### 初期宇宙における重元素合成

我々は宇宙初期のバリオン数の揺らぎからビッグバン元素合成において重元素が生成される可能性を研究した。その結果多くの領域で軽元素観測に矛盾なく重元素を生成する事が可能である事が分かった。[25]

### 5.1.2 観測的宇宙論

#### SDSS 銀河の3点相関関数

スローンデジタルスカイサーベイの銀河カタログを用いて、銀河の3点相関関数解析を行った。我々のグループはこの問題に関して、銀河2点相関関数に表れる銀河バイアスの影響が3点相関関数には見られないことを発見し、バイアスの非線型性の重要性を指摘した (Kayo et al. 2004)。今回はさらに、英国ポーツマス大学、米国ペンシルバニア大学のグループと共同で、宇宙の大構造の存在が、3点相関関数の推定に大きな揺らぎを生み出すことを示し、さらに広い観測領域のサーベイが重要であることを指摘した [10]。

#### 大分離角重力レンズクエーサー SDSS J1004+4112 のレンズ銀河団の X 線観測

2003年に我々のグループが発見した重力レンズ4重像クエーサー SDSS J1004+4112 は、銀河団をレンズ天体とする初めてのクエーサーとして注目され、すばる望遠鏡、ケック望遠鏡、ハッブル宇宙望遠鏡、

など、世界の代表的な望遠鏡で観測が継続されている。今回は、 $z = 0.68$ にあるレンズ天体銀河団をチャンドラ衛星によって X 線観測した。その結果、このレンズ源の質量分布モデルを正確に構築することができた。従来、弱い重力レンズから推定された銀河団の質量は、X 線観測から推定される値の二倍程度であることが多く、銀河団質量推定の系誤差として問題になっているが、この銀河団の場合には、強い重力レンズ現象であるクエーサー 4 重像から推定された質量と X 線データからの推定が良い一致を示す。一方で、4 つの像間の X 線強度比は単純なレンズモデルの予言とはくい違っていることを発見した。このことは、銀河団内の重力マイクロレンズ、時間変動など他の物理過程の存在を示唆し、さらなる観測の重要性を意味する [11]。

### 背景重力波の非等方性のマッピング

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、天体起源と初期宇宙起源とに大別され、宇宙論的にも興味深いさまざまな情報を含んでいる。本研究では、宇宙論的情報を引き出す上で重要な背景重力波の全天強度マップの構築について考察を行った。特にスペース干渉計に焦点をあて、マップ作成の方法論・アルゴリズムを提示し、高周波帯域(重力波の波長が干渉計のアーム長より短い)でのマップ作成を具体的にデモンストレーションした。その結果、LISA のような干渉計では、多重モードで  $\ell \sim 8-10$  程度の解像度をもつ全天強度マップが作れることをはじめて示した。ただし、今回用いたアルゴリズムは検出器の雑音に敏感で、 $\ell \sim 6-8$  まで解像度が落ちることが予想されたため、雑音の影響を受けないアルゴリズムの改良が今後必要なことがわかった。[22, 40, 81, 113, 123, 201]

### 非ガウス雑音があるときの背景重力波の検出方法

背景重力波の検出は、2 台の検出器から得られた信号の相関をとり、その相関シグナルが検出器の雑音レベルを凌駕することで達成される。相関シグナルの評価において通常よく使われる統計推定量は、検出器の雑音がガウス確率過程に従うことを前提に導かれたもので、前提が正しい場合、最適な推定量であることが知られている。本研究では、標準的に使われているこの統計推定量を一般的に拡張した、GCC(Generalized Cross-Correlation statistic) と呼ばれる統計量について焦点をあて、検出器に非ガウス性が混入した場合の検出能力について議論した。ロングテールを持つ非ガウス雑音に対し、解析的な見積もりを行った結果、GCC はロングテールにほとんど影響されず、標準的な統計推定量よりもすぐれた検出能力を持つことが明らかになった。GCC の統

計推定量は単純な形をしており、実データを用いた解析でも比較的容易に実装可能である。今後の具体的な応用が望まれる。[23, 39, 82]

### 偏極成分を持つ背景重力波の検出方法

位相がランダムな背景重力波は、検出器の雑音と一見すると見分けがつかないため、2 台の検出器から得られたデータを使って相関解析を行う。通常、こうした解析では重力波は無偏極 (+, -モードの振幅は同じ) であると仮定する。しかしながら、初期宇宙におけるパリティ非保存に由来して、背景重力波に円偏極成分が生じるなど、偏極した背景重力波を作るメカニズムがいくつか知られており、統計的観点からも無偏極の仮定を外した検出方法が望まれる。そこで本研究では、相関解析の一般的拡張を行い、偏極成分が混入する場合の検出方法についての定式化を行った。その定式化に基づき、偏極成分に対する検出感度をスペース干渉計、地上のレーザー干渉計の場合に評価し、4 種類の偏極成分(無偏極、円偏極、2 種類の直線偏極(E-, B-モード))の分離可能性について議論を行った。その結果、偏極成分の検出には干渉計の向き・配置が重要で、通常、無偏極成分の検出には不利と考えられていた検出器のペアでも、円偏極成分の検出にはきわめて有利になる場合があることを見出した。[68, 128, 137, 154]

### CMB の非等方性による初期宇宙モデルの制限

インフレーション期に生成された量子的揺らぎは、Cosmic Microwave Background (CMB) の温度と偏光の非等方性に対して、特徴的な影響を与える。特に量子揺らぎのテンソル成分である背景重力波の与える CMB の非等方性への影響に注目して、初期宇宙のモデルを観測的にどの程度制限しうるか考察した。インフレーション起源の背景重力波は、スクイーピング状態という特殊な量子状態であると考えられている。このスクイーピング状態はインフレーション期の情報を直接含むが、CMB の偏角観測によってスクイーピング状態による影響を見ることは非常に難しいことを示した。[118] また、超弦理論などではインフレーション起源の背景重力波が円偏光成分をもつことが示唆される。この円偏光成分をもつ背景重力波により生じる、CMB の特徴的なパワースペクトルを計算し、その振る舞いについて考察した。さらに、WMAP の 3 年目のデータを用いた現在での円偏光成分の観測的制限と、将来の観測で予想される検出可能性について議論した。[56, 131, 139]

## ガンマ線バーストとクエーサーを背景光とした WHIM 吸収線系の検出可能性

WHIM (Warm/Hot Intergalactic Medium) を検出する新たな試みとして、ガンマ線バースト (GRB) の X 線残光 (GRB 残光) を背景光源とした場合の金属吸収線に着目した。これは QSO 吸収線による WHIM 検出の QSO を GRB 残光に置き換えたものである。この方法の利点のひとつは、GRB が宇宙論的距離 (例えば  $z=1$  程度) で起こるので、長い距離を稼ぐことができ、そのため間に WHIM が存在する確率が高くなることである。一方、明るいクエーサーは比較的近く (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。我々は次世代衛星 (例えば XEUS) の性能を仮定し、宇宙流体シミュレーションを用いて、GRB 残光中の金属吸収線の模擬スペクトルを衝突、光電離平衡を仮定して作成し、GRB 残光中の WHIM による吸収線が検出可能であることを示した。また、DIOS の性能を仮定した輝線の模擬観測も同時に行った。この結果、XEUS を用いれば明るいガンマ線バーストを背景光とした WHIM 吸収線系の検出が可能であること、さらに、数十個程度の明るいクエーサーもこの方法論のターゲットとなり得ることを示した [14]。

## 銀河団ガスの温度・密度プロファイルと空間ゆらぎの解析モデルと、分光的温度推定にあたる系統誤差

我々は、宇宙流体シミュレーションの解析を通じて、銀河団ガス内の温度、密度揺らぎの空間一点確率密度分布関数が対数正規分布で良く近似できる事を発見し、銀河団ガスの揺らぎの新たな解析モデルを立てる事に成功した。これに基づき、X 線分光観測により求められる分光的温度とその代用としてシミュレーションもしくは理論でよく用いられる放射率重みつき温度に比べ、1-3 割程度低くなるという近年、報告された系統誤差の原因を探った。この系統誤差自体は、各種宇宙論パラメタの推定に影響を及ぼし得る重要な問題である。結果、対数正規分布モデルを用いた系統誤差に対する解析的モデルを構築し、温度揺らぎと温度密度プロファイルの二点が主な原因である事を示した [15]。

## WHIM における非平衡電離過程

WHIM における重要な物理過程として、これまででは考慮されていなかったバリオンの非平衡電離過程を考慮に入れた数値計算を世界で初めて行ない、WHIM 検出の手掛かりとなる酸素イオンの電離度が電離平衡を仮定した場合と比較して大きく異なることがわかった。その結果、WHIM の酸素輝線・吸収線の観測結果を解釈するには非平衡電離過程を考慮することが本質的に重要であることを示した。具

体的には、O VII と O VIII の電離度の比が電離平衡の場合よりも小さくなり、この二つのイオンの吸収線や輝線を使って WHIM の温度を評価する場合には、温度を過小評価することになることがわかった。[32]

## 宇宙論スケールでの重力法則のずれに対する制限

まず、重力法則が変更された場合の質量密度ゆらぎの摂動論を議論し、線形成長、さらにはその上のオーダーである非線形成長に対する表式を与えた。さらに、非線形成長を含めたゆらぎの統計量を議論するため、N 体シミュレーションのコードを重力法則が変更した場合に拡張し、シミュレーションを行った。また SDSS の観測と比較するために、モックデータをシミュレーションから作成した。前年度行った準解析的方法によって得られるパワースペクトル、また摂動論を用いたパワースペクトルが、シミュレーションの結果とよく一致していることを確認し、理論的手法が有効であることを示した。更に、モックデータと SDSS の観測結果とを比較し、銀河バイアスに対し線形を仮定した場合は、パワースペクトルを用いたほうが重力法則の変更に対してよく制限できることを示した。また銀河バイアスに非線形項を含めて考えた場合は、バイアスパラメタに対する制限を与えることができ、今後の様々な宇宙論的観測で得られるであろうバイアスの情報と組み合わせることで、重力法則の変更に対し更に厳しく制限できる可能性があることを示した。[76, 77, 103, 190, 191]

## 広視野銀河分光サーベイによるバリオン振動からの重力理論への制限の可能性

宇宙の大規模構造に見られるバリオン振動のシグナルは、宇宙のものさしとしての役割を果たす。そのため、ダークエネルギーの状態方程式を決定するなどの目的で、バリオン振動を精度よく検出しようとする観測計画が世界中で進められている。我々は SDSS データと現在計画中の広視野銀河分光サーベイ、WF MOS によるデータを念頭に、銀河パワースペクトル中のバリオン振動から DGP モデルと  $\Lambda$  CDM モデルを区別して制限をかけられるか調べた。その結果、WF MOS と Planck などの観測を合わせる事により、重力理論に対して強く制限を与えられる事が判明した。[20]

## SDSS 銀河分布を用いた銀河系ダストマップの検証

銀河系ダストによるダスト減光はあらゆる天文学的観測に重要な影響をおよぼす最も基本的なデータである。現在最も広く利用されているダストマップは、Schlegel, Finkbeiner, & Davis (1998) によるものであるが、これは減光量を直接求めたものではなく、ダストの遠赤外線での放射量から決められたものである。我々はこのマップの精度を SDSS データ

を用いて検証し、このダストマップに背景銀河からの遠赤外線が混入していることに起因する、わずかなが系統的な誤差が含まれている事を明らかにした。[21, 124]

### SDSS 銀河のバイスペクトルと銀河バイアスの非線型性

銀河の数密度の空間分布は背景にあるダークマター、バリオンの質量分布を反映しているものと考えられる。大規模構造の統計解析において、通常はこれらの揺らぎの間を線形な関係式で結ぶモデル(線形バイアスモデル)が採用されてきた。SDSS に代表されるように、近年、銀河分布のデータベースが大幅に増加し、より精度の高い統計解析が可能になった。これにより、線形バイアスモデルの妥当性、これを用いることによる系統的な誤差を精査することが一層重要になってきた。我々はこのモデルの破れ、つまり、バイアスの非線形性を調べるのに都合の良い統計量であるバイスペクトルに注目した。解析モデル、N 体シミュレーション、さらには実際の SDSS 銀河分布についてバイスペクトルの振る舞いを計算、比較し、バイアスの非線形性を定量的に評価した。また、非線形性の度合いは用いた銀河サンプルのバイアス関係式の線形項と強い相関を持つことを発見した。[16, 78, 104, 120]

### バリオン振動のスケールに対する重力非線型効果と赤方偏移歪みの影響

近年、種々の観測から宇宙の加速膨張が決定的となり、これを説明するものとして正体不明のエネルギー成分、ダークエネルギーの存在が考えられるようになった。ダークエネルギーは宇宙全エネルギーの7割程占めることが分かってきたが、その素粒子論的実態は全く未知である。ダークエネルギー解明の最初のステップとして、その状態方程式を決定することが極めて重要かつ現実的である。この一つの方法論として、銀河分布のパワースペクトル中に現れる特徴的スケールを利用するものがある。このスケールはバリオン振動と呼ばれる脱結合以前のバリオンと光子の流体の音響振動によって決まるもので、宇宙の物質密度、バリオン密度が分かれば理論的に予言することができる。一方で、観測サイドでもこの特徴的振る舞いを精度よく検出できるレベルに到達し、これを宇宙の「ものさし」として利用することが現実的となってきた。これまでの研究では、このスケール線型理論に準拠して計算されてきたが、より正確なダークエネルギーの制限のためには重力非線型効果、赤方偏移歪みなどの効果を適切に取り入れることが重要である。我々は摂動論を用いて重力非線型効果、赤方偏移歪みが振動スケールに与える影響を定量的に見積もり、ダークエネルギー状態方程式の推定に混入しうる系統誤差を評価した。[148, 127, 149, 143]

### トランジット惑星系での Rossiter-McLaughlin 効果の観測

トランジットを起こす太陽系外惑星系では、惑星が公転周期ごとに主星の前面を通過する。この時、惑星が主星の自転による吸収線の広がりを隠してしまうため、トランジット中の主星の視線速度は見かけ上ケプラー運動によるものからずれて観測される。この効果は古くから食連星の観測によって知られており、発見者の名前にちなんで Rossiter-McLaughlin 効果(以下、RM 効果: Rossiter 1924, McLaughlin 1924)と呼ばれている。この RM 効果による視線速度のずれは、主星の自転軸と惑星の公転軸のなす角  $\lambda$  などのパラメータを用いて記述することができる(Ohta, Taruya, & Suto 2005)。この  $\lambda$  という量は惑星の形成と進化の過程を反映しており、hot Jupiter がどのように形成されたのかについて手がかりを与えてくれる貴重な観測量である。我々のグループでは、トランジット惑星系での RM 効果の検出を目指し、ハワイ島・マウナケアにあるすばる望遠鏡/HDS またはケック望遠鏡/HIRES と、マウイ島・ハレアカラにあるマグナム望遠鏡/MIP を同時に用いて、2006 年に 2 つのトランジット惑星系 TrES-1 と HD 189733 のトランジット観測を行った。その結果、我々は 2 つの惑星系でそれぞれ世界で初めて RM 効果を検出し、 $\lambda$  の制限をつけることに成功した。[17, 18, 19, 38, 79, 80, 105, 146, 151]。

### 5.1.3 天体核・素粒子物理

#### マグネターとガンマ線バースト

今年度発見された GRB 060218 SN 2006A J は観測結果と理論予測をつき合わせると、中心天体は中性子星になると考えられている。通常の超新星よりも激しい爆発を起こすためには直感的には強磁場中性子星であるマグネターがこの爆発現象のセントラルエンジンと考えるのが自然である。この状況は私のシミュレーションの状況に酷似しており、ある種のガンマ線バーストの起源は私の研究で解明できるかもしれない。昨年度完成特殊相対論的計算コードを開発、完成させた。その結果、長時間安定な計算が可能になり、磁気超新星の爆発の様子が磁場の強さとコラプスしてからの時間に寄ることが理解できた。[28, 64, 121, 132, 144, 150, 192, 193, 194]

#### 暗黒物質対消滅による放射

観測されている宇宙背景ガンマ線のうち、多くの部分はブレーザーなどの天体起源と考えられているが、そのうち一部のエネルギー領域では、暗黒物質対消滅の兆候が見えているという可能性が以前から指摘されてきた。しかし、その予言は暗黒物質の密度分布に強く依存しており、検出可能性もさほど高くはないとされていた。そこで今回我々は、暗黒物質の密度分布の細部構造として中間質量ブラックホール (IMBH) 周りの暗黒物質の増加 (スパイク構造) を

取り入れ、観測にどの程度の寄与を与えうるかを定量的に評価した。その結果、観測されている背景放射と同等のフラックスが予言され、暗黒物質起源の特徴的なシグナルが来年度に打ち上げの予定がされている GLAST 衛星によって検出可能であることを明らかにした [27, 87, 109, 140, 160]。

また暗黒物質が対消滅を起こす際、暗黒物質の定義上、最終的には素粒子物理の標準理論のいずれかの粒子を放出しなければならない。このことから、暗黒物質が標準理論の粒子の中で最も検出が困難であるニュートリノのみを放出すると仮定すると、暗黒物質の性質の極限値を観測より求めることが可能である。今回我々は、銀河中心のニュートリノ観測をもとに、暗黒物質の対消滅断面積の上限を求めた。また、我々の銀河ハローの構造の議論もした [147]。

### 超高エネルギー宇宙線の伝搬

超高エネルギー宇宙線は宇宙空間に存在する磁場にほとんど曲げられることなく地球に到来すると期待されるため、宇宙線ソースの直接的なプローブになり得る。しかし一方で宇宙空間の磁場の強さはほとんどわかっていないため、我々は宇宙の大規模構造を考慮した磁場のモデルを作成し、宇宙線の伝搬計算を行い、地球での到来方向分布をシミュレートした。これを既存の観測結果と比較し、宇宙線ソースの数密度が  $10^{-5\sim-6} \text{ Mpc}^{-3}$  程度であると見積もった [41, 83, 98, 156]。この結果は観測イベントの少なさを原因とした不定性を大きく含むが、近い将来の観測でこの不定性が小さくなり、ソースの数をより精度よく見積もれることを示した [99] また、近い将来にソース分布と宇宙線到来方向分布に数度スケールの相関が見えてくるであろうことを示した [42, 99, 107, 115, 157, 158]。

宇宙線の大きな問題の一つとして銀河系内成分と銀河系外成分がどの程度のエネルギーで入れ替わるかという問題がある。この問題の解決策の一つとして、銀河系外起源の超高エネルギー宇宙線が伝搬中に宇宙背景放射と反応して生成する超高エネルギーニュートリノの観測が有用であると指摘し、そのフラックスについて議論した [99, 129]。

### 超新星コアの原子核パスタ

超新星爆発の初期段階である重い星の死の直前の重力崩壊の過程において、原子核が融けて核物質へと転移していくフェイズが存在する。その相転移の様子は自明ではなく、一つの可能性として球の形状であった原子核が棒状、板状にその姿を変え、さらに反転して棒状のバブル、球状のバブルへと転移して最終的に核物質へと転移することが示唆されている。これらの非球状の原子核は「原子核パスタ」と呼ばれ、パスタ相が存在することで超新星爆発において重要な役割を果たすニュートリノと物質との相互作用に変化をもたらす可能性があることが示唆されてきた。我々は実際にパスタ相が超新星爆発において

10% から 20% 程度存在するというところを見積もることとでその重要性を指摘した。[24, 142] さらに実際パスタ相が存在することでニュートリノの不透明度がどのように変化するかを調べ、20MeV から 30MeV 程度の比較的エネルギーの低いニュートリノに対して超新星コアの不透明度が著しく落ちることを示した。[24, 116, 84, 85, 86, 133]

### 第一世代星の重力崩壊と背景放射

宇宙で最初にできた星のことを第一世代星と呼ぶ。このような天体は、現在の星と異なり、非常に重かったことが示唆されている。これまで、第一世代星の形成についてはよく調べられてきたが、その進化の最終段階である崩壊についてはほとんど調べられてこなかった。そこで我々は、このような天体の重力崩壊のシミュレーションを行い、重力波やニュートリノの背景放射の成分にどのような影響を及ぼすかを調べた。その結果、重力波については、次世代の重力波検出器である DECIGO や BBO といったもので観測可能性が高いことを示した [43, 44, 55, 65, 69, 108, 117, 134, 159]。さらに、ニュートリノに関してはこれまで観測可能性は低いとされていたが、今まで考慮されていなかった回転の効果を入れた計算を行うと、観測の窓となる周波数帯が存在する可能性を示唆した [130, 138]。

<受賞>

<報文>

(原著論文)

- [1] N. Arkani-Hamed, H. C. Cheng, M. A. Luty, S. Mukohyama and T. Wiseman: “Dynamics of gravity in a Higgs phase”; *Journal of High Energy Physics* **0701**, 036 (2007) [arXiv:hep-ph/0507120].
- [2] H. C. Cheng, M. A. Luty, S. Mukohyama and J. Thaler: “Spontaneous Lorentz breaking at high energies”; *Journal of High Energy Physics* **0605**, 076 (2006) [arXiv:hep-th/0603010].
- [3] S. Kawamura *et al.*: “The Japanese space gravitational wave antenna DECIGO”; *Classical and Quantum Gravity* **23**, S125 (2006).
- [4] S. Mukohyama: “An accelerating universe and cosmological perturbation in the ghost condensate”; *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **0610**, 011 (2006) [arXiv:hep-th/0607181].
- [5] Takashi Hiramatsu: “High-energy effects on the spectrum of inflationary gravitational wave background in braneworld cosmology”; *Physical Review D* **73**, 084008 (2006) (hep-th/0601105)
- [6] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama: “Evolution of curvature perturbations in a brane-world inflation at high-energies”; *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **0612**, 009 (2006) (hep-th/0607068)

- [7] Kazuya Koyama, Andrew Mennim, V. A. Ruvakov, David Wands, Takashi Hiramatsu: “Primordial perturbations from slow-roll inflation on a brane”; *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **0704**, 001 (2007) (hep-th/0701241)
- [8] Yuuiti Sendouda, Shigehiro Nagataki and Katsuhiko Sato: “Mass spectrum of primordial black holes from inflationary perturbation in the Randall–Sundrum braneworld: a limit on blue spectra”; *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **0606**, 003 (2006)
- [9] Yuuiti Sendouda, Shunichiro Kinoshita and Shinji Mukohyama: “A doubly covariant formula of deficit angle and its application to six-dimensional braneworld”; *Classical and Quantum Gravity* **23**, 7199 (2006)
- [10] R.C.Nichol, R. Sheth, Y. Suto, A. J. Gray, I. Kayo, R.H.Wechsler, F.Martin, G. Kulkarni, M. Blanton, A. J. Connolly, J. Gardner, B. Jain, C.J.Miller, A. W. Moore, A. Pope, J. Pun, D. Schneider, A. Szalay, I. Szapudi, I. Zehavi, N.A.Bahcall, I.Csabai, and J.Brinkmann: “The Effect of Large-Scale Structure on the SDSS Galaxy Three-Point Correlation Function”; *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* **368**, 1507–1514 (2006) (astro-ph/0602548)
- [11] Naomi Ota, Naohisa Inada, Masamune Oguri, Kazuhisa Mitsuda, Gordon T. Richards, Yasushi Suto, W. N. Brandt, Francisco J. Castander, Ryuichi Fujimoto, Patrick B. Hall, Charles R. Keeton, Robert C. Nichol, Donald P. Schneider, Daniel E. Eisenstein, Joshua A. Frieman, Edwin L. Turner, T.Minezaki and Y.Yoshii: “Chandra Observations of SDSS J1004+4112: Constraints on the Lensing Cluster and Anomalous X-Ray Flux Ratios of the Quadruply Imaged Quasar”; *The Astrophysical Journal* **647**, 215–221 (2006) (astro-ph/0601700)
- [12] Seitaro Urakawa, Toru Yamada, Yasushi Suto, Edwin L. Turner, Yoichi Itoh, Tadashi Mukai, Masahide Tamura and Yiping Wang: “An Extrasolar Transiting Planet Search with Subaru Suprime-Cam”; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **58**, 869–88 (2006)1 (astro-ph/0603346)
- [13] Y.P.Jing, Yasushi Suto, and H.J.Mo: “The dependence of dark halo clustering on the formation epoch and the concentration parameter”; *The Astrophysical Journal* **657**, 664–668 (2007) (astro-ph/0610099)
- [14] Hajime Kawahara, Kohji Yoshikawa, Shin Sasaki, Yasushi Suto, Nobuyuki Kawai, Kazuhisa Mitsuda, Takaya Ohashi, and Noriko Y. Yamasaki: “Soft X-ray Transmission Spectroscopy of Warm/Hot Intergalactic Medium: Mock Observation of Gamma-Ray Burst X-ray Afterglow”; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **58**, 657–671 (2006) (astro-ph/0504594)
- [15] Hajime Kawahara, Yasushi Suto, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, Mamoru Shimizu, Elena Rasia, and Klaus Dolag: “Radial profile and log-normal fluctuations in intra-cluster medium as an origin for systematic underestimate bias of cluster temperature”; *The Astrophysical Journal* **659**, 257–266 (2007) (astro-ph/0611018)
- [16] Takahiro Nishimichi, Issha Kayo, Chiaki Hikage, Kazuhiro Yahata, Atsushi Taruya, Y.P. Jing, Ravi Sheth, and Yasushi Suto: “Bispectrum and nonlinear biasing of galaxies: perturbation analysis, numerical simulation and SDSS galaxy clustering”; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **59**, 93–106 (2007) (astro-ph/0609740)
- [17] Joshua N. Winn, John Asher Johnson, Geoffrey W. Marcy, R. Paul Butler, Steven S. Vogt, Gregory W. Henry, Anna Roussanova, Matthew J. Holman, Keigo Enya, Norio Narita, Yasushi Suto, and Edwin L. Turner: “Measurement of the Spin-Orbit Alignment in the Exoplanetary System HD 189733”; *The Astrophysical Journal* **653**, L69–L72 (2006) (astro-ph/0609506)
- [18] Joshua N. Winn, Matthew J. Holman, Gregory W. Henry, Anna Roussanova, Keigo Enya, Yuzuru Yoshii, Avi Shporer, Tsevi Mazeh, John A. Johnson, Norio Narita, and Yasushi Suto: “The Transit Light Curve Project. V. System Parameters and Stellar Rotation Period of HD 189733”; *The Astronomical Journal* **133**, 1828–1835 (2007) (astro-ph/0612224)
- [19] Norio Narita, Keigo Enya, Bun’ei Sato, Yasuhiro Ohta, Joshua N. Winn, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Edwin L. Turner, Wako Aoki, Motohide Tamura, Toru Yamada, and Yuzuru Yoshii: “Measurement of the Rossiter–McLaughlin Effect in the Transiting Exoplanetary System TrES-1”; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **59**, in press (astro-ph/0702707)
- [20] Kazuhiro Yamamoto, Bruce A. Bassett, Robert C. Nichol, Yasushi Suto and Kazuhiro Yahata: “Searching for modified gravity with baryon oscillations: from SDSS to wide field multiobject spectroscopy (WFMOS)”; *Physical Review D* **74**, 063525-1-11 (2006) (astro-ph/0505278)
- [21] Kazuhiro Yahata, Atsunori Yonehara, Yasushi Suto, Edwin L. Turner, Tom Broadhurst, and Douglas P. Finkbeiner: “The effect of FIR emission from SDSS galaxies on the SFD Galactic extinction map”; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **59**, 205–219 (2007) (astro-ph/0607098)
- [22] Atsushi Taruya: “Probing anisotropies of gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer. III. Reconstruction of a high-frequency sky map”; *Physical Review D* **74**, 104022 (2006) (gr-qc/0607080)
- [23] Yoshiaki Himemoto, Atsushi Taruya, Hideaki Kudoh, Takashi Hiramatsu: “Detecting a stochastic

- background of gravitational waves in the presence of non-Gaussian noise: A performance of generalized cross-correlation statistic"; *Physical Review D* **75**, 022003 (2007) (gr-qc/0607015)
- [24] H. Sonoda, G. Watanabe, K. Sato, T. Takiwaki, K. Yasuoka, and T. Ebisuzaki: "Impact of nuclear pasta on neutrino transport in collapsing stellar cores"; *Physical Review C* **75**, 042801(R) (2007)
- [25] Shunji Matsuura, Shin-ichiro Fujimoto, Masa-aki Hashimoto & Katsuhiko Sato: "Reply to 'Comment on 'Heavy element production in inhomogeneous big bang nucleosynthesis''"; *Physical Review D* **75**, 068302 (2007)
- [26] Shinpei Kobayashi, David Mateos, Shunji Matsuura, Robert C. Myers & Rowan M. Thomson: "Horographic phase transitions at finite baryon density"; *Journal of High Energy Physics* **0702**, 016 (2007)
- [27] Shunsaku Horiuchi & Shin'ichiro Ando: "Dark matter annihilation from intermediate-mass black holes: Contribution to the extragalactic gamma-ray background"; *Physical Review D* **74**, 103504 (2006) [arXiv:astro-ph/0607042]
- [28] Shigehiro Nagataki, Rohta Takahashi, Akira Mizuta, and Tomoya Takiwaki: "Numerical Study on GRB-Jet Formation in Collapsars"; *The Astrophysical Journal* **659**, 512 (2007)
- [29] Sunao Nishimura, Kei Kotake, Masa-aki Hashimoto, Shoichi Yamada, Nobuya Nishimura, Shinichiro Fujimoto, and Katsuhiko Sato: "R-Process Nucleosynthesis in MHD Explosions of Core-Collapse Supernovae"; *The Astrophysical Journal* **642**, 410-419 (2006) (astro-ph/0504100)
- [30] Shin-ichiro Fujimoto, Kei Kotake, Shoichi Yamada, Masa-aki Hashimoto, and Katsuhiko Sato: "Magnetohydrodynamic Simulations of A Rotating Massive Star Collapsing to A Black Hole"; *The Astrophysical Journal* **644**, 1040-1055 (2006) (astro-ph/0602457)
- [31] Shigehiro Nagataki, Akira Mizuta, and Katsuhiko Sato: "Explosive Nucleosynthesis in GRB Jets Accompanied by Hypernovae"; *The Astrophysical Journal* **647**, 1255-1268 (2006) (astro-ph/0601111)
- [32] Kohji Yoshikawa, Shin Sasaki: Non-equilibrium Ionization States of a Warm-Hot Intergalactic Medium; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **58**, 641-65 (2006)6
- [33] Tamon Suwa, Asao Habe, Kohji Yoshikawa: "Protoclusters in the  $\Lambda$ -CDM Universe"; *The Astrophysical Journal* **646**, L5-L8 (2006)
- (会議抄録)
- [34] S. Mukohyama: "Gravity in a Higgs phase"; *Proceedings of QUARKS-2006 14th International Seminar on High Energy Physics*, presented at St. Petersburg, Russia, May 2006.
- [35] S. Mukohyama: "Gravity and cosmology with ghost condensate"; *Proceedings of Summer Institute 2006 International Workshop on Supersymmetry, Electroweak Symmetry Breaking and Particle Cosmology*, presented at APCTP, Pohang, Korea, August 2006.
- [36] S. Mukohyama: "Higgs phase of gravity"; *Proceedings of the 16th workshop on General Relativity and Gravitation*, presented at Niigata University, November 2006.
- [37] Shunichiro Kinoshita, Yuuiti Sendouda, Shinji Mukohyama: "Stability of a de Sitter brane in a six-dimensional braneworld"; *Proceedings of the 16th Workshop on General Relativity and Gravitation (Niigata Prefectural Civic Center, November 27 - December 1, 2006)* in press
- [38] Norio Narita: "Simultaneous Subaru/MAGNUM Observations of Extrasolar Planetary Transits"; *Publications of the Astronomical Society of the Pacific proceedings of Transiting Extrasolar Planets Workshop*, The University of Chicago Press, 2007
- [39] Yoshiaki Himemoto, Atsushi Taruya, Hideaki Kudoh, Takashi Hiramatsu: "Detecting a stochastic background of gravitational waves in the presence of non-Gaussian noise"; *6th International LISA Symposium, AIP Conference Proceedings* **873** (2006) 471-475
- [40] Atsushi Taruya: "Probing anisotropies of gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer"; *6th International LISA Symposium, AIP Conference Proceedings* **873** (2006)494-497
- [41] 高見 一: 「最高エネルギー宇宙線の伝搬と到来方向分布からわかるソースの性質」; 名古屋大学太陽地球研究所研究会報告集「平成18年度STE研究集会」 p.125
- [42] Hajime Takami: "Propagation of Ultra-high-energy Cosmic Rays in Cosmic Magnetic Fields"; *Proceedings of International Workshop on 'Cosmic-rays and High Energy Universe'*, in press
- [43] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, and Katsuhiko Sato: "Gravitational Coallase of Population III Stars"; *Proceedings of "Eleventh Marcel Grossmann Meeting on General Relativity"*, in press
- [44] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, and Katsuhiko Sato: "Gravitational Wave Background from Population III Stars"; *Proceedings of "The 16th Workshop on General Relativity and Gravitation"*, in press
- (国内雑誌)
- [45] 須藤 靖: 「宇宙の加速膨張: 暗黒エネルギー、それとも未知の重力法則?」, *数理科学* **517**(2006) pp.26-32.
- [46] 須藤 靖、相原博昭、高田昌広: 「宇宙の暗黒エネルギーを探る」, *日本物理学会誌* **62** (2007) 2月号 pp.83-91.

- [47] 茂木健一郎、須藤 靖：「茂木健一郎と愉しむ科学のクオリア 第11回「青空の向こうの見えない宇宙を見る」」、日経サイエンス (2007) 4月号, pp.66-71.
- [48] C. J. コンセリス, 樽家 篤史：「宇宙を造った見えざる手 暗黒エネルギー」, 日経サイエンス (2007) 5月号, pp.22-30
- [49] 佐藤勝彦：「宇宙の創生とウロボロスの図」、Ouroboros (ウロボロス) 第29号 東京大学総合研究博物館ニュース 平成18年7月
- [50] 向山信治：「アインシュタインの間違い」, S. Weinbergによる原題「Einstein's Mistake」の翻訳、パリティ 2006年6月号掲載
- [51] 向山信治：「一般相対論を長距離で変更できるか?」, パリティ 2006年10月号掲載
- (学位論文)
- [52] 平松 尚志：「Numerical studies on cosmological perturbations in braneworld」(博士論文)
- [53] 仙洞田雄一：「Inflationary braneworld probed with primordial black holes」(博士論文)
- [54] 西道 啓博：「Galaxy Biasing and Higher-Order Statistics」(修士論文)
- [55] 諏訪雄大：「Gravitational Collapse of Population III Stars」(修士論文)
- [56] 斎藤 俊：「Probing circular polarization of Gravitational Wave Background with Cosmic Microwave Background Anisotropy」
- (著書)
- [57] 須藤 靖：「ものの大きさ - 自然の階層・宇宙の階層 -」, 東大出版会 UT Physics シリーズ 第一巻 (2006年10月刊行)
- [58] 成田 憲保：「あの惑星はどんな環境なんだろう? “もうひとつの地球探し”をめぐって」; アストロアーツ 月刊星ナビ 2006年9月号 p66. 系外惑星を探れ!20
- [59] 佐藤勝彦：「宇宙の起源と現在の姿」, シリーズ 現代の天文学 I 岡村等編 日本評論社 2007年 (分担執筆)
- [60] 佐藤勝彦：「相対性理論における時間と宇宙の誕生」, 「時空のデザイン」 総合博物館 三河内彰子・橋由里香・洪恒夫 = [編], 2006年 (分担執筆)
- [61] 佐藤勝彦：「インフレーション宇宙論」特集、ニュートン、ニュートンプレス、2006年12月号 (監修)
- [62] 佐藤勝彦：「相対性理論と量子論」PHP 研究所 2006 (監修)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- Eleventh Marcel Grossmann Meeting on General Relativity (Freie Universität Berlin, July, 2006)
  - [63] Takashi Hiramatsu: “High-energy effects on the spectra of cosmological perturbations in braneworld”
  - [64] Tomoya Takiwaki: “Special Relativistic Simulations of Magneto-driven Jet from Core-Collapse Supernovae”
  - [65] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake and Katsuhiko Sato: “Gravitational Coalescence of Population III Stars”
  - The 16th Workshop on General Relativity and Gravitation (Niigata Prefectural Civic Center, November - December, 2006)
  - [66] S. Mukohyama, “Higgs phase of gravity”
  - [67] Shunichiro Kinoshita, Yuuiti Sendouda, Shinji Mukohyama: “Stability of a de Sitter brane in a six-dimensional braneworld”
  - [68] Atsushi Taruya: “Polarization analysis of gravitational-wave backgrounds”
  - [69] Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake and Katsuhiko Sato: “Gravitational Wave Background from Population III Stars”
  - その他
  - [70] Shunichiro Kinoshita, Yuuiti Sendouda, Shinji Mukohyama: “Stability of a de Sitter brane in a six-dimensional braneworld”; APCTP-TPI Meeting “Gravity, Cosmology, and Astrophysics - II” (University of Alberta, Edmonton, Canada, December 2006)
  - [71] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama: “Evolution of curvature perturbations in a brane-world inflation at high-energies”; Brane-World Gravity: Progress and Problems (Institute of Cosmology and Gravitation, Portsmouth, UK, September 18-29, 2006)
  - [72] Yuuiti Sendouda: “Mass spectrum of primordial black holes from inflationary perturbation in the RS braneworld”; Brane-World Gravity: Progress and Problems (University of Portsmouth (Portsmouth, UK), Sep 19)
  - [73] Yuuiti Sendouda: “Cosmic rays from primordial black holes in the Randall-Sundrum braneworld”; International Workshop on Cosmic-rays and High Energy Universe (Aoyama Gakuin University (Tokyo, Japan), Mar 5-6)
  - [74] Yasushi Suto: “Report from Japan: from HyperSuprime-Cam to WFMOS”; WFMOS Science Team meeting (Royal Observatory, Edinburgh, May 15-17, 2006)
  - [75] Yasushi Suto: “Modified gravity vs. cosmological constant”; WFMOS Science Team meeting (Royal Observatory, Edinburgh, May 15-17, 2006)

- [76] Akihito Shirata, Yasushi Suto, Chiaki Hikage, Tet-suya Shiromizu, Naoki Yoshida: “Galaxy clustering constraints on deviations from Newtonian gravity at cosmological scales”; SDSS-II collaboration meeting (Seoul National University, Korea, September 22-24, 2006)
- [77] Akihito Shirata, Yasushi Suto, Chiaki Hikage, Tet-suya Shiromizu, Naoki Yoshida: “Galaxy clustering constraints on deviations from Newtonian gravity at cosmological scales”; Second International Symposium on Nanometer-Scale Quantum Physics (Tokyo Institute of Technology, Japan, January 24-26, 2007)
- [78] Takahiro Nishimichi, Chiaki Hikage, Issha Kayo, Kazuhiro Yahata, Atsushi Taruya, Yipeng Jing, Ravi K. Sheth and Yasushi Suto: “Bispectrum and Nonlinear Biasing of Galaxies”; SDSS collaboration meeting (Seoul National University, September 22-24, 2006)
- [79] Norio Narita: “Simultaneous Subaru/MAGNUM Observations of Extrasolar Planetary Transits”: Transiting Extrasolar Planets Workshop at Heidelberg, Germany, September 27 2006
- [80] Norio Narita et al.: “Simultaneous Spectroscopic and Photometric Observations of a Transit of TrES-1b”: The Third Workshop on Development of Extrasolar Planetary Science at the University of Tokyo, December 11 2006
- [81] Atsushi Taruya: “Probing anisotropies of gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer”; 6th International LISA Symposium (NASA Goddard, June 19-23, 2006)
- [82] Yoshiaki Himemoto, Atsushi Taruya, Hideaki Kudoh, Takashi Hiramatsu: “Detecting a stochastic background of gravitational waves in the presence of non-Gaussian noise”; 6th International LISA Symposium (NASA Goddard, June 19-23, 2006)
- [83] Hajime Takami: “Propagation of Ultra-high-energy Cosmic Rays in Cosmic Magnetic Fields”; International Workshop on ‘Cosmic-rays and High Energy Universe’ (Aoyama-gakuin university, Japan, 5-6, March, 2007)
- [84] Hidetaka Sonoda: “Coherent scattering of neutrinos by nuclear pasta in dense matter”; Tours Symposium VI (Tours, 5-8/9/2006)
- [85] Hidetaka Sonoda: “Coherent scattering of neutrinos by nuclear pasta in supernova cores”; 21st century COE International Symposium on neutrino processes and stellar evolution (Tokyo, 9/2/2007)
- [86] Hidetaka Sonoda: “Coherent scattering cross section of neutrinos and nuclear pasta in supernova cores”; Twenty years after SN1987A (Hawaii, 23-25/2/2007)
- [87] Shunsaku Horiuchi & Shin’ichiro Ando: “Dark matter annihilation from intermediate-mass black holes: Contribution to the extragalactic gamma-ray background”; High Energy Astrophysics in the Next Decade (Tokyo Metropolitan University, 2006 June)
- [88] K. Sato, T. Takiwaki, K. Kotake, S. Yamada: “Magneto-rotational collapse of stellar cores and jet-like explosion”; 23rd Texas Symposium, University of Melbourne, 2006, December
- [89] Kohji Yoshikawa: The EDGE General Meeting “Non-equilibrium Ionization States of the Warm-Hot Intergalactic Medium” (CNR Headquarter, Rome, December 19-21, 2006)
- 招待講演
- [90] S. Mukohyama: “Gravity in a Higgs phase”; QUARKS-2006, 14th International Seminar on High Energy Physics, St. Petersburg, Russia, May 2006
- [91] S. Mukohyama: “A Higgs phase of gravity in string theory”; IR Modifications of Gravity, Perimeter Institute, Canada, November 2006
- [92] S. Mukohyama: “Higgs phase of gravity”; General Relativity Trimester IHP Workshop “High Energy, Cosmology and Strings”, Institut Henri Poincaré, Paris, December 2006
- [93] S. Mukohyama: “Gravity in a Higgs phase”; APCTP-TPI Meeting “Gravity, Cosmology, and Astrophysics - II” University of Alberta, Edmonton, Canada, December 2006
- [94] Yasushi Suto: “Three-point correlation functions and bispectra of SDSS galaxies: implications for linear and quadratic biasing coefficients”; The 2nd KIAS workshop on Cosmology and Structure Formation (Korean Institute for Advanced Study, Seoul, September 20-21, 2006)
- [95] Yasushi Suto: “Predicting signatures of planetary rings around extrasolar transiting planets”; The 2nd KIAS workshop on Cosmology and Structure Formation (Korean Institute for Advanced Study, Seoul, September 20-21, 2006)
- [96] Yasushi Suto: “From Far East to Far Infra-Red: galaxy clustering and Galactic extinction map”; SDSS collaboration meeting (Seoul National University, September 22-24, 2006)
- [97] Yasushi Suto: “Exploring dark energy in the universe through baryon acoustic oscillation”; KEK Annual Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEKPH07)(KEK, Tsukuba, March 1-3, 2007)
- [98] Hajime Takami: “Propagation of Ultra-High Energy Cosmic Rays above  $10^{19}$  eV in a Structured Extragalactic Magnetic Field and Galactic Magnetic Field”; 4th Korean Astrophysics Workshop (KASI, Korea, 17, May, 2006)

- [99] Hajime Takami: “Propagation of Extremely-high-energy Cosmic Rays”; International Symposium on ‘Astronomy Astrophysics of Extreme Universe’ (RIKEN, Japan, 22, March, 2007)
- (国内会議)
- 一般講演
- ・ RESCEU 研究会 (鬼怒川コンベンションホール、2006年9月4日)
- [100] 向山信治: 「重力のヒッグス相での宇宙論」
- [101] 木下俊一郎, 向山信治, 仙洞田雄一: 「6次元ブレーンモデルにおける de Sitter ブレーンの安定性」
- [102] 仙洞田雄一: 「Randall-Sundrum 膜宇宙におけるインフレーションへの始原的ブラックホールからの制限」
- [103] 白田 晶人, 須藤 靖, 日影 千秋, 吉田 直紀, 白水 徹也: 「宇宙論スケールでの Newton 重力の破れに対する SDSS からの観測的制限」
- [104] 西道啓博, 矢幡和浩, 日影千秋, 加用一者, 樽家篤史, 須藤靖, Yipeng Jing, Ravi K. Sheth: 「銀河バイアスの非線形性とバイスペクトル: 摂動論・シミュレーション・SDSS 銀河」
- [105] 成田 憲保, 他: 「すばる & MAGNUM 望遠鏡による系外惑星トランジットの同時分光・測光観測」
- [106] 樽家 篤史: “Quasi-Equilibrium Evolution of N-body System”
- [107] 高見 一, 佐藤 勝彦: 「超高エネルギー宇宙線の到来方向と起源の相関」
- [108] 諏訪雄大, 滝脇知也, 固武慶, 佐藤勝彦: 「第一世代星の重力崩壊とその背景重力波への寄与」
- [109] 堀内俊作, 安藤真一郎: 「中間質量ブラックホール周りでの暗黒物質対消滅: 銀河外ガンマ線背景放射への寄与」
- ・ 日本物理学会 2006 年秋季大会 (ハワイ・奈良女子大・千葉大学、2006 年 9 月)
- [110] 向山信治: “Cosmology with Ghost Condensation”
- [111] 木下俊一郎, 向山信治, 仙洞田雄一: 「6次元 Warped Flux Compactification ブレーンモデルにおける de Sitter ブレーンの安定性およびその性質」
- [112] 仙洞田雄一, 長滝重博, 佐藤勝彦: 「Randall-Sundrum 宇宙論における始原的ブラックホールからのインフレーションへの制限」
- [113] 樽家 篤史: “Probing anisotropies of gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer 3”
- [114] 姫本 宣朗, 樽家 篤史: “Detection method for stochastic gravitational-wave backgrounds with modified cross-correlation analysis”
- [115] 高見 一, 佐藤 勝彦: 「超高エネルギー宇宙線の到来方向と起源の相関」
- [116] 園田英貴, 渡邊元太郎, 佐藤勝彦, 泰岡顕示, 戎崎俊一: 「超新星コアにおけるパスタ相のニュートリノオバシティ」
- [117] 諏訪雄大, 滝脇知也, 固武慶, 佐藤勝彦: 「第一世代星の重力崩壊とその背景重力波への寄与」
- [118] 斎藤 俊, 樽家 篤史: “Quantum signature of CMB polarization anisotropy generated during inflation”
- [119] 高水 裕一, 工藤 秀明, 斎藤 俊: 「ハゲドロン領域での初期宇宙、熱平衡の実現とその応用」
- ・ 日本天文学会 2006 年秋季大会 (九州国際大学、2006 年 9 月)
- [120] 西道啓博, 矢幡和浩, 日影千秋, 加用一者, 樽家篤史, 須藤靖, Yipeng Jing: 「銀河バイアスの非線形性とバイスペクトル: 摂動論とシミュレーション・SDSS 銀河」
- [121] 滝脇知也: 「磁気駆動超新星爆発、その機構とニュートリノ重力波放射」
- [122] 村山 真紀, 成田 憲保, 他: 「アストロバイオロジー教育のすすめ I. 小学生に対する教育効果」
- [123] 樽家 篤史: 「スペース干涉計を用いた高周波帯域での宇宙背景重力波のマッピング」
- [124] 矢幡 和浩, 米原 厚憲, 須藤 靖, Edwin Turner, Tom Broadhurst, Douglas, P. Finkbeiner: 「SDSS 銀河及びクエーサーを用いた銀河系内ダストマップの検証」
- [125] 吉川 耕司: 「銀河間ガスの非平衡電離過程を考慮したダークバリオンのシミュレーション」
- ・ RESCEU 研究会 (ホテル伊豆高原、2007 年 2 月)
- [126] 木下俊一郎, 向山信治, 仙洞田雄一: 「de Sitter ブレーンの熱力学的性質」
- [127] 西道啓博, 大室裕史, 樽家篤史, 矢幡和浩, 白田晶人, 斎藤俊, 須藤靖, 山本一博, Yipeng Jing: 「バリオン音響振動で探るダークエネルギー: 銀河バイアスと非線形成長の影響」
- [128] 樽家 篤史: 「背景重力波の偏向観測」
- [129] 高見 一, 村瀬 孔大, 長滝 重博, 佐藤 勝彦: “Cosmogenic Neutrinos as a Probe of the Transition from Galactic to Extragalactic Cosmic Rays”
- [130] 諏訪雄大, 滝脇知也, 固武慶, 佐藤勝彦: 「第一世代星の重力崩壊とニュートリノ放射」
- [131] 斎藤 俊, 樽家 篤史, 市来 浄与: “Probing circular polarization of Gravitational Wave Background with Cosmic Microwave Background Anisotropy”
- ・ 「超新星を舞台とする高エネルギー物理現象」(東京大学、2007 年 2 月)
- [132] 滝脇知也: “Magneto-driven Explosions of Core-Collapse Supernovae”
- [133] 園田英貴: “Coherent scattering of neutrinos by nuclear pasta in supernova cores”
- [134] 諏訪雄大, 滝脇知也, 固武慶, 佐藤勝彦: “Gravitational Wave Background from Population III Stars”
- ・ 日本物理学会 2006 年春季大会 (首都大学・鹿児島大学、2007 年 3 月)

- [135] 向山信治:「超弦理論とインフレーション」
- [136] 木下俊一郎, 向山信治, 仙洞田雄一:「de Sitter プレーンの熱力学的性質」
- [137] 樽家 篤史, 瀬戸 直樹, Asantha Cooray: “Polarization analysis of gravitational-wave backgrounds with a space intermerometer”
- [138] 諏訪雄大, 滝脇知也, 固武慶, 佐藤勝彦:「第一世代星の重力崩壊とニュートリノ放射」
- [139] 斎藤 俊, 樽家 篤史, 市来 浄與: “Probing circular polarization of Gravitational Wave Background with Cosmic Microwave Background Anisotropy”
- [140] 堀内俊作, 安藤真一郎:「中間質量ブラックホール周りでの暗黒物質対消滅: 銀河外ガンマ線背景放射への寄与」
- [141] Jaume Gomis, 松浦俊司: “Holographic Surface Operator”
- [142] 園田英貴, 渡邊元太郎, 佐藤勝彦, 滝脇知也, 泰岡 顕示, 戎崎俊一:「超新星コアにおけるパスタ相の存在量とその影響」
- ・日本天文学会 2007 年春季大会 (東海大学, 2007 年 3 月)
- [143] 大室裕史, 西道啓博, 樽家篤史, 矢幡和浩, 白田晶人, 斎藤俊, 須藤靖, 山本一博, Yipeng Jing:「バリオン音響振動で探るダークエネルギー: 摂動論を用いた非線形成長と赤方偏移歪みの影響」
- [144] 滝脇知也:「磁気超新星からのニュートリノ・重力波放出」
- [145] 成田 憲保, 他:「アストロバイオロジー教育のすすめ II. 高校生に対する教育効果」
- [146] 成田 憲保, 他:「トランジット惑星系 TrES-1 における初めての Rossiter 効果の観測結果」
- [147] 堀内俊作:「暗黒物質対消滅ニュートリノを用いた暗黒物質の制限」
- ・その他
- [148] 大室裕史, 西道啓博, 樽家篤史, 矢幡和浩, 白田晶人, 斎藤俊, 山本一博, Yipeng Jing, 須藤靖: “Perturbative approach to BAO”; 「超広視野撮像/分光器で切り開く銀河天文学と観測的宇宙論」研究会 (東京大学, 2006 年 11 月 7 日)
- [149] 西道啓博, 大室裕史, 樽家篤史, 矢幡和浩, 白田晶人, 斎藤俊, 須藤靖, 中道将司, 野村英範, 山本一博:「バリオン振動の重力非線形進化: 摂動論的アプローチ」; Hyper Suprime-Cam をめぐるサイエンス検討会 (岩松旅館, 2007 年 3 月 12-14 日)
- [150] 滝脇知也:「磁気駆動超新星からのニュートリノ・重力波放出とジェット放射」; 2007 年度ブラックホール天文学研究会 (京都大学, 2007 年 2 月 12 日)
- [151] 成田 憲保, 他:「すばる & MAGNUM 望遠鏡による系外惑星トランジットの同時分光・測光観測」; 2006 年度天体・天体物理学若手夏の学校、(パノラマランド 木島平, 2006 年 8 月 2 日)
- [152] 樽家 篤史, 工藤 秀明, 姫本 宣朗:「DECIGO で探る宇宙背景重力波」; DECIGO ワークショップ (国立天文台, 2006 年 5 月 11 日)
- [153] 樽家 篤史:「バリオン音響振動」; 阪上研合宿 (湯河原, 2007 年 3 月 3-4 日)
- [154] 樽家 篤史, 瀬戸 直樹: “Polarization analysis of gravitational-wave backgrounds” ; TAMA データ解析ミーティング (大阪市立大学, 2007 年 3 月 8 日)
- [155] 樽家 篤史:「バリオン音響振動の非線形重力進化 ~ 非摂動論的アプローチ ~ 」; Hyper Suprime-Cam サイエンス検討会 (作並温泉, 2007 年 3 月 12-14 日)
- [156] 高見 一, 佐藤 勝彦:「最高エネルギー宇宙線の伝搬 - 到来方向分布が示唆するソースの特徴 - 」; 「高エネルギー天体現象と粒子加速の理論」研究会 (大阪大学, 2006 年 11 月 9-11 日)
- [157] 高見 一, 佐藤 勝彦:「超高エネルギー宇宙線の到来方向と起源の空間的相関」; 理論懇シンポジウム (立教大学, 2006 年 12 月 25-27 日)
- [158] 高見 一, 佐藤 勝彦:「最高エネルギー宇宙線の伝搬と到来方向分布が示唆するソースの性質」; 名古屋大学 STE 研シンポジウム (名古屋大学, 2007 年 1 月 29-31 日)
- [159] 諏訪雄大, 滝脇知也, 固武慶, 佐藤勝彦:「第一世代星の重力崩壊とその背景重力波への寄与」; 「すざく時代」のブラックホール天文学 (京都大学基礎物理学研究所, 2007 年 2 月 13-15 日)
- [160] 堀内俊作, 安藤真一郎:「中間質量ブラックホール周りでの暗黒物質対消滅: 銀河外ガンマ線背景放射への寄与」; 理論懇シンポジウム (立教大学, 2006 年 12 月 25-27 日)
- 招待講演
- [161] 向山信治:「重力のヒッグス相での宇宙論」; 天文天体夏の学校 (2006 年 8 月)
- [162] 向山信治:「Cosmology and String Theory」; 弦理論研究会 (立教大学, 2006 年 12 月)
- [163] 須藤 靖: 第 2 回 FMOS GTO ワークショップ「分光サーベイでダークエネルギーを探る意義」(京都大学宇宙物理学教室, 2006 年 7 月 13 日)
- [164] 須藤 靖: 天文天体物理若手の会 夏の学校「トランジット系外惑星研究の魅力」(パノラマランド 木島平, 2006 年 8 月 2 日)
- [165] 須藤 靖: 理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム「宇宙のダークエネルギー」(立教大学, 2006 年 12 月 26 日)
- [166] 樽家 篤史:「宇宙マイクロ波背景放射」; 東北大学院生 GP 合宿 (2006 年 9 月 13-14 日)
- (セミナー)
- [167] 佐藤 勝彦:「超新星爆発とニュートリノ」, 超新星からのニュートリノ検出 20 周年記念講演会、安田講堂 2 月 17 日
- [168] 佐藤 勝彦:「宇宙の誕生 - インフレーションからビッグバンへ」 - JAXA 宇宙学校講演会 2007 年 3 月 26 日

- [169] 佐藤 勝彦:「時間と空間のデザイン」-相対論と宇宙の創生-総合博物館講演会 2006年9月11日
- [170] 佐藤 勝彦:「アインシュタインと宇宙の創生」札幌市民大学 2006年5月30日
- [171] 佐藤 勝彦:「宇宙創生と進化のシナリオ」経済団体連合会講演会、2006年7月7日
- [172] 佐藤 勝彦:「宇宙はいかにはじまったか?」-現代物理学の描く創世記- スーパサイエンススクール講演、藤島高校、2006年6月23日
- [173] 佐藤 勝彦:「相対性理論とブラックホール」朝日カルチャーセンタ講演、2006年7月29日(東京)30日(大阪)
- [174] S. Mukohyama, “Ghost Condensation and Gravity in Higgs Phase”, Tokyo Institute of Technology, Japan, April 2006.
- [175] S. Mukohyama, “Gravity in a Higgs Phase”, Rikkyo University, Japan, June 2006.
- [176] S. Mukohyama, “Gravity in Higgs Phase”, University of Tsukuba, Japan, October 2006.
- [177] S. Mukohyama, “A Higgs Phase of Gravity in String Theory”, Canadian Institute for Theoretical Astrophysics, University of Toronto, Canada, November 2006.
- [178] S. Mukohyama, “Higgs Phase of Gravity”, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Japan, January 2007.
- [179] S. Mukohyama, “The Strig Cosmology of KKLE Models”, Maryland Center for Fundamental Physics, University of Maryland, USA, February 2007.
- [180] S. Mukohyama, “Conformal Inflation and Mass Hierarchy”, High Energy Theory Group, Harvard University, USA, March 2007.
- [181] S. Mukohyama, “Cosmology with warped flux compactification”, Cosmology Group, Simon Fraser University, Canada, March 2007.
- [182] S. Mukohyama, “Ghost condensation and gravity in Higgs phase”, Gravity Group, The University of British Columbia, Canada, March 2007.
- [183] Yasushi Suto: KASI colloquium “Transiting extra-solar planets: spin-orbit misalignment and rings” (Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon, September 26, 2006)
- [184] 須藤 靖: 東京大学 5月祭講演会「夜空の向こう ~ 宇宙の果てから太陽系外惑星へ ~」(2006年5月28日)
- [185] 須藤 靖: 埼玉県立川越高校 SSH 特別講義「夜空の向こうの物理学」(2006年6月17日)
- [186] 須藤 靖: 第5回 RESCEU 夏の学校「太陽系外惑星のロシター効果」(鬼怒川温泉コンベンションホール、2006年9月4日)
- [187] 須藤 靖: 早稲田大学物理学教室セミナー「太陽系外惑星と生命: 第二の地球を探す」(2006年10月27日)
- [188] 須藤 靖: 日本物理学会 2006年度公開講座新原子原子の創造「元素の起源と宇宙の歴史」(東京工業大学、2006年11月11日)
- [189] 須藤 靖: 東大ビッグバンセンター公開講演会宇宙最大のなぞ: ダークエネルギー「宇宙の組成を探る」(小柴ホール、2006年12月22日)
- [190] 白田 晶人: 「宇宙論スケールでの Newton 重力の破れに対する SDSS からの観測的制限」; 大阪市立大学宇宙物理(重力)コロキウム(2006年11月24日)
- [191] 白田 晶人: 「宇宙論スケールでの Newton 重力の破れに対する SDSS からの観測的制限」; 国立天文台宇宙論セミナー(2007年1月25日)
- [192] Tomoya Takiwaki: 「Special Relativistic Simulations of Magneto-driven Jet from Core-Collapse Supernovae」; Moscow University (August 2006)
- [193] Tomoya Takiwaki: 「Special Relativistic Simulations of Magneto-driven Jet from Core-Collapse Supernovae」; Russian academy of science (August 2006)
- [194] 滝脇知也 「Magneto-driven Explosions of Core-Collapse Supernovae」; 東京大学 天文学専攻 (11月22日)
- [195] 成田 憲保: 「宇宙の中の地球」; 東京都千代田区九段小学校 (2006年6月13日)
- [196] 成田 憲保: 「太陽系外惑星の環境と生命を想像しよう」; 東京都千代田区九段小学校 (2006年6月16日)
- [197] 成田 憲保: 「もうひとつの地球を探して」; サマーサイエンススクール in 妙高高原 2006 (2006年8月28日)
- [198] 成田 憲保: 「太陽系以外の地球型惑星を探す最新の試み」; 科学技術館ユニバースゲスト (2006年12月23日)
- [199] 樽家 篤史: 「宇宙背景重力波 ~ future prospects for direct detection ~」; 東北大学 天文学教室談話会 (2006年5月25日)
- [200] 姫本 宣朗: 「Detecting a stochastic background of gravitational waves in presence of non-Gaussian noise」; 東京大学 坪野研究室セミナー (2006年6月13日)
- [201] 樽家 篤史: 「宇宙背景重力波 ~ future prospects for direct detection ~」; 早稲田大学 理論宇宙物理学研究室セミナー (2006年7月24日)
- [202] 樽家 篤史: 「背景重力波の非等方性を探る」; 東京大学 坪野研究室セミナー (2006年10月18日)
- [203] 樽家 篤史: 「宇宙背景重力波 ~ future prospects for direct detection ~」; 東京大学 駒場キャンパス (2006年10月26日)
- [204] 樽家 篤史: 「宇宙背景重力波」; 国立天文台 (2007年2月23日)
- [205] 吉川 耕司: 国立天文台 理論部 宇宙論セミナー “Hunting for the Warm-Hot Intergalactic Medium” (2006年11月2日)

## 5.2 村尾研究室

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

量子情報を活用したシステムとしては、多量子ビットの重ね合わせ状態を利用した量子計算（因数分解アルゴリズム・データベースサーチアルゴリズム）、未知量子ビット状態の測定における不確定性を利用した量子暗号、2量子ビットの重ね合わせ状態に現われる非局所的量子相関である「エンタングルメント (entanglement)」を利用した量子テレポーションなどが提案されている。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を持つ全ポテンシャルを自由に「利用する」ことはできなかった。量子の世界を同じ量子スケールで直接扱うことが可能となってきて初めて、我々は、量子の世界を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、Damian Markham 助手、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田中雄氏、浜地慎一郎氏、添田彬仁氏、中田芳史氏、大学院外国人研究生の Martin Aulbach 氏のメンバーで、エンタングルメントの本質を理解するためのエンタングルメント理論、物性系におけるエンタングルメントの役割を探るためのマクロの系におけるエンタングルメントに関する研究、エンタングルメントを量子暗号へと応用する応用研究を行った。

### 5.2.1 エンタングルメント理論

エンタングルメントは非局所的量子相関であり、エンタングルメントの本質を明らかにするためには、量子状態の持つ古典的な相関と量子相関を明確に区別する必要がある。その一つの方法として、古典相関を増やすことはあっても量子相関を平均としては増やさないような操作のもとで、量子状態がどのように変化し、量子状態や量子情報を用いたタスクを行うことができるか、ということ解析する方法がある。この操作は、Local Operation and Classical Communications (LOCC) と呼ばれる操作であり、一般化された測定を含むような局所的な演算とその測定結果を伝える古典情報の通信、そして測定結果に基づく更なる条件付測定が含まれる。我々は、次のようなタスクについて LOCC の下での量子系の解析を行い、多体系や多準位系におけるエンタングルメントの研究を進めた。

### 最大エンタングル状態における LOCC 状態複製と LOCC 状態識別

量子情報処理である量子クローニングを LOCC で実行する (局所的複製) ことを考え、互いに直交する素数次元系の 2 体間最大エンタングル状態の集合が決定論的に局所的複製できる必要十分条件が、与えられた集合が同時 Schmidt 分解可能かつ正準 Bell 状態の部分集合であるということを示した。更に、同時 Schmidt 分解可能な互いに直交するエンタングル状態は局所的に識別可能であることから、空間的局所性の制限の下では、粒子の複製が粒子の識別より困難であることを示した。[1] この研究は、JST の ERATO 今井プロジェクトの林正人博士との共同研究である。

### LOCC 状態識別における 1 方向古典通信と双方向古典通信の相違

遠距離当事者間の古典情報通信のタイプの違いによる 2 つの LOCC のタイプ、すなわち双方向に古典情報通信が許された一般的な two-way LOCC と古典情報通信が一方に制限された場合の one-way LOCC の違いが、LOCC 識別性にどのような影響を与えるかを研究した。その結果として、one-way LOCC で識別可能な状態数が、2 体の系では Schmidt ランクというエンタングルメント量を用いて表されることを示し、2 量子ビット系においては、具体的に two-way LOCC による状態識別プロトコルを構成することにより、双方向古典通信が一方に古典通信に比べて著しく LOCC 識別の困難さを減少させることを示した。このことは、古典情報をエンコードされた状態集合から LOCC のみによって古典情報を得ようとした時に、双方向古典通信によって得られる古典情報が増加するということを意味するため、情報理論にも非常に意義深い。[7] この研究は、JST の ERATO-SORST 量子情報システムアーキテクチャの林正人博士との共同研究の成果である。

### 高い対称性を保持する状態の距離的エンタングルメント量の群論的考察

昨年の研究において、我々は多体系で定義されるエンタングルメント量の中でも、特に距離的エンタングルメント量と呼ばれる種類の量に着目し、それらのエンタングルメント量がエンタングル状態の LOCC 状態識別性と関わっていることを示した。距離的なエンタングルメント量としては、エンタングルメント頑強性 (Robustness of entanglement)、相対エントロピーによるエンタングルメント (Relative entropy of entanglement) および幾何学的エンタングルメント測度 (Geometric measure of entanglement) の 3 つの異なる量がある。これらの量の間には大小関係が成り立つ事は昨年論文で証明したが、どのような条件のもとでこの 3 つの量が一致するのは、2

体の系を除いて知られていなかった。2 体の系では 3 つの量は最大エンタングル状態でのみ一致するので、これらの量の一致する状態を多体系で見つけることは、最大エンタングル状態の自然な拡張を見つけることになるという意味でも意義深い。我々は、群論的な解析の結果、与えられた状態がコンパクト位相群の局所ユニタリ表現の多重度 1 の規約表現になっている時に、これらの 3 つの量の値が一致することを証明した。更にこの性質を用いて、今まで求められていなかった反対称状態や対称状態の距離的なエンタングルメント量の値を求めることに成功した。その結果、反対称状態の方が対称状態よりも距離的なエンタングルメント量の値が大きいことがわかった。これは、反対称状態に古典情報を符号化すると、LOCC 操作によって復号化できる情報量がより少なくなることを意味しており、量子ネットワーク上で情報を分散秘匿するのに適していることを示している。この研究は、JST の ERATO-SORST 量子情報システムアーキテクチャの林正人博士、英国 Imperial College の S.S. Virmani 博士との共同研究の成果である。

### 計算可能な LOCC 識別性の上界

昨年研究で我々は、LOCC で決定論的かつ完全に識別可能な状態数の上限が対象となる状態集合の距離的エンタングルメント量の平均であらわされることを示した。しかし、それらの距離的なエンタングルメント量の値を知るためには、計算量的にも非常に複雑な大域的最適化を行わねばならず、前項の研究から分かったように GHZ 状態や W 状態などの非常に群対称性の高い状態以外に対しては、有効な計算手法が確立されていない。そこで我々は新しい LOCC 識別性の上界を求めた。この上界は 2 体系に対しては昨年求めた上界に一致し、さらに 3 体以上の系に対してすべての GHZ タイプや W タイプ状態を含む非常に広いクラスに対して有効的に計算可能である。この研究は、国立情報学研究所の松本啓史助教授、JST の ERATO-SORST 量子情報システムアーキテクチャの林正人博士との共同研究の成果である。

### Graph 状態におけるエンタングルメントと LOCC による復号化通信容量

2001 年に Raussendorf と Briegel は、クラスター状態と呼ばれる特殊なエンタングルメントを持つ多量子ビット状態を用いて、構成する量子ビットを一つづつ測定することとで、どのような量子計算も行うことができることを見出した。これによって、エンタングルメントが普遍的な量子計算の資源として使えることが示された。ゲート演算の列によって量子演算を定義するような回路モデルの量子計算に対して、このような量子計算のモデルは測定ベース量子計算 (Measurement based quantum computation) または一方量子計算 (one-way quantum computation) と

呼ばれる。クラスター状態は格子点においた量子ビットに対して、再近接の量子ビットとの間で制御  $\sigma_z$  演算を行うことによって作る事ができる。さらに一般的なグラフで定義されるような graph 状態と呼ばれるエンタングルメントを量子計算の資源として用いることも可能である。

我々は、graph 状態のうちのあるクラスに属する状態に関して、エンタングルメント頑強性・相対エントロピーによるエンタングルメント・幾何学的エンタングルメント測度などの、多体間距離的エンタングルメント量を導出することに成功した。[2] このクラスには、任意の  $d$  次元クラスター状態や GHZ 状態、そして関連する混合状態が含まれる。これらの距離的エンタングルメント量は、LOCC 状態識別可能数の最大値と関連し、量子状態に符号化された古典情報の LOCC による復号化通信容量の限界値を導くものである。この研究は、英国 Imperial College の S.S. Virmani 博士、オーストリア Innsbruck 大学の三宅章雅博士との共同研究の成果である。

### 量子状態への LOCC による古典情報符号化

量子系の持つ非局所性が古典情報を量子系に符号化・復号化する際に与える影響を考えるために、多者間で共有するエンタングルした量子状態に対して局所操作のみで全次元数の古典情報を符号化するための条件および符号化方法を求めた。[3] この問題は、一般的には多くの変数に対して大域的な探索を行う必要があるため非常に困難な問題となるが、我々は群論的な考察を行うことによって、古典情報符号化可能なエンタングル状態の集合を見だし、それらに対する符号化方法を求めることに成功した。LOCC による古典情報符号化可能な状態としては、積状態に Clifford 演算子を作用させることによって作られるエンタングル状態他に、我々が擬 Clifford 状態と名付けたより広いクラスのエンタングル状態が該当する。近年、graph 状態など、Clifford 演算子を作用させることによって得られる状態の解析が進んでいるが、我々の研究は非 Clifford 状態においても大域的な探索の困難に打ち勝つ場合を見出したという点で興味深い。

### LOCC 量子情報破壊

エンタングル状態に符号化した大域的に共有された量子情報を LOCC 操作のみによって破壊可能であるための必要十分条件を求めた。これは、2 者間で共有する量子ビット情報を、どちらか一方の局所的な操作のみによって、測定後の状態には量子情報が存在しないように不可逆に破壊するタスクである。その結果、LOCC による量子情報抽出と同様に、片方の量子ビットを測定することで量子情報を完全に破壊することは可能であるが、もう片方の量子ビットの測定では完全に量子情報を破壊することはできない、というような、量子ビット情報の非対称な共有

の仕方があることが判明した。しかし、この共有は、LOCC 量子情報抽出とはまったく逆の条件となり、純粋状態への符号化を行っている限り、LOCC 量子情報抽出と LOCC 量子情報破壊の条件を同時に満たすことはできないことが判明した。この研究は、東京大学大学院数理科学研究科の緒方芳子博士との共同研究の成果である。

### 測定ベース量子計算の実用的拡張に関する考察

従来の計算モデルである量子回路モデルに基づいた量子計算では、意味のある計算を実現するには一般的に対象となる量子系に対し膨大な回数のユニタリ操作 (unitary operation) を行う必要がある。そのためエラーに対して非常に敏感になってしまうことが実用的な量子計算機の実現を妨げている大きな要因の一つになっている。それに対し、量子計算の新しい計算モデルである測定ベース量子計算ではユニタリ操作よりはるかに実現が容易な測定を主に使用することによりエラーに対する頑強性 (robustness) を格段に高めることができると期待されている。また、測定ベース量子計算の各操作は群論でいう stabilizer への変換操作に置き換えられることも知られている。

我々は測定ベース量子計算が実用的な物理設計で活用できるようにするための拡張を考察した。その結果、Raussendorf や Briegel が初め提案したタイプの測定ベース量子計算では、その群論的構造のみが重要なことが判明した。このことから、群論的性質が同じならばいかなる量子系操作でも測定ベース量子計算が実現可能だと結論付けられた。現在可能であるような量子系の測定技術において、測定ベース量子計算と同じ群論的性質を持つものを発見することができれば、既存の技術で量子計算機を開発することも可能となるだろう。

### 3 体系における最大エンタングル状態の探索

3 体以上の多体系の量子状態は、LOCC の下での変換性に関して全順序集合ではないため、2 体の場合のように絶対的な最大エンタングル状態というものはない。しかし、それぞれのエンタングルメント測度に対する最大エンタングル状態を定義することは可能である。距離的エンタングルメント測度について最大エンタングル状態を求めるということは、これまでの我々の研究によって、エンタングル状態に符号化された古典情報を局所操作のみで抽出することが最も困難であるような状態を求めることがわかっており、情報の秘密共有 (secret sharing) などの量子暗号への応用が期待される。しかしながら、一般的な状態については、大域的最適化問題の困難性によって距離的エンタングルメント測度を求めることが難しく、3 量子ビット・4 量子ビットなどの小数自由度系の純粋状態についてさえ、距離的エンタングルメント最大の状態が何であるか未だ知られていない。そこで、数値計算により 3 体系

におけるより高い距離的エンタングルメントを持つ状態を探索を行っている。

### 5.2.2 マクロな系におけるエンタングルメント

ここ数年、物理の様々な分野でエンタングルメントの存在とその役割を理解するための多大なる努力がなされてきた。例えば、凝縮系物理の臨界現象や高エネルギー物理での対称性の破れ、ホーキング放射などにもエンタングルメントの存在が関連づけられてきており、マクロな系でもエンタングルメントが絶対零度以外で存在し得ることが証明された。我々は、統計力学で記述されるようなマクロな系における多体間エンタングルメントと物性との関連を探索する研究を進めている。

#### 熱平衡状態における多体間エンタングルメント

マクロな系における多体エンタングルメントの性質をよりよく理解するために、有限温度の熱平衡状態における多体エンタングルメント保持性を、エンタングルメントの距離的測度を用いて解析した。その結果、エンタングルメントの距離的測度であるエンタングルメント頑強性の大きな基底状態を持つ熱平衡状態において、エンタングルメントの存在を保証する臨界温度を導出することに成功した。[4] この結果は、量子情報におけるエンタングルメントと統計力学における分配関数を関連づけるものであり、マクロな系におけるエンタングルメントと物性として現れる性質との関連を探るための最初の一步であり、今後の発展が期待される。この研究は、英国 Leeds 大学 V. Vedral 教授、シンガポール国立大学 J. Anders 氏との共同研究である。

#### 測定ベース量子計算におけるエンタングルメントと相転移

量子計算における解を秩序変数として捕えることによって、測定ベース量子計算を情報についてのある種の相転移過程として考察した。その結果、エネルギーや温度、仕事などの標準的な熱力学的量とエンタングルメント量、時間、普遍的量子計算可能性などの量との間の類似性を見いだした。この描像は、計算終了までにかかる必要臨界時間の見積りや 1 次元における測定ベース量子計算での適切なアーキテクチャーなどの指針を与えることを可能とする。[5] この研究は、英国 Leeds 大学 V. Vedral 教授、M. Hajdusek 氏、シンガポール国立大学 J. Anders 氏との共同研究である。

#### 一次元スピン鎖における多体間エンタングルメント

絶対零度系の量子相転移ではエンタングルメントが重要な役割を担っていると考えられている。我々は一次元スピン鎖に注目し、量子相転移とエンタングルメントの関係を考察した。先行研究として、一次元スピン鎖の基底状態のエンタングルメントを計算した研究は存在するが、多くは二体間エンタングルメント量の計算であった。しかし、近年、量子相転移を考える際には二体間のエンタングルメントだけでは不十分であることが示唆されており、我々は量子相転移に関係している多体間エンタングルメント量を探ることを目的として、特に一次元 XY モデルの基底状態を調べた。その結果、相転移点以外で相関関数が劇的に変化する場合があること、その変化点では基底状態が分離可能な状態になっていることが分かった。このことは、相関関数の振る舞いを知るためには熱力学的議論だけでは不十分で、基底状態そのものを考察しなければならない場合があることを示唆している。その考察に基づき、相関関数の振る舞いを特徴付けるエンタングルメント状態を突き止め、定量化する研究を行っている。また、有限温度系ではエンタングルメントが減少すると考えられているが、温度とエンタングルメントの定量的関係を明らかにするために、1 次元 XY モデルにおいて基底状態の幾何学的エンタングルメント測度に注目して研究を進めている。

### 5.2.3 エンタングルメントの応用研究

#### 計算量的秘匿量子演算

暗号論における認証問題の安全性を量子論を用いて強化するために、計算量的秘匿量子計算 (Computational blind quantum computation) を提案し、その安全性を考察した。ここで言う認証問題とは、送信者と受信者の間で暗号通信を行う際に、正規の受信者のみが復号化に成功するようになるというものである。秘匿量子計算は、受信者から送られたエンタングルした量子状態 (量子秘密鍵) と、事前に公開され認証された量子ゲート回路情報 (古典公開鍵) を用いて送信者が暗号化を行うものと定義される。我々は、計算量的秘匿量子計算の安全性が公開された量子ゲート回路の分解問題に基づいており、さらにその計算量的複雑性が複雑性クラス QMA 困難にあることを示した。今回の研究成果は、量子計算機による複雑性クラス BQP 以上の複雑性クラス QMA に安全性の根拠をもつため、量子計算機を用いても安全であることが期待される。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] M. Owari, M. Hayashi, *Local Copying and local discrimination as a study for non-locality of a set of states*, Physical Review A, **74**, 032108 (2006)
- [2] D. Markham, A. Miyake and S. Virmani, *Entanglement and local information access for graph states*,

arXiv:quant-ph/0609102 (to appear in N. J. Phys.)

- [3] Y. Tanaka, D. Markham and M. Muraio, *Local encoding of classical information onto quantum states* arXiv:quant-ph /0702190 (to appear in J. Mod. Opt.)
- [4] D. Markham, J. Anders, V. Vedral and M. Muraio, *Survival of entanglement in thermal states* arXiv:quant-ph/0606103
- [5] J. Anders, D. Markham, V. Vedral and M. Hajdusek, *How much of one-way computation is just thermodynamics?* arXiv:quant-ph/0702020
- [6] M. Owari, S. L. Braunstein, K. Nemoto, Mio Muraio,  *$\epsilon$ -convertibility of entangled states and extension of Schmidt rank in infinite-dimensional systems*, arXiv:quant-ph/0609167

(学位論文)

- [7] 尾張正樹, *Quantum information processing under local operations and classical communications*, 博士論文
- [8] 田中雄, *Enhancement of information security using quantum theory*, 修士論文
- [9] 浜地慎一郎, *High precision measurements with quantum optics*, 修士論文

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [10] Damian Markham, Masahito Hayashi, Mio Muraio, Masaki Owari, Shashank virmani, *Distance-like Multipartite Entanglement Measures Bound LOCC State Discrimination*, XXXVIII Symposium on Mathematical Physics "Quantum Entanglement and Geometry", Torun (Poland), June 2006
- [11] Masaki Owari, Keiji Matsumoto, Masahito Hayashi, *A computable Bounds of Deterministic LOCC Discrimination in a Multipartite System*, Asian Conference on Quantum Information Science 2006, 北京 (中国), September 2006
- [12] Masaki Owari, Masahito Hayashi, Damian Markham, Mio Muraio, Shashank Virmani, *Multipartite distance like measure of entanglement for a class of symmetric states*, The 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement, and Computing, 筑波, November 2006
- [13] D. Markham, A. Miyake and S. Virmani, *Entanglement and local access of information for graph states*, The 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement, and Computing, 筑波, November 2006

(国内会議)

一般講演

- [14] Masaki Owari, Keiji Matsumoto, Masahito Hayashi, *状態識別における一方向 LOCC と二方向 LOCC の違いについて*, 第 14 回量子情報技術研究会 (QIT14), 東京, May 2006

(セミナー)

- [15] Damian Markham, *Entanglement and local access of information*, ERATO-SORST, Tokyo, JAPAN, July 2006
- [16] Damian Markham, *Multipartite Entanglement in Quantum Information*, National University of Singapore, Singapore, August 2006
- [17] Damian Markham, *Multipartite Entanglement in Quantum Information.*, University of Leeds, UK, September 2006
- [18] Mio Muraio, *Asymmetric qubit information sharing*, Tokyo Workshop on Information and Locality (TWIL), University of Tokyo, Tokyo, November 2006
- [19] Mio Muraio, *Locally encoding classical information on entangled states and Asymmetric quantum information sharing*, NII-Waterloo workshop, University of Waterloo, Waterloo (Canada), March 2007

## 6 一般物理実験

### 6.1 牧島研究室 + 中澤研究室

国分紀秀助手は、2006年12月1日付で、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)・宇宙科学研究本部へ助教として転出し、かわって中澤知洋講師が2007年4月1日付で着任した。

#### 6.1.1 「すざく」衛星の運用と稼働状況

- 宇宙X線衛星「すざく」[21, 144, 145]

2005年7月10日に打ち上げられた日本5機目の宇宙X線衛星「すざく」は、2006年4月から公募体制に移行し、JAXA、NASA、およびESAで競争的に選ばれた観測提案にもとづき順調に観測を続けている。我々は国分、川原田、中澤 (当時JAXA)らを中心に、衛星の運用を支援し、搭載されたHXD装置の運用を担当するとともに、初期に得られた衛星チームの占有データ (占有権は2007年5月末まで)、および公募観測で獲得したデータの解析を続けた。

- 硬X線検出器 (HXD) とその運用 [22, 23]

「すざく」に搭載された硬X線検出器 (HXD; Hard X-ray Detector) は、我々がJAXA、広島大、埼玉大、理研、金沢大、阪大、青学大、Stanford大などと協力して開発した装置で、撮像機能は持たないが、10–600 keVの広帯域で世界最高レベルの感度を実現している。昨年度に引き続き、本研究室はHXDの運用とその軌道上較正に、中心的な役割を担った [36, 38, 68, 67, 76, 105, 108, 130]。また較正データベースを全世界に公開し、データ処理ソフトウェアの開発と公開に努めた。

HXDは個々のイベントの到来時刻を61  $\mu\text{sec}$ の精度で計測する機能をもつ。榎戸らは理研などと共同し、かにパルサーをRXTE衛星や電波望遠鏡などと同時に観測し、時刻づけ精度を確認した [60, 85]。

- HXDのバックグラウンド [23, 83, 106, 107]

HXDは10–70 keVの検出素子として2 mm厚のシリコンPINダイオードを用い、その背後には、50–600 keVを受け持つGSOシンチレータを置く。それらのバックグラウンドは、軌道上で2~3倍の変動を示すため、それを精度よくモデル化し観測データから差し引く必要がある。

PINはBGOシンチレータで堅くシールドされているため、優れた低バックグラウンド特性をもつが、そのカウント数は地磁気緯度に相関して変動する。そこで北口らは、UC Berkeley、JAXAなどと協力

し、モンテカルロツールMGGPODを用いて評価を進めた結果、宇宙線が大気に突入して作る中性子が衛星高度まで逆流し、PINバックグラウンドの主因となっている可能性を突き止めた [109]。

GSOのバックグラウンドは、地磁気緯度に相関する成分に加え、南大西洋地磁気異常帯を通過するさいに検出器が陽子照射で放射化することによる成分 (短期、長期)の寄与が大きい [15]。山田らはGSOバックグラウンドデータに対し、フラクタル次元解析および主成分解析を行い、それらを独立に変動するスペクトル成分に分解する試みを行っている [61, 110]。

- シリコンPINダイオードの放射線照射試験

HXD-PINは500 Vの逆バイアスを印可して空乏化しているが、打ち上げから今日まで、64個のPINのうち2個でリーク電流の増加が起き、その系統の高圧を400 Vに下げる必要が生じた。これは放射線損傷に起因する可能性があるため、川原田らを中心に3月と4月に工学部総合試験所にて、フライト品相当の4個のPINダイオードに、軌道上で約10年間に浴びる線量に相当する $^{137}\text{Cs}$ を照射し、特性の変化を検証した。現在データ解析中である。

#### 6.1.2 星と太陽の物理学

- 進化した星での炭素合成 [12, 63, 66, 94, 56]

昨年度に村島らは「すざく」CCDカメラ (XIS)の優れた特性を活かし、惑星状星雲 (進化した星の最終形態) BD+30° 3639を観測し、X線を放射するプラズマの炭素と酸素の比が、宇宙組成比を90倍も凌駕することを発見した。これはヘリウムから炭素が合成される現場を、世界で初めて捉えた結果である。今年度は、ビッグバンセンターの須田、北大の藤本らと協力し、成果の公表に努めた。

- 中質量星からのX線放射 [40, 41, 14]

低質量星は磁気コロナ、大質量星は星風を起源とするX線を放射するが、中質量星はどちらの機構も欠くため、X線が微弱と考えられていた。柳田らはChandra衛星の公開データを用い、多数の星形成領域に含まれる中質量星を研究した結果、若い中質量星 (2~10  $M_{\odot}$ ) は、巨大なX線フレアを含む活発なX線放射を示すこと (図6.1.1)を突き止めた。これら若い星は、周囲の降着円盤との間に磁気架橋をもつか、連星に伴う磁気活動を起こしていると考えられる。これは柳田の博士学位論文となった [43]。

- 「すざく」による太陽フレアの研究

HXDシールド部は、0.05–5 MeVの広帯域で全天を監視する、WAM (Wide-Band All-Sky Monitor)機能も有する [37, 39, 131, 77, 131]。我々は埼玉大、青学大、理研、広島大、JAXAなどと共同し、WAMによる観測を進めた結果、2007年4月末までに120例を越すガンマ線バーストを [78, 93]、また太陽極小期にもよらず20例を越す太陽フレアを検出した [111]。2006年12月には、数例のXクラスフレアから、数MeVまでのスペクトルを得た。

堅固にシールドされたHXDを利用し、太陽フレ

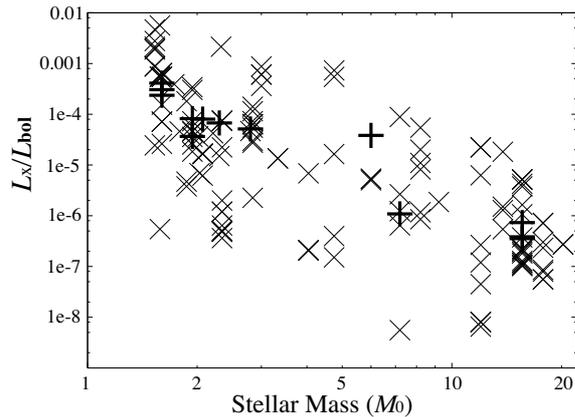


図 6.1.1: X-ray to bolometric luminosity ratios of intermediate-mass stars, observed in nearby star-forming regions observed with *Chandra*. Thick crosses indicate those sources which produced X-ray flares [43].

アに伴う中性子の探査も開始した。天文台の古徳と協力し、フレアのガンマ線が太陽表面でコンプトン散乱される効果の研究を進め、投稿論文とした [9]。

### 6.1.3 コンパクト天体からのX線放射

#### ○ X線パルサー [52, 147]

強磁場中性子星はパルサーとも呼ばれ、回転駆動と降着型に分類できる。今年度はHXDの時刻付け検証を兼ねて、回転駆動パルサーの代表として、「すざく」による、かにパルサーの詳しい観測を続けたほか、SN1987Aでのパルサー探しを続行した。「すざく」第2期公募観測には、マグネター天体の観測時間を得た。

降着型パルサーではX線スペクトル中に、電子サイクロトロン共鳴構造が現れ、磁場計測に利用できる場合がある [13, 11, 88]。榎戸らは理研と協力し、降着型パルサー Her X-1 の「すざく」データを解析した結果、既知の  $\sim 38$  keV のサイクロトロン基本共鳴に加え、その倍波共鳴を確認できた。

#### ○ 白色わい星での加速現象 [50, 55, 124]

回転駆動パルサーに比べ、強磁場白色わい星は、磁場は弱い、誘導起電力の強さでは遜色ない場合がある。理研の寺田らと協力し、高速自転する強磁場白色わい星 AE Aqr の「すざく」データを、昨年度に続き解析した。その結果、 $\sim 40$  keV までの硬X線が、33秒の周期でパルスしており、そのパルス波形は、質量降着に伴う熱的X線とは異なり、かにパルサーに似た鋭い二山構造をもつことを突き止めた。

#### ○ ブラックホール連星

広島大の高橋 [弘]、立教大の北本、JAXAの堂谷、理研の久保田らと協力し、A. Zdziarski の協力も得て、「すざく」で観測したブラックホール連星の解析を進めた [27, 69, 51, 47, 89, 90, 91]。降着円盤を上から見ている Cyg X-1 と、横から見ている

GRO J1655-40 [81, 140] の比較に焦点を当てた結果、ともに Low/Hard 状態にあった2天体のスペクトルは、それぞれ2種類の光学的厚みをもつ熱的コンプトン過程を考えると、0.5-200 keV の広帯域にわたり統一的に説明できることを発見した [8, 133]。図 6.1.2 は2天体のスペクトルの比であり、 $> 30$  keV で比が徐々に上昇することから、GRO J1655-40の方が系統的に大きな光学的厚みを持ち、よってコンプトン雲はやや扁平と考えられる [42]。低エネルギー側では、Cyg X-1の方が低温円盤が見えやすいため、比が1より低下する。

山田らは、速い時間変動にともない、Cyg X-1の広帯域スペクトルがどのように変化するか、新たな視点から研究を開始した。

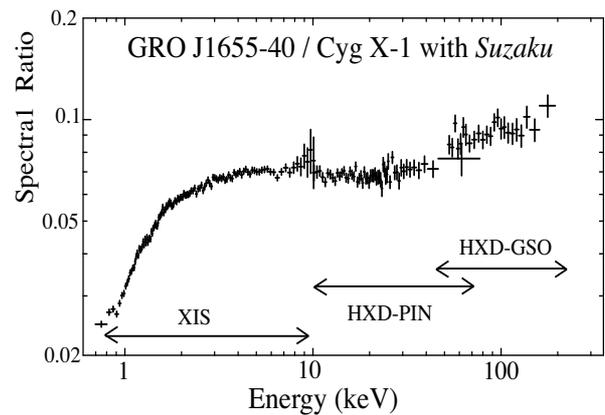


図 6.1.2: Ratios of the *Suzaku* spectra of two black-hole binaries, GRO J1655-40 and Cyg X-1. The deviation of the ratios from a constant is thought to reflect the inclination difference between the two objects. [42]

#### ○ ULX 天体

ULX (Ultra-Luminous compact X-ray) 天体は、中質量ブラックホールの有力候補で、我々は広島大の水野、理研の久保田や磯部、理科大の宮本などと協力し、総合的に研究している [46, 47, 132]。「すざく」や *XMM-Newton* を用いて NGC 1313 銀河にある2つの ULXなどを研究した結果、それらが太陽の数十倍の質量をもつ中質量ブラックホールであるという描像を一段と強化し [31, 4]、2つの一方にはハイパーノバの残骸とおぼしきプラズマの放射が伴う可能性を突き止めた [120, 134]。

理研の磯部らと協力し、「すざく」が NGC 4945 銀河に発見したトランジェント ULX が、回転ブラックホールである可能性を得た [92, 121]。宮脇らは「すざく」HXDを用い、M82 銀河にある ULX を 10 keV 以上で検出することに成功した [123, 135, 47, 42]。これは ULX から初めての、硬X線の検出である。

#### ○ 活動銀河核 (AGN)

伊藤らは理研の磯部や Durham 大の C. Done らと協力し、「すざく」の試験観測期間に観測された2

型セIFAート NGC 4945 の解析を進めた [54, 70, 80, 98, 58]。その硬 X 線は数十分で強く変動することから、ぶ厚い吸収体を通じた AGN 放射が硬 X 線の大部分を占め、遠方の大きな散乱体から戻ってくる硬 X 線は微弱であることを突き止めた。この結果、吸収体は視線方向に限って存在するという、新しい可能性が強まった [58, 136]。

伊藤を PI とし、低光度 AGN の代表として、M81 と NGC 4258 を「すざく」で観測した [137]。

#### 6.1.4 広がった宇宙プラズマからの X 線

##### ○ 銀河系に付随するディフューズ X 線放射

昨年度は、JAXA、京大など共同して、「すざく」を用いた銀河系ディフューズ X 線の研究を進め、銀河中心を含む銀経  $\pm 1.5^\circ$  銀緯  $\pm 0.5^\circ$  の領域から、高温の強い熱的放射に加え光子指数 2~3 程度の非熱的放射を検出することに成功した [49]。図 6.1.3 に、そのスペクトルを示す。XIS では、強いイオン輝線を伴う高温 ( $\sim 10^8$  K) の熱的放射が受かっている。視野中心に点源がある場合 (実線) に比べ、視野の大きな HXD が、ずっと強い信号を受けていることから、放射はディフューズである可能性が高い。

湯浅、国分らは今年度、HXD の視野内に混入する可能性のある点源の強度を、他の衛星などの情報を用いて推定し、それらの影響を差し引いても硬 X 線放射が残ることを検証した [95, 48, 62, 79, 95, 96, 125, 126]。このことから、星間空間で広く粒子加速が起きており、たとえば超熱的電子が制動放射で硬 X 線を放射していることが示唆される。

以上を受け「すざく」第 1 期と第 2 期の公募観測では、国分を PI とし、より広い領域をマッピング観測する作業が進んでいる [48, 49]。この研究は、XIS の優れたエネルギー分解能と広がった放射に対する高い感度、HXD のもつ高感度と絞られた視野、XIS と HXD の連続したエネルギー帯など、「すざく」の特徴を活かした重要な観測テーマである。

##### ○ 球状星団の運動に伴う衝撃波

2005 年度に岡田が着手した、球状星団が銀河系ハロー内を運動するさいの X 線放射を、論文として投稿した [7]。衝撃波で準相対論的な超熱的な電子と、相対論的な逃走電子が作られている可能性が高い。対象天体の中から 47 Tuc を選び、湯浅を PI として「すざく」に観測時間を確保した。

##### ○ 銀河と銀河団プラズマの相互作用

牧島らは、「銀河団プラズマ中を運動する銀河は、プラズマから磁気流体的な抵抗を受け、銀河団ポテンシャルの底に沈む」という独創的な描像を提唱しており、その論文で受賞した [3]。この描像を検証するには、銀河と銀河団の相互作用をさまざまな角度から検討する必要がある。

今年度は理研の太田らと協力して、「すざく」によるケンタウルス銀河団のデータを解析し、プラズマは大きなバルクな速度をもたず、静水圧平衡にあると考えてよいことを確立した [34, 102]。首都大の佐

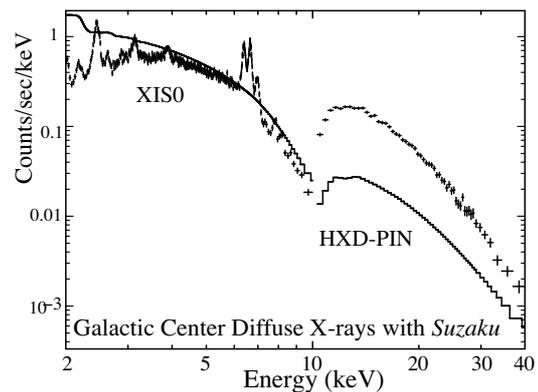


図 6.1.3: *Suzaku* spectra of the Galactic Center region. The XIS detects hot plasma emission with intense atomic lines, whereas the HXD observes non-thermal signals possibly from accelerated electrons. The solid curves indicate a prediction when a point source with a certain intensity is present at the field-of-view center.

藤らが主導した、「すざく」による Abell 1060 銀河の観測では、銀河団の中心でプラズマ加熱が起きている兆候を得た [6, 100]。銀河の運動の熱化が起きている兆候かもしれない。

北口らは理研の太田、埼玉大の浦田、天文台の児玉らと協力し、「すばる」で観測した遠方銀河団の可視光データを用い、X 線分布で規格化した銀河団の可視光の広がり、宇宙の進化とともに減少する効果を探査している。

##### ○ 銀河団プラズマ中の重元素の研究

X 線観測により銀河団プラズマ中の重イオンの特性 X 線を検出すると、宇宙における元素合成が探査できる。「すざく」XIS の優れた軟 X 線特性のお蔭で、酸素輝線の研究が大幅に進展した。川原田、理科大の松下、都立大の佐藤らは「すざく」の観測を通じ、多くの銀河団において、プラズマ中の鉄イオンは酸素イオンより強く中心に集中することを示した [33, 6, 86, 100, 103, 57, 114]。宇宙初期には銀河は現在より外側まで分布しており、当時の II 型超新星で作られた酸素は空間的に広がる一方で、銀河は宇宙年齢かけ、Ia 型超新星による鉄を放出しつつ、重力ポテンシャルの中心への落下してきたことが示唆される。川原田らはこの結果をさらに強化すべく、「すざく」に遠方銀河団 MS 1512.4+3647 の観測時間を獲得した。

##### ○ 銀河群および銀河団からの非熱的 X 線

銀河団や銀河群は、宇宙線の加速現場の候補として注目されている。中澤 (当時 JAXA)、牧島、広島大の深沢らは、「あすか」GIS のデータを再解析し、複数の銀河群から非熱的な放射の徴候を得た [5]。

昨年に続き「すざく」HXD を用いて、銀河団からの非熱的放射の探査も進められた。広島大との協力で、Abell 3376 銀河団では、非熱的信号に対して厳しい上限値を得た [104]。川原田、中澤らは、強い電

波ハローをもつ別の衝突銀河団 Abell 3667 銀河団を「すざく」で観測し、データ解析を進めている [128]。

北口らは静穏な銀河団に注目し、「すざく」HXD-PIN を用いて、ケンタウルス座銀河団、Abell 1060、およびペルセウス座銀河団を、10 keV 以上で検出することに成功した [82, 59, 127]。信号は熱的なものと解釈でき、異常に高温な成分などは見られない。

### 6.1.5 雷雲からのガンマ線の観測

雷雲中の電場は、 $\gtrsim 100$  kV/m に達する。大気中では粒子衝突が激しいため、電子は容易に加速されないが、宇宙線などで高速 ( $> 10$  keV) の電子が作られると、それらは加速されるほどクーロン散乱されにくくなり、大気分子によってアバランシェ増幅を繰り返す。その結果、相対論的な「逃走電子」が発生し、制動放射でガンマ線を放射すると期待される。じっさい雷に伴う放射線の増加が、原子力発電所の放射能モニターを含め、国内外で報告されている。

榎戸、山田、湯浅らは、理研の土屋らと協力し、自律型の放射線検出器を製作し、東京電力の協力を得て、2006 年 12 月下旬にそれを柏崎刈羽原発の建物の屋上に設置した。3 インチ径の円筒状 NaI シンチレータに、BGO のアクティブシールドを付加したものの 2 台を用意し、プラスチックシンチレータ、可視光の雷光検出器、雷鳴の音検出器なども製作した。

遠隔運転していたところ、2007 年 1 月 7 日の早朝、強い冬型気圧配置に伴う寒雷が活発になり、約 40 秒にわたり放射線の増加を検出した (図 6.1.4)。プラスチックシンチレータには増加が無いので、到来したのはガンマ線であり、それらは雷雲中で  $> 10$  MeV に加速された電子からの放射と解釈できる [74, 115, 141]。ガンマ線が落雷と同期せず、落雷に先行したことは興味深い。結果は榎戸の修士論文となり [44]、第 1 回の理学系研究科・研究奨励賞を受賞した [2]。

### 6.1.6 将来に向けての技術開発

#### ○ アバランシェフォトダイオード (APD) の開発

我々は、東工大、広島大などと共同で、アバランシェフォトダイオード (APD) を開発している。佐藤らはリバース型 APD ( $5 \times 5$  mm<sup>2</sup>, Hamamatsu S8664-55) のノイズ特性を調べるとともに、<sup>241</sup>Am を直接に照射することで、電子増幅の信号に加え、正孔の増幅信号を検出することに成功した。電子の増幅率を  $M_e$ 、正孔の増幅率を  $M_h$  とすると、 $(M_h - 1)/(M_e - 1) \approx 0.013$  が成り立ち、逆バイアス 400 V で、 $M_e \approx 80$ 、 $M_h \approx 2.0$  を得た [45]。12 個の  $3 \times 3$  mm<sup>2</sup> の APD を一列に並べた spl4651 を使い、大型 BGO 結晶シンチレータからガンマ線蛍光を読み出すことに成功した [75, 113]。これらは佐藤の修士論文となった [45]。

○ Space Wire / Space Cube の利用法の開発  
SpaceWire は、次世代衛星の標準的なデータ収集・機器制御プロトコルとして、世界的に開発が進めら

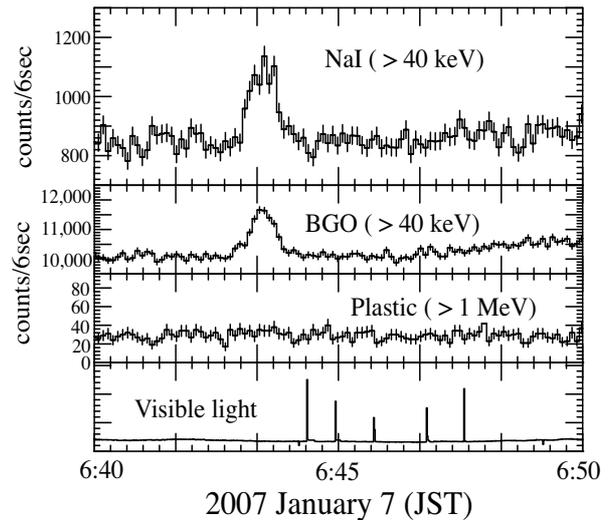


図 6.1.4: Count-rate histories of three scintillators, installed at Kashiwazaki, Niigata. An episode of prolonged gamma-ray emission from thunderclouds was observed on 2007 January 7. The spectrum extends up to  $\approx 10$  MeV. The bottom panel, output of an optical sensor, recorded five lightning discharges.

れている。Space Cube は、それに適合した超小型の宇宙用 CPU で、OS として TRON などを搭載できる。我々は、湯浅、国分らを中心に、JAXA (高橋 [忠]、小高ら)、シマフジ電気などと協力し、その開発を行っている。今年度は、C++言語により Space Wire の汎用のデータ収集ソフトウェア群を作成するとともに、位置検出型ガンマ線検出器の読み出し (次項) に応用した [112]。

坪野研究室による、Space Wire / Space Cube を用いたスペース重力波の技術実証のための小型衛星プラットフォーム計画 (SWIM) にも、JAXA などとともに協力している [116, 117, 118, 119]。

#### ○ 撮像型ガンマ線検出器の開発

伊藤らは昨年度に続き、薄い短冊型の GSO 結晶を重ねたものを、1 次元の半導体光検出器で読み出すことで、 $\sim 0.4$  mm の位置分解能をもつ、1 次元の位置検出ガンマ線検出器を開発した [17, 20, 65]。

湯浅らは昨年の中平らの成果を受け、4 mm 角の柱状 LaBr<sub>3</sub> 結晶を  $10 \times 10$  で並べ、位置有感フォトチューブ (浜松 H9500) に付け、256 本の信号を専用ヘッドアンプ (クリアパルス 80158) を通して、Space Wire で読み出すことに成功した [112]。

柳田らは、これら撮像検出器に用いる無機シンチレータの開発を続け [64, 138, 16]、多結晶シンチレータに関する講演により受賞した [1, 19]。

#### ○ NeXT 衛星に向けての準備 [73, 139, 35]

日本の多くの機関と協力して、「すざく」の後継機 NeXT (NEw X-ray Telescope) ミッションの提案を進めている。これは、 $\sim 70$  keV まで集光できるスー

パーミラーに、硬X線の撮像検出器を組み合わせたものを主力装置とし、「すざく」HXDをさらに改良して撮像機能をもたせた軟ガンマ線検出器や、「すざく」で実現できなかったカロリメータを搭載するものである。2012年頃の打ち上げを旨ざしており、JAXA宇宙理学委員会では、ASTRO-G(電波干渉計)計画に続く理学ミッションとして認定されている。

<【受賞】>

- [1] 柳田健之、日本セラミックス協会特定セッション(第19回秋季シンポジウム、2006年9月) 若手優秀発表賞
- [2] 榎戸輝揚、第1回理学系研究科研究奨励賞・修士の部(2007年3月)
- [3] 牧島一夫ほか、第11回日本天文学会欧文研究報告論文賞(2006年3月29日)、Makishima *et al.*: *Publ. Astr. Soc. Jp.* **53**, 401-420, “X-Ray Probing of the Central Regions of Clusters of Galaxies” に対し

<【報文】>

(原著論文)

- [4] Tsunoda, N., Kubota, A., Namiki, M., Sugiho, M., Kawabata, K., & Makishima, K.: “Detailed Spectral Study of an Ultra-Luminous Compact X-Ray Source, M81 X-9, in the Disk-Dominated State”, *Publ. Astr. Soc. Jp.* **58**, 1081-1088 (2006)
  - [5] Nakazawa, K., Makishima, K., & Fukazawa, Y.: “Hard X-Ray Properties of Groups of Galaxies as Observed with ASCA”, *Publ. Astr. Soc. Jp.* **59**, in press (2007)
  - [6] Sato, K., (5名), Kitaguchi, T., Kawaharada, M., Kokubun, M., Makishima, K., Ota, N., Nakazawa, K., (6名): “X-Ray Study of Temperature and Abundance Profiles of the Cluster of Galaxies Abell 1060 with Suzaku”, *ibid.*, in press (2007)
  - [7] Okada, Y., Kokubun, M., Yuasa, T., & Makishima, K.: “Chandra Detections of Diffuse X-ray Emission From Globular Clusters”, *ibid.*, in press (2007)
  - [8] Takahashi, H., Kitamoto, S., (5名), Kubota, A., Makishima, K., Itoh, T., Kokubun, M., (16名), “Low/Hard State Spectra of GRO J1655-40 Observed with Suzaku”, *ibid.*, in press (2007)
  - [9] Kotoku, J., Makishima, K., Matsumoto, Y., Kohama, M., Terada, Y., & Tamagawa, T.: “Effects of Compton scattering on the Gamma Ray Spectra of Solar flares”, *ibid.*, in press (2007)
  - [10] Isobe, N., Makishima, K., Tashiro, M., Itoh, K., Iyomoto, N., Takahashi, I., & Kaneda, H.: “The XMM-Newton Examination of Energetics in the East Lobe of the Nearby Radio Galaxy Fornax A (NGC 1316)”, *Astrophys. J.*, **645**, 256-263 (2006)
  - [11] Nakajima, M., Mihara, T., Makishima, K., & Niko, H.: “A Further Study of the Luminosity-Dependent Cyclotron Resonance Energies of the Binary X-ray Pulsar 4U 0115+63 with *RXTE*”, *Astrophys. J.* **646**, 1125-1138 (2006)
  - [12] Murashima, M., Kokubun, M., Makishima, K., (7名): “*Suzaku* Reveals He-burning Products in the X-ray Emitting Planetary Nebula BD +30° 3639”, *Astrophys. J. Lett.*, **647**, L131-L134 (2006)
  - [13] Terada, Y., Mihara, T., Nakajima, M., Suzuki, M., Isobe, N., Makishima, K., Takahashi, H., Enoto, T., Kokubun, M., Kitaguchi, T., (21名): “Cyclotron Resonance Energies at a Low X-Ray Luminosity: A0535+262 Observed with *Suzaku*”, *Astrophys. J. Lett.* **648**, L139-L142 (2006)
  - [14] Ezoe, Y., Kokubun, M., Makishima, K., Sekimoto, Y., & Matsuzaki, K.: “The Discovery of Diffuse X-Ray Emission in NGC 2024, One of the Nearest Massive Star-forming Regions”, *Astrophys. J.* **649**, L123-L128 (2006)
  - [15] Ozaki, M., Watanabe, S., Terada, Y., Itoh, T., Kit-sunezuka, M., Kishishita, T., Ishisaki, Y., Takahashi, T. “Framework for a Geant4-based Simulator of the Radiation Background and Detector Responses of the Space X-ray Observatory *Suzaku*”, *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, **53**, 1310 (2006)
  - [16] Takahashi, H., Yanagida, T., Kasama, D., Itoh, T., Kokubun, M., Makishima, K., Yanagitani, T., Yagi, H., & Shigeta, T.: “The Temperature Dependence of Gamma-Ray Responses of YAG:Ce Ceramic Scintillators”, *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, **53**, 2404 (2006)
  - [17] Itoh, T., Kokubun, M., Takashima, T., Honda, T., Makishima, K., Tanaka, T., Yanagida, T., Hirakuri, S., Miyawaki, R., Takahashi, H., Nakazawa, K., & Takahashi, T.: “Developments of a New 1-Dimensional  $\gamma$ -Ray Position Sensor Using Scintillators Coupled to a Si Strip Detector”, *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, **53**, 2983 (2006)
  - [18] Nakazawa, K., Takeda, S., Tanaka, T., Takahashi, T., Watanabe, S., Fukazawa, Y., Sawamoto, N., Tajima, H., Itoh, T., & Kokubun, M., “A high-Energy Resolution 4 cm-Wide Double-Sided Silicon Strip Detector”, *Nucl. Inst. Meth. A*, **573**, 44-47 (2007)
  - [19] Yanagida, T., Itoh, T., Takahashi, H., Sato, M., Enoto, T., Kokubun, M., Makishima, K., Yanagitani, T., Yagi, H., Shigeta, T., & Ito, T.: “Improvement of Ceramic YAG(Ce) Scintillator to  $(\text{YGd})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}(\text{Ce})$  for Gamma-ray Detectors”, *Nucl. Inst. Meth. A*, in press (2007)
  - [20] Itoh, T., Yanagida, T., Kokubun, M., Sato, M., Miyawaki, R., Makishima, K., Takashima, T., Tanaka, T., Nakazawa, K., Takahashi, T., Shimura, N., & Ishibashi, H.: “A 1-Dimensional  $\gamma$ -ray Position Sensor based on GSO:Ce Scintillators Coupled to a Si Strip Detector”, *Nucl. Inst. Meth. A*, in press (2007)
- Publ. Astr. Soc. Japan Vol. **59**, 「すざく」特集号
- [21] Mitsuda, K., (5名), Makishima, K., (49名), Kokubun, M., *et al.*: “The X-Ray Observatory *Suzaku*”, S1-S7

- [22] Takahashi, T., (以下順不同) Ezoe, Y., Fukazawa, Y., Hirakuri, S., Isobe, N., Itoh, T., Iyomoto, N., Kasama, D., Kawaharada, M., Kitaguchi, T., Kokubun, M., Kotoku, J., Kubota, A., Makishima, K., Matsumoto, Y., Miyawaki, R., Mizuno, T., Murashima, M., Nakazawa, K., Niko, H., Okada, Y., Ota, N., Sugiho, M., Takahashi, H., Takahashi, I., Tamura, T., Tashiro, M., Terada, Y., Yanagida, T., *et al.*: “Hard X-Ray Detector (HXD) on Board Suzaku”, S35-S51
- [23] Kokubun, M., Makishima, K., (以下順不同) Nakazawa, K., Terada, Y., Tamagawa, T., Kubota, A., Isobe, N., Takahashi, I., Takahashi, H., Hong, S., Kawaharada, M., Murashima, M., Miyawaki, R., Yanagida, T., Itoh, T., Hirakuri, S., Kitaguchi, T., Enoto, T., Sato, M., Yamada, S., Yuasa, T., *et al.*: “In-Orbit Performance of the Hard X-Ray Detector on Board Suzaku”, S53-S76
- [24] Hamaguchi, K., Petre, R., (11 名), & Kokubun, M.: “Suzaku Observation of Diffuse X-Ray Emission from the Carina Nebula”, S151-S161
- [25] Miyata, E., Katsuda, S., Tsunemi, H., Hughes, J. P., Kokubun, M., & Porter, F. S.: “Detection of Highly-Ionized Carbon and Nitrogen Emission Lines from the Cygnus Loop Supernova Remnant with the Suzaku Observatory”, S163-S170
- [26] Ueno, M., Sato, R., Kataoka, J., Bamba, A., Harus, I., Hiraga, J., Hughes, J.P., Kilbourne, C., Koyama, K., Kokubun, M., (12 名): “A Suzaku Observation of the Low-Ionization Fe-Line Emission from RCW 86”, S171-S176
- [27] Kubota, A., (10 名), Makishima, K., Yamada, S., Kohmura, T., & Angelini, L.: “Suzaku Discovery of Iron Absorption Lines in Outburst Spectra of the X-Ray Transient 4U 1630-472”, S185-S198
- [28] Matsumoto, H., Ueno, M., Bamba, A., (10 名), Hiraga, J., Yamauchi, S., Hughes, J. P., Senda, A., Kokubun, M., Kohmura, T., & Porter, S.: “Suzaku Observations of HESS J1616-508: Evidence for a Dark Particle Accelerator”, S199-S208
- [29] Bamba, A., Koyama, K., Hiraga, J. S., Hughes, J. P., Kohmura, T., Kokubun, M., (7 名), Yuasa, T., Maeda, Y., Matsumoto, H., Senda, A., Takahashi, T., Tsuboi, Y., Yamauchi, S., & Yuasa, T.: “Discovery of a Possible X-Ray Counterpart to HESS J1804-216”, S209-S214
- [30] Yamauchi, S., Ebisawa, K., Bamba, A., Ishida, M., Iwasawa, K., Tanaka, Y., Kokubun, M., (4 名): “Discovery of a New X-Ray Transient Source in the Scutum Region with Suzaku”, S215-S220
- [31] Mizuno, T., Miyawaki, R., Ebisawa, K., Kubota, A., Miyamoto, M., Winter, L., Ueda, Y., Isobe, N., (4 名), Kokubun, M., Kotoku, J., Makishima, K., (5 名), Tamagawa, T., & Terashima, Y.: “Suzaku Observation of Two Ultraluminous X-Ray Sources in NGC 1313”, S257-S267
- [32] Yaqoob, T., (6 名), Itoh, T., Kelley, R., Kokubun, M., (9 名): “Precision Fe K and Fe K Line Spectroscopy of the Seyfert 1.9 Galaxy NGC 2992 with Suzaku”, S283-S299
- [33] Matsushita, K., Fukazawa, Y., Hughes, J., Kitaguchi, T., Makishima, K., Nakazawa, K., Ohashi, T., Ota, N., (3 名): “Suzaku Observation of the Metallicity Distribution in the Intracluster Medium of the Fornax Cluster”, S327-S338
- [34] Ota, N., Fukazawa, Y., Fabian, C., Kanemaru, T., Kawaharada, M., Kawano, N., Kelley, R., Kitaguchi, T., Makishima, K., (7 名): “Suzaku Observations of the Centaurus Cluster: Absence of Bulk Motions in the Intracluster Medium”, S351-S359
- (会議抄録)
- [35] Nakazawa, K., Fukazawa, Y., Kamae, T., Kataoka, J., Kokubun, M., Makishima, K., (6 名), Tamagawa, T., Terada, Y., *et al.*: “Hard X-ray Imager for the NeXT Mission”, *SPIE* **6266**, 62662H (2006)
- [36] Fukazawa, Y., (5 名), Makishima, K., Kokubun, M., Kawaharada, M., Murashima, M., Miyawaki, R., Yanagida, T., Itoh, T., Kitaguchi, T., Hirakuri, S., Enoto, T., Sato, M. (9 名), Terada, Y., Tamagawa, T., Kubota, A., *et al.*: “Inflight Calibration & Performance of the Hard X-ray Detector (HXD) onboard *Suzaku*”, *SPIE* **6266**, 62662L (2006)
- [37] Yamaoka, K., Sugita, S., Ohno, M., Takahashi, T., Fukazawa, Y., Terada, Y., Tamagawa, T., (10 名), Miyawaki, R., Enoto, T., Kokubun, M., Makishima, K., & Murakami, T.: “In-Orbit Performance of the *Suzaku* Wideband All-Sky Monitor”, *SPIE* **6266**, 626643 (2006)
- [38] Kitaguchi, T., Kokubun, M., Kawaharada, M., Murashima, M., Miyawaki, R., Yanagida, T., Itoh, T., Hirakuri, S., Enoto, T., Sato, M., Makishima, K., Takahashi, T., Nakazawa, K., *et al.*: “In-Orbit Calibration of the Hard X-ray Detector (HXD-II) onboard *Suzaku*”, *SPIE* **6319**, 63190U (2006)
- [39] Yamaoka, K., Sugita, S., Ohno, M., Takahashi, T., Fukazawa, Y., Terada, Y., Endo, Y., Hong, S., Abe, K., Onda, K., Tashiro, M., Enoto, T., Miyawaki, R., Kokubun, M., Makishima, K., *et al.*: “*Suzaku* Wide-Band All-Sky Monitor Observations of GRB Prompt Emissions”, *AIP Conf. Proc.* **836**, 201-204 (2006)
- [40] Yanagida, T., Ezoe, Y., Kawaharada, M., Kokubun, M., & Makishima, K.: “*Chandra* Observations of OB stars in the Cygnus OB2 Association”, *Active OB-Stars: Laboratories for Stellar and Circumstellar Physics, Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **361** p. 533 (2007)
- [41] Yanagida, T., Ezoe, Y., Kawaharada, M., Kokubun, M., & Makishima, K.: “Large X-ray Flares from B-type Stars, HD 261902 and HD 47777, in NGC 2264 Observed with *Chandra*”, *ibid.*, p.533 (2007)

- [42] Makishima, K.: “X-ray Study on Stellar/ Intermediate Mass Black Holes”, *Prog. Theor. Phys.* in press (2007)  
(学位論文)
- [43] Yanagida, Takayuki: “Investigation of X-ray Flares from Intermediate Mass Stars”, 博士学位論文
- [44] 榎戸輝揚:「雷雲電場における粒子加速の観測的研究」, 修士学位論文
- [45] 佐藤光浩:「1次元 APD アレイの宇宙利用に向けた基礎実験」, 修士学位論文
- <【学術講演】>
- (国際会議)
- 招待講演
- [46] Makishima, K., Kubota, A., Miyawaki, R., & Mizuno, T.: “Observational Evidence for Intermediate-Mass Black Holes: Ultra-Luminous X-ray Sources”, IAU Symp. 238, *Black Holes from Stars to Galaxies* (2006 Aug. 21-25, Prague)
- [47] Makishima, K.: “X-ray Study on Stellar/ Intermediate Mass Black Holes”, *The Extreme Universe in the Suzaku Era* (2006 Dec. 4-8, Kyoto)
- [48] Kokubun M., Yuasa, T., Tamura, K., Makishima K., (11 名), Bamba, A., Senda, A., *et al.*: “Hard X-ray Investigation of the Galactic Center Region with *Suzaku*”, *ibid.*
- 6th INTEGRAL Workshop, *The Obscured Universe* (2006 July 2-8, Moscow) 一般講演/ポスター発表
- [49] Kokubun, M., Makishima, K., Takahashi, T., & the *Suzaku* Team: “Hard X-ray view of the Milky Way Galaxy obtained with the HXD onboard *Suzaku*”, (口頭)
- [50] Terada, Y., Ishida, M., Mukai, K., Makishima, K., Dotani, T., Gallo, L., Naik, S., & Enoto, T.: “A High-Sensitivity *Suzaku* Observation of Possible Non-Thermal Emission from a White Dwarf”
- [51] Takahashi, H., (5 名), Kubota, A., Miyawaki, R., Yamaoka, K., Itoh, T., Kokubun, M., Makishima, K., (10 名): “*Suzaku* Broadband Observations of Galactic Black Hole Binaries”, (口頭)
- [52] Enoto, T., Terada, Y., Miyawaki, R., Kokubun, M., Makishima, K., Mihara, T., Nakajima, M., Suzuki, M., *et al.*: “Wide-band study of X-ray pulsars with *Suzaku*”, (ポスター)
- 36th COSPAR Scientific Assembly (2006 July 16-23, Beijing) 一般講演/ポスター発表
- [53] Takahashi, H., & Makishima, K.: “X-ray Study of Mass-Accretion Flows onto Weakly-Magnetized Neutron Stars”
- [54] Isobe, N., Griffiths, R., Itoh, T., Anabuki, N., Awaki, H., Dewangan, G., Madejski, G., Makishima *et al.*: “*Suzaku* observation of nearby Seyfert 2 galaxy NGC 4945”
- [55] Terada, Y., Ishida, M., Mukai, K., Dotani, T., Makishima, K., Gallo, L., Naik, S., & Enoto, T.: “Possible *Suzaku* Detection of Non-Thermal X-ray Signals from a Rotating Magnetized White Dwarf”  
The Extreme Universe in the *Suzaku* Era (2006 年 12 月 4-8 日, 京都) ポスター発表
- [56] Suda, T., Fujimoto, M., Murashima, M., Kokubun, M., & Makishima, K.: “How the Fast Stellar Wind Blowing—A Lesson from the Recent X-ray Observations of Planetary nebulae”
- [57] Kawaharada, M., Sato, M., Kitaguchi, T., Makishima, K., Nakazawa, K., Kanemaru, T., Ota, N., Tamagawa, T., *et al.*: “*Suzaku* Study of Spatial Oxygen Distribution in the Centaurus Cluster”
- [58] Itoh, T., Isobe, N., Awaki, H., Kawaharada, M., Kokubun, M., Makishima, K., *et al.*: “*Suzaku* Hard X-ray Observation of Nearby Seyfert 2 Galaxy: NGC 4945”
- [59] Kitaguchi, T., Kawaharada, M., Kokubun, M., Makishima, K., Nakazawa, K., Yamasaki, N., Ota, N., *et al.*: “*Suzaku* Study of Hard X-ray Emission from Relaxed Galaxy Clusters”
- [60] Enoto T., Terada Y., Ishisaki Y., Miyawaki R., Kokubun M., Makishima, K., Itoh M., & Hasinger, G.: “The HXD Timing Calibrations and Applications to X-ray Pulsars”
- [61] Yamada, S., Itoh, T., Kokubun, M., Makishima, K., Kubota, A., *et al.*: “Fractal dimensional and principal component analyses”
- [62] Yuasa, T., Kokubun, M., Makishima, K., Tamura, K., Onuki, K., Nakazawa, K., Takahashi, T., Bamba, A., Senda, A., Koyama, K. *et al.*: “HXD-PIN Studies of the Diffuse Hard X-ray Emission from the Galactic Center”
- その他の一般講演
- [63] Kokubun, M., Murashima, M., Makishima K., *et al.*: “*Suzaku* detection of a highly carbon enriched plasma in BD +30 3639”, IAU Symp. No.234, *Planetary Nebulae in Our Galaxy and Beyond* (2006 Apr. 3-7, Hawaii)
- [64] Yanagida, T., Itoh, T., Takahashi, H., Kokubun, M., Makishima, K., Yanagitani, T., Yagi, H., Shigeta, T., & Ito, T.: “Improvement of Ceramic YAG(Ce) Scintillator to (YGD)<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>(Ce) for Gamma-ray Detectors”, *Symp. Rad. Meas. and Appl.* (2006 May 23-25, Univ. Michigan)
- [65] Itoh, T., Yanagida, T., Kokubun, M., Sato, M., Miyawaki, R., Makishima, K., Takashima, T., Tanaka, T., Nakazawa, K., Takahashi, T., Shimura, N., Ishibashi, H.: “A 1-Dimensional  $\gamma$ -ray Position Sensor based on GSO:Ce Scintillators Coupled to a Si Strip Detector” *ibid.*

- [66] Makishima, K., Murashima, M., Kokubun, K., *et al.*: “He-Burning Products in the Planetary Nebula BD+30 3639”, 208th Amer. Astr. Soc. Meeting (2006 June 6, Calgary)
- [67] Kokubun, M., & the *Suzaku* HXD team: “Calibration Status of *Suzaku* Hard X-ray Detector”, *Int'l W. G. on Cross-Calibration and the Definition of X-ray Standards* (2006 June 14-16, Iceland)
- [68] Kitaguchi, T., Kokubun, M., Kawaharada, M., Murashima, M., Miyawaki, R., Yanagida, T., Itoh, T., Hirakuri, S., Enoto, T., Sato, M., Makishima, K., Takahashi, T., *et al.*: “In-orbit calibration of the Hard X-ray Detector (HXD-II) onboard *Suzaku*”. *SPIE* (2006 Aug. 13-17, San Diego)
- [69] Kubota, A., Dotani, T., (8名), Makishima, K., Yamada, S., *et al.*: “*Suzaku* Observation of the Black Hoke Transient 4U 1630-47: Discovery of Absorption Lines”, IAU Symposium 238, *Black Holes from Stars to Galaxies* (2006 Aug. 21-25, Prague)
- [70] Itoh, T., Isobe, N., Awaki, H., Kawaharada, M., Kokubun, M., Makishima, K., *et al.*: “*Suzaku* Observations of Nearby Seyfert 2 Galaxies”, *ibid.*
- [71] Kokubun, M. *et al.*: “The Current Status of HXD on board *Suzaku*”, *Amer. Astr. Soc. HEAD Meeting* (2006 Oct. 4-7, San Francisco)
- [72] Bautz, M., Arnaud, K., Fukazawa, Y., Hayashida, K., Henry, P., Hughes, J., Kawaharada, K., Makishima, K., *et al.*: “*Suzaku* Observations of Abell 1795”, *ibid.*
- [73] Kokubun, M., Hirakuri, S., Kubo, S., Enoto, T., Itoh, T., Kitaguchi, T., Yamada, S., Yanagida, T., Yuasa, T., Takahashi, H., Watanabe, S., Takahashi, T., and Makishima, K.: “Development of an Active Gamma-ray Imaging Spectrometer with Pixelated Scintillators”, *IEEE Nucl. Science Symp.* (2006 Oct.29-Nov.4, San Diego)
- [74] Tsuchiya, H., Enoto T., Yamada, S., Yuasa, T., Kitaguchi, T., Kawaharada, M., Kokubun, M., Nakamura S., Okano, M., Kato, H., & Makishima, K.: “Observation of High-Energy Gamma Rays from a Winter Thundercloud”, *Shock Formation under Extreme Environments in the Universe* (2007 Feb. 20-22, Titiech, Tokyo)
- (国内会議)
- 日本物理学会・秋の分科会 (2006年9月20~23日、奈良女子大)
- [75] 佐藤光浩、榎戸輝揚、柳田健之、牧島一夫、国分紀秀ほか: 「シンチレータと組合せた1次元APDアレイの基礎特性評価」, 22pSH-6
- [76] 国分紀秀、川原田円、牧島一夫、高橋忠幸、中澤知洋、渡辺伸、寺田幸功、玉川徹、久保田あや ほか: 「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD) 主検出部の現状 II」, 23aSH-8
- [77] 寺田幸功、玉川徹、鈴木素子、山岡和貴、(13名)、国分紀秀 E、榎戸輝揚、洪秀徴ほか: 「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD) 広帯域全天モニタ部の現状 II」, 23aSH-9
- [78] 恩田香織、田代信、浦田裕次、(10名)、寺田幸功、玉川徹、鈴木素子、中澤知洋、渡辺伸、国分紀秀、榎戸輝揚 F、洪秀徴ほか: 「ガンマ線バーストを用いた『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器全天モニター (HXD/WAM) と Swift/BAT 検出器の相互較正」, 23aSH-10
- [79] 田村健一、村上弘志、牛尾雅佳、国分紀秀、小山勝 C、高橋忠幸ほか: 「『すざく』衛星による Sgr B2 領域からの硬 X 線スペクトルの解析」, 23aSH-11,
- [80] 磯部直樹、伊藤健、牧島一夫、粟木久光、Richard Griffiths ほか: 「『すざく』衛星による 2 型セイファート銀河の観測」, 23aSH-13
- [81] 高橋弘充、深沢泰司、伊藤健、国分紀秀、牧島一夫、久保田あや ほか: 「『すざく』衛星によるブラックホール連星系 GRO J1655-40 の観測」, 23pSH-4
- [82] 北口貴雄、川原田円、国分紀秀、牧島一夫、太田直美、深沢泰司、川埜直美、中澤知洋ほか: 「『すざく』衛星による銀河団からの硬 X 線放射の探査」, 23pSH5
- [83] 牛尾雅佳、高橋忠幸、田中孝明、田村健一、中澤知洋、渡辺伸、国分紀秀、深沢泰 B、寺田幸功ほか: 「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD/PIN) の軌道上バックグラウンドの再現性」, 23pSH-6
- [84] 馬場彩、小山勝二、平賀淳子、国分紀秀、(4名)、千田篤史、高橋忠幸、山内茂雄、湯浅孝行ほか、: 「『すざく』による HESS 未同定天体 HESS J1804-216 の観測」, 23pSH-7
- [85] 榎戸輝揚、寺田幸功、石崎欣尚、宮脇良平、千田篤史、海老沢研、国分紀秀、牧島一夫ほか: 「X 線パルサーを用いた『すざく』衛星 硬 X 線検出器の時刻較正」, 23pSH-9
- [86] 川原田円、北口貴雄、国分紀秀、牧島一夫、太田直美ほか: 「銀河団中の重元素および銀河の空間分布から探る銀河団の進化」, 23pSH11
- 日本天文学会・秋の年会 (2006年9月19~21日、九州国際大学)
- [87] 山内茂雄、海老沢研、馬場彩、岩澤一司、田中靖郎、石田学、国分紀秀、小山勝二、高橋弘充、坪井陽子: 「『すざく』衛星による銀河面領域観測時に発見されたトランジェント天体」, J21b
- [88] 中島基樹、三原建弘、牧島一夫: 「電子サイクロトロン共鳴線高調波の X 線光度に依存した変動」, J24a
- [89] 山田真也、国分紀秀、牧島一夫、久保田あや、J. Cottam、堂谷忠靖、C. Done ほか: 「『すざく』による 4U 1630-47 の硬 X 線放射」, J26a
- [90] 保田知則、深沢 泰司、高橋弘充、久保田あや、山田真也、牧島一夫、J.Cottam、堂谷忠靖、C.Done ほか: 「『すざく』によるブラックホール天体 4U1630-472 High State の X 線連続成分の時間変動」, J25a
- [91] 久保田あや、J. Cottam、堂谷忠靖、C. Done、小谷太郎、上田佳宏、A. C. Fabian、保田知則、高橋弘充、深沢泰司、山岡和貴、山田真也、牧島一夫ほか: 「『すざく』による 4U 1630-472 の共鳴吸収線の発見と長期時間発展、J27a

- [92] 磯部直樹、久保田あや、牧島一夫、伊藤健、宮脇良平、水野恒史ほか : 『すざく』が NGC 4945 銀河中に見付けたブラックホール候補天体 Ⓜ, J28a
- [93] 大野雅功、高橋拓也、深沢 泰司、山岡和貴、杉田聡司、玉川徹、寺田幸功、鈴木素子、田代信、浦田裕次、阿部圭一、恩田香織、鈴木正信、洪秀徴、国分紀秀、榎戸輝揚ほか : 『すざく』衛星搭載広帯域全天モニタ (HXD/WAM) による GRB 観測の現状 Ⓜ, J55a
- [94] 藤本正行、須田拓馬、村島未生、国分紀秀、牧島一夫 : “How the fast stellar wind blowing – A lesson from the recent X-ray observations of planetary nebulae”, N26a
- [95] 湯浅孝行、国分紀秀、牧島一夫、田村健一、大貫宏祐、中澤知洋、高橋忠幸、馬場彩、千田篤史、小山勝二 : 『すざく』による銀河面・銀河中心からの硬 X 線ディフュース放射の解析 Ⓜ, Q33a
- [96] 海老沢研、村上弘志、(6 名)、田中靖郎、岩沢一司、馬場彩、千田篤史、平賀純子、国分紀秀ほか : 『すざく』による銀河面リッジ X 線放射の観測 Ⓜ, Q40a
- [97] 粟木久光、池田真也、田中雄二、磯部直樹、伊藤健、牧島一夫ほか : 『すざく』衛星による Compton thick 2 型セイファート銀河 Mrk3 の観測 Ⓜ, S15a
- [98] 伊藤 健、高橋弘充、国分紀秀、牧島一夫、粟木久光、磯部直樹、渡辺伸ほか : 『すざく』衛星による明るい 2 型セイファート銀河の硬 X 線観測 Ⓜ, S17a
- [99] 寺島雄一、穴吹直久、林田清、(5 名)、国分紀秀、伊藤健、久保田あや、A. Markowitz、岡島崇、J. Reeves ほか : 『すざく』衛星によるセイファート銀河 NGC 4051 の広帯域 X 線スペクトル変動の観測 Ⓜ, S20a
- [100] 佐藤浩介、山崎典子、石崎欣尚、石田学、大橋隆哉)、北口貴雄、川原田円、国分紀秀、牧島一夫、太田直美、中澤知洋 : ほか「すざく衛星で観測された銀河団 A 1060 の温度構造と重元素分布 Ⓜ, T02a
- [101] 竹井洋、満田和久、藤本龍一、田村隆幸、山崎典子、大橋隆哉、(6 名)、国分紀秀、佐藤光浩ほか : 『すざく』による銀河団 A2218 の観測 Ⓜ, T03a
- [102] 太田直美、深沢泰司、川埜直美、牧島一夫、川原田円、北口貴雄、佐藤光、松下恭子、金丸武弘、浦田裕次、村瀬弘一、中澤知洋ほか : 『すざく衛星による Centaurus 銀河団中のガスバルク運動測定 Ⓜ, T04a
- [103] 松下恭子、大橋隆哉、鶴剛、深沢泰司、戸塚都、山崎典子、中澤知洋、田村隆幸、太田直美、浦田裕次、北口貴雄、牧島一夫ほか : 『すざく衛星による Fornax 座銀河団の観測 – 重元素の分布と起源 – Ⓜ, T05a
- [104] 川埜直美、深澤泰司、北口貴雄、川原田円、国分紀秀、牧島一夫、中澤知洋、山崎典子、太田直美、佐藤浩介、大橋隆哉ほか : 『すざく』衛星による銀河団からの非熱的硬 X 線放射の探査 Ⓜ, T06a
- [105] 国分紀秀、川原田円、牧島一夫、寺田幸功、山岡和貴、高橋忠幸、中澤知洋、渡辺伸、深沢泰司、水野恒史、高橋弘充、田代信ほか : 『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD) 主検出部の現状 (II) Ⓜ, W74a
- [106] 牛尾雅佳、高橋忠幸、田中孝明、田村健一、中澤知洋、渡辺伸、国分紀秀、川埜直美、深沢泰司、磯部直樹ほか : 『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD/PIN) の軌道上バックグラウンドの系統的評価 Ⓜ, W75a
- [107] 山崎智紀、平澤歩、高橋弘充、深沢泰司、山田真也、伊藤健、北口貴雄、国分紀秀、牧島一夫、鈴木正信、田代信、磯部直樹、寺田幸功ほか : 『すざく』搭載硬 X 線検出器 GSO シンチレータのゲイン履歴補正およびバックグラウンドモデル化の現状 Ⓜ, W76a
- 日本物理学会・春の年会 (2007 年 3 月 25 ~ 28 日、首都大学)
- [108] 国分紀秀、高橋忠幸、中澤知洋、渡辺伸、川原田円、牧島一夫、寺田幸功、玉川徹ほか : 『すざく』衛星硬 X 線検出器 (HXD) 主検出部の現状 (III) Ⓜ, 26aSF-3
- [109] 北口貴雄、川原田円、牧島一夫、小高裕和、国分紀秀、高橋忠幸、尾崎正伸、寺田幸功ほか : 『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD-II) のバックグラウンドシミュレーション Ⓜ, 26aSF4
- [110] 山田真也、伊藤健、国分紀秀、牧島一夫、山岡和貴、高橋弘充、深沢泰司ほか : 統計的手法による 『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器のバックグラウンドのモデル化 Ⓜ, 26aSF-5
- [111] 鈴木正信、佐藤優美、浦田裕次、田代信、寺田幸功、山岡和貴、養島敬、横山央明、高橋忠幸、牧島一夫ほか : 『X 線衛星 『すざく』広帯域全天モニター (WAM) を用いた太陽フレアの観測と性能評価 Ⓜ, 26aSF-6
- [112] 湯浅孝行、牧島一夫、国分紀秀、小高裕和、高島健、高橋忠幸、能町正治 : 『アレイ型 LaBr<sub>3</sub> を用いた撮像型ガンマ線検出器の SpaceWire による読み出し Ⓜ, 26pSF-12
- [113] 佐藤光浩、榎戸輝揚、柳田健之、牧島一夫、国分紀秀ほか : 『シンチレータと組合せた 1 次元 APD アレイの基礎特性評価 [2] Ⓜ, 26pSF-13
- [114] 床井和世、佐藤浩介、星野晶夫、石崎欣尚、大橋隆哉、中澤知洋、国分紀秀、川原田円、(3 名)、太田直美、磯部直樹ほか : 『すざく』で観測された銀河群 HCG62 の温度と重元素分布の研究 Ⓜ, 26pSF-14
- [115] 榎戸輝揚、山田真也、湯浅孝行、北口貴雄、川原田円、国分紀秀、牧島一夫、中村聡史、加藤博、土屋晴文 : 『雷雲電場における粒子加速の検証に向けた放射線検出器の製作設置およびその初期観測 Ⓜ, 27aSF-4
- [116] 高橋忠幸、高島健、笠羽康正、国分紀秀、吉光徹雄、渡辺伸ほか : 『小型衛星搭載用宇宙実験実証プラットフォーム (SWIM) Ⓜ, 28pSG-1
- [117] 安東正樹、森脇成典、石徹白晃治、穀山涉、新谷昌人、麻生洋一、高島健、中澤知洋、高橋忠幸、国分紀秀ほか : 『宇宙実験実証プラットフォーム (SWIM) を用いた超小型重力波検出器の開発 I (概要) Ⓜ, 28pSG-2
- [118] 石徹白晃治、安東正樹、森脇成典、穀山涉、新谷昌人、麻生洋一、高島健、中澤知洋、高橋忠幸、国分紀秀ほか : 『宇宙実験実証プラットフォームを用いた超小型重力波検出器の開発 II (信号処理系) Ⓜ, 28pSG-3
- [119] 穀山涉、安東正樹、森脇成典、石徹白晃治、新谷昌人、麻生洋一、高島健、中澤知洋、高橋忠幸、国分紀秀ほか : 『宇宙実験実証プラットフォームを用いた超小型重力波検出器の開発 III (制御系) Ⓜ, 28pSG-4
- 日本天文学会・春の年会 (東海大平塚、2007 年 3 月 28 ~ 30 日)

- [120] 宮本将雄、吉田鉄生、松下恭子、水野恒史、久保田あや、牧島一夫ほか :「XMM-Newton 衛星を用いた NGC1313 内の超光度 X 線源の系統的解析」, J44a
- [121] 磯部直樹、久保田あや、牧島一夫、伊藤健、宮脇良平、水野恒史ほか :「『すざく』が発見した大光度 X 線源 Suzaku J1305-4931 の質量と回転」, J46b
- [122] 平澤歩、高橋弘充、深澤泰司、牧一夫、高橋忠幸、三谷烈史、国分紀秀ほか :「『すざく』衛星による低質量 X 線連星系 GX 349+2 の観測」, J50c
- [123] 宮脇良平、牧島一夫、水野恒史、久保田あや、鶴剛 :「『すざく』による M 82 銀河 X-1 のスペクトル解析」, J57a
- [124] 寺田幸功、林多佳由、石田学、岡田俊策、中村良子、馬場彩、向井浩二、堂谷忠靖、S.Naik、L.Gallo、榎戸輝揚、牧島一夫 :「『すざく』を用いた白色矮星における非熱的放射の探査」, J62a
- [125] 国分紀秀、田村健一、中澤知洋、内山泰伸、村上弘志、高橋忠幸、湯浅孝行、牧島一夫、小山勝二ほか :「すざく搭載硬 X 線検出器 (HXD) による銀河中心領域の観測 (1)」, Q17a
- [126] 田村健一、国分紀秀、内山泰伸、牛尾雅佳、高橋忠幸、田中孝明、中澤知洋、村上弘志、渡辺伸、小山勝二ほか :「すざく搭載硬 X 線検出器 (HXD) による銀河中心領域の観測 (2)」, Q18a
- [127] 北口貴雄、川原田 円、牧島一夫、太田直美、中澤知洋、国分紀秀、山崎典子ほか :「『すざく』衛星による銀河団からの硬 X 線放射の分光観測」, T01a
- [128] 川原田円、北口貴雄、牧島一夫、中澤知洋、田村隆幸、川埜直美、深沢泰司、滝沢元和、井上進 :「『すざく』XIS 検出器による衝突銀河団 Abell 3667 の観測」, T08a
- [129] 金丸武弘、太田直美、玉川徹、蓮池和人、林田清、内山秀樹、古澤彰浩、牧島一夫ほか :「すざく衛星によるペルセウス銀河団の高温ガスバルク運動の測定 (2)」, T11b
- [130] 中澤知洋、釜江常好、国分紀秀、高橋忠幸、高橋弘充、田代信、玉川徹、寺田幸功、能町正治、深沢泰司、牧島一夫ほか :「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD) 主検出部の現状 (III)」, W15a
- [131] 山岡和貴、杉田聡司、田代信、浦田裕次、阿部圭一、恩田香織、鈴木正信、佐藤優美、寺田幸功、玉川徹、鈴木素子、深沢泰司、大野雅功、高橋拓也、浅野哲也、上原岳士、榎戸輝揚、牧島一夫、高橋忠幸、中澤知洋、国分紀秀、洪秀徴ほか :「『すざく』衛星搭載硬 X 線検出器 広帯域全天モニタ部 (HXD-WAM) の現状 (III)」, W16a
- 「すざく時代のブラックホール天文学」研究会 (2007 年 2 月 14 日、京都大学基礎物理学研究所)
- [132] 牧島一夫 :「ブラックホール連星と ULX 天体の統一的な解釈」(口頭)
- [133] 高橋弘充、平澤歩、(12 名)、国分紀秀、伊藤健、牧島一夫、(6 名) :「『すざく』衛星によるブラックホール連星系 GRO J1655-40 の観測」(口頭)
- [134] 宮本将雄、吉田鉄生、松下恭子、久保田あや、牧島一夫、水野恒史 :「XMM-Newton 衛星を用いた NGC 1313 内の超高度 X 線源の解析」(口頭)
- [135] 宮脇良平、牧島一夫、水野恒史、久保田あや、鶴剛ほか :「『すざく』による M82 銀河 X-1 のスペクトル解析」(ポスター)
- [136] 伊藤健、C. Done、牧島一夫、磯部直樹、粟木久光、渡辺伸、高橋忠幸、R. Griffiths ほか :“Suzaku Observation of Sey. 2 AGN in NGC 4945 ” (ポスター)
- [137] 山田真也、伊藤健、国分紀秀、牧島一夫、宮脇良平 :「『すざく』衛星による低光度活動銀河核 M81 の観測」(ポスター)
- その他
- [138] 柳田健之、伊藤健、佐藤光浩、榎戸輝揚、国分紀秀、牧島一夫、高橋弘充、柳谷高公、八木秀喜、繁田岳志、伊東孝之 :「透光性セラミックスを用いた放射線検出用シンチレータの開発」第 19 回秋季セラミックシンポジウム/フォトセラミックス (2006 年 9 月)
- [139] 国分紀秀ほか NeXT SGD チーム :「NeXT 搭載軟ガンマ線検出器 (SGD) 開発の現状」, 第 7 回宇宙科学シンポジウム (2006 年 12 月 21 ~ 22 日、宇宙科学研究所) p3-04
- [140] 高橋弘充、深沢泰司、水野恒史、平澤歩、北本俊二、須藤敬輔、久保田あや、牧島一夫、伊藤健、A. Parmar、国分紀秀ほか :「『すざく』によるブラックホール連星系 GRO J1655-40 の観測」, 同上 p4-07
- [141] 榎戸輝揚、土屋晴文、山田真也、湯浅孝行、北口貴雄、川原田円、国分紀秀、中村聡史、加藤博、牧島一夫 :「日本海側の冬季雷雲にともなう X 線/ガンマ線の観測」, 第 8 回惑星圏研究会 (2007 年 3 月 22-23 日、東北大学、)
- (セミナー、講演会、談話会)
- [142] 牧島一夫 :「宇宙は巨大な実験室」, 理学系大学院教育先導プログラムにもとづく「クラスター講義」の一環 (2006 年 6 月 30 日、東京大学理学系研究科)
- [143] 牧島一夫 :「星の誕生と死」, Super Science High-school 講演会 (2006 年 7 月 15 日、埼玉県立川越高校)
- [144] 牧島一夫 :「『すざく』1 年の観測成果」, 東大理学系ビッグバン宇宙国際研究センター研究会 (2006 年 9 月 4 日、鬼怒川)
- [145] Kokubun, M.: “Initial Results from the First Year of Suzaku”, Seminar at the Stanford Linear Accelerator Center (2006 Oct. 11)
- [146] 牧島一夫 :「宇宙空間からの宇宙物理学・天文学」, 宇宙開発委員会・計画部会・宇宙科学 WG 審議会での説明 (2006 年 11 月 8 日、東京)
- [147] 牧島一夫 : “Observation of Neutron Stars”, COE21 Workshop on Strongly Correlated Many-Body Systems (2007 年 1 月 16 日、東大理学系)

## 6.2 高瀬研究室

### 6.2.1 TST-2 球状トカマクにおけるプラズマ生成・加熱・維持実験

核融合研究に使われるトカマク装置では、プラズマ中に流れる電流（プラズマ電流  $I_p$ ）はプラズマ閉じ込めに不可欠である。通常のトカマクでは変流器の一次巻線にあたるセンターソレノイド（CS）の電流を変化させることで、二次巻線に相当するプラズマに電流を電磁誘導で駆動する。CS はトーラス中心部の貴重な空間を占有するため、これを用いずにプラズマを生成・維持することができれば、トカマク型核融合炉の小型化が可能となり、経済性が著しく改善される。これは当研究室で研究を行っている球状トカマク（ST）という中心部の空間を最小限にした配位では、特に最重要課題である。ST では更に高ベータ（ $\beta = \text{プラズマ圧力} / \text{磁場圧力}$ ）のプラズマが得られるという利点がある。高  $\beta$  が実現できれば、低磁場でも高いプラズマ圧力（核融合出力密度はプラズマ圧力の 2 乗に比例する）を達成でき、高出力密度化が可能となるので、いかに高  $\beta$  プラズマを安定に保てるかが重要な課題となる。本研究室では主に柏キャンパスの TST-2 球状トカマク（図 6.2.5）を用い、複数のアプローチによりこれらの課題に取り組んでいる。



図 6.2.5: TST-2 at Kashiwa Campus.

### 6.2.2 HHFW による電子加熱実験

高次高調速波（HHFW）は ST のように高い誘電率をもつプラズマ中でも良好な伝播特性を持ち、電子に強く吸収されるため、電子加熱や電流駆動に適している。しかし現実にはパラメトリック崩壊などの非線形現象により、伝播および吸収は影響を受ける。これらの影響を評価するため、プラズマの周辺に多数の高周波（RF）プローブを設置し、RF 磁場の計測を行った。典型的な周波数スペクトルを図 6.2.6 に示す。基本波（ $f_0$ ）の他に低周波数側（ $f_{-1}$ ,  $f_{-2}$ ）と高周波数側（ $f_1$ ）にパラメトリック崩壊による周波数成分が見られる。これらの基本波からの周波数差は周辺部におけるイオンサイクロトロン周波数に対応していることから、崩壊はプラズマ周辺部で起きており、低周波モードはイオンサイクロトロン擬似モードであることが示唆される。

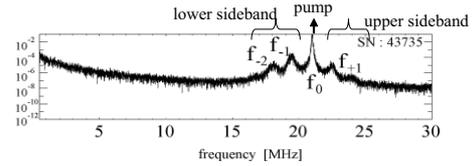


図 6.2.6: Frequency spectrum measured by an RF probe.

パラメトリック崩壊のプラズマ位置依存性を図 6.2.7 に示す。崩壊の強さは崩壊波の基本波に対する比で表し、プラズマの大半径方向の位置はポロイダルコイル電源の充電電圧（大きいほどプラズマは内寄せになる）で表している。これよりプラズマが外寄せの場合にパラメトリック崩壊がより強く起こることが分かった。パラメトリック崩壊の加熱に対する影響を調べるため、ポリプロピレン膜（ $> 0.2 \text{ keV}$ ）や Be 膜（ $> 1 \text{ keV}$ ）でフィルターして軟 X 線を測定したところ、パラメトリック崩壊が殆ど起こらない場合に軟 X 線放射は有意に増加することがわかった。

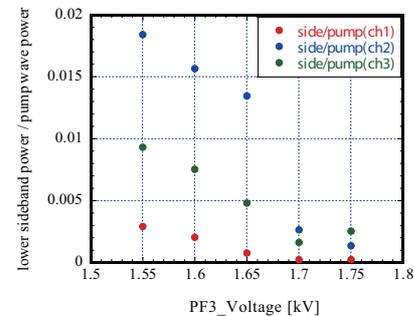


図 6.2.7: Dependence of parametric decay on plasma position.

RF による加熱効果の定量的な評価には、トムソン散乱による直接的な電子温度計測が不可欠である。トムソン散乱計測装置は入射レーザー系、集光光学系、分光検出系より成る。TST-2 では入射レーザーにはパルス当たりのエネルギーが  $0.45 \text{ J}$ 、繰り返し周波数が  $10 \text{ Hz}$  の Nd:YAG レーザー（波長  $1064 \text{ nm}$ ）を用いている。集光光学系にはニュートン光学系を採用し、直径  $242 \text{ mm}$  という比較的小型の球面ミラーで集光しており、分光器にはフィルターポリクロメーター、検出器にはアバランシェフォトダイオードを使用している。装置の校正のため、窒素ガスを真空容器内に導入し、レイリー散乱・ラマン散乱計測を行った後、プラズマ中にレーザーを入射し、トムソン散乱光を計測した。解析の結果、電子温度が  $170 \text{ eV}$ 、電子密度が  $7 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  と求められた。今後は装置の SN 比の改善後、HHFW による加熱効果の検証を行い、計測点の増設を行う予定である。

### 6.2.3 反射計による密度分布・波動測定

マイクロ波反射計はマイクロ波をプラズマに入射し、プラズマ中のカットオフ層で反射された波を測

定する手法である。カットオフは密度の関数なので、入射周波数を掃引すれば密度分布を測定でき、固定周波数では局所的な密度揺動を測定することができる。特に後者においては、非常に高い感度を有するため、微小な揺らぎを測定することができる。TST-2で加熱に用いている HHFW は振動電場を生じ、密度振動を引き起こす。従って、感度のよい反射計を用いて密度振動を測定することにより、局所的な RF 電場を評価できる。そこで、周波数帯域 26–40 GHz のマイクロ波反射計を設計・製作し、分布・揺動測定を行った。図 6.2.8 は HHFW 入射中の密度分布の変化を示したもので、徐々に密度が上昇している様子がわかる。この場合、密度上昇の主な要因は入射した HHFW であるが、プラズマの条件により密度への影響が異なり、HHFW の吸収が弱いと予想される条件で密度上昇が顕著に現れる傾向がある。

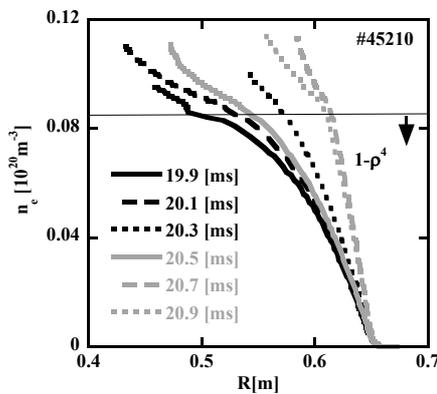


図 6.2.8: Time evolution of the electron density profile during HHFW heating.

図 6.2.9 は周波数を 25.85 GHz に固定した時の反射波の位相のワースペクトルを示したものである。HHFW の周波数である 21 MHz だけでなく、RF プロブと同様、イオンサイクロトロン周波数だけ離れた 19.3 MHz, 22.7 MHz にピークが見られるほか、イオンサイクロトロン周波数 1.7 MHz にもピークがみられる。反射計で測定した位相変動から電場の値を評価することができ、250 kW の高周波を入射したときの電場はおよそ 0.2 kV/m であった。

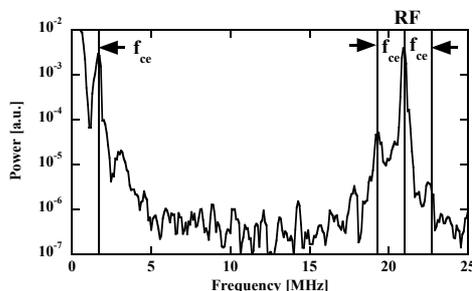


図 6.2.9: Power spectral density of phase fluctuations measured by a reflectometer with a frequency of 25.85 GHz.

## 6.2.4 電流生成過程の単一粒子軌道解析

高周波を用いた自発的な電流立ち上げ・維持において、単一粒子軌道の非対称閉じ込めが重要な役割を果たすと考えられている。トロイダル磁場によるドリフトと磁力線に沿う運動が打ち消された粒子は閉じた軌道を持ち、常に一方向のトロイダル電流に寄与する。実験では、磁場配位、入射パワー、磁場強度、充填ガス圧力など様々な条件を変えてプラズマ電流を測定しているが、最適条件はわかっていない。そこで、単一粒子軌道の観点から生成される電流がどのようなパラメータに依存するかを調べた。与えられた磁場配位、出発座標に対し、速度空間における閉じた軌道の境界(領域)を求め、トロイダル電流を求めた。解析的な近似式を導くとともに、その精度を数値計算により確かめた。速度空間における構造は磁場配位に依存し、エネルギーの低い領域はミラー比のみで決まることが分かった。電流のパラメータ依存性は、ポロイダル磁場で計算したサイクロトロン周波数  $\Omega_p$  と大半径  $R$  の積  $R\Omega_p$  と熱速度との大小で大きく変わり、両者が同程度になる時に大きな電流が流れる。図 6.2.10(a) は 4 種類の磁場配位で、電流の垂直磁場強度に対する依存性を示し、ある垂直磁場強度で電流が最大となる。図 6.2.10(b) は、対応する磁場配位で単一粒子軌道による電流を示したものである。磁場強度とともに電流が増加、減少する様子が再現されているが、配位依存性は実験と理論で異なる。特に、単一粒子軌道では、垂直磁場の曲率が負となる PF3 配位で、電流が流れないと予想されるにも関わらず、実験では有意な電流が観測されている。この現象について、電場の効果を取り入れた単一粒子軌道を検討している。

## 6.2.5 MHD 不安定性

ST に固有の不安定性である再結合現象 (RE) の研究が進められている。2005 年度には軟 X 線放射強度分布の時間発展からプラズマの内部構造の崩壊を実験的に確認し、RE を伴う放電と伴わない放電で軟 X 線放射強度分布の比較を行い、RE が圧力勾配による不安定性であることを示唆するデータを得た。2006 年度には詳細なモード構造を理解するために、トロイダル方向 5ヶ所に取り付けられた磁気プロブとトロイダル接線方向の視野を持つ 20 チャンネルの軟 X 線 (SX) 検出器アレイを同時に用いた特異値分解法による不安定モードの解析を行った。図 6.2.11 に特異値分解されたモードを上段から  $i = 1, 2, 4, 7$  の順に示す ( $i$  はモード強度の強い順の番号)。(a)–(d) は chrono と呼ばれ各モードの時間発展を示し、(e)–(h) は topo と呼ばれ空間分布を示す。チャンネルは 1–20 が SX 強度、21–25 が磁気プロブに対応する。3, 4 行目のモードは磁気プロブがそれぞれトロイダルモード数  $n = 1, 2$  を示している。前兆振動としての  $n = 1, 2$  は MHD シミュレーションの結果と矛盾しない。また RE とそれに伴うイオン加熱の振る舞いを調べるため、磁気エネルギーの変化を RE 時のプラズマ電流の変化から間接的に求めた。イオン温度上昇は不純物イオンからの放射である C III

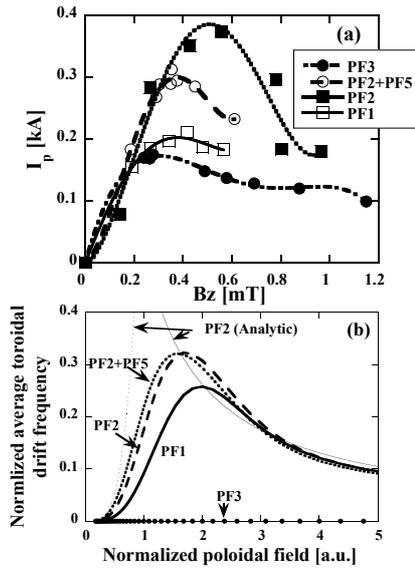


図 6.2.10: Comparison of (a) experimental and (b) theoretical poloidal field dependences. Experimental currents were obtained with ECH power of 4kW, with the fundamental resonance located close to the inboard limiter.

よび 0 V のドップラー幅から求めた。0 V の加熱は C III よりも顕著であり、最大で  $\Delta T_i/T_i \sim 2.4$  の増加を示しており、プラズマ電流の変化  $\Delta I_p/I_p$  に対し正の相関を示しており、規模が大きい RE は強いイオン加熱を伴うことがわかった。

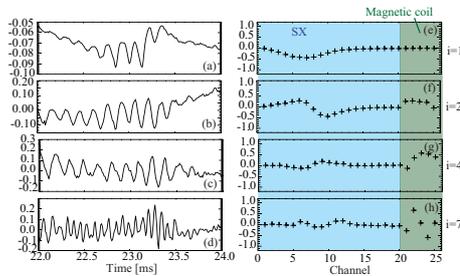


図 6.2.11: Singular value decomposed modes  $i = 1, 2, 4, 7$ . (a)–(d): chrono, (e)–(h): topo. Channels 1–20 are SX intensities, and 21–25 are magnetic probes at 5 toroidal locations.

RE が圧力勾配により駆動される不安定性であることを示すためには、RE 時の詳細な圧力分布の計測が必要である。当研究室では、英国原子力機関 (UKAEA) との共同研究のもと、イギリスにある世界最大級の球状トカマク MAST において、トムソン散乱を用いた圧力分布計測およびその解析を行っている。RE 直前に  $dP/dr \sim 9 \times 10^3$  Pa/m 程度まで圧力勾配の上昇が見られ、RE 後には  $dP/dr \sim 4 \times 10^3$  Pa/m 程度に緩和されていることがわかった。今後は RE を

伴う放電と伴わない放電で圧力分布の比較を行うとともに、前兆振動のモード数の同定や、それらの  $\beta$  依存性を調べる予定である。

## 6.2.6 ゾーナルフローと GAM

通常プラズマには温度・圧力勾配が存在するため乱流状態となり、粒子やエネルギーの異常輸送を引き起こすが、乱流の微視的スケールとシステムサイズの間スケールの電場が非線形過程により自発的に生成され、ゾーナルフロー (ZF) と呼ばれる層流を作り出す。磁場閉じ込めプラズマでは ZF が異常輸送を抑制し、プラズマの閉じ込めを格段に向上する働きがあると考えられている。さらにトロイダルプラズマにおいては、磁力線がトロイダル方向に振れているため ZF の他に geodesic acoustic mode (GAM) と呼ばれる振動モードが発現する。非線形ジャイロ運動論方程式を基礎に、磁場構造 (逆アスペクト比、シャフラノフシフト) やトロイダルカップリングの効果を考慮し、空間構造のパラメタ依存性を明らかにした。今後は乱流、ZF、GAM の多スケール間相互作用を考慮した大域的理論の構築を目指す。

## 6.2.7 コムラインアンテナの特性試験

TST-2 では低域混成波を用いたプラズマ電流立ち上げ実験を予定している。そのためにはプラズマ中に効率よく進行波を励起する必要がある。2006 年度には、JFT-2M トカマクで使われていた 200 MHz 帯コムラインアンテナを TST-2 用に改造し (図 6.2.12)、その特性試験を行った。



図 6.2.12: 200 MHz combline antenna for TST-2.

方向性を持った進行波を効率よく励起するためには不要な反射を抑え、かつ励起スペクトルが所定の波数のみで大きな成分を持つようにする必要がある。ネットワークアナライザで測定した TST-2 コムラインアンテナの透過率および反射率を図 6.2.13 に示す。160–220 MHz の範囲では反射電力が小さく、透過電力はほとんど減衰しておらず良好なパスバンドが得られていることがわかる。また励起される波数スペクトルを求めるために、アンテナ前面で磁気フ

ローブにより励起磁場の強度・位相分布を測定した結果、トロイダル方向の屈折率  $N_{||}$  は 5 であることがわかった。

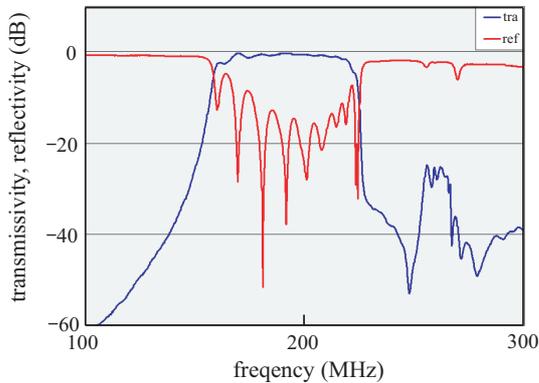


図 6.2.13: Transmissivity and reflectivity of the TST-2 combline antenna.

### 6.2.8 JT-60U トカマクにおける自発電流によるプラズマ電流駆動実験

日本原子力研究開発機構の JT-60U トカマクを用いて、プラズマが自身の圧力勾配により自発的に流すブートストラップ電流  $I_{BS}$  による電流駆動実験を行った。この実験では、垂直入射および反電流駆動方向の接線入射 NBI のみを用い、非誘導電流駆動は負の寄与をしないようにした。また電磁誘導による電流駆動もゼロないしは負となる状態が達成され、この間は正方向の電流はブートストラップ電流のみにより駆動されていると結論された。いくつかの異なるプラズマ制御を用い、この結果の信頼性を高めた。CS 電流を一定にし、このコイルからの誘導の寄与をゼロとした放電では、プラズマ断面全体にわたりほぼゼロまたは負のループ電圧がかかっている状態が 0.1 秒以上維持された。全プラズマ電流は 543 kA、計算された NB による駆動電流は  $-35$  kA、MSE 計測に基づき計算された誘導駆動電流は  $-5$  kA であり、BS 電流が全プラズマ電流を上回る状態が達成された。また、新たに導入された表面磁束一定制御により、プラズマ表面から出入りする磁束がゼロとした放電では、ゆっくりとしたプラズマ電流上昇 ( $10$  kA/s) が 0.5 秒間維持され (図 6.2.14)、ブートストラップ電流によるプラズマ電流上昇がより明確に示された。これらは、プラズマ中に自発的に流れるブートストラップ電流により、プラズマ電流の全てが駆動されるといふ、自己維持トカマクプラズマが実現されたこと、また自発電流が全プラズマ電流を上回ること (従ってプラズマ電流を増加させること) が可能であることを示す画期的な成果であり、経済的競争力の高い核融合炉の実現にとって大変意義の高いものである。

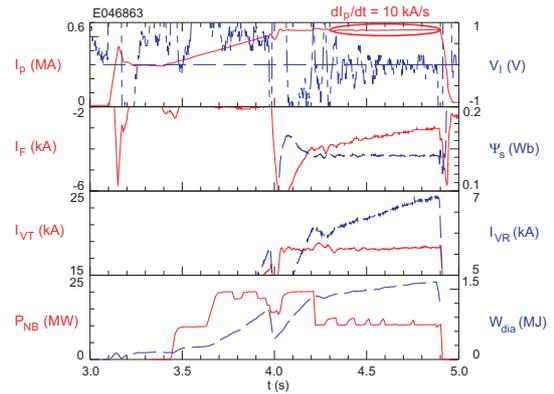


図 6.2.14: Bootstrap overdrive on JT-60U. A slow  $I_p$  ramp-up at  $10$  kA/s is maintained for  $0.5$  s.

### 6.2.9 プラズマ合体を使った超高ベータプラズマ生成・維持の研究

ST の高ベータ・高閉じ込め特性を活用すれば、小型装置で体積中性子源或いは発電実証を実現し、核融合開発の加速に貢献することができる。ST の特徴である高ベータを更に高めた「超高ベータ ST プラズマ」を生成・維持するための新手法を開発することを目的とし、科研費基盤研究 (S) の支援のもとに新装置 UTST (図 6.2.15) を建設し、実験を開始している。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  $30\text{--}50\%$ ) の新生成法の開発、および HHFW などの先進的 RF 手法による高ベータ ST プラズマの維持を目指している。



図 6.2.15: Newly constructed UTST device for ultra-high beta ST plasma formation.

## &lt; 報文 &gt;

## (原著論文)

- [1] N. Takei, Y. Nakamura, M. Ushigome, T. Suzuki, N. Aiba, M. Takechi, K. Tobita, Y. Takase, A. Fukuyama, S.C. Jardin: Intermittent beta collapse after NBCD turn-off in JT-60U fully non-inductive reversed shear discharges, *Plasma Phys. Control. Fusion* 49 (3), 335-345 (2007).
- [2] Y. Takase, M. Kikuchi, T. Maekawa, M. Matsukawa, M. Nagata, S. Nishio, Y. Ono, K.N. Sato, K. Tobita: Tokamak and Spherical Tokamak Research in Japan, *Trans. Fusion Sci. Tech.* 51 (2T) 46-51 (2007).
- [3] A. Ejiri, T. Oosako, J. Tsujimura, Y. Shimada, Y. Takase, Y. Torii, M. Sasaki, H. Tojo, T. Masuda, H. Nuga, N. Sumitomo, S. Kainaga, J. Sugiyama and N. Tsujii: ECH and HHFW start-up experiments on the TST-2 spherical tokamak, *Trans. Fusion Sci. Tech.* 51, No. 2T, 168-170 (2007).
- [4] T. Yamada, A. Ejiri, S. Shiraiwa and Y. Takase: Application of differential phase method to interferometry, *Rev. Sci. Instrum.* 77, 124701 (2006).
- [5] K. Tanaka, A. Ejiri, Y. Ito, K. Kawahata, T. Tokuzawa, M. Osakabe, and Y. Takeiri: Homodyne reflectometer for neutral beam injection interlock on large helical device, *Rev. Sci. Instrum.* 77, 10E912 (2006).
- [6] H. Kasahara, T. Oosako, Y. Takase, N. Takeuchi, K. Saito, T. Seki, T. Mutoh, R. Kumazawa, LHD Experimental group: Electron Heating Experiment Using the High Harmonic Fast Wave on LHD, *Journal of the Korean Physical Society* 49, S192-S196 (2006).
- [7] Y. Nagashima, K. Hoshino, K. Nagaoka, K. Shinohara, A. Fujisawa, K. Uehara, Y. Kusama, K. Ida, Y. Yoshimura, S. Okamura, K. Matsuoka, A. Ejiri, Y. Takase, K. Itoh, M. Yagi, S.-I. Itoh, JFT-2M group, and CHS group: Experimental study of nonlinear processes in edge turbulence of toroidal plasmas, *Plasma Fusion Res.* 1, 041 (2006)
- [8] Y. Nakamura, K. Tobita, A. Fukuyama, N. Takei, Y. Takase, T. Ozeki and S.C. Jardin: A Simulation Study on Inductive ITB Control in Reversed Shear Tokamak Discharges, *Nucl. Fusion* 46 (8), S645-S651 (2006).
- [9] Y. Takase, A. Ejiri, S. Shiraiwa, Y. Adachi, N. Ishii, H. Kasahara, H. Nuga, Y. Ono, T. Oosako, M. Sasaki, Y. Shimada, N. Sumitomo, I. Taguchi, H. Tojo, J. Tsujimura, M. Ushigome, T. Yamada: Plasma current start-up experiments without the central solenoid in the TST-2 spherical tokamak, *Nucl. Fusion* 46 (8), S598-S602 (2006).
- [10] D. A. Gates, R. Maingi, J. Menard, S. Kaye, S. A. Sabbagh, G. Taylor, J. R. Wilson, M. G. Bell, R. E. Bell, S. Bernabei, J. Bialek, T. Biewer, W. Blanchard, J. Boedo, C. Bush, . . . , Y. Takase, . . . : Effect of plasma shaping on performance in the National Spherical Torus Experiment, *Phys. Plasmas* 13 (5), 056122 (2006).
- [11] H. Nozato, S. Morita S, M. Goto, Y. Takase, A. Ejiri, T. Amano, K. Tanaka, S. Inagaki and LHD Expt Grp: A dependence of carbon impurity transport coefficients on fuel ions in hydrogen and helium plasmas of Large Helical Device, *Phys. Plasmas* 13, 092502 (2006).
- [12] A. Ejiri, Y. Takase, H. Kasahara, T. Yamada, K. Hanada, K. N. Sato, H. Zushi, K. Nakamura, M. Sakamoto, H. Idei, M. Hasegawa, A. Iyomasa, N. Imamura, K. Esaki, M. Kitaguchi, K. Sasaki, H. Hoshika, O. Mitarai and N. Nishino: RF start-up and sustainment experiments on the TST-2@K spherical tokamak, *Nucl. Fusion* 46, 709-713 (2006).
- [13] S. Shiraiwa, K. Hanada, M. Hasegawa, H. Idei, H. Kasahara, O. Mitarai, K. Nakamura, N. Nishino, H. Nozato, M. Sakamoto, K. Sasaki, K. Sato, Y. Takase, T. Yamada, H. Zushi, and TST-2@K Group: Heating by an Electron Bernstein Wave in a Spherical Tokamak Plasma via Mode Conversion, *Phys. Rev. Lett.* 96 (18), 185003 (2006).
- [14] Y. Nagashima, K. Itoh, S.I. Itoh, K. Hoshino, A. Fujisawa, A. Ejiri, Y. Takase, M. Yagi, K. Shinohara, K. Uehara, Y. Kusama and JFT-2M group: Observation of coherent bicoherence and biphasic in potential fluctuations around geodesic acoustic mode frequency on JFT-2M, *Plasma Phys. Contr. Fusion*, 48, A377-A386 (2006).
- [15] Y. Nagashima, K. Itoh, S.I. Itoh, A. Fujisawa, K. Hoshino, Y. Takase, M. Yagi, A. Ejiri, K. Ida, K. Shinohara, K. Uehara, Y. Kusama and JFT-2M group: Bispectral analysis applied to coherent floating potential fluctuations obtained in the edge plasmas on JFT-2M, *Plasma Phys. Contr. Fusion*, 48, S1-S15 (2006).
- [16] Y. Nagashima, S.I. Itoh, M. Yagi, K. Itoh, A. Fujisawa, K. Hoshino, K. Shinohara, K. Uehara, Y. Kusama, A. Ejiri, Y. Takase: Convergence study of bispectral analysis in experiments of high temperature plasmas, *Rev. Sci. Instrum.* 77, 045110 (2006).

## (学位論文)

- [17] 住友信幸:「TST-2 球状トカマクにおける静電プローブを用いた周辺プラズマ分布および揺動の研究」(修士論文)。
- [18] 賀賀秀男:「JT-60U トカマクにおけるプラズマ自発電流の研究」(修士論文)。
- [19] 島田善行:「TST-2 球状トカマクにおける高周波加熱の密度分布依存性の研究」(修士論文)。
- [20] 辻村次郎:「TST-2 球状トカマクにおける高周波波動を用いた加熱研究」(修士論文)。

## &lt; 著書 &gt;

- [21] 江尻晶:「プラズマ揺動計測」プラズマ診断の基礎と応用、345-351、プラズマ・核融合学会編、コロナ社、東京、2006
- [22] 江尻晶:「プラズマ」物理データ事典、日本物理学会編、朝倉書店、2006

## &lt; 学術講演 &gt;

## (国際会議)

## 一般講演

- [23] Y. Takase: “Ip start-up by ECH/ECCD without CS in JT-60U” 9th Steady State Operation ITPA Topical Group meeting, Naka, Japan, April 10–13, 2006.
- [24] R. Kumazawa: “Long Pulse Discharge of MW-ICRF Heated Plasma on the Large Helical Device” 33rd EPS Conference on Plasma Phys., Rome, Italy, June 19–23, 2006.
- [25] N. Takei: “A Simulation Study on Stable Current Shutdown in Non-Inductive Reversed Shear Tokamak Discharges” 33rd EPS Conference on Plasma Phys., Rome, Italy, June 19–23, 2006.
- [26] K. Sasaki: “Soft X-ray measurement in IRE on the TST-2 spherical tokamak” 33rd EPS Conference on Plasma Phys., Rome, Italy, June 19–23, 2006.
- [27] Y. Nagashima: “Observation of nonlinear processes between coherent fluctuations and turbulent fluctuations in the edge regions of JFT-2M and CHS” 33rd EPS Conference on Plasma Phys., Rome, Italy, June 19–23, 2006.
- [28] H. Tojo: “Radiation measurements during MHD events in the TST-2 spherical tokamak” The 3rd Japan-Korea Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State Fusion Plasma, Miyagi, Japan, Aug. 31–Sept. 3, 2006.
- [29] A. Ejiri: “ECH and HHFW start-up experiments on the TST-2 spherical tokamak” 6th International Conference on Open Magnetic Systems, Tsukuba, Japan, July 17–21, 2006.
- [30] Y. Takase: “RF Experiments on TST-2” Workshop on Physics and Technology of RF Heating of Fusion Plasmas 2006, Nara, Japan, Sept. 26–30, 2006.
- [31] Y. Takase: “High-Harmonic Fast Wave Experiments on TST-2” 12th International Workshop on Spherical Torus 2006, Chengdu, China, Oct. 11–13, 2006.
- [32] S. Shiraiwa: “Study of electron Bernstein wave heating on TST-2” 12th International Workshop on Spherical Torus 2006, Chengdu, China, Oct. 11–13, 2006.
- [33] Y. Takase: “Evolution of Bootstrap-Sustained Discharge in JT-60U” 21st IAEA Fusion Energy Conference 2006, Chengdu, China, Oct. 16–21, 2006.
- [34] Y. Takase: “RF Experiments on TST-2 and Plans for TST-2 and UTST” 48th Annual Meeting of APS/DPP, Philadelphia, USA, Oct. 30–Nov. 3, 2006.
- [35] Y. Ono: “Initial operation of UTST high-beta spherical tokamak and merging device” 48th Annual Meeting of APS/DPP, Philadelphia, USA, Oct. 30–Nov. 3, 2006.
- [36] M. Sawahata: “Development of low-cost pulsed NBI system for UTST high-beta ST experiment” 48th Annual Meeting of APS/DPP, Philadelphia, USA, Oct. 30–Nov. 3, 2006.
- [37] Y. Takase: “Complex Phenomena in High Temperature Fusion Plasmas” 5th International Conference of the University of Tokyo COE21 Program QUESTS “Perspectives in Nonlinear Physics”, Tokyo, Japan, Nov. 20–22, 2006.
- [38] S. Kainaga: “Thomson scattering diagnostic on the TST-2” 5th International Conference of the University of Tokyo COE21 Program QUESTS “Perspectives in Nonlinear Physics”, Tokyo, Japan, Nov. 20–22, 2006.
- [39] H. Nuga: “Demonstration of bootstrap driven plasma in JT-60U” 5th International Conference of the University of Tokyo COE21 Program QUESTS “Perspectives in Nonlinear Physics”, Tokyo, Japan, Nov. 20–22, 2006.
- [40] M. Sasaki: “Geodesic acoustic mode in toroidal plasma” 5th International Conference of the University of Tokyo COE21 Program QUESTS “Perspectives in Nonlinear Physics”, Tokyo, Japan, Nov. 20–22, 2006.
- [41] N. Sumitomo: “Electrostatic probe measurements on the TST-2 spherical tokamak” 5th International Conference of the University of Tokyo COE21 Program QUESTS “Perspectives in Nonlinear Physics”, Tokyo, Japan, Nov. 20–22, 2006.
- [42] T. Yamada: “Reflectometry for Density Fluctuation and Profile Measurements in TST-2” ITC-16, Advanced Imaging and Plasma Diagnostics, Toki, Japan, Dec. 5–8, 2006
- [43] H. Tojo: “Soft X-ray emission profile and mode structure during MHD events in the TST-2 spherical tokamak” ITC-16, Advanced Imaging and Plasma Diagnostics, Toki, Japan, Dec. 5–8, 2006
- [44] A. Ejiri: “Recent results from TST-2 Spherical Tokamak” Int. WS. Reconnection events in STs, Culham, UK, Feb. 28–Mar. 1, 2007.
- [45] H. Tojo: “Studies of REs on TST-2” Int. WS. Reconnection events in STs, Culham, UK, Feb. 28–Mar. 1, 2007.

## 招待講演

- [46] Y. Takase: “Tokamak and Spherical Tokamak Research in Japan” 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Tsukuba, Japan, July 17–21, 2006.

## (国内会議)

## 一般講演

- [47] 高瀬雄一:「高ベータ・高自律系プラズマの物理」日本地球惑星科学連合 2006 年大会(幕張)2006 年 5 月 14-18 日
- [48] 島田喜行:「周波数変調(FM)反射計による TST-2 プラズマの密度分布計測」第 6 回核融合エネルギー連合後援会(富山)2006 年 6 月 13-14 日
- [49] 辻村次郎:「TST-2 球状トカマクにおける HHFW 波動加熱実験」第 6 回核融合エネルギー連合後援会(富山)2006 年 6 月 13-14 日
- [50] 今澤良太:「球状トカマク実験装置 UTST の建設と現状」第 6 回核融合エネルギー連合後援会(富山)2006 年 6 月 13-14 日
- [51] 浅井朋彦:「UTST 球状トカマクへの中性粒子ビーム入射実験計画」第 6 回核融合エネルギー連合後援会(富山)2006 年 6 月 13-14 日
- [52] 澤島公則:「ワッシャーガンを用いた中性粒子ビーム用プラズマ源の開発」第 6 回核融合エネルギー連合後援会(富山)2006 年 6 月 13-14 日
- [53] 徳沢季彦:「高エネルギー粒子・電子による不安定性の研究」第 6 回核融合エネルギー連合後援会(富山)2006 年 6 月 13-14 日
- [54] 江尻晶:「TST-2 球状トカマク装置におけるスタートアップ実験」日本物理学会秋季大会 2006 年(千葉)2006 年 9 月 23-26 日
- [55] 鳥居祐樹:「高速 AXUV 検出器による RF 密度揺動の計測」プラズマ・核融合学会第 23 回年会(筑波)2006 年 11 月 28 日-12 月 1 日
- [56] 住友信幸:「TST-2 球状トカマクにおける静電プローブ計測」プラズマ・核融合学会第 23 回年会(筑波)2006 年 11 月 28 日-12 月 1 日
- [57] 山田琢磨:「反射計による TST-2 の密度揺動・分布測定」プラズマ・核融合学会九州支部会(九大)2006 年 12 月 15-16 日
- [58] 江尻晶:「TST-2 球状トカマクにおける反射計を用いた高周波波動の研究」日本物理学会第 62 回年次大会(鹿児島)2007 年 3 月 19 日-21 日
- [59] 高瀬雄一:「球状トカマクにおける高周波加熱・電流駆動シナリオ」日本物理学会第 62 回年次大会(鹿児島)2007 年 3 月 19 日-21 日
- [60] 海永壮一郎:「コンパクトなトムソン散乱計測装置の開発」日本物理学会第 62 回年次大会(鹿児島)2007 年 3 月 19 日-21 日
- [61] 佐々木真:「トカマクプラズマにおける GAM 固有モード」日本物理学会第 62 回年次大会(鹿児島)2007 年 3 月 19 日-21 日
- [62] 永島芳彦:「変調不安定性を利用した密度揺動による zonal flow 観測」日本物理学会第 62 回年次大会(鹿児島)2007 年 3 月 19 日-21 日
- [63] 永島芳彦:「プラズマ中に励起された波動の空間構造計測」日本物理学会第 62 回年次大会(鹿児島)2007 年 3 月 19 日-21 日

## 招待講演

- [64] 高瀬雄一:「核融合エネルギー科学としての学術の拡がり」高ベータプラズマの学術研究および核融合実用化への貢献 第 6 回核融合エネルギー連合講演会(富山)2006 年 6 月 13-14 日

## (セミナー)

- [65] 高瀬雄一:「デモ炉に向けたプラズマ物理開発 六ヶ所村での連携協力体制について(箱根)2006 年 7 月 24-25 日
- [66] 高瀬雄一:「QUEST 計画の進捗状況報告(1) 第 21 回トリアム研究会&核融合フォーラムサブクラスター会合同研究会「周辺プラズマ及び PWI 研究の進展~モデリングとシミュレーション」(九大)2006 年 8 月 3-4 日
- [67] 佐々木真:「GAM 固有モードの逆アスペクト比、イオンラーマー半径の効果 第 2 回 COE RA 若手交流シンポジウム(東大)2006 年 11 月 6-8 日
- [68] 高瀬雄一:「全日本 ST 研究計画と QUEST 第 22 回トリアム研究会「球状トカマクプラズマ研究の進展」(九大)2006 年 12 月 14-15 日
- [69] 江尻晶:「TST-2 の最近の成果 第 22 回トリアム研究会「球状トカマクプラズマ研究の進展」(九大)2006 年 12 月 14-15 日
- [70] 高瀬雄一:「大学のトカマク(ST)研究と ITPA、BA への貢献 核融合フォーラム・プラズマ物理クラスター「MHD」,「定常運転」,「閉じ込め・輸送」サブクラスター合同会合(京都)2007 年 2 月 28 日-3 月 1 日
- [71] 鳥居祐樹、大迫琢也:「TST-2 における高次高調速波によるパラメトリック不安定性と放射光揺動の計測 第 10 回若手科学者によるプラズマ研究会(那珂)2007 年 3 月 14-16 日

## (その他)

- [72] 高瀬雄一:「プラズマ物理から核融合への挑戦パリティ特集:物理科学、この 1 年 Vol. 22 No. 1 pp. 17-18 (2007.01)
- [73] JT-60 共同研究の進展プラズマ・核融合学会誌(プロジェクトレビュー)H. Kimura, M. Inutake, M. Kikuchi, Y. Ogawa, Y. Kamada, T. Ozeki, O. Naito, Y. Takase, S. Ide, K. Nagasaki, A. Isayama, T. Tanabe, N. Miya, M. Nakatsuka, T. Hatae, K. Ida, H. Takenaga, Journal of Plasma and Fusion Research 83 (1), 81-93 (2007).
- [74] 江尻晶, 小川雄一, 門信一郎:「ITER およびブローダーアプローチに関する若手意識調査」プラズマ・核融合学会誌 82, 250 (2006).

## 6.3 坪野研究室

本研究室では重力と相対論に関する実験的研究を進めている。その中でも、重力波検出は一貫して研

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ともなって発生する。また宇宙のごく初期に起源をもつ重力波も予想されており、将来的には重力波によって、電磁波では決して見ることができない宇宙の姿をとらえるようになると期待される。これらの重力波観測によって、新しい分野「重力波天文学」を確立することが現在の重力波研究の目的である。重力波を使って宇宙を見ることは、人類の新たな知の開拓につながる。

これまでの研究では、三鷹に設置された TAMA300 を用いた近傍銀河からの重力波探査と、次世代レーザー干渉計 LCGT の開発が 2 つの主軸となっていた。最近これにくわえて、宇宙空間を利用した重力波検出計画が構想されるようになった。地上に干渉計を作る限り、基線長の制限や地面振動といった障害は避けることができない。しかし自由な宇宙空間ではこれらの制限が取り払われ、理想的な環境が期待できる。特に、地上では不可能な低周波の重力波検出が可能となるのが大きな魅力である。われわれは、日本独自の衛星重力波検出器 DECIGO を提唱している。これを実現するための基礎研究として、小型衛星を用いた予備実験なども実施が予定されている。これらの基礎研究をもとにして、DECIGO によって巨大ブラックホールや宇宙初期のインフレーションに起源をもつ重力波をとらえようとする計画を検討中である。[45]

### 6.3.1 レーザー干渉計を用いた重力波の検出

#### TAMA プロジェクトの現状

TAMA プロジェクトは、日本国内の関係機関が協力して基線長 300m のレーザー干渉計型重力波検出器 (TAMA300) を国立天文台三鷹キャンパス内に建設し、重力波観測を行う計画である。現在までに TAMA では、我々の銀河系内での連星中性子星合体のような重力波イベントがあれば十分検出可能な感度と安定度を達成している。これまで取得された 3000 時間以上におよぶデータは現在、連星中性子星の合体からのチャープ重力波、超新星爆発からのバースト重力波、パルサーからの連続重力波等を求めて解析が進められている。また、米欧の干渉計との同時観測を実施しているが、LIGO (米国) との共同観測で得られたデータの解析結果が既に公表されている。その他、散乱光雑音や電気系雑音、変調系雑音などを想定した雑音源検討の研究を実施している。現在は、われわれの研究室で基礎開発を行った SAS とよばれる次世代の高性能防振装置を TAMA に組み込むための作業を進めているところである。既に 4 台の SAS が設置されたが、このインストール作業が完了すれば、低周波において一層の感度向上が見込ま

れる。[2, 3, 4, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 25, 30, 31, 39]

#### TAMA300 モニター信号の系統的解析

重力波検出器 TAMA300 は非常に高い感度を持つために、地面振動などの外乱により不安定になることがある。そのために、検出器のメイン信号 (2 つの腕の差動変動信号) から得られた重力波イベント候補が真に重力波か外乱の影響であるかを区別できない。そこで、検出器の全モニター信号を系統的に解析して、メイン信号とモニター信号が同時に異常な振る舞いをすれば、それは重力波でなく外乱の影響としてイベント候補から除去した。結果、イベント候補数を約 1/100 (このときの偶然に真の重力波イベントを除去する確率は 3.2% である。) にすることに成功した。[10, 33]

#### 未知パルサーからの連続重力波探査

TAMA300 の DT9 のデータを用いて未知のパルサーからの連続波検出を目標に解析を行なった。通常の連続波の解析に用いる手法は計算コストの関係で使えないため、Hough 変換と呼ばれる手法を用いて解析を行なった。Hough 変換は雑音から信号を抽出する際に使われるもので、ノイズに強いという特徴を持っている。これにより、未知のパラメータが多い場合でも、計算コストをかけずに解析を行ない、パラメータの推定や重力波の有無を統計的に調べることができる。この手法を TAMA300 データ (DT9) に適用して、1020-1030Hz の重力波信号を探した。結果としてこの周波数帯には重力波信号は見つからなかった。そこで、上限値を求めるために信号注入試験を行なった。その結果上限値として 1020-1021Hz で  $h = 8.6 \times 10^{-22}$  (confidence level 95 %) という値を得た。[8, 32]

#### 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 3km のレーザー干渉計型重力波検出器 2 台を神岡地下のサイトに建設するものである。この重力波検出器では、干渉計を構成する鏡を 20 K の低温に冷却するとともに、高出力レーザー光源を用い、干渉計方式を RSE と呼ばれる方式を採用する事で、TAMA より 2 桁以上高い感度が実現される。それによって、連星合体からの重力波については約 200 Mpc 遠方のイベントまで観測する事

ができる見込みである。その範囲にある銀河数を考慮すると、1年に10回程度の頻度で重力波イベントを観測できることが期待できる。また、もし我々の銀河系内で超新星爆発が発生すれば、そこからの重力波も、LCGTによって十分観測可能である。

現在、LCGTの具体的な設計と、その実現のための要素技術の研究開発が日本の各機関で精力的に進められている。その中で、当研究室では、高性能防振装置の開発、干渉計方式の最適化の研究、干渉計制御方式の研究などが行なわれている。[5, 6, 16, 26, 27, 37, 40]

### 6.3.2 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検討している。NASA/ESAでは宇宙干渉計重力波検出器LISAの開発を行っている。LISAは500万km離れた3つのスペースクラフト間でMichelson型レーザー干渉計を構成することで、地上では実現不可能な1mHz~10mHzの低周波数の重力波を目標としている。日本でもLISAのスペースクラフト間の距離を100分の1程度として、デシHz(0.1Hz)の周波数を観測するDECIGOが検討されている。0.1Hzという周波数は、LISAとLIGO,LCGTなどの地上干渉計の観測周波数の間にあり、重力波源としては、MBH連星などの合体や初期宇宙起源の重力波などが挙げられる。さらに、究極の感度をもったデシHz帯の干渉計を考えると、1年に約10万個の連星中性子星の合体( $z=1$ まで)を重力波で観測でき質量を決定できること。ダークエネルギーを起源とした宇宙の加速膨張を直接測定できること。

インフレーション起源の背景重力波を検出できることが示されている。現在は、小型衛星を用いた予備実験の準備と並行して、DECIGOの概念設計を進めているところである。[7, 9, 17, 18, 19, 29, 34, 43, 44]

#### DECIGO パスファインダー

宇宙空間レーザー干渉計型重力波検出器DECIGOのような大型のミッションを実現させるためには、地上での入念な試験と共に、宇宙でしかできない試験を行うことや、各要素技術を宇宙実証することも不可欠である。そこで、DECIGOグループでは、DECIGOパスファインダー(DPF)と呼ばれる小型衛星を打ち上げ、軌道上での各種試験を行うと共に、実際の重力波観測も行うことも目指している。

DPFでは、高度750kmの地球周回軌道(太陽同期極軌道)に投入される100kg級の小型衛星を想定している。衛星内にはミッション機器として、ドラッグフリー制御によって衛星内に非接触保持された2つの試験質量(鏡)と安定化レーザー光源、小型・低雑音スラスタを搭載する。これらの鏡で構成された基線長10cmのファブリ・ペロー干渉計の基線長変化を、安定化Nd:YAGレーザー光源を用いて測定することで、0.1-1Hz付近での重力波観測を行う。DPF

がターゲットとする周波数帯では、地上検出器では観測することができないため、これまでに実際に重力波を観測した例は無い。その一方で、銀河中心ブラックホールの準固有振動や、中間質量ブラックホール合体からの重力波は、この周波数帯で放射されていることが予想されている。従って、DPFで得られた観測結果は、これまでにない貴重なものになると期待できる。

その一方で、DPFで用いられる技術は、安定な宇宙環境と安定なレーザー干渉計を用いた精密計測・制御技術、ドラッグフリー技術などであり、宇宙空間を用いた精密基礎物理実験、安定な時間・周波数基準、地球重力観測や、ドラッグフリーを用いたフォーメーションフライト技術などへの広い応用が考えられる。[42]

#### 小型重力波検出器 S WIM <sub>$\mu\nu$</sub>

SWIM (SpaceWire Interface demonstration Module) は、次世代の宇宙用通信規格SpaceWireを持った汎用小型演算処理・制御システムであり、2008年度打上予定の小型実証衛星(SDS-I)への搭載に向けて開発が進められている。

我々は、このSWIMの超小型宇宙実験プラットフォーム開発の一環として、超小型重力波検出器(SWIM <sub>$\mu\nu$</sub> )の開発を進めている。この超小型重力波検出器は、小型であるために実際の重力波観測に十分な感度は実現できないが、試験質量変動の検出や非接触制御など、将来の本格的な検出器と同様を実証試験をする最初のステップとなる。

SWIM <sub>$\mu\nu$</sub> は、80mm立方程度の大きさのモジュール2つと制御用基板で構成されている。各モジュール内には、長さ50mm、質量50g程度の試験質量が非接触保持されており、その試験質量とフレームとの間の距離をフォトセンサーで読み取ることによって、衛星と試験質量の間の相対変動を検出できるようになっている。2つのモジュール内の試験質量は互いに直交する方向に配置されており、重力波によってそれらが差動回転変動する効果を観測する、というのが重力波検出の原理になる。

一方、本検出器は、衛星内に非接触保持された試験質量を基準にして、人工衛星の変動を観測する精密加速度計としての側面も持っている。つまり、本検出器では人工衛星内の振動環境を実測したデータが得られる見込みである。従って、本検出器での測定結果は、将来の本格的な宇宙重力波検出器や、人工衛星を利用した精密計測実験などに広く活用できるものになることが期待できる。

現時点までに、試験質量を収めるモジュール構造体、変動を読み取るためのフォトセンサー、モジュールの変動モニタ用センサ、信号取得と試験質量位置の制御に用いる信号処理ボード等の各要素の設計と試作、試験などが進められており、宇宙実装に向けた準備が完了しつつある。[22, 28, 41]

### SWIM-信号処理系開発

SWIMはSpaceWire実現や棒状試験質量制御のためにFPGA(Field Programmable Gate Array)を持つ。我々は、必要なADC(Analog Digital Converter)などのICを選定し、SWIM地上試験用のSpaceWire ADC/DACボードを設計した。この試験用ボードを用いて、試験質量制御のためのデジタルフィルタやデータ取得が可能な組み込み制御系を開発した。[23]

### SWIM-制御系開発

SWIM<sub>μν</sub>では、フォトセンサー、コイル・マグネットアクチュエータによる制御系を用いる。フォトセンサーは、LEDからの赤外光を磨かれた棒状回転子表面で反射し、反射光をフォトダイオードでとらえることによって変動を検出するものであり、1モジュールあたり6つ取り付けられる。取得した変動信号はFPGAを用いて処理され、4つあるコイル・マグネットアクチュエータへフィードバックされる。また、消費電力を節減するため6つのフォトセンサをFPGAを用いて制御し、交互に点灯させることも一つの特徴である。本年度はこのような制御系のなかでも、特に重要な要素であるフォトセンサを試作し、その性能を評価した。その結果、センサのノイズレベルが1Hzにおいて $3 \times 10^{-9} \text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度であること、消費電力が許容範囲であること、フォトダイオードなどの素子にガンマ線を照射しても特性に劣化がないこと、などといういずれも良好な結果を得た。これらの試験結果を踏まえて改良を加え、打ち上げモデル用センサの製作を進めることとなった。[24]

### 6.3.3 精密計測の研究

#### 光ファイバーを用いたレーザー安定化

LCGTのような大型干渉計の光学素子の変動を抑えるための制御やDECIGOのような宇宙干渉計では、アラインメントのずれの影響を受けにくく、かつ高い安定度を持つレーザー光源が不可欠となる。そこで、本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。

本研究室では、光ファイバで構成された光共振器を基準として光ファイバ結合のレーザー光源の周波数を安定化する実験、また、光ファイバ結合された音響光学変調器(AOM)を用いた光強度安定化実験を行なっている。この研究の結果、従来の空間光を用いた方法では制御の難しかった1Hz帯において、周波数・強度をそれぞれ $1 \times 10^2 \text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $6 \times 10^{-7}/\sqrt{\text{Hz}}$ まで安定化することに成功した。現在、さらなる安定化の向上に向けて研究を継続中である。[12, 36]

### 磁気浮上の研究

高性能防振装置を使用した場合、振動振幅が微小であるため、支持に用いるワイヤーの内部摩擦や弾性の影響で防振比が制限されてしまう場合がある。そこで、本研究室では、永久磁石を用いて、被防振体を非接触で浮上支持することで、摩擦や、弾性による復元力の影響を排除した高性能防振装置の開発を行っている。その結果、400g程度の質量を持つマスを1ヶ月間程度の期間、安定に浮上支持させることに成功し、その安定性や制御特性の評価を行った。

また、より安定な浮上保持を実現し、本格的な重力波検出器へ応用することを念頭に置いて、超伝導体のピンニング効果を用いた磁気浮上装置の開発も行っている。超伝導状態を実現するための冷凍機の振動の影響を抑えるために低振動型のパルスチューブ冷凍機と、防振されたヒートリンクを備えた装置を用い、1kg程度の重量の試験マスを安定かつ低振動に浮上保持することを実現している。また、浮上体を回転させ、磁気摩擦などに起因する減衰を測定することによって、摩擦の影響が十分に小さいことを確認している。今後、浮上体を真空槽に入れることで、より本格的な重力波検出器の開発を進める予定である。[38]

### 6.3.4 熱雑音の研究

#### 宇宙重力波検出器における熱雑音の研究

宇宙空間レーザー干渉計重力波検出器DECIGOは、地上のレーザー干渉計では検出困難な低周波数領域の重力波を観測することを目的としている。

DECIGOの場合、低周波数帯の感度を制限する要因として加速度雑音、輻射圧雑音、鏡の熱雑音などがあげられる。これらのいずれもが鏡の質量が大きくなることによって低減することができる。そのため、打ち上げに問題がない範囲で鏡を重くする必要がある。実際、DECIGOの鏡は直径1m、質量100kgという大きなものを予定している。このような大きな鏡の熱雑音については前例が無く熱雑音がどの程度になるのかを調べる必要があるため、溶融石英で直径1mの一枚鏡を作成したときの鏡の熱雑音について数値シミュレーションにより推定し、そのときにDECIGOの目標感度を達成するために必要なQ値を見積もった。また、このように大型の鏡を1枚鏡として作成するのは困難であるから複合鏡の可能性も考えた。複合鏡にする場合、鏡同士の接触面における機械損失が問題となる。そのため、接触面の機械損失を知るひとつの例として熱はめという手法を取り入れ、単体のときと熱はめしたときの鏡材料のQ値を測定し接触面による機械損失がどの程度であるかを見積もった。[21, 35]

## 熱雑音の新しい解析法 (新モード解析法)

熱雑音推定のため従来使われてきたモード展開法に改良を加え、損失が非一様に分布している場合でも正しい熱雑音を与えるような解析方法を提案した。この新モード解析法では、従来考慮されてこなかった固有モード間の相関を取り入れることにより損失の分布に関わらず正しい熱雑音の値を得ることができる。この解析法により熱雑音に対する物理的考察が可能になった。また、この方法の妥当性は、損失が非一様に分布した試験体の熱雑音を実際に測定することにより検証された。[1]

&lt; 報文 &gt;

(原著論文)

- [1] Kazuhiro Yamamoto, Masaki Ando, Keita Kawabe, and Kimio Tsubono: Theoretical approach to thermal noise caused by an inhomogeneously distributed loss: Physical insight by the advanced modal expansion, *Phys. Rev. D* (2007) in press.
- [2] Tomomi Akutsu, and the TAMA Collaboration, Results of the search for inspiraling compact star binaries from TAMA300's observation in 2000-2004, *Phys. Rev. D* **74**-12 (2006) 122002.
- [3] B Abbott et al. (LIGO Scientific collaboration), T Akutsu et al. (TAMA Collaboration), Joint LIGO and TAMA300 search for gravitational waves from inspiraling neutron star binaries, *Phys. Rev. D* **73**-10 (2006) 102002.
- [4] Akutsu T, Ando M, Kanda N, Tatsumi D, Telada S, Miyoki S, Ohashi M, and TAMA Collaboration, Analysis of gravitational wave bursts in TAMA300 data using an ALF filter, *Class. Quantum Grav.* **23** (2006) S715-S721.
- [5] Kuroda K, Kanda N, Ohashi M, Saito Y, Takahashi R, Ando M, Mio N, Telada S, Moriawaki S, Uchiyama T, Tomaru T, Suzuki T, Miyoki S, Takamori A, Tatsumi D, and LCGT Collaboration, Experimental Efforts to Detect Gravitational Waves —Large Scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope—, *Progress of Theoretical Physics Supplement* **163** (2006) 54-99.
- [6] Miyoki S, Uchiyama T, Yamamoto K, Ohashi M, Kuroda K, Akutsu T, Kamagasako S, Nakagawa N, Tokunari M, Kasahara K, Telada S, Tomaru T, Suzuki T, Sato N, Shintomi T, Haruyama T, Yamamoto A, Tatsumi D, Ando M, Araya A, Takamori A, Takemoto S, Momose H, Hayakawa H, Morii W, Akamatsu J, The CLIO project, *Class. Quantum Grav.* **23** (2006) S231-S237.

(会議抄録)

- [7] 安東 正樹, 川村 静児, 中村 卓史, 坪野 公夫, 瀬戸 直樹, 長野 重夫, 田中 貴浩, 石川 毅彦, 植田 憲一, 武者満, 佐藤 孝, 細川 瑞彦, 森脇 成典, 高島 健, 沼田 健司, 平林 久, 高野 忠, 藤本 真克, 樽家 篤史, 姫本 宣

朗, 柳 哲文, 中尾 憲一, 原田 知広, 井岡 邦仁, 佐合 紀親, 疋田 涉, 佐藤 修一, 苔山 圭以子, 福嶋 美津広, 國森 裕生, 山崎 利孝, 大河 正志, 橋本 樹明, 高橋 忠幸, 青柳 巧介, 我妻 一博, 阿久津 智忠, 浅田 秀樹, 麻生 洋一, 新井 宏二, 新谷 昌人, 池上 健, 石徹白 晃治, 市 未 淨與, 伊藤 洋介, 井上 開輝, 戎崎 俊一, 江里口 良治, 大石 奈緒子, 大橋 正健, 大原 謙一, 奥富 聡, 鎌ヶ 迫 将悟, 河島 信樹, 川村 麻里, 神田 展行, 雁津 克彦, 木内 建太, 桐原 裕之, 工藤 秀明, 黒田 和明, 郡 和範, 古在 由秀, 小高 康史, 小林 史歩, 西條 統之, 阪上 雅昭, 阪田 紫帆里, 佐々木 節, 柴田 大, 真貝 寿明, 杉山 直, 宗宮 健太郎, 祖谷 元, 高橋 弘毅, 高橋 龍一, 高橋 竜太郎, 田越 秀行, 田代 寛之, 谷口 敬介, 千葉 剛, 辻川 信二, 常定 芳基, 徳成 正雄, 内藤 勲夫, 中川 憲保, 中野 寛之, 中村 康二, 西澤 篤志, 丹羽 佳人, 野沢 超越, 端山 和大, 平松 尚志, 二間瀬 敏史, 前田 恵一, 松原 英雄, 水澤 広美, 蓑 泰志, 宮川 治, 三代木 伸二, 向山 信治, 森澤 理之, 山元 一広, 横山 順一, 吉田 至順, 吉野 泰造, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画, 第 6 回宇宙科学シンポジウム (2006 年 1 月 6 日 宇宙科学研究本部 相模原, 神奈川).

(学位論文)

- [8] 鈴木健晃: TAMA300 データを用いた未知パルサーの探査, 修士論文, 2007 年.

&lt; 学術講演 &gt;

(国際会議)

一般講演

- [9] Masaki Ando and DECIGO collaboration, DECIGO: the Japanese Space Gravitational Wave Antenna, 11th Marcel Grossmann Meeting on General Relativity (July 23 - 29, 2006, Freie Universität Berlin).
- [10] Koji Ishidoshiro, Masaki Ando, Kimio Tsubono and TAMA collaboration: Systematical veto by all monitor signals 11th Gravitational Wave Data Analysis Workshop (Dorint Novotel, Potsdam, Germany December, 2006).

(国内会議)

一般講演

- [11] 辰巳大輔, 新井宏二, 高橋竜太郎, 中川憲保, 我妻一博, 荒瀬勇太, 福嶋美津広, 山崎利孝, 高森昭光, A. Bertolini, R. DeSalvo, 佐藤修一, 麻生洋一, 阿久津智忠, 常定芳基, 長野重夫, 安東正樹, 三代木伸二, 森脇成典, 神田展行, 武者満, 藤本真克, 川村静児, 三尾典克, 大橋正健, 黒田和明, 坪野公夫, TAMA Collaboration, 干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 IX (低雑音化), 日本物理学会 2007 年春季大会 (2007 年 3 月、首都大学東京、南大沢).
- [12] 高橋竜太郎, 我妻一博, 荒瀬勇太, 福嶋美津広, 山崎利孝, 辰巳大輔, 新井宏二, 中川憲保, 高森昭光, A. Bertolini, R. DeSalvo, 佐藤修一, 麻生洋一, 阿久津智忠, 常定芳基, 長野重夫, 安東正樹, 三代木伸二, 森脇成典, 神田展行, 武者満, 藤本真克, 川村静児,

- 三尾典克, 大橋正健, 黒田和明, 坪野公夫, TAMA Collaboration, 干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 X (低周波防振装置 1), 日本物理学会 2007 年春季大会 (2007 年 3 月、首都大学東京、南大沢).
- [13] 我妻一博, 高橋竜太郎, 荒瀬勇太, 福嶋美津広, 山崎利孝, 辰巳大輔, 新井宏二, 中川憲保, 高森昭光, A. Bertolini, R. DeSalvo, 佐藤修一, 麻生洋一, 阿久津智忠, 常定芳基, 長野重夫, 安東正樹, 三代木伸二, 森脇成典, 神田展行, 武者満, 藤本真克, 川村静児, 三尾典克, 大橋正健, 黒田和明, 坪野公夫, TAMA Collaboration, 干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 XI (低周波防振装置 2), 日本物理学会 2007 年春季大会 (2007 年 3 月、首都大学東京、南大沢).
- [14] 荒瀬勇太, 高橋竜太郎, 我妻一博, 福嶋美津広, 山崎利孝, 辰巳大輔, 新井宏二, 中川憲保, 高森昭光, A. Bertolini, R. DeSalvo, 佐藤修一, 麻生洋一, 阿久津智忠, 常定芳基, 長野重夫, 安東正樹, 三代木伸二, 森脇成典, 神田展行, 武者満, 藤本真克, 川村静児, 三尾典克, 大橋正健, 黒田和明, 坪野公夫, TAMA Collaboration, 干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 XII (低周波防振装置 3), 日本物理学会 2007 年春季大会 (2007 年 3 月、首都大学東京、南大沢).
- [15] 新井宏二, 辰巳大輔, 高橋竜太郎, 中川憲保, 我妻一博, 荒瀬勇太, 福嶋美津広, 山崎利孝, 高森昭光, A. Bertolini, R. DeSalvo, 佐藤修一, 麻生洋一, 阿久津智忠, 常定芳基, 長野重夫, 安東正樹, 三代木伸二, 森脇成典, 神田展行, 武者満, 藤本真克, 川村静児, 三尾典克, 大橋正健, 黒田和明, 坪野公夫, TAMA Collaboration, 干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 XIII (干渉計開発), 日本物理学会 2007 年春季大会 (2007 年 3 月、首都大学東京、南大沢).
- [16] 黒田和明, 大橋正健, 三代木伸二, 内山隆, 石塚秀喜, 山元一広, 岡田淳, 奥富聡, 徳成正雄, 阿久津朋美, 中川憲保, 鎌ヶ迫将悟, 我妻一博, 桐原裕之, 藤本真克, 川村静児, 高橋竜太郎, 山崎利孝, 新井宏二, 辰巳大輔, 上田暁俊, 福嶋美津広, 佐藤修一, Leonhardt Volker, 山本明, 斎藤芳男, 春山富義, 鈴木敏一, 木村誠宏, 佐藤伸明, 都丸隆行, 坪野公夫, 安東正樹, 高城毅, 柳村幸, 石徹白晃治, 鈴木健晃, 高橋走, 小野里光司, 米田仁紀, 中川賢一, 武者満, 三尾典克, 森脇成典, 新谷昌人, 高森昭光, 阿久津智忠, 荒瀬勇太, 神田展行, 寺田聡一, 高辻利之, 尾藤洋一, 長野重夫, 田越秀行, 佐合紀親, 藤田龍一, 中村卓史, 田中貴浩, 佐々木節, 西澤篤志, 阪田紫帆里, 川添史子, 苔山圭以子, 柴田大, 新富孝和, 宗宮健太郎, 高橋弘毅, Yanbei Chen, Archana Pai, Linqing Wen, 河邊径太, 宮川治, M.E.Tobar, D. Blair, JuLi, Chunnong Zhao, 端山和大, 中野寛之, Zong-Hong Zhu, S. Dhurandhar, S. Mitra, H. Muckhopadhyay, V. Milyukov, L. Baggio, Yang Zhang, Chao-Guang Huang, 沼田健司, 麻生洋一, 大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) 計画 XI, 日本物理学会 2007 年春季大会 (2007 年 3 月、首都大学東京、南大沢).
- [17] 川村静児, 安東正樹, 高橋龍一, 中村卓史, 坪野公夫, 田中貴浩, 瀬戸直樹, 沼田健司, 船木一幸, 森本睦子, 佐藤修一, 青柳巧介, 我妻一博, 阿久津智忠, 阿久津朋美, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 荒瀬勇太, 新谷昌人, 井岡邦仁, 池上健, 石川毅彦, 石徹白晃治, 市来淨與, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 植田憲一, 榎基宏, 戎崎俊一, 江里口良治, 大石奈緒子, 大河正志, 大橋正健, 大原謙一, 奥富聡, 小野里光司, 鎌ヶ迫将悟, 河島信樹, 川添史子, 神田展行, 雁津克彦, 木内建太, 桐原裕之, 工藤秀明, 國中均, 國森裕生, クラウス・ヴェルナー, 黒田和明, 小泉宏之, 郡和範, 苔山圭以子, 古在由秀, 小島康史, 固武慶, 小林史歩, 西條統之, 坂井真一郎, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親, 佐々木節, 佐藤孝, 柴田大, 真貝寿明, 杉山直, 宗宮健太郎, 祖谷元, 高野忠, 高橋走, 高橋忠幸, 高橋弘毅, 高橋竜太郎, 高森昭光, 田越秀行, 田代寛之, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 辻川信二, 常定芳基, 徳田充, 徳成正雄, 豊嶋守生, 内藤勲夫, 中尾憲一, 中川憲保, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中山宜典, 西澤篤志, 西田恵里奈, 西山和孝, 丹羽佳人, 橋本樹明, 端山和大, 原田知広, 疋田涉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志, 福嶋美津広, 藤本真克, 二間瀬敏史, 細川瑞彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 三浦純一, 養泰志, 宮川治, 三代木伸二, 向山信治, 武者満, 森岡友子, 森澤理之, 森脇成典, 柳哲文, 山崎利孝, 山元一広, 横山順一, 吉田至順, 吉野泰造, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 VII (設計・計画), 日本物理学会 2007 年春季大会 (2007 年 3 月、首都大学東京、南大沢).
- [18] 高橋龍一, 川村静児, 安東正樹, 中村卓史, 坪野公夫, 田中貴浩, 瀬戸直樹, 沼田健司, 船木一幸, 森本睦子, 佐藤修一, 青柳巧介, 我妻一博, 阿久津智忠, 阿久津朋美, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 荒瀬勇太, 新谷昌人, 井岡邦仁, 池上健, 石川毅彦, 石徹白晃治, 市来淨與, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 植田憲一, 榎基宏, 戎崎俊一, 江里口良治, 大石奈緒子, 大河正志, 大橋正健, 大原謙一, 奥富聡, 小野里光司, 鎌ヶ迫将悟, 河島信樹, 川添史子, 神田展行, 雁津克彦, 木内建太, 桐原裕之, 工藤秀明, 國中均, 國森裕生, クラウス・ヴェルナー, 黒田和明, 小泉宏之, 郡和範, 苔山圭以子, 古在由秀, 小島康史, 固武慶, 小林史歩, 西條統之, 坂井真一郎, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親, 佐々木節, 佐藤孝, 柴田大, 真貝寿明, 杉山直, 宗宮健太郎, 祖谷元, 高野忠, 高橋走, 高橋忠幸, 高橋弘毅, 高橋竜太郎, 高森昭光, 田越秀行, 田代寛之, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 辻川信二, 常定芳基, 徳田充, 徳成正雄, 豊嶋守生, 内藤勲夫, 中尾憲一, 中川憲保, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中山宜典, 西澤篤志, 西田恵里奈, 西山和孝, 丹羽佳人, 橋本樹明, 端山和大, 原田知広, 疋田涉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志, 福嶋美津広, 藤本真克, 二間瀬敏史, 細川瑞彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 三浦純一, 養泰志, 宮川治, 三代木伸二, 向山信治, 武者満, 森岡友子, 森澤理之, 森脇成典, 柳哲文, 山崎利孝, 山元一広, 横山順一, 吉田至順, 吉野泰造, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 VIII (サイエンス), 日本物理学会 2007 年春季大会 (2007 年 3 月、首都大学東京、南大沢).
- [19] 安東正樹, 川村静児, 高橋龍一, 中村卓史, 坪野公夫, 田中貴浩, 瀬戸直樹, 沼田健司, 船木一幸, 森本睦子, 佐藤修一, 青柳巧介, 我妻一博, 阿久津智忠, 阿久津朋美, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 荒瀬勇太, 新

- 谷昌人, 井岡邦仁, 池上健, 石川毅彦, 石徹白晃治, 市来淨與, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 植田憲一, 榎基宏, 戎崎俊一, 江里口良治, 大石奈緒子, 大河正志, 大橋正健, 大原謙一, 奥富聡, 小野里光司, 鎌ヶ迫将悟, 河島信樹, 川添史子, 神田展行, 雁津克彦, 木内建太, 桐原裕之, 工藤秀明, 國中均, 國森裕生, クラウス・ヴェルナー, 黒田和明, 小泉宏之, 郡和範, 苔山圭以子, 古在由秀, 小嶋康史, 固武慶, 小林史歩, 西條統之, 坂井真一郎, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親, 佐々木節, 佐藤孝, 柴田大, 真貝寿明, 杉山直, 宗宮健太郎, 祖谷元, 高野忠, 高橋走, 高橋忠幸, 高橋弘毅, 高橋竜太郎, 高森昭光, 田越秀行, 田代寛之, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 辻川信二, 常定芳基, 徳田充, 徳成正雄, 豊嶋守生, 内藤勲夫, 中尾憲一, 中川憲保, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中山宜典, 西澤篤志, 西田恵里奈, 西山和孝, 丹羽佳人, 橋本樹明, 端山和大, 原田知広, 疋田涉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志, 福嶋美津広, 藤本眞克, 二間瀬敏史, 細川瑞彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 三浦純一, 蓑泰志, 宮川治, 三代木伸二, 向山信治, 武者満, 森岡友子, 森澤理之, 森脇成典, 柳哲文, 山崎利孝, 山元一広, 横山順一, 吉田至順, 吉野泰造, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 IX (DECIGO パスファインダー), 日本物理学会 2007 年春季大会 (2007 年 3 月、首都大学東京、南大沢).
- [20] 高橋走, 安東正樹, 坪野公夫, 光ファイバーを用いたレーザー光源の強度・周波数安定化 II, 日本物理学会 2007 年春季大会 (2007 年 3 月、首都大学東京、南大沢).
- [21] 小野里光司, 安東正樹, 坪野公夫, 宇宙重力波検出器における熱雑音の研究 I, 日本物理学会 2007 年春季大会 (2007 年 3 月、首都大学東京、南大沢).
- [22] 安東正樹, 森脇成典, 石徹白晃治, 穀山涉, 新谷昌人, 麻生洋一, 高島健, 中澤知洋, 高橋忠幸, 国分紀秀, 吉光徹雄, 小高裕和, 湯浅孝行, 石川毅彦, 榎戸輝揚, 川浪徹, 苔山圭以子, 坂井真一郎, 佐藤修一, 高森昭光, 坪野公夫, 戸田知朗, 橋本樹明, 松岡彩子, 宇宙実験実証プラットフォーム (SWIM) を用いた超小型重力波検出器の開発 I (概要), 日本物理学会 2007 年春季大会 (2007 年 3 月、首都大学東京、南大沢).
- [23] 石徹白晃治, 安東正樹, 森脇成典, 穀山涉, 新谷昌人, 麻生洋一, 高島健, 中澤知洋, 高橋忠幸, 国分紀秀, 吉光徹雄, 小高裕和, 湯浅孝行, 石川毅彦, 榎戸輝揚, 川浪徹, 苔山圭以子, 坂井真一郎, 佐藤修一, 高森昭光, 坪野公夫, 戸田知朗, 橋本樹明, 松岡彩子, 宇宙実験実証プラットフォーム (SWIM) を用いた超小型重力波検出器の開発 II (信号処理系), 日本物理学会 2007 年春季大会 (2007 年 3 月、首都大学東京、南大沢).
- [24] 穀山涉, 安東正樹, 森脇成典, 石徹白晃治, 新谷昌人, 麻生洋一, 高島健, 中澤知洋, 高橋忠幸, 国分紀秀, 吉光徹雄, 小高裕和, 湯浅孝行, 石川毅彦, 榎戸輝揚, 川浪徹, 苔山圭以子, 坂井真一郎, 佐藤修一, 高森昭光, 坪野公夫, 戸田知朗, 橋本樹明, 松岡彩子, 宇宙実験実証プラットフォーム (SWIM) を用いた超小型重力波検出器の開発 III (制御系), 日本物理学会 2007 年春季大会 (2007 年 3 月、首都大学東京、南大沢).
- [25] 本多了太, 安東正樹, 田越秀行, 辰巳大輔, 阿久津朋美, 粟家律親, 徳田充, 神田展行, 多変量クラスターを用いた TAMA300 データのバースト重力波解析 I, 日本物理学会 2007 年春季大会 (2007 年 3 月、首都大学東京、南大沢).
- [26] 内山 隆, 黒田和明, 大橋正健, 三代木伸二, 山元一広, 奥富聡, 徳成正雄, 阿久津朋美, 鎌ヶ迫将悟, 中川憲保, 桐原裕之, 我妻一博, 山本明, 春山富義, 鈴木敏一, 佐藤伸明, 都丸隆行, 早河秀章, 新谷昌人, 高森昭光, 辰巳大輔, 安東正樹, 寺田聡一, 粟家規親, 神田展行, 新富孝和, 低温レーザー干渉計 CLIO (XI), 日本物理学会 2007 年春季大会 (2007 年 3 月、首都大学東京、南大沢).
- [27] 寺田聡一, 内山隆, 黒田和明, 大橋正健, 三代木伸二, 山元一広, 奥富聡, 徳成正雄, 阿久津朋美, 鎌ヶ迫将悟, 中川憲保, 桐原裕之, 我妻一博, 山本明, 春山富義, 鈴木敏一, 佐藤伸明, 都丸隆行, 早河秀章, 新谷昌人, 高森昭光, 辰巳大輔, 安東正樹, 粟家規親, 神田展行, 新富孝和, 低温レーザー干渉計 CLIO (X), 日本物理学会 2007 年春季大会 (2007 年 3 月、首都大学東京、南大沢).
- [28] 安東 正樹, 石徹白 晃治, 穀山 涉, 湯浅 孝行, 榎戸 輝揚, 坪野 公夫, 森脇 成典, 川浪 徹, 新谷 昌人, 高森昭光, 高橋 忠幸, 高島 健, 吉光 徹雄, 中澤 知洋, 国分紀秀, 吉光 徹雄, 小高 裕和, 坂井 真一郎, 戸田 知朗, 橋本 樹明, 松岡 彩子, 麻生 洋一, 石川 毅彦, 佐藤 修一, 苔山 圭以子, SWIM 搭載にむけた超小型重力波検出器の開発, 第 7 回 宇宙科学シンポジウム (2006 年 12 月 21, 22 日 宇宙科学研究本部, 相模原).
- [29] 安東 正樹, 川村 静児, 中村 卓史, 坪野 公夫, 瀬戸 直樹, 長野 重夫, 田中 貴浩, 石川 毅彦, 植田 憲一, 武者満, 佐藤 孝, 細川 瑞彦, 森脇 成典, 高島 健, 沼田 健司, 平林 久, 高野 忠, 藤本 眞克, 樽家 篤史, 姫本 宣朗, 柳 哲文, 中尾 憲一, 原田 知広, 井岡 邦仁, 佐合 紀親, 疋田 涉, 佐藤 修一, 苔山 圭以子, 福嶋 美津広, 國森 裕生, 山崎 利孝, 大河 正志, 橋本 樹明, 高橋 忠幸, 青柳 巧介, 我妻 一博, 阿久津 智忠, 浅田 秀樹, 麻生 洋一, 新井 宏二, 新谷 昌人, 池上 健, 石徹白 晃治, 市来 淨與, 伊藤 洋介, 井上 開輝, 戎崎 俊一, 江里口 良治, 大石 奈緒子, 大橋 正健, 大原 謙一, 奥富 聡, 鎌ヶ迫 将悟, 河島 信樹, 川村 麻里, 神田 展行, 雁津 克彦, 木内 建太, 桐原 裕之, 工藤 秀明, 黒田 和明, 郡 和範, 古在 由秀, 小嶋 康史, 小林 史歩, 西條 統之, 阪上 雅昭, 阪田 紫帆里, 佐々木 節, 柴田 大, 真貝 寿明, 杉山 直, 宗宮 健太郎, 祖谷 元, 高橋 弘毅, 高橋 龍一, 高橋 竜太郎, 田越 秀行, 田代 寛之, 谷口 敬介, 千葉 剛, 辻川 信二, 常定 芳基, 徳成 正雄, 内藤 勲夫, 中川 憲保, 中野 寛之, 中村 康二, 西澤 篤志, 丹羽 佳人, 野沢 超越, 端山 和大, 平松 尚志, 二間瀬 敏史, 前田 恵一, 松原 英雄, 水澤 広美, 蓑 泰志, 宮川 治, 三代木 伸二, 向山 信治, 森澤 理之, 山元 一広, 横山 順一, 吉田 至順, 吉野 泰造, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画, フォーメーションフライト研究会 (2006 年 12 月 13 日 KKR ホテル熱海, 熱海).
- [30] 辰巳大輔, 麻生洋一, 新井宏二, 高橋竜太郎, 中川憲保, 我妻一博, 荒瀬勇太, 福嶋美津広, 山崎利孝, 高森昭光, A. Bertolini, R. DeSalvo, 佐藤修一, 阿久津智忠, 常定芳基, 長野重夫, 安東正樹, 三代木伸二,

- 森脇成典, 神田展行, 武者満, 藤本真克, 川村静児, 三尾典克, 大橋正健, 黒田和明, 坪野公夫, TAMA Collaboration, 干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 VII (低雑音化), 日本物理学会 2006 年秋季大会 (2006 年 9 月、奈良女子大学、奈良).
- [31] 我妻一博, 高橋竜太郎, 荒瀬勇太, 辰巳大輔, 麻生洋一, 新井宏二, 中川憲保, 福嶋美津広, 山崎利孝, 高森昭光, A. Bertolini, R. DeSalvo, 佐藤修一, 阿久津智忠, 常定芳基, 長野重夫, 安東正樹, 三代木伸二, 森脇成典, 神田展行, 武者満, 藤本真克, 川村静児, 三尾典克, 大橋正健, 黒田和明, 坪野公夫, TAMA Collaboration, 干渉計型重力波検出器 TAMA300 開発の現状 VIII (低周波防振装置), 日本物理学会 2006 年秋季大会 (2006 年 9 月、奈良女子大学、奈良).
- [32] 鈴木健晃, 安東正樹, 坪野公夫, TAMA300 データによる連続波解析, 日本物理学会 2006 年秋季大会 (2006 年 9 月、奈良女子大学、奈良).
- [33] 石徹白晃治, 安東正樹, 姫本宣朗, 神田展行, 坪野公夫, TAMA300 データを用いた GCC 統計の評価, 日本物理学会 2006 年秋季大会 (2006 年 9 月、奈良女子大学、奈良).
- [34] 川村静児, 中村卓史, 安東正樹, 坪野公夫, 瀬戸直樹, 沼田健司, 田中貴浩, 青柳巧介, 我妻一博, 阿久津智忠, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 新谷昌人, 井岡邦仁, 池上健, 石川毅彦, 石徹白晃治, 市末淨與, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 植田憲一, 榎基宏, 戎崎俊一, 江里口良治, 大石奈緒子, 大河正志, 大橋正健, 大原謙一, 奥富聡, 鎌ヶ迫将悟, 河島信樹, 神田展行, 雁津克彦, 木内謙太, 桐原裕之, 工藤秀明, 國森裕生, クラウス・ヴェルナー, 黒田和明, 郡和範, 蒼山圭以子, 古在由秀, 小島康史, 小林史歩, 西條統之, 坂井真一郎, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親, 佐々木節, 佐藤修一, 佐藤孝, 柴田大, 真貝寿明, 杉山直, 宗宮健太郎, 祖谷元, 高野忠, 高橋忠幸, 高橋弘毅, 高橋龍一, 高橋竜太郎, 高森昭光, 田越秀行, 田代寛之, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 辻川信二, 常定芳基, 徳成正雄, 豊嶋守生, 内藤勲夫, 中尾憲一, 中川憲保, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 西澤篤志, 西田恵里奈, 丹羽佳人, 橋本樹明, 端山和大, 原田知広, 疋田涉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志, 福嶋美津広, 藤本真克, 二間瀬敏史, 細川瑞彦, 前田恵一, 松原英雄, 三浦純一, 蓑泰志, 宮川治, 三代木伸二, 向山信治, 武者満, 森岡友子, 森澤理之, 森本睦子, 森脇成典, 柳哲文, 山崎利孝, 山元一広, 横山順一, 吉田至順, 吉野泰造, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画, 日本物理学会 2006 年秋季大会 (2006 年 9 月、奈良女子大学、奈良).
- [35] 小野里光司, 安東正樹, 坪野公夫, 宇宙重力波検出器における熱雑音の研究, 日本物理学会 2006 年秋季大会 (2006 年 9 月、奈良女子大学、奈良).
- [36] 高橋走, 安東正樹, 坪野公夫, 光ファイバーを用いたレーザー光源の強度・周波数安定化 I, 日本物理学会 2006 年秋季大会 (2006 年 9 月、奈良女子大学、奈良).
- [37] 黒田和明, 大橋正健, 三代木伸二, 内山 隆, 石塚秀喜, 山元一広, 岡田 淳, 奥富 聡, 徳成正雄, 阿久津朋美, 中川憲保, 鎌ヶ迫将悟, 我妻一博, 桐原裕之, 藤本真克, 川村静児, 高橋竜太郎, 山崎利孝, 新井宏二, 辰巳大輔, 上田暁俊, 福嶋美津広, 佐藤修一, 山本 明, 斎藤芳男, 春山富義, 鈴木敏一, 佐藤伸明, 都丸隆行, 坪野公夫, 安東正樹, 高城 毅, 榎村 宰, 石徹白晃治, 鈴木健晃, 高橋 走, 小野里光司, 米田仁紀, 中川賢一, 武者 満, 三尾典克, 森脇成典, 新谷昌人, 高森昭光, 阿久津智忠, 荒瀬勇太, 神田展行, 寺田聡一, 高辻利之, 尾藤洋一, 長野重夫, 田越秀行, 佐合紀親, 藤田龍一, 中村卓史, 田中貴浩, 佐々木節, 西澤篤志, 阪田紫帆里, 川添史子, 蒼山圭以子, 柴田大, 新富孝和, 宗宮健太郎, 高橋弘毅, Yanbei Chen, Archana Pai, 河邊径太, 宮川 治, M.E.Tobar, D. Blair, Ju Li, Chunnong Zhao, 端山和大, 中野寛之, Zong-Hong Zhu, S. Dhurandhar, S. Mitra, H. Mukhopadhyay, V. Milyukov, L. Baggio, Yang Zhang, Chao-Guang Huang, 沼田健司, 麻生洋一, 大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) 計画, 日本物理学会 2006 年秋季大会 (2006 年 9 月、奈良女子大学、奈良).
- [38] 安東正樹, 穀山涉, 久徳浩太郎, 高森昭光, 石徹白晃治, 坪野公夫, 低周波重力波検出器の開発 I, 日本物理学会 2006 年秋季大会 (2006 年 9 月、奈良女子大学、奈良).
- [39] 本多了太, 安東正樹, 田越秀行, 辰巳大輔, 阿久津朋美, 粟家律親, 徳田充, 神田展行, 多変量クラスタを用いた TAMA300 データのバースト重力波解析 I, 日本物理学会 2006 年秋季大会 (2006 年 9 月、奈良女子大学、奈良).
- [40] 内山 隆, 黒田和明, 大橋正健, 三代木伸二, 山元一広, 奥富 聡, 徳成正雄, 阿久津朋美, 鎌ヶ迫将悟, 中川憲保, 桐原裕之, 我妻一博, 山本明, 春山富義, 鈴木敏一, 佐藤伸明, 都丸隆行, 早河秀章, 新谷昌人, 高森昭光, 辰巳大輔, 安東正樹, 寺田聡一, 粟家規親, 神田展行, 新富孝和, 低温レーザー干渉計 CLIO (XI), 日本物理学会 2006 年秋季大会 (2006 年 9 月、奈良女子大学、奈良).
- [41] 安東 正樹, 他, 重力波天文学に向けた小型衛星による検証実験, スペースウィーク 2006 (2006 年 6 月 28 日 筑波宇宙センター総合開発推進棟, 筑波).
- [42] 安東 正樹, DECIGO-WG, DECIGO パスファインダー 1, スペース重力波アンテナ (DECIGO) WG 第 4 回ミーティング (2006 年 05 月 11 日 国立天文台, 東京).
- [43] 安東 正樹, DECIGO-WG, DECIGO の干渉計方式, スペース重力波アンテナ (DECIGO) WG 第 4 回ミーティング (2006 年 05 月 11 日 国立天文台, 東京).
- [44] 坪野公夫, DECIGO の光学素子, スペース重力波アンテナ (DECIGO) WG 第 4 回ミーティング (2006 年 05 月 11 日 国立天文台, 東京).
- (セミナー)
- [45] 安東 正樹, 重力波検出器の開発、データの解析 (2007 年 01 月 18 日, 東京大学 工学系研究科, 東京)

## 6.4 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を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い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。

### 6.4.1 非線形非平衡系の物理学

#### 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。

本年度は可動ステージを用いてセンサーを移動可能とし、対流セルの高さ方向 ( $z$ ) に沿った水平方向 ( $x$ ) 流速分布の測定を行い以下の知見を得た。図 6.4.16 に、 $x$ - $z$  面内における流速分布を示す。観測された水平断面の速度場は、平均流の存在を示しているとともに早い変動成分の存在も明らかにした。同時に計測された上面近くの速度場の水平成分の長時間測定から乱流中の平均流の反転の特徴的時間スケールが数 10 秒という結果が得られた。これは水などの他の高プラントル数流体で見つがっている時間スケールに比べても 1 桁小さい値であり、低プラントル数流体の特徴が現れていると推察された。今後、長時間にわたる温度分布の測定などと併せて、この観測結果をより

精密に検証する必要がある。 [14, 28, 29, 32, 46, 72]

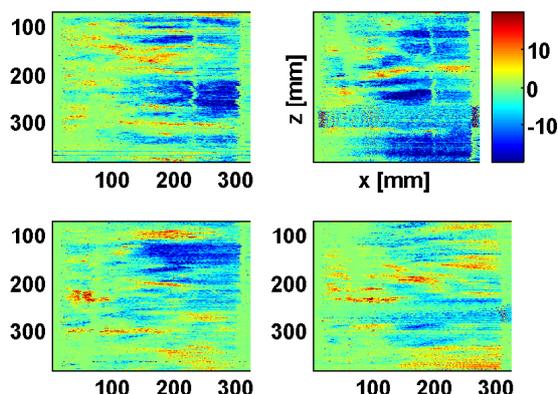


図 6.4.16:  $x$ - $z$  面内における流速分布 (連続した 4 回のスキャン)、レイリー数  $Ra = 1.6 \times 10^{10}$ 、 $z$  方向スキャンスピード 10 mm/sec。

#### 散逸粒子系の統計則

粉体は環境条件によって固体、液体、気体に類似の性質を示すだけでなく、相分離やクラスター形成などの特異な現象を示す。しかし、その構成方程式はまだ確立しておらず、粉体の扱いには経験則が用いられている。本研究では粉体の非平衡状態を作り出し、散逸粒子系の統計力学的、流体力学的性質を明らかにすることが目的である。

外部加振 (励起) により二次元粉体ガス系を構築し、地上及び放物フライトによる微小重力下で実験を行った。高速度カメラを用いた粒子追跡法により速度分布関数、粉体温度 (速度の二乗平均値)、拡散定数等の統計量を求めた結果、“定常状態”における励起強度の変化に伴う統計量の変化は、粒子の平均衝突時間と外部励起の加わる典型的時間の比を通して理解できることを明らかにした [25, 71]。また微小重力下で実験を行うことで、外部加振停止後の“自由冷却状態”を長時間測定し、速度分布関数の漸近的振る舞いを観測することに成功した (図 6.4.17)。従来の理論では、冷却過程の速度分布関数は指数分布に漸近することが予測されていたが、異なる形状のセルで実験を行った結果、分布関数の漸近形は系の構造により変化することが分かった [15, 42, 60]。さらに、微小重力実験においてミクロンからサブミリサイズの微小粒子を加振し、クラスターやバンドの形成現象を見出した [62]。

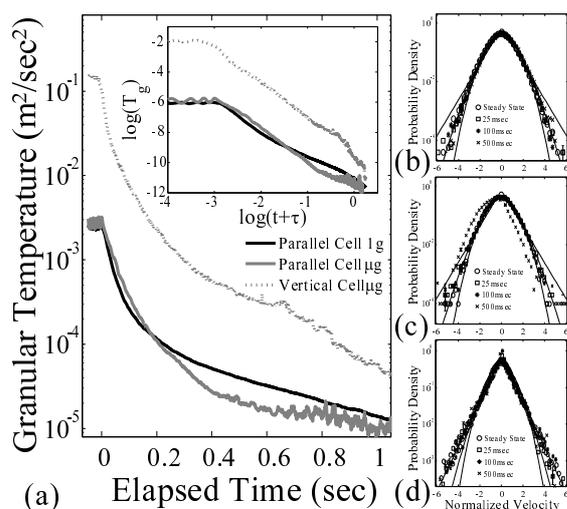


図 6.4.17: 自由冷却状態。(a) エネルギー減衰の様子。(b-d) 速度分布関数。(水平セル 1 g、水平セル  $\mu\text{g}$ 、垂直セル  $\mu\text{g}$ )

#### 垂直加振された粘弾性体の対流現象

非平衡状態では様々なパターンが自発的に形成される。我々は、ずり応力により流動化するシアーシニング物質を垂直加振すると、境界のあるなしに関わらず対流が生じることを発見した(図 6.4.18) [5]。

様々な試料に対し観測した結果、対流開始加速度は周波数に対し線形に増加し、対流開始は降伏応力で無次元化した量で特徴付けられることが分かった。また、対流ロール径の加速度依存性及び体積依存性や物質の粘弾性特性の測定から、この新奇な対流現象を示す物質には、シアーシニング特性及び弾性成分が粘性成分と比べて大きいという共通した特徴があることを明らかにした。[13, 16, 33, 44, 47, 67]

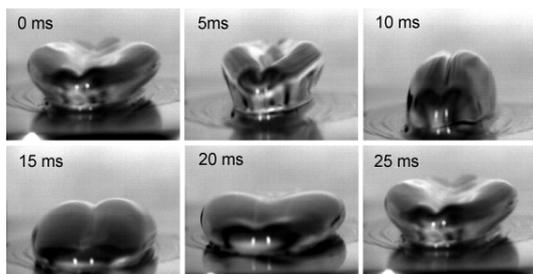


図 6.4.18: 2ロール対流の側面図(振動加速度:  $14.8 \times G$ 、 $G$ : 重力加速度、周波数: 40 Hz、体積: 5 mL)

#### せん断流の下での反応拡散系のパターン形成

非平衡系のパターン形成を記述するモデルとして、反応拡散モデルに移流項を加えた方程式がいくつかの系で提案されている。移流項を導入することでこれまでになかった種類のパターンをうまく記述することができる一方、そもそも移流項がパターン形成に寄与するメカニズムは明らかでなかった。そこで、周期パターンをつくることで知られる2次元ブラッセレータモデルに線形のせん断流を加えた系について考察した。

まずヘキサゴナルパターンの位相が満たす方程式を位相縮約の方法によって4次まで求めた。この式から、せん断流がある臨界値を超えると、非線形項に起因する新しいタイプの不安定化が起きることがわかった。これは位相の4次の項の係数が負であることに因る。せん断流はこの縮約した方程式において外力とみなすことができる。また周期パターンはこの外力に対して結晶格子のように応答する。この位相の式がもとのブラッセレータモデルを正しく縮約していることを数値計算により確かめた。また周期構造に導入された欠陥の、せん断流の下での運動についても議論した。[10, 17, 34]

#### 液晶電気対流における Directed Percolation 相転移の発見

Directed Percolation(DP)は吸収状態、すなわち入ったら二度と出られない状態への相転移を議論する際の基本モデルであり、そのユニバーサリティクラスは多種多様の非平衡系で見られることが数値的・理論的に確立されているが、実験的にそれが十分な信頼性をもって観測されたことは未だかつてない。これは非平衡相転移における最大の未解決問題の1つとして認識されている。

我々は液晶電気対流系の乱流間転移の高精度実験を行うことにより、DP転移の初めての実験的証拠を得ることに成功した。転移点近傍では2種類の乱流状態(DSM1-DSM2)が時空間欠的に共存するが、その様子は一見してDPモデルのふるまいと定性的に一致する(図 6.4.19a)。実験は電圧一定の定常状態と電圧急降下の際のクエンチ状態の2通りについて行い、オーダーパラメータのべき的立ち上がりをはじめ、臨界指数も含めてDPと精度よく一致するものであった。特にクエンチ実験による動的スケールリングの確認(図 6.4.19b)は実験的に試みられたのも初めてであり、臨界指数のみならず普遍スケールリング関数も一致することが示された。さらにDPに稀な自発生成を付加したモデルを考えることで、性質や起源が未解明であったDSM1-DSM2転移のヒステリシスを理論と数値計算の双方から定性的・定量的に説明した。これはDP普遍性の従来知られていなかった側面であり、液晶以外にも多種多様の実験系で観測されることが期待される。[9, 12, 35, 53, 57, 63, 73]

また、理論的・数值的に扱いやすい非平衡系の相転移現象を研究することにより、ある大自由度カオス系において非平衡相転移が不安定周期軌道分布の

特異性によって引き起こされること [6, 12]、Ising の転移を示す非平衡セルオートマトンにおいて先行研究に反して同期の有無だけでユニバーサリティクラスが変わらないこと [3, 12, 18] を示した。

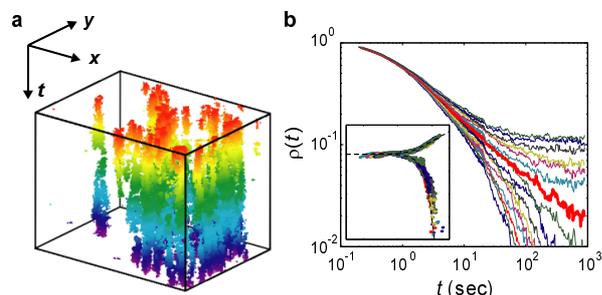


図 6.4.19: (a) 定常状態における DSM2 分布の時空プロット。時間方向への「浸透現象」との対応を強く示唆するふるまいである。(b) クエンチ時の DSM2 面積比 (オーダーパラメータ) の時間変化。転移点上 (太線) ではべき的に減衰する。臨界指数を用いてリスケールすると全ての曲線が重なる (挿図)。

#### 揺らぐ小さな系におけるエネルギー散逸率の測定

熱揺らぎが無視できない小さな系において、エネルギー散逸率を測定することは一般に困難である。しかし、原田-佐々により導出された等式を用いることで、Langevin 方程式で記述される非平衡定常状態において、散逸率を速度の相関関数および応答関数といった実験で比較的得やすい量から計算することが可能である [Harada and Sasa (2005)]。この等式は Markov 的な Langevin 等式に対して導かれたものであるが、最近、Deutsch と Narayan によって一般化 Langevin 方程式で記述される系に対してこの等式が拡張された [Deutsch and Narayan (2006)]。この拡張は、摩擦に時間遅れがある系でも散逸率を比較的容易に計算可能であることを示唆しており、実験で確認されれば非常に広範囲の応用が期待できる。

我々は、水中で直径  $1 \mu\text{m}$  のポリスチレン粒子を光ピンセットでトラップし、時間的にこのレーザートラップを駆動することで非平衡定常状態を構成し、原田-佐々等式を用いて散逸率を高い精度で測定することに初めて成功した [7]。また、Poly(Ethylene Oxide) の高分子溶液中で同様の実験を行い、Deutsch と Narayan によって拡張された原田-佐々等式を用いて散逸率を高い精度で測定することに初めて成功した (図 6.4.20)。このことは一般化 Langevin 方程式による系の記述の妥当性も示唆している。 [11, 19, 36, 45, 49, 64]

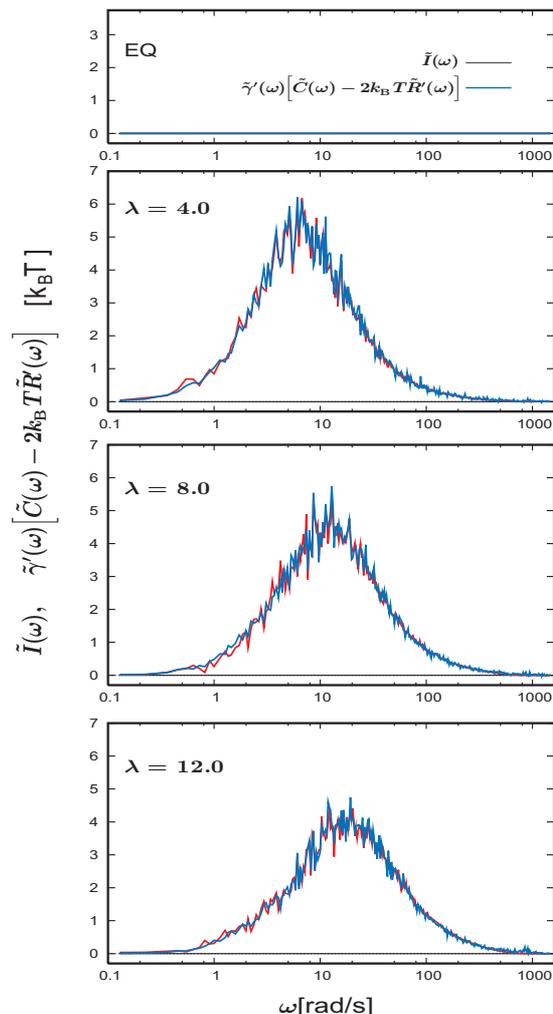


図 6.4.20: 高分子溶液中におけるエネルギー散逸率の周波数依存性。

#### 6.4.2 非平衡ソフトマターの物理学

##### 一分子 DNA の熱泳動現象

温度勾配により物質が輸送される現象は熱泳動現象として知られている。我々は水溶液中で局所温度勾配を作る方法を開発し、制御された勾配下で蛍光標識した一分子 DNA の熱泳動を観測した。その結果、 $2 \text{ K}/\mu\text{m}$  程度の極めて大きな勾配下においても勾配と移動速度の線形性が保たれることが分かった。さらに、一分子 DNA が温度勾配により引き伸ばされることを発見した (図 6.4.21)。現在そのメカニズムの解明と熱揺らぎの中で動作する分子機械への応用に向け、研究を進めている。 [37, 43, 59]

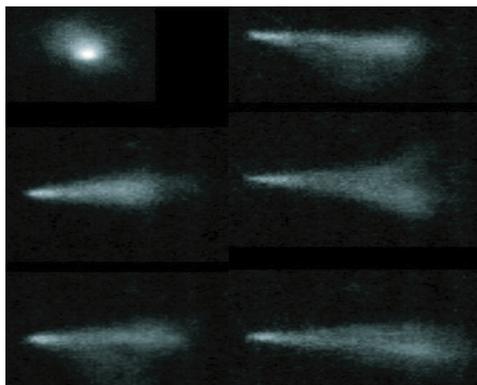


図 6.4.21: 温度勾配により伸張した一分子 DNA の蛍光像。

#### 一分子凝縮 DNA の内部摩擦

イオン環境の変化による DNA の凝縮転移は、静電相互作用が引き起こすユニークな現象の一つであるが、非平衡下における一分子のダイナミクスに関する知見は極めて乏しい。

我々はスペルミジン (3+) 存在下で浅い凝縮状態にある DNA の伸張 - 緩和サイクルで、力学応答に履歴が生じることを見出した。操作速度を系統的に変化させ測定した結果、i): 緩和過程における凝縮の核生成、ii): 伸張過程における速度に依存した散逸、が履歴の要因であることを明らかにした。伸張時には速度に比例した実効的摩擦力が生じており、測定から得られた摩擦係数  $\approx 10^{-7}$  kg/sec は DNA 鎖が溶媒から受ける粘性抵抗より 10 倍以上大きいことから、散逸は凝縮相内部で生じているという結論を得た。[21, 26, 30, 50, 54, 65, 70]

#### AFM を用いたタンパク質の一分子伸張実験

本研究では、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて機能タンパク質の伸張実験を行うことにより、ミクロなスケールでの秩序構造形成のメカニズムや機能活性と構造変化の関連について調べている。

DNA 分解酵素である Staphylococcal Nuclease (SNase) を用いて伸張実験を行った結果、天然状態からの力学的変性過程では、複数の準安定な中間状態を確率的に遷移し変性することが分かった。また、酸変性条件下において SNase は完全に変性せず、部分的な構造が保たれていることが分かった。タンパク質は疎水的相互作用によってコンパクトな構造を保っており、この部分構造が構造形成の初期段階において重要な役割を果たすと考えられる。さらに、DNA 類似体である pdTp と Ca イオン存在化での伸張実験を行い、立体構造が強く安定化されることを一分子レベルで明らかにした。[22, 31, 38, 56]

### 6.4.3 生命現象の物理学

#### 細胞性粘菌の運動メカニズム

細胞運動は胚分割・傷の修復・癌の転移などの生理学的・医学的に重要なプロセスにおいて中心的な役割を果たすが、そのメカニズムについては未だ解明されていない点が多い。

単一細胞の自発運動のメカニズムを解明するため、自発運動中の細胞性粘菌を顕微鏡下で観察し重心運動と膜変形について解析した。その結果、細胞運動は単純なランダム運動ではなく、膜揺らぎにいくつかのパターンが存在することが分かった。[24, 39, 74, 75]

さらに細胞が接着している基盤との相互作用に注目し、細胞が発生する力の測定を行った。ヤング率 300 - 1000 Pa 程度のポリアクリルアミドゲルに 0.2  $\mu\text{m}$  の蛍光ビーズを埋め込み、typeI コラーゲンでゲルの表面をコートした基盤を用い、表面から 1  $\mu\text{m}$  程度の深さにあるビーズの位置をレーザー共焦点顕微鏡で測定した。PIV を用いてビーズの変位を定量化し、粘菌がゲルに与える力を逆問題として求めた。その結果、運動性の高い飢餓状態の粘菌の方が栄養状態に比べ平均で約 1/2 の小さな力を出して運動している事が分かった。また運動中の力の分布を調べた結果、粘菌が基盤に対し発生している力は細胞の中心方向に向かっており、細胞膜の境界に向かうほど強いことが分かった。さらに飢餓状態は進行している前部での力が弱く前後で力の分布が非対称であることを明らかにした (図 6.4.22)。[40, 66]

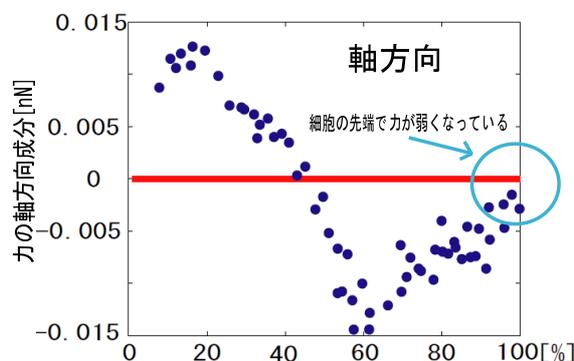


図 6.4.22: 飢餓状態の力の各方向の成分。

#### バクテリアコロニーのパターン形成機構

大腸菌のような細菌は、栄養のある寒天培地上に接種すると巨視的なコロニーを形成する。培地条件を変えることで多様なコロニーパターンが見られる。しかしながら、細菌がどのようにしてコロニーを形成しているのかは、物理学的にも生物学的にも未だに解明されておらず、実験的手法により解明することを目指している。

巨視的には準二次元だと思われていたコロニーだが、レーザー変位計を用いることで微視的には高さの相違が確認された。周期パターンにおいて輝度が高い所は、細胞密度が高い所であることが明らかになり細胞密度の違いがパターンに影響している事が分かった。また、形成過程における成長先端のダイナミクスについて解析を行った。細胞密度が高い所は確率的に発生し、ソリトンのように拡がりながら衝突することが示された。このことから、揺らいだパターンを形成するのは細胞密度が高い所同士が衝突するためであることを見出した。 [41]

#### <受賞>

- [1] 竹内一将, 理学系研究科研究奨励賞( 修士 ), 東京大学 理学系研究科, 2007年3月22日.
- [2] 竹内一将, 東京大学 総長賞・総長特別賞, 東京大学, 2007年3月22日.

#### <報文>

##### (原著論文)

- [3] K. Takeuchi: Can the Ising critical behavior survive in non-equilibrium synchronous cellular automata?, *Physica D*, 223, 146-150 (2006).
- [4] A. Awazu and K. Kaneko : Pulse Replications and Spatially Differentiated Structure Formation in One dimensional lattice dynamical System, *Mathematical Bioscience*, 201, 90-100 (2006).
- [5] H. Shiba, J. R.-Felsot, Y. Takahashi, Y. Murayama, Q. Ouyang, and M. Sano: Elastic Convection in Vibrated Viscoplastic Fluids, *Phys. Rev. Lett.* 98, 044501 (2007).
- [6] K. Takeuchi and M. Sano: Role of unstable periodic orbits in phase transitions of coupled map lattices, *Phys. Rev. E*, 75, 036201 (2007).
- [7] S. Toyabe, H. R. Jiang, T. Nakamura, Y. Murayama and M. Sano: Experimental Test of a New Equality: Measuring Heat Dissipation in an Optically Driven Colloidal System, *Phys. Rev. E* 75, 011122 (2007).

##### (会議抄録)

- [8] Y. Murayama, H. Wada, R. Ishida, and M. Sano: Unfolding Dynamics of Single Collapsed DNA Molecules, *Prog. Theo. Phys. Suppl.* 165, 144-163 (2006).
- [9] 竹内一将, 黒田真史, Hugues Chaté, 佐野雅己: 「液晶電気対流の乱流間相転移における Directed Percolation ユニバーサリティ」, 九州大学応用力学研究所研究集会報告 18ME-S7, 86-94 (2007).

##### (学位論文)

- [10] 小林康明: Pattern formation in reaction-diffusion systems with advection ( 博士論文 ).

- [11] 鳥谷部祥一: Measurement of the Energy Dissipation Rate in Fluctuating Small Systems ( 博士論文 ).
- [12] 竹内一将: 非平衡臨界現象におけるユニバーサリティ: 非平衡系に固有なクラススの探求 ( 修士論文 ).
- [13] 高橋善樹: 垂直加振された粘弾性体の対流現象 ( 修士論文 ).

#### < 学術講演 >

##### (国際会議)

##### 一般講演

- [14] M. Bienia and M. Sano: Turbulent thermal convection in mercury, 9th Tamura Symposium "Frontiers in Dynamics -Physical and Biological Systems", May 22-24, 2006, Tokyo, Japan.
- [15] S. Tatsumi, M. Sano: Observation of the cooling state in quasi-2D granular gas system, (9th Tamura Symposium).
- [16] Y. Takahashi and M. Sano: Pattern formation of shear thinning materials on a shaker, (9th Tamura Symposium).
- [17] Y. Kobayashi: Stability of hexagonal patterns in reaction-diffusion systems under shear, (9th Tamura Symposium).
- [18] K. Takeuchi: Can the Ising critical behavior survive in synchronous cellular automata?, (9th Tamura Symposium).
- [19] S. Toyabe, H. R. Jiang, T. Nakamura, Y. Murayama, and M. Sano : Measurement of Energy Dissipation under the Nonequilibrium Steady State, (9th Tamura Symposium).
- [20] H.-R. Jiang and M. Sano : F-actin bundling under spatial confinement, (9th Tamura Symposium).
- [21] Y. Murayama, H. Wada, and M. Sano: Irreversible work in stretching a single collapsed DNA, (9th Tamura Symposium).
- [22] T. Ishii, A. Katano, Y. Murayama and M. Sano: Velocity and force dependent unfolding and folding trajectory of single-molecule protein by AFM, (9th Tamura Symposium).
- [23] Yusuke T. Maeda and Masaki Sano: Response and Fluctuation in Gene Expression at the Single-Cell Level, (9th Tamura Symposium).
- [24] M. Matsuo, J. Inose, Y. T. Maeda, S. Iwaya and M. Sano: Statistical Analysis of motion pattern of dictyostelium amoeba cells, (9th Tamura Symposium).
- [25] S. Tatsumi, Y. Murayama, and Masaki Sano: Quasi-2D Granular Gas under gravity and micro gravity, DYGRAM 2006, June 19-23, 2006, Rennes, France.
- [26] Y. Murayama, H. Wada, and M. Sano: Irreversible elastic responses of single collapsed DNA molecules, Structures and Dynamics in Soft Matter -Beyond Self-Organization and Hierarchical Structures-, July 14-16, 2006, Kyoto, Japan.

- [27] A. Awazu: Complex rheology in a Simple Lattice Gas, (Structures and Dynamics in Soft Matter).
- [28] M. Bienia, C. Quilliet, M. Vallade, F. Mugele/M. Bienia, and M. Sano: Droplet and thin film deformation induced by electrowetting/Rayleigh-Benard turbulence in mercury, 21st century COE and SEIKEN International Workshop on Recent Advances in Soft Matter Physics, Aug. 21-23, 2006, Tokyo, Japan.
- [29] M. Bienia and M. Sano: Rayleigh-Benard turbulence in mercury, Conference & Euromech Colloquium no. 480 on High Rayleigh Number Convection, Sep. 4-8, 2006, Trieste, Italy.
- [30] Y. Murayama, H. Wada, and M. Sano: Irreversible work during a stretch-relax cycle of a single collapsed DNA, 5th East Asian Biophys. Symp. & 44th Annual Meeting of the Biophys. Soc. of Japan, Nov. 12-16, 2006, Okinawa, Japan.
- [31] T. Ishii, A. Katano, Y. Murayama, and M. Sano: Observing mechanical unfolding and folding process of single molecular protein by AFM, (5th East Asian Biophys. Symp. & 44th Annual Meeting of the Biophys. Soc. of Japan).
- [32] M. Bienia and M. Sano: Study of thermal turbulence in mercury, 21st COE 5th International Conference "Perspectives in Nonlinear Physics", Nov. 20-22, 2006, Tokyo, Japan.
- [33] Y. Takahashi, H. Shiba, and M. Sano: Pattern formation in vertically vibrated viscoplastic fluids, (21st COE 5th Int. Conf.).
- [34] Y. Kobayashi: Stability of hexagonal and stripe patterns in the Brusselator model under a linear shear flow, (21st COE 5th Int. Conf.).
- [35] K. Takeuchi, M. Kuroda, H. Chaté, and M. Sano: Directed Percolation Universality in Turbulence of Liquid Crystals, (21st COE 5th Int. Conf.).
- [36] S. Toyabe and M. Sano: Evaluating Heat Dissipation in Viscous Fluid and Viscoelastic Fluid from the Violation of the Fluctuation Dissipation Relation, (21st COE 5th Int. Conf.).
- [37] H.-R. Jiang and M. Sano: Thermophoresis and thermo-stretch of a single DNA, (21st COE 5th Int. Conf.).
- [38] T. Ishii, A. Katano, Y. Murayama and M. Sano: Mechanical unfolding process of single molecular protein with AFM, (21st COE 5th Int. Conf.).
- [39] S. Iwaya, Y. T. Maeda, M. Matuo, J. Inose, and M. Sano: Patterns on the membrane's dynamics of Cell locomotion, (21st COE 5th Int. Conf.).
- [40] S. Iwaya and M. Sano: Statistical Analysis of cell locomotion of Dictyostelium Discoideum, (21st COE 5th Int. Conf.).
- [41] T. Kato, Y. T. Maeda, R. Tokita, M. Matsushita, and M. Sano: Pattern formation of bacterial colony by *E.coli*, (21st COE 5th Int. Conf.).
- [42] S. Tatsumi, Y. Murayama, and M. Sano: The Homogeneous Cooling State of a Granular Gas under gravity and micro gravity, Granular Matter 20th Canberra International Physics Summer School and Workshop on Granular Materials, Dec. 4-8, 2006, Canberra, Australia.
- [43] H.-R. Jiang and M. Sano : Thermophoresis and Thermostretch of single DNA, Opportunities and challenges for Physicists in Quantitative and Systemic Biology, Dec. 4-9, 2006, Hong-Kong, China.

## 招待講演

- [44] Masaki Sano: Nonlinear Rheology and Elastic Convection of Complex Fluids, 9th Tamura Symposium "Frontiers in Dynamics -Physical and Biological Systems", May 22-24, 2006, Tokyo, Japan.
- [45] Masaki Sano, Shoichi Toyabe: Experimental test of a new equality in nonequilibrium steady state using laser tweezers, 21st century COE and SEIKEN International Workshop on Recent Advances in Soft Matter Physics, Aug. 21-23, 2006, Tokyo, Japan.
- [46] Masaki Sano: Ultrasonic measurement of mean wind and fluctuations in thermal turbulence of mercury, Conference & Euromech Colloquium # 480 on High Rayleigh Number Convection, Sept. 4-8, 2006, Trieste, Italy.
- [47] Masaki Sano: Pattern and Localized Spatiotemporal Chaos in Vibrated Non-Newtonian Fluids, International Workshop on Synchronization: Phenomena and Analysis 2006, Oct. 3-6, 2006, Tokyo, Japan
- [48] Y. T. Maeda and Masaki Sano: Regulatory Dynamics of Synthetic Gene Networks with Positive Feedback, 7th International Conference on Systems Biology, Oct. 9-13, 2006, Yokohama, Japan.
- [49] Masaki Sano, Shoichi Toyabe: Measurement of Fluctuations in Small Nonequilibrium Systems, 21st COE 5th International Conference "Perspectives in Nonlinear Physics", Nov. 20-22, 2006, Tokyo, Japan.
- [50] Y. Murayama, H. Wada, and M. Sano: Dynamic Force Measurements of a Single Condensed DNA Using Optical Tweezers, (21st COE 5th Int. Conf.).

## (国内会議)

## 一般講演

- [51] 前多裕介: 遺伝子ネットワークのダイナミクスとゆらぎ, 理学系 COE・大学院イニシアティブ若手合同シンポジウム-真理の探究-(東京大学)2006年7月27-28日.
- [52] 辰己創一, 佐野雅己: 鉛直加振粉体ガスにおける局所構造の形成, 日本物理学会 2006年秋季大会(千葉大学)2006年9月23-26日.

- [53] 竹内一将, 黒田真史, Hugues Chaté, 佐野雅己: 液晶電気対流系の乱流状態における Directed Percolation (I) (日本物理学会 2006 年秋季大会).
- [54] 村山能宏, 和田浩史, 佐野雅己: 凝縮 DNA の力学応答における不可逆性, (日本物理学会 2006 年秋季大会).
- [55] 粟津暁紀: 生体分子機械の確率玩具による設計複雑性と機能性, (日本物理学会 2006 年秋季大会).
- [56] 石井孝明, 片野厚人, 村山能宏, 佐野雅己: 一分子タンパク質の力学的アンフォールド・リフォールド過程の観測: 21 世紀 COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム: (東京大学) 2006 年 11 月 6 日 - 8 日.
- [57] 竹内一将, 黒田真史, Hugues Chaté, 佐野雅己: 液晶電気対流の乱流間相転移における Directed Percolation ユニバーサリティ, 乱流現象及び多自由度系の動力学, 構造と統計法則 (九州大学 応用力学研究所) 2007 年 11 月 23-25 日.
- [58] 前多裕介, 佐野雅己: 遺伝子ネットワークのダイナミクスと揺らぎ, 生命科学研究ネットワークシンポジウム (東京大学) 2006 年 11 月 25 日.
- [59] 佐野雅己: 外場下での生体高分子の輸送と変形, 特定領域研究「ソフトマター物理」第一回領域研究会, 熱海, 12 月 22 日.
- [60] 辰己創一, 村山能宏, 佐野雅己: 一様励起粉体ガスの緩和ダイナミクス, 粉体物理の現状と展望 (京都大学基礎物理学研究所) 2006 年 12 月 25 日.
- [61] M. Bienia, 佐野雅己: 2D velocity projections in turbulent heat convection, 日本物理学会 2007 年春季大会 (鹿児島大学) 2007 年 3 月 18-21 日.
- [62] 辰己創一, 佐野雅己: 微小重力下における微小粒子の挙動 (日本物理学会 2007 年春季大会).
- [63] 竹内一将, 黒田真史, Hugues Chaté, 佐野雅己: 液晶電気対流系の乱流状態における Directed Percolation (II) (日本物理学会 2007 年春季大会).
- [64] 鳥谷部祥一, 佐野雅己: 高分子溶液中のコロイド粒子に対する非平衡定常下での熱散逸測定, (日本物理学会 2007 年春季大会).
- [65] 村山能宏, 和田浩史, 佐野雅己: 一分子凝縮 DNA の内部摩擦, (日本物理学会 2007 年春季大会).
- [66] 岩谷卓, 猪瀬淳也, 松尾美希, 前多裕介, Jean-Paul Rieu, 佐野雅己: 単一細胞の膜ゆらぎと力発生の関係, (日本物理学会 2007 年春季大会).
- 招待講演
- [67] 佐野雅己: 自己組織化と非線形レオロジー, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 領域 11, 12 合同シンポジウム, レオロジー研究の新展開, 千葉大学, 2006 年 9 月 23-26 日.
- [68] 佐野雅己: 時間と空間のゆらぎ, 東京大学総合博物館公開講座「時間と空間」, 9 月 15 日, 東京大学.
- [69] 佐野雅己: カルシウムパフとカルシウム波の実験と解析, 北海道大学数学科 COE ワークショップ, 生命リズムと振動子ネットワーク, 2006 年 10 月 18-20 日, 北海道大学.
- [70] 村山能宏: 凝縮 DNA の非線形力学応答と内部摩擦, 特定領域研究 非平衡ソフトマター物理学の創生、第一回公開シンポジウム - 非平衡ソフトマター物理学の創生を目指して -, 東京大学, 2007 年 3 月 15-16 日.
- (セミナー)
- [71] 辰己創一: 一様粉体ガスの動力学 - 擬 2 次元系における振る舞い -, 地震研究所物性実験セミナー, 2006 年 5 月 31 日.
- [72] M. Bienia, C. Quilliet, M. Vallade, F. Mugele/M. Bienia, and M. Sano: Electrowetting of thin films and droplets/Rayleigh-Benard turbulence in mercury”, Laboratoire d’electrostatique et des materiaux dielectriques (LEMD), CNRS, Sep. 15, 2006, Grenoble, France.
- [73] 竹内一将: 液晶電気対流系の乱流状態における Directed Percolation, 九州大学先端複雑系セミナー, 2006 年 11 月 22 日.
- [74] 前多裕介: ゆらぎから探る細胞性粘菌の運動メカニズム, 京都大学, 2007 年 3 月 7 日.
- [75] 前多裕介: ゆらぎから探る細胞性粘菌の運動メカニズム, 広島大学, NLPM コロキウム, 2007 年 3 月 8 日.
- (その他)
- [76] 佐野雅己: 集中講義「統計物理学特論 IV」, 早稲田大学大学院理工学研究科, 2007 年 1 月 15 - 17 日.

## 6.5 山本研究室

星と星の間にはガスと塵からなる希薄な雲 (星間雲) が存在している。星間雲の中でも密度が比較的高いものが星間分子雲で、恒星が形成される場所として銀河系における物質循環の主要経路にあたる。本研究室では、星間分子雲に存在する原子・分子に着目して、電波望遠鏡による観測的研究を行っている。これらを通して、星間分子雲の構造、形成、進化、および星形成を物質的視点から研究している。

サブミリ波、テラヘルツ領域 (波長 1 mm から 0.1 mm) は天文学において十分に開拓されていない波長域である。本研究室では、わが国ではじめてサブミリ波望遠鏡 (口径 1.2 m) を富士山頂に設置して観測を行ってきた。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) にも参加するとともに、わが国が北米、欧州とともに建設している ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) 計画にも協力している。

一方、テラヘルツ帯での観測を開拓するために、超伝導ホットエレクトロン・ポロメータ (HEB) ミクス素子の開発を行っている。研究室内に専用の素子製造装置を導入し、ミク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 にある窒素イオンの微細構造スペクトル線 ( $^3P_1 - ^3P_0$ ) の広域観測を実現することで、銀河系における星間プラズマの分布と運動を明らかにし、プラズマ相が星間分子雲

の形成と進化に与える役割を解明する。この研究を通してテラヘルツ天文学を創生したいと考えている。

これらの研究とともに、国内外の電波望遠鏡を用いて星形成領域の観測研究を行っている。とくに、星形成にもなう化学進化に着目し、種々の分子スペクトル線による観測を展開している。また、岡らは銀河系中心部の観測的研究を行っている。

### 6.5.1 富士山頂サブミリ波望遠鏡

富士山頂サブミリ波望遠鏡(口径 1.2 m)は 1998 年に富士山頂に設置してから 7 シーズンにわたる運用で、かつてない規模での中性炭素原子サブミリ波スペクトル線( $^3P_1 - ^3P_0$ , 492 GHz;  $^3P_2 - ^3P_1$ , 809 GHz)の観測を展開してきた。その結果を一酸化炭素分子の分布と比較することにより、星間分子雲の形成、進化を研究してきた。この望遠鏡は 2005 年 8 月に閉鎖し、現在、撤去作業を行っている。2006 年度は望遠鏡下部機器室を解体撤去した。[2]

### 6.5.2 HEB ミクサ素子の開発

サブミリ波帯では、ヘテロダイン検出素子として SIS (superconductor - insulator - superconductor) ミクサ素子が広く用いられてきた。しかし、このミクサでは周波数が超伝導ギャップのエネルギーを超えると、急激に性能が低下する。たとえば Nb を用いたものでは 750 GHz が限界の周波数となる。従って、テラヘルツ帯の観測のためには新しいミクサ素子の開発が求められる。

本研究室では、超伝導ホットエレクトロン・ポロメータ (HEB) ミクサ素子の開発を進めている。HEB ミクサ素子は電磁波の吸収による超伝導状態の破壊を利用し、受信信号と局部発振信号の「うなり」(中間周波信号)に伴う電力変化をバイアス電流の変化として鋭敏に検知するものである。そのためには、素子内に生じた熱電子を中間周波信号の周期よりも速く冷却し、超伝導状態を回復させる必要がある。熱電子の冷却方法として、(1) 拡散によって電極へ逃がす方法(拡散冷却)と、(2) フォノンとの相互作用を介して基板にエネルギーを逃がす方法(格子冷却)の 2 つの方法がある。我々は Nb を用いた拡散冷却型の HEB ミクサ素子と、NbTiN を用いた格子冷却型の HEB ミクサ素子の開発を行っている。

#### エッチング装置の導入と立ち上げ

HEB 素子製作の自由度を広げるために、武田先端知クリーンルームに ICP ドライエッチング装置を導入した。初期性能確認実験として、 $CF_4$  による Nb のエッチングを行ったところ、エッチングレートは 100 nm/min 程度と妥当であり、再現性も良いことが確認できた。実際の素子製作工程においては、マイクロブリッジ部分で Nb-Au の 2 層薄膜から上部の Au だけ削り取る必要がある。ガスを Ar のみにすることで、選択比を 10 : 1 以上確保し、かつ、エッチングレートは 50 nm/min 程度を得た。本装置では溝幅が 0.2  $\mu\text{m}$  程度になっても十分に直線的に掘

ることができ、幅も設計通りに制御できることが確認された。

#### 新しい素子製作プロセス

これまでのリフトオフのみで行う素子製作では、Nbのパターンと Auのパターンを別々に形成していたので、成膜した Nb の表面に自然酸化膜の層が形成されてしまう問題があった。この表面酸化を抑制するため、Nbの成膜後に真空装置から取り出すことなく Au を成膜することにした。この新プロセスでは、Nb の上にある Au をエッチングで完全に除去する必要がある。その際のオーバーエッチを防ぐために Nb と Au の間に 2 nm 程度の薄い Ti 層を挟み、エッチングのストッパーとした。Ti は Au と Nb の密着性を高める効果も期待される。このような方法で作成した Nbブリッジの面抵抗は、15 nm の膜厚で 20  $\Omega/sq.$  程度となり、他のグループのものと比較しても、良い膜質を得られていたことが確認された。その結果、素子のインピーダンスは理想値付近に制御することが可能となった。[21][23]

#### Nb HEB 素子の評価

ミクサとしての性能評価は、800 GHz 帯で行った。導波管マウントに素子を装着し、小型 GM 2 段冷凍機を用いたデユワーで冷却した。当初の性能評価試験では、Nb の膜厚が 40 nm の素子を用い、中間周波出力信号 (IF : 1.5 GHz) が局部発振信号 (LO : 800 GHz) の ON-OFF で 4 dB 以上の反応を示したものの、素子のインピーダンスが低すぎたため定在波の影響が強く現れ、ミクサ性能の測定には至らなかった。そこで、Nb の厚みを 15 nm まで薄くした素子を用いて性能評価を行ったところ、ミクサとしての性能を確認でき、Y-factor 0.15 dB (受信機雑音温度  $T_{rx} = 6500$  K(DSB)) を得た。この素子は、冷却試験 5 回を行ってもまったく劣化せず、耐久性にも優れていることもわかった。機械式冷凍機を用いた実用的な環境で、ミクサとしての動作を確認できたことは、将来的に HEB 素子を用いた観測を行う上で意義が大きい。

その後、IF アンプをアイソレーター付きのものに変更することで、性能向上を図った。それにより、IF 帯域での定在波はなくなり、広い帯域で性能を得られるようになった。現在では Y-factor 0.3 dB ( $T_{rx} = 3000$  K(DSB)) の性能を得ている。Nb を用いた HEB ミクサで 4.2 K 冷却時における性能としてはほぼ世界的水準に達したと言える。[29]

#### NbTiN 薄膜の $T_c$ 測定

NbTiN はバルク状態の超伝導転移温度 ( $T_c$ ) が 16 K 程度と Nb よりも高く、また、石英基板上に成膜できるので、THz 帯 HEB ミクサ素子の超伝導材料として注目されている。本研究では NbTiN を薄膜化したときの  $T_c$  を系統的に調べた。測定にあたっては、GM2 段冷凍機を用いた冷却デユワーを用いた。温度と抵抗のそれぞれのモニターを GPIB を介して計算機で読み取ることができるようにし、転移温度付近で

連続的な温度-抵抗曲線を測定できるようにした。NbTiN 薄膜は NbTi 合金をターゲットにして、 $N_2 + Ar$  パツファガスによる反応性スパッタで成膜する。その  $T_c$  は膜厚の減少に伴い低くなる傾向にあるが、膜厚によって  $N_2$  分圧を最適化することで、その減少を極力抑えることができることがわかった。その結果、6 nm で 9.6 K の  $T_c$  を得た。これは NbTiN 薄膜の  $T_c$  としては非常に良好な値であり、これを用いてミクサ素子製作を行った。[22]

### NbTiN HEB の評価

NbTiN 薄膜を用いて 800 GHz 帯の格子冷却型 HEB ミクサ素子を製作した。素子の設計および製作プロセスは Nb を用いた HEB ミクサ素子の方法を踏襲して進めた。その際、NbTiN 薄膜の上に金を成膜すると剥離してしまう現象が起こった。この問題は NbTiN と金の間にパツファ層として Ti を挿入することで解決した。また、厚さ 10 nm 以下の NbTiN 薄膜は、基板洗浄に用いる水酸化ナトリウム水溶液や成膜前の Ar 逆スパッタによってエッチングを受けてしまうことが判明した。それらの影響を調べて製作プロセスにフィードバックすることにより、HEB ミクサ素子を安定して製作できるようになった。製作した HEB 素子は液体ヘリウムによる冷却試験において正常な直流電気特性を示した。更にその素子を機械式冷凍機デューワーに搭載して行った冷却試験においてもその電気特性は保たれることが確認された。引き続きミクサとしての性能測定を行ったところ、hot-cold(77 K) の切り替えに対して最大で 0.65 dB の応答を示した。これは受信機雑音温度に換算すると  $T_{rx} = 1300$  K 程度に相当し、我々の製作した HEB ミクサがこれまでに報告されている実験例と比べても遜色の無いものであることが示された。以上の実験結果は 3 回の冷却サイクルに対して再現性が見られ、耐久性も確認できた。[28]

### NbTiN を用いた準光学 HEB ミクサの開発

名古屋大学の前澤氏、筑波大学の山倉氏、中井氏と共同で、NbTiN 薄膜を用いた準光学 HEB ミクサの開発に取り組んでいる。準光学ミクサでは誘電体レンズを用いて、電磁波をミクサに集光する。そのためのミクサマウントを製作し、機械式冷凍機による冷却試験を行なった。懸念されていた機械式冷凍機の振動によるボンディングのはずれ、ミクサ素子の破損、誘電体レンズのひび割れ、熱接触不良などの問題は発生しないことがわかった。また、ミクサマウントに NbTiN 薄膜のみを成膜したテスト素子を装填し、外部から 250GHz の信号を入射したところそのテスト素子の電流電圧特性に変化が見られた。このことから冷却した状態でも誘電体レンズにより電磁波が集光されていることが確認できた。

### 6.5.3 星形成領域の観測的研究

#### 大質量星形成領域における複雑な有機分子:NGC2264 における $HCOOCH_3$ の分布

大質量星形成領域において、 $HCOOCH_3$  や  $C_2H_5CN$  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いる。昨年度、我々は非常に若い中小質量星形成領域である NGC1333IRAS4B からこれらの分子を検出し (Sakai et al. 2006)、複雑な有機分子が中小質量原始星の進化のごく初期段階から存在していることを明らかにした。そこで、改めて近傍の大質量星形成領域において  $HCOOCH_3$  分子の振舞いを調べたところ、NGC2264 においてこれと似た傾向を見出した。NGC2264 において、最も明るい IRS1 方向からは複雑な有機分子が検出されなかったのに対して、IRS1 よりも若い領域であるといわれている MMS3 方向から  $HCOOCH_3$  分子を検出した。したがって、進化の速度が速い大質量原始星の進化段階を調べる上で、複雑な有機分子が良い指標となる可能性が出てきた。しかし一方で、ミリ波干渉計による観測で、 $HCOOCH_3$  分子の分布のピークは、MMS3 の 3 mm 連続波ピークからわずかにずれていることも明らかになった。これは Orion-KL における "hot core" と "compact ridge" の関係によく似ており、星形成領域における複雑な有機分子の振舞いを明らかにする上で非常に重要な例である。[6][8][12][13]

#### $^{13}C$ 同位体種を用いた CCS と CCCS の生成メカニズムの解明

炭素鎖分子 CCS のスペクトル線は分子雲コア進化の初期過程を調べるために広く用いられている。しかし、CCS の生成メカニズム自体は未だによくわかっていない。以前、我々は  $^{13}CCS$  と  $C^{13}CS$  を暗黒星雲コア TMC-1 で探索した (野辺山 45 m, 1999-2000 年, 池田ら)。その結果、 $C^{13}CS(J_N = 3_2 - 2_1)$  は検出できた一方で、 $^{13}CCS$  は検出されなかった。これは、CCS の生成過程において、2 つの炭素原子が非等価であることを意味する。また、 $^{13}CCS$  の存在量は星間空間における  $[^{13}C]/[^{12}C]$  比よりも遥かに低く、 $^{13}CCS$  が希釈されていることが示唆される。分子雲コアでこのような例は他にはなく、もしこれが正しければ星間化学の分野で重要な発見である。

そこで、この結果を別の回転輝線 ( $J_N = 2_1 - 1_0$ ) でも確認するとともに、 $^{13}CCS$  の検出を目指してアメリカ国立電波天文台の GBT(口径 100 m) を用いて高感度観測を行った。その結果、 $C^{13}CS$  の輝線強度は  $^{13}CCS$  の 4.2 倍もあることを示した。さらに、別の暗黒星雲コアである L1521E でも  $^{13}CCS$  が有意に少ないことを示し、この現象が天体に固有のものでないことを確認した。従って、これまで提案されている様々な生成ルートの中で、 $^{13}C$  同位体種の存在量の非対称性を説明できる  $CH + CS \rightarrow CCS + H$  反応が最も有力な主要生成経路として絞り込まれた。その場合、 $^{13}CCS$  の希釈の原因は  $^{13}CH$  の希釈によることになるが、これは CO でよく知られてい

る光解離の self-shielding による効果と考えられる。さらに、CCS に加えて CCCS の同位体種の観測も行い、 $^{13}\text{CCCS}$  でも希釈が起こっていることを示した。もし、CCCS が  $\text{CH} + \text{CCS}$  で生成されているならば、 $^{13}\text{CCCS}$  の希釈は  $^{13}\text{CH}$  の希釈で自然に説明される。これらの結果から、CH を介した  $\text{C}_n\text{S}$  の成長という新しい炭素鎖分子の生成過程が見えてきた。[7][26][27]

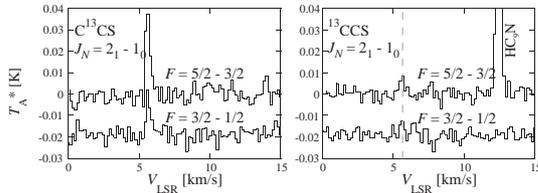


図 6.5.23: TMC-1 における  $\text{C}^{13}\text{CS}$  と  $^{13}\text{CCS}$  のスペクトル

### 小質量原始星 L1527 における炭素鎖分子高励起輝線の検出

小質量原始星 L1527 におけるホットコア分子の観測の過程において、我々は偶然、炭素鎖分子  $\text{H}_2\text{CCCC}$  の高励起輝線 ( $J = 10 - 9$ ,  $E_u = 24$  K) を検出した (野辺山 45 m 望遠鏡)。これまでこの分子は、TMC-1 など星形成を伴わない分子雲で検出されていたが、星形成領域でこの分子が検出されたのは初めてである。 $\text{C}_4\text{H}_2$  の様々な遷移の観測から、その回転温度は  $12.3 \pm 0.8$  K と計算され、TMC-1 に比べて非常に高いことがわかった。また、その柱密度も TMC-1 と比べて  $1/5$  と、星形成領域としては異常に多いことがわかった。さらに、他の炭素鎖分子の観測を行ったところ、 $\text{C}_4\text{H}$  ( $N = 9 - 8$ ,  $E_u = 21$  K) や  $c\text{-C}_3\text{H}_2$  ( $4_{3,2} - 4_{2,3}$ ,  $E_u = 29$  K),  $l\text{-C}_3\text{H}_2$  ( $4_{1,3} - 3_{1,2}$ ,  $E_u = 23$  K),  $\text{CH}_3\text{CCH}$  ( $J = 5 - 4$ ,  $K = 2$ ,  $E_u = 41$  K) など、多くの炭素鎖分子高励起輝線を検出した。その中でも特に、 $\text{C}_4\text{H}$  は  $1.5$  K ( $T_{\text{MB}}$ ) という非常に強い強度で検出された。そこで、 $\text{C}_4\text{H}$  のプロファイルマップを作成したところ、原始星方向でその積分強度が最大になっていることが明らかになった。しかも、中心星に向かってその線幅が  $0.3$  km/s から  $0.6$  km/s と太くなっていく現象が見られ、 $\text{C}_4\text{H}$  が中心星にむかって落ち込んで行くガスの中に存在している可能性が高いことがわかった。

一般に炭素鎖分子は、炭素がまだ CO に固定される前の非常に若いフェーズでのみ豊富に存在し、星形成が始まる段階では急速に存在量が減少すると考えられている。しかし、もし、L1527 原始星の収縮のタイムスケールが他の小質量星形成領域に比べて短く自由落下に近いとすると、化学進化と物理進化の相対的な速さの違いによってこのようなことが起こる可能性がある。さらに、原始星付近で  $\text{CH}_4$  が星間塵から蒸発し、炭素鎖分子が再生成されている可能性も考えられる。従って、これらの炭素鎖分子高励起輝線の起源の解明は、星間化学だけでなく星形成の研究においても重要であると考えられる。[27]

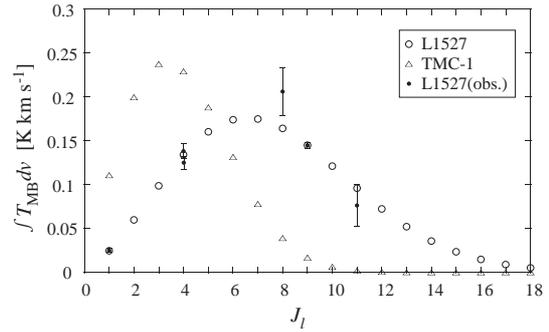


図 6.5.24: L1527 における  $\text{C}_4\text{H}_2$  の回転温度・柱密度のフィッティング結果

### 小質量原始星 L1527 における陰イオン $\text{C}_6\text{H}^-$ の検出

昨年 12 月、暗黒星雲 TMC-1 と晩期型星 IRC+10216 で、初めて陰イオン分子  $\text{C}_6\text{H}^-$  の存在が明らかになった (McCarthy et al. 2006)。これに引き続き、我々は、L1527 原始星から  $\text{C}_6\text{H}^-$  の検出に成功した。これは星形成領域における初めての陰イオンの検出という意味だけでなく、長い炭素鎖を持つ分子が、通常は存在しないと考えられてきた星形成領域に豊富に存在していたという点でも驚きであった。この結果は、L1527 原始星が化学進化の速度よりも速い収縮によって作られた可能性を支持する。一方、L1527 における  $[\text{C}_6\text{H}^-]/[\text{C}_6\text{H}]$  比が、TMC-1 に比べて約 10 倍も高いことは特に注目に値する。L1527 では  $\text{C}_6\text{H}^-$  は TMC-1 よりも高密度な領域に存在していると考えられ、高密度領域における陰イオンの役割の重要性が浮き彫りになった。

### L1527 原始星におけるラインサーベイ

最近、観測の高感度化に伴い、低質量星形成領域の化学が新しい展開を見せている。その代表的なものは、 $\text{HCOOCH}_3$  をはじめとする複雑な有機分子の検出、2 個以上の重水素原子を含む分子の検出、および炭素鎖分子の高励起輝線の検出である。特に、小質量原始星 L1527 での炭素鎖分子  $\text{C}_4\text{H}_2$  の高励起輝線の検出は、炭素鎖分子に関わる新しい星間化学現象として注目される。そこで我々は、低質量星形成領域の化学組成の多様性とその起源を探究する目的で、L1527 における高感度ラインサーベイをスタートさせた。本年度観測できた帯域は  $1$  GHz のみに限られたが、高感度の観測を行った結果、 $\text{C}_m\text{H}_n$  系の炭素鎖分子や、その  $^{13}\text{C}$  同位体、 $\text{HC}_n\text{N}$  系分子の非常に高励起な輝線など、多くの分子輝線を検出することができた。これらの輝線の強度はほとんどが  $10$  mK から  $100$  mK であったため、従来の観測に比べて  $1$  桁高い感度を実現したことで初めて検出が可能となった。このように今回の観測から、先入観にとられない無バイアスサーベイ、特に、ミリ波帯におけるサーベイの重要性が再認識された。

### 大質量星形成領域における重水素濃縮

星間分子雲中の分子には、重水素原子が多く含まれることが知られており、重水素濃縮と呼ばれる。水素と重水素の宇宙元素存在度比が  $10^{-5}$  程度であるのに対して、分子中での存在比は  $10^{-1} \sim 10^{-3}$  という高い割合になっている。その中でも、低質量星形成領域では重水素濃縮度が特に高く、大質量星形成領域では低い傾向が見られているが、その原因としては、星形成を起こす前のコアの温度の違いを反映していることが考えられる。しかし、現在のところ、低質量星形成領域と大質量星形成領域における重水素濃縮度の違いを系統的に調べた例はほとんどない。そこで、おもに気相反応で生成される DNC/HNC 及び HDCS/H<sub>2</sub>CS に着目し、野辺山 45m 望遠鏡による観測を進めている。

#### 6.5.4 銀河系中心部の観測的研究

クエーサーやセイファート銀河に代表される活動銀河核 (AGN) からの強烈な放射は、銀河中心にある  $10^6 \sim 10^{10}$  太陽質量もの巨大ブラックホールへの質量降着に起因する。そのような巨大ブラックホールは大部分の銀河中心に存在することが、最近の研究から明らかになってきた。そのうち殆どの銀河中心核は、活動性の低い、低光度 AGN と呼ばれる範疇に属する。そして、私たちの銀河系の中心核 Sgr A\* もまた、370 万太陽質量の巨大ブラックホールを擁する低光度 AGN である。規模にして少なくとも 10 桁に渉る中心核活動性の多様性は、巨大ブラックホールの形成過程とともに、銀河物理学における重要かつ未解決の問題である。

銀河系構造の一部としての中心部分は、星の強い集中と大量の星間物質の存在によって特徴付けられる特異な領域である。銀河系中心核から半径数百パーセクの領域は Central Molecular Zone (CMZ) と呼ばれ、銀河系円盤部と比較して高温・高密度の分子ガスが広がっている。同領域には、衝撃波起源の分子が空間的に広がって分布する事が知られている。このように特異な星間ガスの物理状態・化学組成の起源もまた未解明である。

我々はこの銀河系中心領域に対して、ミリ波・サブミリ波分子輝線による高分解能・広域サーベイ観測というアプローチを取り、同領域の特異な物理状態・化学組成の起源および中心核への質量供給過程の解明を目指している。さらに、これを一つのケーススタディとして、一般の銀河中心核活動性の包括的理解と、中心核巨大ブラックホールの形成・進化過程の解明を目指している。なお本研究は、国立天文台 ALMA 推進室の長谷川哲夫氏、東京大学理学部天文学教育研究センターの亀谷和久氏、田中邦彦氏らとの共同研究である。

#### 高速度コンパクト雲の同定

以前岡らは、国立天文台野辺山の 45m 電波望遠鏡によって取得した一酸化炭素 (CO) の  $J=1-0$  同

転輝線 (115 GHz) による広域サーベイデータ内に、速度幅が非常に広く空間的にコンパクトな分子雲を多数発見した (高速度コンパクト雲; High-velocity Compact Cloud; HVCC)。これはそれぞれ局所的な爆発現象によって加速された分子ガス成分と考えられ、同領域の星間ガスの特異性を解明する手がかりであると我々は考えている。

今回永井らは、この CO  $J=1-0$  データセットに対して、均一な条件下で系統的な HVCCs の同定作業を行った。自らの開発した専用の計算コードによって、速度幅  $\geq 50 \text{ km s}^{-1}$ 、直径  $\leq 5 \text{ pc}$  の条件下で 84 個の HVCCs を同定し、それらの統計的性質を調べた。同定された HVCCs の運動エネルギーは、 $10^{49} \sim 10^{52} \text{ erg}$  の広範囲に渉り、大部分は単一の超新星爆発では賄えない規模のものであった。この事は、特に energetic な HVCCs の位置には大質量 ( $10^{5-6}$  太陽質量) の星団が存在し、度重なる超新星爆発によって星間ガスが加速されているものと推測される。このような銀河中心核近傍の大質量星団は、中間質量ブラックホールの母胎となる可能性が指摘されており、それらが中心核へ沈降することによって中心核ブラックホールが成長するというシナリオが提唱されている。

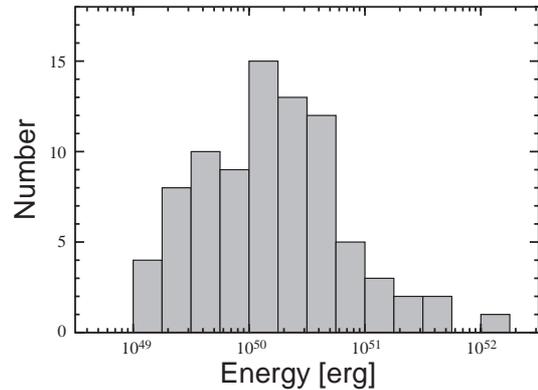


図 6.5.25: CO  $J=1-0$  輝線データ内で同定された高速度コンパクト雲の膨張速度及びエネルギー頻度分布。

#### ASTE 望遠鏡による広域サーベイ

我々は、衝撃波で加熱された分子ガス成分を銀河系中心の広い領域から効率的に検出する目的で、Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE) を用いた CO  $J=3-2$  輝線 (346 GHz) による広域サーベイ観測を進めている。この輝線は  $J=1-0$  輝線に比べて、より高温の分子ガスに対して感度を持つ。これまで 2 シーズンの観測を行い、15908 点のスペクトルを取得した。サーベイ領域は、銀経  $-1^\circ$  から  $+1.7^\circ$ 、銀緯  $\pm 0.3^\circ$  の範囲にわたり、CMZ の主要な部分をほぼ完全にカバーしている。[3][9][14][15]

・高励起ガスの検出とその分布 CO  $J=3-2/J=1-0$  強度比 ( $R_{3-2/1-0}$ ) が 1.5 を超える、高励起ガス領域を多数見出した。Sgr A、高速度コンパクト雲 CO  $1.27 \pm 0.01$ 、CO  $-0.41 \sim -0.23$ 、超新星残骸 G  $0.9 \pm 0.1$  それぞれの周辺では、空間的にやや広がった高励起

ガス成分が検出された。それ以外にも、CMZ 全域にわたって空間的にコンパクトな高励起ガス領域 (ホット・スポット) を多数検出した。これらホット・スポットの約半数は既に同定されている HVCCs と一致し、速度幅等の特徴も含め衝撃波起源が疑われるものが全体の 88% にのぼる。この事は、HVCCs の起源を超新星爆発とした我々の推測を支持するものである。[18]

・物理状態分布の把握 CO  $J=3-2$ ,  $J=1-0$ ,  $^{13}\text{CO}$   $J=1-0$  の 3 輝線データセットを用いて、Large Velocity Gradient (LVG) モデルに基づいた回転準位励起状態の解析を行い、CMZ における物理状態の大局的分布を導くことに成功した。計算には最小二乗法を用い、最適解の探索には最急降下法 (steepest descent method) を採用した。3 つの輝線が  $1\sigma$  以上で検出されたデータ点のうち、69% について温度・密度・柱密度を決定できた。HVCCs を除けば、温度は CMZ 全域にわたってほぼ一様で、密度には幾分の非一様性が見出された。[4]

・「大きな」中心核円盤の発見 銀河系中心核 Sgr A\* は、Circumnuclear Disk (CND) と呼ばれる半径約 2 パーセクの分子リング状構造に取り囲まれている。その外側には二つの巨大分子雲 M-0.02-0.07, M-0.17-0.08 が付随するが、それらと CND との物理的関係は判然としていなかった。今回岡らは、 $R_{3-2/1-0}$  の詳細な解析から、直径約 10 パーセク程度の広がりを持つ楕円状の高励起分子ガス領域を検出した。この高励起ガス領域は、二つの巨大分子雲に挟まれるように分布し、約  $110 \text{ km s}^{-1}$  の速度で回転する一体の構造の様に見える。これは、これまで認識されていなかった、CND を含む「大きな」中心核円盤 (Large Nuclear Disk; LND) を検出した可能性が高い。LND の質量は 20-60 万太陽質量で、 $30-60 \text{ km s}^{-1}$  の降着運動を伴う。この事は、この LND(+CND) が定常的構造ではなく、約十万年後には中心核へと落下する運命にあることを意味する。[25]

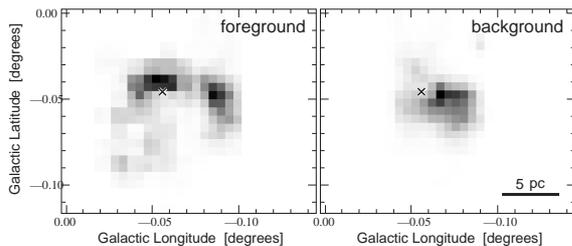


図 6.5.26: 今回発見された「大きな」中心核円盤 (LND)。左図のグレースケールは手前側、右図は向こう側の速度成分を表す。×印は Sgr A\* の位置。

#### NRO45m 望遠鏡による追観測

CO ミリ波・サブミリ波輝線サーベイ結果の中で特に興味深い領域について、国立天文台野辺山宇宙電波観測所 (NRO)45m 電波望遠鏡を使用した追観測を進めている。観測輝線は、高密度領域に感度をもつ

HCN,  $\text{HCO}^+$   $J=1-0$  輝線 (90 GHz 帯)、衝撃波領域の良いトレーサである SiO 分子の  $J=1-0$  (43 GHz),  $J=2-1$  輝線 (87 GHz) である。

・Proto-Superbubble の発見  $l = 1.3^\circ$  複合体は、特異的に銀緯方向に広がった分布を示し、内部には高速度コンパクト雲 CO  $1.27+0.01$  を始め大きな速度幅を持つ領域が発見されている。今回我々は、NRO45m 望遠鏡で高密度・衝撃波トレーサの観測を行う事によって、力学的に擾乱を受けた高密度分子ガスの検出を試みた。その結果、高密度トレーサーの空間/速度分布は大きな速度分散と複数の膨張シェルからなるバブル状の構造で特徴付けられる事が分かった。そして、このバブル状構造の多くに、高速度かつコンパクトな SiO スポットが付随していることが明らかになった。これらの観測事実は、領域全体が複数の超新星爆発によって広く攪乱を受けていることを示し、スターバースト銀河で見られるスーパーバブル構造へと進化する初期の段階を見ているものと解釈される。膨張シェルの力学的エネルギー ( $> 10^{52}$  erg) からは、 $10^{-3-2} \text{ yr}^{-1}$  程度の頻度の超新星爆発が必要であると試算され、これは同領域に  $10^{5-6}$  太陽質量の大質量星団が埋もれている事を示唆している。[5][19]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Hirota and S. Yamamoto, “Molecular Line Observations of Carbon-Chain-Rich Core L492”, *ApJ*, **646**, 258-268 (2006).
- [2] T. Sakai, T. Oka, and S. Yamamoto, “Atomic Carbon in the AFGL 333 Cloud”, *ApJ*, **649**, 268-279 (2006).
- [3] T. Oka, M. Nagai, K. Kamegai, & K. Tanaka, “A CO  $J=3-2$  Survey of the Galactic Center”, *PASJ*, **59**, 15-24 (2007)
- [4] M. Nagai, K. Tanaka, K. Kamegai, & T. Oka, “Physical Conditions of Molecular Gas in the Galactic Center”, *PASJ*, **59**, 25-32 (2007)
- [5] K. Tanaka, K. Kamegai, M. Nagai, & T. Oka, “High Resolution Mappings of the  $L=1.3$  deg Complex in Molecular Lines : Discovery of a Proto-Superbubble”, *PASJ*, **59**, 323-334 (2007)
- [6] Sakai, N., Sakai, T., & Yamamoto, S. “Methyl Formate in the NGC2264 IRS1 Region”, *ApJ*, **660**, 363 (2007)
- [7] Sakai, N., Ikeda, M., Morita, M., Sakai, T., Takano, S., Osamura, Y., & Yamamoto, S. “Production Pathways of CCS and CCCS Inferred from their  $^{13}\text{C}$  Isotopic Species”, *ApJ*, in press (2007)

(会議抄録)

- [8] Sakai, N., Sakai, T., & Yamamoto, S. “Complex Organic Molecules in an Early Stage of Protostellar Evolution”, *Science with ALMA: a new era for Astrophysics*, Springer, Astrophysics and Space Science (ApSS) Journal, in press (2007)

- [9] T. Oka, M. Nagai, K. Kamegai, & K. Tanaka, "A Large-scale CO  $J=3-2$  Survey of the Galactic Center", *Journal of Physics: Conference Series*, **54**, 67-71 (2006)
- (国内雑誌)
- [10] 岡 朋治: 「銀河系内の中性炭素原子」, *天文月報*, **99**, 190-196 (2006)
- (学位論文)
- [11] 森田将: 「炭素同位体種で探る星間分子雲における CCS の生成過程」( 修士論文 )
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [12] Sakai, N., Sakai, T., & Yamamoto, S. "Exploring an Early Stage of Protostellar Evolution with Complex Organic Molecules", *Complex Molecules in Space: Present status and prospects with ALMA* (May 2006, Fuglsocentret, Denmark)
- [13] Sakai, N., Sakai, T., & Yamamoto, S. "Complex Organic Molecules in an Early Stage of Protostellar Evolution", *Science with ALMA: a new era for Astrophysics* (November 2006, Madrid, Spain)
- [14] T. Oka, M. Nagai, K. Kamegai, & K. Tanaka, "ASTE Observations of the Galactic Center: A Large-scale  $J=3-2$  Survey", *Galactic Center Workshop 2006: From the Center of the Milky Way to Nearby Low-Luminosity Galactic Nuclei*, (Cologne, Germany, April, 2006)
- [15] T. Oka, M. Nagai, K. Kamegai, & K. Tanaka, "A Large-scale CO  $J=3-2$  Survey of the Galactic Center", *Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies* (Okinawa, Japan, June, 2006)
- [16] M. Nagai, T. Oka, S. Yamamoto, Y. Moriguchi, Y. Fukui, & Y. Sekimoto, "A High-Velocity [CI] Wing Emission toward the M17 Molecular Cloud", *Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies* (Okinawa, Japan, June, 2006)
- (国内会議)
- 一般講演: 日本天文学会秋季年会 (九州国際大学, 2006/9)
- [17] 坂井 南美、酒井 剛、山本 智: 「大質量星形成領域における複雑な有機分子: NGC2264 における HCOOCH<sub>3</sub> の分布」, P20a
- [18] 岡 朋治、永井 誠、亀谷和久、田中邦彦: 「銀河系中心 Central Molecular Zone における高励起ガスの分布とその起源」, Q08a
- [19] 田中邦彦、亀谷和久、永井 誠、岡 朋治: 「銀河系中心  $l = 1.3^\circ$  領域の高密度分子ガスの分布」, Q09a
- [20] 永井 誠、岡 朋治、亀谷和久、田中邦彦: 「銀河系中心  $L = 0.9^\circ$  Anomaly の HCN、HCO<sup>+</sup> 輝線観測」, Q11a
- [21] 新保謙、芝祥一、森田将、坂井南美、岡朋治、山本智、P. G. Ananthasubramanian、前澤裕之、奥寺勇: 「HEB ミクサ素子製作のための自動重ね描画の開発」, V25a
- [22] 坂井 南美、前澤 裕之、佐野 崇、丹代 卓也、新保 謙、芝 祥一、山本 智: 「NbTiN 薄膜の超伝導転移温度の膜厚依存性」, V26c
- [23] 芝 祥一、新保 謙、中村 友哉、P. G. Ananthasubramanian、前澤 裕之、山本 智: 「HEB ミクサ素子製作における Nb の表面酸化層の抑制」, V27b
- 一般講演: 日本天文学会秋季年会 (東海大学, 2007/3)
- [24] 坂井 南美、酒井 剛、廣田 朋也、山本 智: 「L1527 原始星における炭素鎖分子 H<sub>2</sub>CCCC 高励起輝線の検出」, P40a
- [25] 岡 朋治、永井 誠、亀谷和久、田中邦彦: 「銀河系中心核 Sgr A\* を取り囲む「大きな」中心核円盤の発見」, Q15a
- [26] 池田 正史、森田 将、坂井 南美、酒井 剛、高野 秀路、山本 智: 「<sup>13</sup>C<sub>2</sub>CS および C<sup>13</sup>CS における <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C 比の異常と CCS の生成過程 (1)」, Q28a
- [27] 坂井 南美、森田 将、池田 正史、酒井 剛、高野 秀路、山本 智: 「<sup>13</sup>C<sub>2</sub>CS および C<sup>13</sup>CS における <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C 比の異常と CCS の生成過程 (2)」, Q29b
- [28] 新保謙、森田将、芝祥一、坂井南美、山本智、前澤裕之: 「NbTiN 薄膜を用いた格子冷却型 HEB ミクサの開発」, V40a
- [29] 芝 祥一、新保 謙、森田 将、山本 智、前澤 裕之: 「HEB ミクサ素子の開発と性能評価」, V41a

## 6.6 酒井広文 研究室

本研究室では、(1) 高強度レーザー電場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。

### 6.6.1 静電場と整形されたレーザー電場の併用による分子配向の制御

本研究室では、レーザー技術に基づいた分子操作と配列あるいは配向した分子試料を用いた応用実験を進めている。分子の向き揃った試料を用いることが出来れば、従来、空間平均を取って議論しなければならなかった多くの実験を格段に明瞭な形で行うことが出来る。そればかりでなく、化学反応における配置効果を直接的に調べることができるのを始めとし、物理現象における分子軸や分子面とレーザー光の偏光方向との相関や分子軌道の対称性や非対称性の効果を直接調べることができるなど、全く新しい実験手法を提供する。実際、配列した分子試料の有効性は、 $I_2$  分子中の多光子イオン化過程を、時間依存偏光パルスを用いて最適制御することに成功したり、配列した分子中からの高次高調波発生実験において、電子のド・プロイ波の打ち消しあいの干渉効果を観測することに成功したりするなどの、本研究室の最近の成果でも実証されている。

分子の配向については、静電場とレーザー電場の併用により、既に 1 次元および 3 次元の分子の配向が可能であることの原理実証実験に成功した。これらの実験は、分子の回転周期に比べてレーザー光のパルス幅が十分長い、いわゆる断熱領域で行われたものである。この場合、分子の配向度は、レーザー強度に追従して高くなり、レーザー強度が最大のときに配向度も最大となる。一方、光電子の観測や高精度の分光実験では、高強度レーザー電場が存在しない状況で試料分子の配向を実現することが望ましく、本研究室では、このような配向制御技術についても世界初の実現を目指している。配列に関しては、超短パルスレーザー光を照射して回転波束を励起することにより、いわゆる field free な状況で分子配列を実現できることが知られている。非断熱領域での分子配向についても静電場の存在下で超短パルスレーザー光を照射する手法が理論的に提案されているが、双極子モーメントが 1 D 程度以下の多くの分子に対しては極めて大きな静電場 (50 kV/cm 程度以上) を必要とし、あまり効果的な手法でないことを量子力学的数値計算により明らかにした。そこで、静電場とレーザー電場の併用による手法が断熱領域で有効なことに着目し、回転周期に比べて立ち上がりのゆっくりしたパルスをピーク強度付近で急峻に遮断されるように整形することにより、断熱領域での配向度と同等の配向度を高強度レーザー電場が存在しない状況下で実現する全く新しい手法を提案した。Schrödinger 方程式を Crank-Nicholson 法を用いて数値積分することによって、静電場と超短パルスレーザー光を単純に併用する手法と比べて圧倒的に優位な手法となりうることを示した (図 6.6.27)。特に、レーザー光の立ち上がり時間の違いによる分子配向の様子を詳細に調べた。その結果、従来分子の回転周期の 5 倍程度のパルス幅で断熱的な振る舞いをすると考えられていたのに対し、静電場とレーザー電場を併用する手法の場合には、回転周期の 10 倍程度以上でない断熱的な振る舞いをしないことが明らかになった。すなわち、断熱領域での有効性を生かすためには、回転周期の 10 倍以上のゆっくり

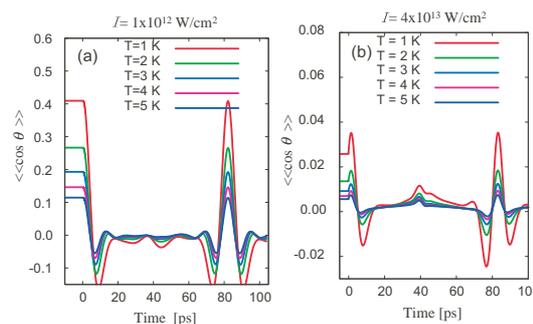


図 6.6.27: (a) 今回提案した静電場と整形されたレーザー電場を併用する手法により、レーザー電場の存在しない状況で、断熱領域と同程度の配向度が得られることを示す計算結果。(b) 静電場と超短パルスレーザー電場を併用する手法では、レーザーの強度が (a) の場合より 40 倍高い場合でも極めて小さな配向度しか得られない。試料分子として OCS を仮定し、静電場はどちらも 5 kV/cm である。

した立ち上がり時間をもつパルスを用いることが必要である。

上記のようなピーク強度付近で急峻に遮断されるようなパルスは、プラズマシャッターと呼ばれる手法を用いて整形可能である。具体的には、ナノ秒 Nd:YAG レーザーの基本波 (波長  $\lambda = 1064$  nm) とフェムト秒 Ti:sapphire レーザー光 (波長  $\lambda \sim 800$  nm) をそのピークが一致するように同軸上でエチレングリコールのジェットシートに集光する。Ti:sapphire レーザー光のピーク強度が  $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> 程度以上であれば、エチレングリコールがプラズマ化する。いったんプラズマが形成されると Nd:YAG レーザーのピーク強度以降の光は吸収されてプラズマ形成を維持するとともに、吸収あるいは反射により YAG レーザー光は透過できず急峻にスイッチオフされたパルスが得られる。本年度、エチレングリコールのジェットシートを生成するための装置を新たに立ち上げ、プラズマシャッターの手法を用いたスイッチパルス生成の予備実験を行い、実際にスイッチパルスの生成が可能であることを確認した。厳密には、スイッチオフ後に残留成分が残っており、その除去が今後の課題である。現在、上記の理論提案に基づく、高強度レーザー電場の存在しない状況下での分子配向の実現の原理実証実験が進行中である。

エチレングリコールのジェットシートを生成するための装置の立ち上げに関し、(独) 産業技術総合研究所の板谷太郎主任研究員にお世話になった。ここに記して謝意を表す。

### 6.6.2 非断熱的に配列した分子への偏光ゲート法の適用による高次高調波発生

高強度フェムト秒レーザー光を原子・分子に照射することにより発生する高次高調波は典型的な非摂動論的現象の一つであり、極端紫外軟 X 線領域の超短パルスコヒーレント光源としての有用性から、実験的・理論的研究が 1990 年前後から精力的に進められている。ランダムに配向した分子中からの高次高調波発生についても、既に 10 年以上前に酒井らによって、イオン化ポテンシャルのほぼ等しい姉妹原子 ( $N_2$  分子の場合は Ar) とほぼ同様の高次高調波発生特性を示すことなどが明らかになっていた。

しかしながら、分子軌道の対称性などに関連する物理過程の詳細に関する研究については、配列した分子試料を用いることが必要であり、最近の分子操作技術の進展を待たねばならなかった。高次高調波の発生実験では、高い分子密度を得るために、分子線バルブの直下にレーザー光を集光する必要がある。このような条件では、分子の回転温度は数 10 K 程度と比較的高く、分子を断熱的に配列させることは極めて困難であるが、超短パルス高強度レーザー光で回転波束を励起し、非断熱的に配列させる手法が有効である。

本研究グループでは、非断熱的に配列した分子を試料として用い、分子中からの高次高調波発生の物理過程の詳細を明らかにすべく研究を進めている。例えば、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を可能にした。その結果、理論的にその発現が予想されていた再結合過程における量子干渉効果を  $CO_2$  分子中での destructive interference として観測することに初めて成功した。さらに、非断熱的に配列した分子 ( $N_2$ ,  $O_2$ , および  $CO_2$ ) を試料とし、高次高調波発生の楕円率依存性を測定した。分子軸と楕円の長軸が平行なときと垂直のときとで楕円率依存性が異なり、平行なときの方が垂直なときよりも楕円率の増大とともに高調波強度が早く減少することを明らかにした。このことは分子軌道の形状から直感的に予想される結果と一致するが、新たに開発した理論モデルで説明することにも成功した。また、上記の destructive interference の効果を楕円率依存性で観測することにも初めて成功した。具体的には、 $N_2$  分子の 31 次高調波について分子軸と楕円の長軸が平行なときの楕円率依存性において、直線偏光 (楕円率  $\varepsilon \sim 0$ ) のときに明瞭なディップが現れることを観測した。

一方、物質中の超高速現象を探究するため、レーザーが 1960 年に発明されて以来、そのパルス幅を短くする努力が続けられている。現在では、フェムト秒 ( $fs = 10^{-15}$  秒) パルスの利用によって、例えば分子内の原子核のダイナミクスや励起状態の緩和過程が観測されている。一方、原子分子内の電子のダイナミクスを観測するためには、典型的に 100 アト秒 ( $as = 10^{-18}$  秒) 程度の分解能が必要である。そのような、アト秒領域の超短パルス光源として周波数帯

域の拡大が可能な高次高調波が注目されている。

媒質として原子を用いた場合、高次高調波は基本波が直線偏光の時に発生効率が最大となり、楕円率を大きくするに従い、急激に効率が落ちる。パルス中で楕円率が変化し、ピーク強度付近で一瞬だけ直線偏光となる時間依存偏光パルスを用いれば、高調波のパルス幅を短くすることができると期待される。この原理に基づいて、アト秒パルスの発生を目指す手法を偏光ゲート法とよぶ。

実際に超短パルスを発生する試みとして、配列した分子に偏光ゲート法を適用した。この場合には、上記の楕円率依存性からの自然な推論として、分子軸と楕円偏光の長軸が平行な時の方が高調波の発生が可能な時間幅がより制限され、高調波スペクトルを観測した場合、より広いスペクトル幅を示すと予想したが、実験結果はむしろ逆の傾向を示すことを初めて発見した。その物理的理由を解明するために、モデル計算を行った。試料として用いた  $N_2$  分子の HOMO を 1 中心原子型軌道の重ね合わせで近似し、Lewenstein モデルを適用して数値計算を行うことにより、実験結果を定性的に再現することに成功した。考察により、観測された結果が、基本波強度の変化とともに楕円率が急峻に変化するパルスに特有の効果であることが分かった。したがって、数サイクルパルスの偏光ゲートによりアト秒パルスを発生する場合にも、搬送波包絡位相 (CEP) だけでなく、分子の空間配列を重要な制御パラメータとできることを初めて明らかにした。

### 6.6.3 非断熱的に配列した多原子分子の多光子イオン化と解離過程の制御

配列あるいは配向した分子集団を試料とし、照射するレーザー光の偏光、波長、強度などを適切に選択することにより、分子の多光子イオン化過程や解離過程を高度に制御したり、結果の解析からレーザー光と分子との相互作用に関する新たな知見が得られる可能性がある。多原子分子の場合でも、親分子のイオン化効率やイオン化に伴う解離生成物の収量は、配列した試料を用いると、レーザー光の波長や強度が同じでも偏光方向との間に強い相関を示すと期待される。実際、試料として非断熱的に配列した  $CO_2$  分子を用いて実験したところ、分子軸と偏光方向との関係により、多光子イオン化や解離過程が高度に制御されていることが初めて明らかになった。

$CO_2$  分子をポンプ光 ( $\sim 7 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>) で非断熱的に配列させ、ポンプ光と平行に偏光したプローブ光 ( $\sim 4 \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>) を照射して多光子イオン化した。図 6.6.28 にポンプ光とプローブ光の間の遅延時間を変えながら測定した  $CO_2^+$ ,  $CO_2^{2+}$ , および  $C^+$  のイオン収量を示す。上段には、比較のため  $CO_2$  分子の配列度 ( $\langle \cos^2 \theta_{2D} \rangle$ ) が示されている。図に示された  $CO_2^+$  と  $C^+$  を含む多くの解離生成物は、配列度との間に正の相関を示す、すなわち、分子軸とプローブ光の偏光方向が平行なときに収量が多くなる。一方、 $CO_2^{2+}$  は配列度と負の相関を示し、分子軸と偏

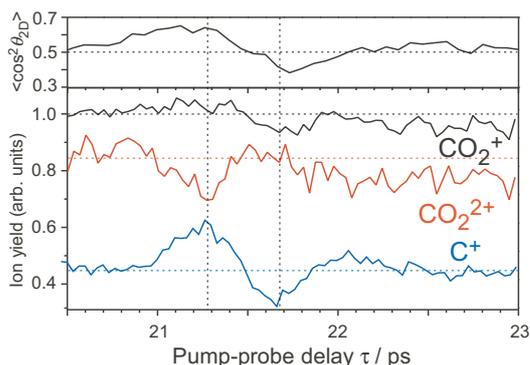


図 6.6.28: イオン収量のポンプ光とプローブ光の間の遅延時間依存性。各イオン収量は、点線がランダムに配向しているときの値であり、見易さのため、縦軸をずらして示してある。上段には  $\text{CO}_2$  分子の配列度  $\langle \cos^2 \theta_{2D} \rangle$  が示されている。

光方向が平行なときに収量が小さくなっている。このことは、分子軸と偏光が平行なときには  $\text{CO}_2^{2+}$  から解離あるいはさらなるイオン化が促進されていることを示している。詳細なデータ解析により、一連の観測結果は、ポンプ光とプローブ光の間の遅延時間とともに変化する分子軸と偏光方向の関係により、分子軸と偏光方向が平行なときに多光子イオン化が促進されやすいという enhanced ionization の効果が高度に制御されている結果として統一的に理解できることが明らかになった。

今回の成果を踏まえ、今後、配列あるいは配向した分子試料を用い、化学結合の選択的な切断や構造変形の高度な制御とそのメカニズムの解明、さらには新現象の探索を進める予定である。

#### 6.6.4 1300 nm 光を基本波とする $\text{H}_2/\text{D}_2$ 中での高次高調波発生と分子振動のダイナミクス

最近 Baker らは、 $\text{H}_2$  分子とその同位体である  $\text{D}_2$  分子を試料とし、高次高調波の強度比と核波束の自己相関関数の比が対応することを利用して、 $\text{H}_2$  や  $\text{D}_2$  の振動ダイナミクス、すなわち、核間距離の時間発展を追跡できることを示した。彼らは、Ti:sapphire レーザー増幅システムの出力である 775 nm の光を基本波として用いたが、高調波が基本波の 1 周期以内で発生することを考えると、1  $\mu\text{m}$  以上の長波長の基本波を用いることにより、振動のダイナミクスがより顕著に現れる可能性がある。さらに、長波長の基本波を用いた分子中からの高次高調波発生に関しては、理論的にも未解明な部分が多く、実験的に新奇な現象が観測される可能性もある。

上記の問題意識から、基本波として Ti:sapphire

レーザー増幅システムの出力である 800 nm の光と超短パルスパラメトリック周波数変換器からの出力である 1300 nm の光を用い、 $\text{H}_2$  および  $\text{D}_2$  分子中で発生する高次高調波の強度を比較して分子振動のダイナミクスや関連する現象の実験的解明を進めつつある。完全に近赤外域にある 1300 nm 光は、可視光との境界である 800 nm 光より取り扱いが極めて困難であるばかりでなく、高次高調波発生における位相整合条件が 800 nm 光と異なるなどのため、当初はフォトンカウンティングレベルの極めて微弱な高調波信号しか観測できなかったが、諸々の実験条件の最適化の結果、十分な強度の信号が観測できるようになった。予備実験の結果、定性的には Baker らの結果と矛盾しない結果が得られている。今後、実験データの統計を上げて定量的な比較検討や理論との比較などを行う予定である。

本研究に関する有益な議論をいただいたドイツ Kassel 大学の Manfred Lein 博士に感謝する。

#### 6.6.5 4 年生特別実験

##### 夏学期

レーザー光によって分子を配列させる場合の配列度の評価は、レーザー光の偏光方向と分子軸とのなす角を  $\theta$  として、 $\cos^2 \theta$  の平均値、 $\langle \cos^2 \theta \rangle$  を用いて行うことが多い。実験的には、配列した分子試料に高強度フェムト秒レーザー光を照射して生成される多価の分子イオンから、クーロン爆裂によって生成されるフラグメントイオンを 2 次元イオン画像化法によって観測する。この手法を用いれば、 $\langle \cos^2 \theta \rangle$  あるいは  $\langle \cos^2 \theta_{2D} \rangle$  ( $\theta_{2D}$  は  $\theta$  の検出器面への射影) を直接的に評価できるが、試料分子をクーロン爆裂によって壊してしまう。

一方、分子の配列状態を検出する手法としてラマン誘起偏光分光法を用いることができる。これは、配列した分子試料が複屈折性を示し、直線偏光したプローブ光が、配列した分子試料を通過後に楕円偏光となった際、元の直線偏光と垂直な成分を検出する手法である。この手法は  $\langle \cos^2 \theta \rangle$  あるいは  $\langle \cos^2 \theta_{2D} \rangle$  を定量的に評価することはできないが、分子試料を壊さずに高感度で配列の様子を観測できる。夏学期には、このラマン誘起偏光分光法を用いた測定を行うための実験装置の設計と試作を行うとともに、 $\text{N}_2$  分子と  $\text{O}_2$  分子を試料として非断熱的な分子配列の様子を観測し、結果を数値計算と比較した。2 次元イオン画像化法を用いる手法と相補的な手法として有効であることを明らかにした。

##### 冬学期

夏学期に行った、ラマン誘起偏光分光法では、プローブ光の偏光はできるだけ純粋な直線偏光であるほうが、検出時のバックグラウンドを低減でき、より高感度の測定が可能となる。フェムト秒レーザー増幅システムからの出力光は、わずかに楕円偏光に

なっている可能性があり、夏学期には直線偏光に補正する目的で、0 次の  $\lambda/4$  波長板を用いていた。多くの場合、0 次の波長板を用いれば十分であるが、今回、より高精度な測定をめざし、色消しの  $\lambda/4$  波長板を用い、 $\text{CO}_2$  分子を試料として測定を行った。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分子配列の時間発展を示す信号をフーリエ変換した結果、0 次の波長板を用いたときに含まれていたノイズ成分が、色消しの  $\lambda/4$  波長板を用いたときにはかなりの程度まで低減しており、その有効性が確認できた。

また、6.6.1 節で述べたプラズマシャッターを用いたナノ秒 Nd:YAG レーザー光の整形を行うために、エチレングリコールのジェットシートを生成する装置を立ち上げるとともに、実際にプラズマシャッターの予備実験を行い、相互相関測定を行ってパルスの時間波形を評価したところ、急峻にスイッチオフされていることを確認した。6.6.1 節で述べたように、厳密にはスイッチオフ後に残留成分が残っており、その除去が今後の課題である。

### 6.6.6 その他

本年度は大学院生 2 名が加入する一方、博士 1 名と修士 2 名を輩出した。ここで報告した研究成果は、研究室のメンバー全員と学部 4 年生の特別実験で本研究室に配属された大口雄一郎君、丸山俊君（以上夏学期）、暮盤晃久君、吉田紅君（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、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) によって行われた。ここに記して謝意を表する。

#### <受賞>

- [1] 金井恒人、第 23 回 (平成 18 年度) 井上研究奨励賞、2007 年 2 月。

#### <報文>

#### (原著論文)

- [2] 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," *Phys. Rev. A* **75**, 041801(R) (4 pages) (2007).
- [3] Shinichirou Minemoto and Hirofumi Sakai, "Anomalous angular distribution of fragment ions from rare-gas diatomic molecules with intense, femtosecond, near-infrared laser pulses," *Phys. Rev. A* **75**, 033413 (6 pages) (2007).
- [4] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Ellipticity dependence of high-order harmonic generation from aligned molecules," *Phys. Rev. Lett.* **98**, 053002 (4 pages) (2007).

#### (会議抄録)

- [5] Takayuki Suzuki, Yu Sugawara, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Optimal control of molecular alignment with the feedback of ion images," to appear in *Ultrafast Phenomena XV*, Springer, P. Corkum, D. Jonas, D. Miller, and A. M. Weiner (Eds.) (2007).
- [6] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Basis for ultrafast imaging of molecular orbitals with high-order harmonic generation," to appear in *Ultrafast Phenomena XV*, Springer, P. Corkum, D. Jonas, D. Miller, and A. M. Weiner (Eds.) (2007).

#### (著書)

- [7] Hirofumi Sakai, "Molecular manipulation techniques and their applications," to appear in *Advances in Multi-Photon Processes and Spectroscopy*, Vol. 15, (20 pages) World Scientific (2007).

#### (国内雑誌)

- [8] 酒井広文、「レーザー光による分子操作と分子物理学の新展開」, *日本物理学会誌*, **61**, 263–267 (2006).
- [9] 酒井広文、「静電場と楕円偏光したレーザー電場の併用による 3 次元分子配向」, *レーザー加工学会誌*, **13**, 33–35 (2006).

#### (学位論文)

- [10] Tomoyuki Horikiri, "Development of a heralded photon source with the advantage of multiphoton reduction for improved quantum key distribution," Doctor's thesis, March 2007.
- [11] 菅原悠、「パルス整形技術を用いた分子の配列および配向制御」, 修士論文、2007 年 3 月。
- [12] 櫃本研太郎、「偏光ゲート法を用いた配列分子からの高次高調波発生」, 修士論文、2007 年 3 月。

#### <学術講演>

#### (国際会議)

#### 招待講演

- [13] Hirofumi Sakai, "Molecular manipulation techniques and their applications," International conference on many particle spectroscopy of atoms, molecules, clusters, and surfaces, Rome, Italy, June 2006.
- [14] Hirofumi Sakai, "Quantum interference in the recombination process of high-order harmonic generation from aligned molecules," *Ultra-Fast Dynamic Imaging Workshop*, London, U.K., April 2006.

#### 一般講演

- [15] Takayuki Suzuki, Yu Sugawara, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Optimal control of molecular alignment with the feedback of ion images," The Fifteenth International Conference on Ultrafast Phenomena, Pacific Grove, California, U.S.A., August 2006.
- [16] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Basis for ultrafast imaging of molecular orbitals with high-order harmonic generation," The Fifteenth International Conference on Ultrafast Phenomena, Pacific Grove, California, U.S.A., August 2006.
- [17] Tomoyuki Horikiri, Yuishi Takeno, Atsushi Yabushita, Haibo Wang, and Takayoshi Kobayashi, "Quantum key distribution with a heralded single photon source and a photon number resolving detector," Conference on Lasers & Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference 2007, Long Beach, California, U.S.A., May 2006.
- (国内会議)
- 招待講演
- [18] 酒井広文、「レーザー光を用いた気体分子の配列・配向制御とその応用」、第14回原子衝突セミナー(原子衝突研究協会) 上智大学四谷キャンパス、2007年3月。
- [19] 酒井広文、「パルス整形技術の分子操作への応用」、特定領域研究「強レーザー光子場における分子制御」研究成果報告会、東京大学本郷キャンパス、2006年9月。
- [20] 酒井広文、「気相分子の配列・配向制御で切り開く分子科学の新展開」、理研シンポジウム「共鳴・配向による分子反応の量子デザイン」、理化学研究所、2006年5月。
- 一般講演
- [21] 櫃本研太郎、峰本紳一郎、酒井広文、「偏光ゲート法を用いた配列分子からの高次高調波発生」、2007年(平成19年)春季、第54回応用物理学関係連合講演会、青山学院大学相模原キャンパス、2007年3月。
- [22] 峰本紳一郎、村松雅弘、酒井広文、「配列した多原子分子の多光子イオン化および解離過程の制御」、2007年(平成19年)春季、第54回応用物理学関係連合講演会、青山学院大学相模原キャンパス、2007年3月。
- [23] 菅原悠、酒井広文、「静電場と整形されたレーザー電場を用いた非断熱的分子配向の優位性」、2007年(平成19年)春季、第54回応用物理学関係連合講演会、青山学院大学相模原キャンパス、2007年3月。
- [24] 菅原悠、酒井広文、「静電場と整形されたレーザー電場の併用による分子の配向制御法の提案」、日本物理学会2007年春季大会、鹿児島大学、2007年3月。
- [25] 峰本紳一郎、菅原悠、村松雅弘、櫃本研太郎、酒井広文、「円偏光パルスにより非断熱的に配列した分子中の高次高調波発生および多光子イオン化」、2006年(平成18年)秋季、第67回応用物理学学会学術講演会、立命館大学びわこ・くさつキャンパス、2006年8月。
- [26] 菅原悠、深澤正裕、酒井広文、「静電場と整形されたレーザー電場を用いた非断熱的分子配向の数値実験」、2006年(平成18年)秋季、第67回応用物理学学会学術講演会、立命館大学びわこ・くさつキャンパス、2006年8月。
- <その他>
- [27] 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14~17年度報告書。
- [28] 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," Virtual Journal of Ultrafast Science, Vol. 6, No. 5 (2007).
- [29] Shinichirou Minemoto and Hirofumi Sakai, "Anomalous angular distribution of fragment ions from rare-gas diatomic molecules with intense, femtosecond, near-infrared laser pulses," Virtual Journal of Ultrafast Science, Vol. 6, No. 4 (2007).
- [30] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Ellipticity dependence of high-order harmonic generation from aligned molecules," Virtual Journal of Ultrafast Science, Vol. 6, No. 3 (2007).

## 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）の分子機構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参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 19 年より桑島が自然科学研究機構・岡崎統合バイオサイエンスセンター（分子科学研究所）に異動となったことに伴い、研究室もそちらに移った。これは物理教室における最後の年次報告である。

#### 7.1.1 蛋白質工学を用いた蛋白質のフォールディング研究

球状蛋白質の構造形成機構を明らかとするには、天然状態の熱力学的安定性に関する研究とともに、巻き戻り過程の速度論的研究が必要である。多くの蛋白質で、巻き戻り反応初期に二次構造を持った過渡的な中間状態の蓄積されることが知られている。この中間体は、平衡条件下で観測されるモルテン・グロビュール (MG) 状態と同一であり、蛋白質構造形成にとって必須であると考えられている。このような中間体の構造や巻き戻り反応の遷移状態の構造を明らかにすることが蛋白質のフォールディング研究にとって重要である。そのためには、蛋白質工学の手法を用いて、対象とする蛋白質に部位指向的な変異を導入し、導入されたアミノ酸変異がその蛋白質の構造安定性や巻き戻り速度過程にどのような影響を及ぼすかを調べる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。

ヤギ  $\alpha$  ラクトアルブミンの安定性とフォールディングに及ぼす N 末端アミノ酸残基の影響

(友寄、中村、榎、桑島)

蛋白質工学の手法を用いてヤギ  $\alpha$  ラクトアルブミンのフォールディング機構を調べるため、これまで

の研究では、野生型ヤギ  $\alpha$  ラクトアルブミン発現プラスミドを持った大腸菌から得られた、組み換え体が用いられてきた。しかし、この組換え蛋白質は、その N 末端に開始コドンに由来する余分な Met 残基が付加しているため、天然状態の安定性がヤギ乳より抽出した真性体と比べて著しく不安定化することが、われわれの以前の研究により明らかになっている。一方、この組み換え体の N 末端の次にあるグルタミン酸を遺伝子工学的に除去した組換え体 ( $\Delta E1$  変異体) では安定性が回復することが知られている。本研究では、組み換え体、真性体、 $\Delta E1$  変異体の三つの蛋白質を用いて、ヤギ  $\alpha$  ラクトアルブミンの N 末端残基がその熱力学的安定性やフォールディングとアンフォールディングの速度過程にどのような影響を及ぼすかを定量的に調べた。Ca<sup>2+</sup> 存在下 (ホロ型) と Ca<sup>2+</sup> 非存在下 (アポ型) の二つの条件下で、これらの蛋白質の安定性とフォールディング/アンフォールディングの速度論の実験を円偏光二色性 (CD) 分散装置を用いて行った。その結果、以下の結論が得られた。

(1) 三つの蛋白質のアンフォールディングのストップフロー CD による解析から、N 末端残基の違いによらず、アンフォールディングのバースト相が存在し、それは、アンフォールディングの初期中間体 ( $I_N$ ) によってもたらされていることが初めて明らかになった。

(2) Ca<sup>2+</sup> の  $\phi$  値解析および Ca<sup>2+</sup> 結合定数の評価を行った結果、N 末端残基の違いによらず、ヤギ  $\alpha$  ラクトアルブミンのフォールディングは、巻き戻り中間体 ( $I_B$ ) とアンフォールディング中間体 ( $I_N$ ) の間に存在する遷移状態 ( $\ddagger$ ) によって律速される逐次的四状態モデルに従うことが分かった。

(3) N 末端の  $\phi$  値解析の結果から、アポ型の N 末端部位の各状態の安定化エネルギーレベルが、ホロ型に比べて高くなっており、ホロ型とアポ型では構造形成開始部位が異なる可能性がある。

(4)  $\Delta E1$  変異体は、その安定性とフォールディングの速度論的描像が真性体のものとよく似ており、今後ヤギ  $\alpha$  ラクトアルブミンのフォールディング機構を研究する上で良い擬野生型蛋白質となり得ることが分かった。

NMR によるヤギ  $\alpha$ -ラクトアルブミンのフォールディング機構の解析

(中村、榎、桑島)

$\alpha$  ラクトアルブミン ( $\alpha$ -LA) はアミノ酸 123 残基の球状蛋白質であり、フォールディングのモデル蛋白質として様々な研究がなされてきた。 $\alpha$ -LA のモルテン・グロビュール (MG) 状態は、生物種によって、その構造や安定性が異なることが知られている。また、ヤギ  $\alpha$ -LA (GLA) は  $\phi$  値解析からそのフォールディング遷移状態の構造が明らかになっている。 $\alpha$ -LA の中で遷移状態についての知見が得られているのは GLA だけである。本研究では、GLA の天然状態及び MG 状態における水素/重水素 (H/D) 交換反応を NMR により観測し、GLA のフォールディン

グ過程に関する情報をアミノ酸残基レベルで得ることを目的とした。

大腸菌の発現系を用いて、 $^{15}\text{N}$  標識した GLA を発現し、精製した。 $\text{D}_2\text{O}$  溶媒に溶解した GLA の HSQC スペクトルの時間変化を追跡する H/D 交換実験から、天然状態では C-ヘリックス付近に存在するアミドプロトンが強く保護されていることが示された。さらに、MG 状態における H/D 交換実験の結果から、MG 状態においても C-ヘリックスが特に安定化されていた。本研究の結果と  $\phi$  値解析から得られた遷移状態の構造は、階層的フォールディング機構を支持するものである。

### イヌ・ミルク・リゾチームの巻き戻りとアンフォールディングの速度論的解析

(仲谷、榎、桑島：佐伯博士(東大)、相沢博士(北大)、出村教授(北大)、河野教授(北大)との共同研究)

$\text{Ca}^{2+}$  の結合したホロ状態および  $\text{Ca}^{2+}$  非存在下のアポ状態におけるイヌ・ミルク・リゾチームのリフォールディングとアンフォールディング反応をストップトフロー CD 装置を用いて研究した。両方の型の蛋白質とも、リフォールディング反応は一つの指数関数で表され、反応曲線を時間ゼロに外挿した CD 値と平衡測定の結果から予測されるほどけた状態(U)の CD 値との間に大きな差が観測された。これは装置の不感時間内に、バースト相中間体 ( $I_B$ ) が蓄積することを意味している。また、 $I_B$  の転移曲線はホロ型とアポ型で一致した。この結果は、 $I_B$  が  $\text{Ca}^{2+}$  と結合しないことを示す。また二状態モデルで解析した  $I_B$  と U との間の自由エネルギー差はアポ型のモルテン・グロビュール (MG) 状態と U 状態との自由エネルギー差と一致した。このことは  $I_B$  がアポ型の MG 状態と同一であることを示している。ホロ型とアポ型でフォールディングの機構は共通であり、MG 状態を中間体として経由するスキームで表される。

ホロ型のアンフォールディング反応は、一つの指数関数で表され、バースト相も見られなかった。これに対して、アポ型のアンフォールディング反応では、バースト相とそれに続く単一指数関数的な反応曲線が観測された。また、アンフォールディング反応の速度定数に変性剤 (GdnHCl) 濃度依存性が殆ど認められなかった。クエンチトフロー法を用いたダブルジャンプ巻き戻り実験より、アポ型では天然状態が不均一であり、バースト相内に素早くほどける分子種と観測可能な時間域でほどける分子種の 2 種類以上からなっていることがわかった。

ホロ蛋白質について平衡論測定の  $m_{IU}$ 、 $m_{NU}$  値および速度定数の変性剤濃度依存性から求められる遷移状態の  $m$  値を用いて中間体および遷移状態の構造形成度を求めた。構造形成度は U 状態から MG 状態、遷移状態そして N 状態の順に大きくなり、階層的なフォールディング機構を示している。

$\text{Ca}^{2+}$  結合部位の  $\phi$  値を求めたところ、-0.15 となり、フォールディング反応の遷移状態では  $\text{Ca}^{2+}$  結

合部位の構造が形成されていないことを示している。イヌ・ミルク・リゾチームの相同蛋白質ウシ  $\alpha$ -ラクトアルブミンでは、 $\phi$  値は 0.76 であり、遷移状態において  $\text{Ca}^{2+}$  結合部位は形成されていることがわかっている。したがって、これらの結果は、同じファミリーに属する相同な蛋白質間でフォールディング開始部位(フォールディング経路)が異なっていることを示している。この結果は、相同蛋白質間でフォールディング経路が異なることを明確に示した最初の例である。

### 核磁気共鳴法を用いたスタフィロコッカール・ヌクレアーゼ変異体のアンフォールディング転移の解析

(榎、桑島)

スタフィロコッカール・ヌクレアーゼ (SNase; 149 残基) は、フォールディング研究における代表的なモデル蛋白質である。SNase のプロリン残基を全て他のアミノ酸残基に置換した変異体である無プロリン SNase (P11A/P31A/P42A/P47T/P56A/P117G) はフォールディング研究に重要な役割を果たしている。われわれは、この無プロリン SNase のフォールディング中間体の性質を残基レベルで詳細に明らかにするために、核磁気共鳴 (NMR) 法を用いて研究している。

天然条件下での水素重水素交換反応を用いた安定性の解析によると、(1)  $\beta$ -ストランド II, III 及び V が、 $\beta$ -ストランド I, IV 及び  $\alpha$ -ヘリックス H1, H2 及び H3 よりも安定であること、(2) アンフォールディングに伴う自由エネルギー変化について、水素重水素交換実験から得られた値の方が、円偏光二色性 (CD) やトリプトファン蛍光をプローブとして得られた値に比べて 1-2 kcal/mol 程度大きいことが示唆された。測定手法によって自由エネルギー変化に違いが現れる原因を探るため、昨年度は HSQC スペクトルを用いて平衡論的アンフォールディングを測定した。今年度は、HSQC スペクトルによって観測したアンフォールディングの解析を進めた。観測することができた約 30 残基について、アンフォールディングに伴う信号の強度変化を二状態モデルを用いてより定量的かつ詳細に解析している。

### スタフィロコッカール・ヌクレアーゼのフォールディング開始部位の研究

(高橋(龍)、榎、桑島)

プロリン残基のない SNase 変異体 (SNasePro-) は、フォールディングのメカニズムを調べる上で重要な役割を果たしてきた。この変異体はプロリン残基がないためにプロリンの異性化反応が起こらず、野生型の SNase と比較すると、フォールディングの振る舞いがより単純化される。SNasePro-を擬似野生型として、V66L、G88V、V66L/G88V、A69T の 4 つの変異体も作成した。この 5 つの変異体を使って、われわれは今までに SNase のフォールディングのメカニズムを詳細に調べてきた。今回は新たに SNasePro-

に A90S 変異を導入し、変異蛋白質のフォールディングとアンフォールディングをストップ・フロー蛍光測定とストップ・フロー CD 測定を用いて調べた。その結果、A90S も他の変異体と同様、リフォールディングは複数の相からなる反応であり、アンフォールディングは 1 つの相からなる反応であった。またダブルジャンプの測定から、リフォールディングの測定に見られた 5 つ相のうち、遅延相を除く 4 つの相は天然状態の蓄積を表していることがわかった。遅延相が見られることも考慮すると、SNase は、フォールディング経路上の必須の中間状態を経て天然状態に至ると考えられる。さらに今までの結果も合わせて考えると、SNase は複数のフォールディング開始部位を持っていることが示唆される。その際、変異を導入することによりエネルギー地形が変化して、その結果フォールディング経路の優先順位が変化すると考えられる。

### GroEL の単一リング変異体 (SR1) のヌクレオチドによる構造転移の速度論的解析

(高橋(一) 槇、桑島: 木下助教授 (東大・医科研) との共同研究)

GroEL はヌクレオチドによるアロステリック転移を起こすことによって標的蛋白質を効率的に巻き戻す。われわれはその詳細な分子機構を明らかにすることを目的として研究を行っているが、GroEL の二重リング構造のためそのアロステリック転移は複雑である。そこで、単一リングだけからなる GroEL の変異体 (SR1) を作成し、その構造転移をストップ・フロー蛍光スペクトルを用いて調べてきた。SR1 のアロステリック転移に相当する相の見かけの速度定数の ATP 濃度依存性を詳細に解析した結果、単純な一つのシグモイドでは表されないことが明らかとなった。この結果は GroEL には既に確認されている ATP 結合部位の他に ATP と弱く結合する部位が存在することを示唆している。また、第二の ATP 結合部位への阻害剤と考えられる ADP が大過剰に存在するときに、SR1 のアロステリック転移の ATP 濃度依存性が一つのシグモイドへ変化するというのも第二の ATP の結合部位の存在を示唆している。

これら、速度論的解析により示唆されている第二の ATP 結合部位の存在を確かめるために、GroEL のアミノ酸配列を他のヌクレオチド結合蛋白質のアミノ酸配列と比較して調べた。その結果、Walker の配列とよばれる、多くのヌクレオチド結合蛋白質のヌクレオチド結合部位に共通するアミノ酸配列が GroEL のアミノ酸配列の中にも存在することが明らかとなった。この配列部位は GroEL の既知の ATP 結合部位とは異なるので、第二の ATP 結合部位である可能性が高い。

現在、フォトアフィニティーラベリングの方法を用いて、実験的に第二の ATP 結合部位を特定することを試みている。

大腸菌シャペロニンがスタフィロコッカス・ヌクレアーゼの巻き戻りに及ぼす影響

(鈴木、廉岡、桑島)

昨年度に引き続き、大腸菌シャペロニンが標的蛋白質の巻き戻りに与える影響を調べた。標的蛋白質として、プロリンを全て他のアミノ酸に置換し、かつ A69T という不安定化の変異を加えたスタフィロコッカス・ヌクレアーゼ (SNase(Pro)-A69T:A69T と呼ぶ) を用いた。巻き戻りの速度過程は Trp140 をプローブとしたストップ・フロー実験により調べた。

GroEL 非存在下では A69T は phase1,2,3 の 3 つの相 (速度定数はそれぞれ  $0.90 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.45 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.03 \text{ s}^{-1}$ ) で巻き戻り、ダブルジャンプ実験により、この 3 つの相は全て天然状態への蓄積過程であることが確認された。一方、GroEL 存在下でも A69T は phase1', 2', x の 3 つの相 (速度定数はそれぞれ、 $0.01 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.03 \text{ s}^{-1}$ ,  $40 \text{ s}^{-1}$ ) で巻き戻すが、ダブルジャンプ実験により、天然状態への蓄積過程は phase1', 2' のみであることがわかった。次に、GroEL 存在下での 2 つの天然状態蓄積過程と GroEL 非存在下での巻き戻り速度過程との対応づけを行なうため、ダブルジャンプ実験を応用して GroEL を A69T の巻き戻りの途中で混合する実験を行なった。この結果、GroEL の存在により、phase1 の速度定数は phase1' に、phase2 の速度定数は phase2' に変化することがわかった。これは GroEL が A69T の巻き戻り速度過程を遅らせることを示唆するものである。

この他に、GroEL/ATP 存在下及び GroEL/GroES/ATP 存在下での A69T の巻き戻りを観測した。その結果、両実験において A69T の見かけの巻き戻りは GroEL 非存在条件の場合とかなり近くなった。特に、GroEL/GroES/ATP 存在下では A69T の見かけの巻き戻りは GroEL 非存在下での A69T 巻き戻りより速くなり、この見かけのうえでの加速は GroEL 非存在下での A69T 巻き戻りにおける phase1 の存在割合が増えたことによって引き起こされたことがわかった。

### 7.1.2 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、CD、蛍光スペクトル、X 線溶液散乱などの分光学的な測定手段を用いて調べる。しかし、現在まで用いられているストップ・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。

高温分子動力学シミュレーションによる、 $\alpha$  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

(荳口、桑島：池口助教授 (横浜市大) 太田元規助教授 (東工大) 木寺教授 (横浜市大) との共同研究)

溶媒を含めた蛋白質の系は複雑な多体系であり、また分子動力学 (MD) シミュレーションのトラジェクトリーは非常に確率的であるため、その中から構造変化の特徴を抽出してくることは難しい。例えば先行研究では、複数のアンフォールディング・トラジェクトリーからなる構造アンサンブルから遷移状態アンサンブルを抽出することに成功した研究例はなかった。

そこで本研究では、ヤギ  $\alpha$  ラクトアルブミンの真正体と組み換え体のそれぞれについて、498 K で完全にアンフォールディングさせる 5 ns のシミュレーションを各 10 本行った。得られた全トラジェクトリーに対して直交座標空間での主成分解析を行ったが、各トラジェクトリー間に共通したアンフォールディング経路を見出すことはできなかった。そこで、蛋白質の構造を特徴的な部分構造に分けて粗視化し、それら部分構造間の構造形成率を表す新しい座標系を用いてトラジェクトリーの記述を行った。この粗視化座標空間における主成分解析では、各トラジェクトリー間に共通したアンフォールディング経路を見出すことができた。さらに、各トラジェクトリーで観察されるアンフォールディング経路の間でどこが似ていて、どこが違っているかを系統的に分類する解析方法「マルチプル・トラジェクトリー・アライメント」を開発し、それを用いてアンフォールディング経路の解析を行った。その結果、真正体と組み換え体ではアンフォールディング経路が違うことを見つけ、さらにアンフォールディング経路のボトルネックにあたる遷移状態アンサンブルを抽出することができた。抽出された遷移状態の構造特徴は、実験値である  $\phi$  値解析 (佐伯ら (2004) *J. Mol. Biol.* 341, 589-604.) と非常に良い相関を示した。得られた遷移状態アンサンブルの解析から、フォールディング過程の律速段階は、(1) エントロピックな障壁であること、(2) 脱溶媒和過程であることが分かった。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] S. Enoki, K. Maki, T. Inobe, K. Takahashi, K. Kamagata, T. Oroguchi, H. Nakatani, K. Tomoyori & K. Kuwajima: The Equilibrium unfolding intermediate observed at pH 4 and its relationship with

the kinetic folding intermediates in green fluorescent protein. *J. Mol. Biol.* (2006) 361, 969-982.

- [2] A. Kato, K. Maki, T. Ebina, K. Kuwajima, K. Soda & Y. Kuroda: Mutational analysis of protein solubility enhancement using short peptide tags. *Biopolymers* (2007) 85, 12-18.
- [3] H. Nakatani, K. Maki, K. Saeki, T. Aizawa, M. Demura, K. Kawano, S. Tomoda & K. Kuwajima: Equilibrium and Kinetics of the Folding and Unfolding of Canine Milk Lysozyme. *Biochemistry* (2007) 46, 5238-5251.

(会議抄録)

- [4] K. Kuwajima, T. Inobe & M. Arai: The allosteric transition of the chaperonin GroEL from *Escherichia coli* as studied by solution X-ray scattering. *Macromol. Res.* (2006) 14, 166-172.

(国内雑誌)

- [5] 鎌形清人、桑島邦博：タンパク質フォールディング速度と構造パラメータとの相関解析、生物物理 (2006) 46(3), 144-149.
- [6] 桑島邦博：リサーチ・ナビ 文部科学省 - 特定領域研究「水と生体分子が織り成す生命現象の化学」、未来材料 (2007) 2月号 62-65.
- [7] 桑島邦博：分子科学へのあこがれと回帰、分子研レターズ (2007) 55, 28-29.

(学位論文)

- [8] 荳口友隆：Experimental and simulation studies on the folding/unfolding of goat  $\alpha$ -lactalbumin. (博士論文)
- [9] 友寄克亮：ヤギ  $\alpha$  ラクトアルブミンの安定性とフォールディングに及ぼす N 末端アミノ酸残基の影響 (博士論文)
- [10] 仲谷博安：Equilibrium and kinetics of the folding and unfolding of canine milk lysozyme. (博士論文 (化学専攻))
- [11] 鈴木啓介：大腸菌シャペロニンがスタフィロコッカル・ヌクレアーゼの巻き戻りに及ぼす影響 (修士論文)
- [12] 高橋龍司：プロリンのないスタフィロコッカル・ヌクレアーゼのフォールディング反応 (修士論文)

(著書)

- [13] 桑島邦博：「バイオインフォマティクス事典」(宮野悟・江口至洋・金久實・高木利久・中井謙太 編) 分担執筆、(共立出版)
- [14] 桑島邦博：タンパク質のアンフォールディングとフォールディング、「生物物理学ハンドブック」(石渡信一・桂勲・桐野豊・美宅成樹 編) 分担執筆、(朝倉書店)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [15] K. Takahashi, T. Inobe, K. Maki, K. Kamagata, S. Enoki & K. Kuwajima: Asymmetric GroEL-GroES complex observed by small-angle X-ray scattering under physiological conditions. *XIII International Conference on Small-angle Scattering* (Kyoto, Japan, July 9-13, 2006) (Poster).
- [16] K. Takahashi, K. Kinoshita, K. Maki & K. Kuwajima: Search for the second ATP binding site in the *Escherichia coli* chaperonin GroEL. *The Protein Society 20th Symposium* (San Diego, CA, U.S.A, August 5-9, 2006) (Poster).
- [17] T. Nakamura, E. Yukawa, K. Maki & K. Kuwajima: Backbone NMR assignment and hydrogen exchange of goat  $\alpha$ -lactalbumin. *The Protein Society 20th Symposium* (San Diego, CA, U.S.A, August 5-9, 2006) (Poster).
- [18] K. Takahashi, H. Yamada, K. Maki & K. Kuwajima: The allosteric transition of GroEL in the presence of ADP. *5th East Asian Biophysics Symposium & 44th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan* (Okinawa convention center, Okinawa, Japan, November 12-16, 2006) (Poster).
- [19] T. Nakamura, E. Yukawa, K. Maki & K. Kuwajima: Backbone NMR assignment and hydrogen exchange of goat  $\alpha$ -lactalbumin. *5th East Asian Biophysics Symposium & 44th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan* (Okinawa convention center, Okinawa, Japan, November 12-16, 2006) (Poster)
- [20] K. Tomoyori, K. Saeki, K. Maki, T. Nakamura & K. Kuwajima: The role of  $\text{Ca}^{2+}$  in the folding goat  $\alpha$ -lactalbumin. *5th East Asian Biophysics Symposium & 44th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan* (Okinawa convention center, Okinawa, Japan, November 12-16, 2006) (Poster)
- [21] H. Nakatani, K. Maki, K. Saeki, T. Aizawa, M. Demura, K. Kawano & K. Kuwajima: Equilibrium and kinetics of the folding of canine milk lysozyme. *5th East Asian Biophysics Symposium & 44th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan* (Okinawa convention center, Okinawa, Japan, November 12-16, 2006) (Poster)
- [22] R. Takahashi, R. Yoshida, K. Maki & K. Kuwajima: Folding mechanisms of a proline-free variant of staphylococcal nuclease studied by mutagenesis approach. *5th East Asian Biophysics Symposium & 44th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan* (Okinawa convention center, Okinawa, Japan, November 12-16, 2006) (Poster)
- [23] A. Fukagawa, M. Hiroshima, K. Kuwajima & M. Tokunaga: Detection of substructural unfolding of SNase by intermolecular force microscopy. *5th East Asian Biophysics Symposium & 44th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan* (Okinawa convention center, Okinawa, Japan, November 12-16, 2006) (Poster)
- [24] K. Kuwajima: Folding mechanism of non-two-state globular proteins. *Asia-Pacific Workshop on Biological Physics* (National University of Singapore, Singapore, July 3-5, 2006)
- [25] K. Kuwajima: Experimental and simulation studies on the folding/unfolding of goat  $\alpha$ -lactalbumin. *The 6th KIAS Conference on Protein Structure and Function* (Korea Institute for Advanced Study, Seoul, Korea, October 26-28, 2006)
- [26] K. Takahashi: Kinetics of the Allosteric Transition of the Chaperonin GroEL Studied by Small-angle X-ray Scattering and Fluorescence Spectroscopy. *21st COE 5th International Conference-Perspectives in Nonlinear Physics* (Dept. Phys., Univ. Tokyo, November 20-22, 2006)
- [27] K. Kuwajima: Equilibrium and kinetics of the folding/unfolding of authentic and recombinant goat  $\alpha$ -lactalbumin. *21st COE 5th International Conference-Perspectives in Nonlinear Physics* (Dept. Phys., Univ. Tokyo, November 20-22, 2006)

## (国内会議)

## 一般講演

- [28] 榎 互介、遠藤峻彦、桑島邦博：プロリン残基を含まないスタフィロコッカール・ヌクレアーゼ変異体のアンフォールディング転移の解析、第6回日本蛋白質科学会年会（京都国際会館、2006年4月24-26日）
- [29] 塚本精一、山下貴子、佐藤美由紀、津下英明、藤原和夫、榎互介、桑島邦博、池口雅道：Tear lipocalinの折れたたみ初期構造、 $\beta$ -Lactoglobulinとの比較、第6回日本蛋白質科学会年会（京都国際会館、2006年4月24-26日）
- [30] 中村 敬、湯川 英美、榎 互介、桑島 邦博：NMRによるヤギ  $\alpha$ -ラクトアルブミンのフォールディング機構の解析、第6回日本蛋白質科学会年会（京都国際会館、2006年4月24-26日）
- [31] 仲谷博安、榎互介、佐伯喜美子、相沢智康、出村誠、河野敬一、桑島邦博：イヌ・ミルク・リゾチームの巻き戻りとアンフォールディングの速度論的解析、第6回日本蛋白質科学会年会（京都国際会館、2006年4月24-26日）
- [32] 高橋一暢、木下賢吾、榎互介、桑島邦博：シャペロニン GroEL の第二の ATP 結合部位の探索、第6回日本蛋白質科学会年会（京都国際会館、2006年4月24-26日）
- [33] 笠口友隆、池口満徳、佐伯喜美子、太田元規、木寺詔紀、桑島邦博：分子動力学シミュレーションと速度論的実験を用いたラクトアルブミンのアンフォールディング過程の観察、東京大学生命科学研究ネットワーク・シンポジウム（東京大学、2006年11月25日）
- [34] 中村敬、榎互介、桑島邦博：The native and molten globule states of goat  $\alpha$ -lactalbumin characterized by the NMR hydrogen-exchange technique. 特定領域研究「水と生体分子」第4回公開ワークショップ（京都テルサ、2006年12月18-19日）

## 招待講演

- [35] 高橋一暢、槇互介、桑島邦博: The Effect of ADP on the Kinetics of the ATP-induced Allosteric Transition of GroEL. 特定領域研究「水と生体分子」第4回公開ワークショップ(京都テルサ、2006年12月18-19日)
- [36] 鈴木啓介、廉岡昭雄、槇互介、高橋一暢、桑島邦博: Effect of the chaperonin GroEL/ES on the refolding kinetics of a staphylococcal nuclease mutant. 特定領域研究「水と生体分子」第4回公開ワークショップ(京都テルサ、2006年12月18-19日)
- [37] 高橋龍司、吉田龍平、槇互介、桑島邦博: Folding kinetics of the A90S variant of proline-free staphylococcal nuclease. 特定領域研究「水と生体分子」第4回公開ワークショップ(京都テルサ、2006年12月18-19日)

## 招待講演

- [38] 槇互介: 還元型チトクロム *c* のフォールディング、第7回蛋白質ダイナミクス研究会(岐阜県岐阜市岐阜大学医学部本館、2006年6月22-23日)
- [39] 桑島邦博: 蛋白質フォールディングの階層性と協同性、自然科学研究機構連携プロジェクト「自然科学における階層性と全体」第3回シンポジウム(箱根パークス吉野、2006年7月19-20日)
- [40] 桑島邦博: 蛋白質のフォールディング問題: 物質科学と生命科学の接点、蛋白質科学に関するシンポジウム「ライフサイエンスと蛋白質科学」(東京大学山上市会館、2006年10月5日)
- [41] 桑島邦博: 蛋白質科学: 蛋白質の構造と機能、日本化学会第87春季年会イブニングセッション「生体分子科学の進展」(関西大学千里山キャンパス、2007年3月25日)

## (セミナー)

- [42] K. Kuwajima: Experimental and simulation study of the mechanism of folding and unfolding of  $\alpha$ -lactalbumin. (Department of Biological Sciences, National University of Singapore, Singapore, July 6, 2006)

## 7.2 能瀬研究室

脳・神経系はいかにして形成され機能するのか。この問いは現代科学に残された最大の謎の一つである。ヒトの脳には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現するために如何なる原理が働いているのだろうか? 当研究室では、動物の発生過程において神経細胞がどのようにして自分の結合相手を見つけ出し、シナプスを形成するのかを研究している。特に、シナプスが形成される際、細胞間でどのようなコミュニケーションが取られているのかを分子レベルで理解することをめざしている。また、シナプスは「記憶の場」としても注目を集めており、その基礎となるシナプスの性質を明らかにする、という観点からも研究を進めている。

## 7.2.1 シナプス特異性を決める分子の同定と機能解析

発生過程において神経細胞はいかにして、その行き先を正しく見つけたのだろうか。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ブリシャス、コネクチンを発見した。今年度は以下のような研究を行った。

単一細胞遺伝子発現解析による神経標的認識分子の網羅的同定 (稲木美紀子、鄭凌霄、新座(亀田)麻記子、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、カブ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。このような冗長性のある系において神経の標的認識の分子機構を解明するため、少数の標的細胞に絞りを絞り、そこで働く神経標的認識分子を網羅的に同定することを試みた。具体的にはショウジョウバエの全遺伝子を解析できるDNAマイクロアレイを用い、単一細胞レベルでの遺伝子発現解析を行った。これまでに、異なる運動神経細胞RP5及びRP1によりそれぞれ支配されている2つの筋肉、筋肉12及び筋肉13で2倍以上他方より高く発現する遺伝子を、それぞれについて約100個ずつ同定している。これらの候補分子のうち、標的認識過程に直接関与する可能性のある膜局在型または分泌型タンパク質に焦点をあてた機能解析を昨年度までに行い、新たな標的認識分子としてWnt4を同定した(事項参照)。本年度はさらに、筋肉特異的な遺伝子発現を制御している可能性のある転写因子について、欠失体を用いた機能解析を行った。また、標的認識分子の機能の冗長性を明らかにするため、複数の標的認識分子を同時に欠損した2重欠失体の解析を進めている。特に、Toll遺伝子がWnt4同様、筋肉13においてより強く発現し、類似した表現型を示すことを見いだしたので、Wnt4とTollの二重変異体を解析することで、一つの標的細胞の認識に関わる冗長的な分子の存在を明らかにできると期待している。尚、本研究は本学先端科学技術研究センター、油谷浩幸教授との共同研究である。

Wnt4の機能解析: 抑制因子を介した神経標的認識機構(稲木美紀子、能瀬聡直)

上記の、DNAマイクロアレイ法を用いた研究により同定したWnt4について詳細な機能解析を行った。Wnt4は、哺乳動物まで保存され、様々な発生過程で重要な役割を果たすWntファミリーに属する分泌蛋

白質である。Wnt4の機能欠失変異体では、筋肉12の神経終末が小さくなる一方、筋肉13では神経終末が大きくなっていった。逆に、Wnt4を筋肉12において異所発現させると、この運動神経の筋肉12上での終末形成が阻害された。以上の結果は、Wnt4が筋肉13に発現し、筋肉12に投射すべき運動神経細胞に対し阻害的に働きかけることにより、それらが正しい標的細胞(筋肉13ではなく筋肉12)と結合するよう制御していることを示唆している。この結果は非標的細胞上の阻害分子の働きが、標的特異性の決定に必須の役割を果たしていることを示した初めての例である。われわれはさらに、運動神経軸索においてWnt4シグナルを介するシグナル伝達経路を調べた。Wntファミリーのレセプターの一つであるFrizzled2及び細胞内蛋白質であるDishevelledのドミナントネガティブ型をすべての神経で強制発現させ、それぞれの機能を阻害すると、Wnt4の変異体と同様の表現型がみられた。また、別のWntレセプターとして近年解析されているDerailed-2の機能欠失変異体でも同様の表現型がみられた(米国ソーク研究所John Thomas教授との共同研究)。これらの結果から、Wnt4は、レセプターであるFrizzled2、Derailed-2及び細胞内情報伝達分子Dishevelledを介して働いていることが示された。

### 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るのか、という問いかけに答える研究はまだ始まったばかりである。当研究室ではショウジョウバエ神経筋シナプスをモデルとして、シナプス形成の分子機構を探っている。特に、バイオイメージング、電気生理学等の生物物理学的諸技術を用い、機能的側面と、形態的側面の両方向からシナプス形成の分子機構を理解することを目標としている。

蛍光消光回復法(FRAP)を用いた細胞接着分子ファシクリン2の動態解析(高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直)

シナプス部では、タンパク質組成が他の細胞膜領域と異なっており、シナプス伝達のために特殊化している。発生過程におけるシナプス部への分子局在は、多くの遺伝子が関与する複雑な過程であるが、その中で細胞接着分子は、シナプス前細胞と後細胞を物理的に直接つなぐことができるため、特に重要であると考えられている。実際、細胞外領域に接着能を持ち、細胞内領域に分子集積を担う部位を持つ膜貫通タンパク質が複数同定されており、培養下でのシナプス形成に関与していることが報告されている。ところが、生体内(in vivo)でのシナプス部への分子局在における細胞接着の役割は明らかになっていない。我々はこれまでに、細胞接着分子ファシ

クリン2(Fas2)のin vivoでの神経筋シナプス形成における局在と機能を解析してきた。そして、軸索上のFas2が細胞外相互作用を介して筋肉細胞上のFas2をシナプス部に集積させることを明らかにした。本年度は、Fas2の集積の様子を詳しく調べるために、蛍光消光回復法(FRAP)を用いて、シナプス部におけるFas2の可動性を解析した。FRAPは、高強度レーザー照射によって蛍光タンパク質が非可逆的に蛍光性を失うことを利用した分子動態の解析法である。本実験の原理は以下の通りである。まず、Fas2と黄色蛍光タンパク質YFPとの融合タンパク質Fas2-YFPを筋肉細胞に発現させ、高強度レーザーをシナプス部だけに照射することで、シナプス部に存在するFas2-YFPを特異的に消光させる。その後、Fas2の可動性を反映して、シナプス部に存在する消光された(非蛍光性の)Fas2-YFP分子と、シナプス以外の場所にあつて消光されてない(蛍光性の)Fas2-YFP分子の入れ替わりが起こり、シナプス部の蛍光が回復する。したがって、蛍光消光後の蛍光回復のkineticsを測定することにより、シナプス部におけるFas2分子の可動性を解析することが可能となる。我々は、シナプス形成が始まる前の産卵後13時間と、シナプス形成開始直後の産卵後15時間におけるFas2-YFPの可動性の比較から、軸索による神経支配に伴ってシナプス後膜部のFas2-YFPが動きにくくなることを見出した。この、シナプス形成に伴うFas2-YFPの可動性の低下は、ファシクリン2欠失体では起こらなかったことから、軸索上のFas2の関与が示唆された。さらに、この可動性の低下には、Fas2細胞外領域が重要で、細胞内領域は不必要であった。以上のことから、生体内において、軸索上のFas2が細胞外での相互作用を介して、筋肉細胞上のFas2の可動性を低下させることで、シナプス部への集積を実現させていることが示された。今後、この解析法を他のシナプス局在分子に応用して、シナプス形成における分子動態を詳細に解析する計画である。

培養細胞を用いた細胞接着分子ファシクリン2の接着能の解析(糸崎、樋口、大原(4年生特別実験)、高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直)

我々はこれまでに、シナプス前細胞および後細胞の細胞接着分子ファシクリン2(Fas2)が、細胞外相互作用を介してシナプス部に集積するという遺伝学的、発生学的な結果を得た。Fas2の細胞外相互作用を介した接着能をより明らかに示すために、ショウジョウバエ培養細胞であるS2細胞にFas2タンパク質を発現させて、細胞の凝集実験を行なった。全長のFas2に黄色蛍光タンパク質(YFP)を挿入した遺伝子をS2細胞に導入したところ、遺伝子導入がなされた蛍光を発する細胞は細胞塊(10 cells)を形成したが、遺伝子導入されなかった細胞は、細胞塊を形成しなかった。このことから、この実験系でFas2による接着能解析が可能であることが分かった。接着が細胞外相互作用によるものかを明らかにするために、Fas2の細胞外領域とYFPとの融合タンパク

質、および細胞内領域と YFP との融合タンパク質をそれぞれ別の S2 細胞群に発現させ凝集実験を行なった。すると、Fas2 の細胞内領域を発現させた S2 細胞群では細胞塊を形成しなかったのに対し、Fas2 の細胞外領域を発現させた細胞群は細胞塊を形成した。このことから、Fas2 の細胞外領域が細胞間の接着を行なうのに十分であることが明らかになった。このことは、Fas2-YFP の後シナプス集積が細胞外相互作用によるものであるという遺伝学的、発生学的結果を強く支持するものである。

標的細胞内におけるカルシウム・神経支配依存性自家蛍光シグナルの解析 (風間北斗、市川彩子、高坂洋史、谷藤(森本)高子、能瀬聡直)

我々はショウジョウバエの神経-筋結合系において、筋肉細胞が自発的な自家蛍光の一過性の上昇を示すことを見いだした。この自家蛍光の変動は、発生過程の中でもシナプスが形成される時間帯で特に大きな振幅を示した。そのため自家蛍光の変動が、シナプス形成過程における細胞内の変化を反映していることが予想された。また、自家蛍光シグナルは細胞内で起こるカルシウムイオン濃度の一過性の上昇と同期するので、非侵襲性のカルシウムイメージングとして利用できる可能性を持つ。本年度は、自家蛍光シグナルとシナプス形成との関係を明らかにし、自家蛍光の起源と変動メカニズムを解明することを目的とし以下の実験を行った。神経軸索の伸長が遅れる prospero 変異体において自家蛍光の変動頻度が減少することから、神経支配が自家蛍光の変動に重要であることが昨年度までの研究により示唆されていた。そこで、神経支配のどのような要素が関与するのかをさらに明らかにするため、神経細胞伝達物質放出に欠損をもつ 2 種類の変異体、Syntaxin 欠失体、Synaptobrevin 欠失体に対して頻度の解析を行った。Syntaxin 欠失体は、evoked(神経細胞の発火に伴う神経伝達物質放出)および spontaneous(神経の発火とは関係なく恒常的に低いレベルで起こる神経伝達物質放出)両方を欠損するのに対し、Synaptobrevin 欠失体は evoked のみを欠失している。解析の結果、Syntaxin 欠失体のみで自家蛍光の変動頻度が減少するという予備的結果が得られている。この結果は、spontaneous な神経伝達物質放出の関与を示唆するものであり、現在この可能性をさらに検討している。細胞内の自家蛍光は、ミトコンドリアに局在するフラビンたんぱく質の酸化還元反応に起因することが報告されている。そこでまず、抗体染色法によりミトコンドリアの分布を調べたところ、筋肉細胞中央部に、周辺部より多くのミトコンドリアが存在していた。また、ミトコンドリアの酸化活性によって蛍光を生じるプローブである Mito-tracker Orange を用いた解析から、筋肉細胞中央部のミトコンドリア活性が高いことがわかった。自家蛍光は、この筋肉細胞中央部で大きく変動することから、ミトコンドリアの活性と自家蛍光の変動に相関があることが予想された。そこで、ミトコンドリアに局在し、その膜電位上昇に伴い拡散するマーカーである TMRE を

用いて、自家蛍光とミトコンドリア膜電位の同時イメージングを試みた。その結果、自家蛍光シグナルと、ミトコンドリアの膜電位上昇が同期することが明らかとなった。以上のことから、シナプス形成期に生じる自家蛍光の変動は、ミトコンドリアの活性の変化を反映していることが示唆された。シナプス形成に伴う後シナプス細胞内のミトコンドリア活性の上昇は、今まで報告のない新しい現象であるが、本研究では自家蛍光を用いて、それを可視化することに成功した。今後はシナプス形成とミトコンドリアの活性上昇の関係を更に詳細に解析する予定である。

シナプス形成過程における神経支配依存的な遺伝子発現解析 (吉見愛、能瀬聡直)

シナプス形成過程においては、神経細胞(シナプス前細胞)とその標的細胞(シナプス後細胞)とが綿密な相互作用を行なうことが重要であると示唆されている。このプロセスには、遺伝子発現の制御が伴うと考えられているが、どのような遺伝子が発現制御されているか、さらにそれがシナプス形成においてどのような役割を持っているかは、ほとんど明らかになっていない。そこで、我々は、ショウジョウバエの神経筋結合系を用いて、シナプス形成を誘導する遺伝子プログラムの解析を試みた。特に、神経細胞によって標的細胞(筋肉細胞)において発現誘導され、シナプス形成過程に直接関与するような遺伝子の同定を目的とした。このため、ショウジョウバエの全遺伝子の発現レベルが解析可能な DNA マイクロアレイを使用し、マイクロピペットで単離した筋肉細胞内での遺伝子発現量を測定した。この手法を用いて、神経支配が行なわれる前の筋肉、神経支配によりシナプスが形成された後の筋肉、さらに神経支配が起こらない突然変異体の筋肉での遺伝子発現量をそれぞれ比較した結果、神経支配により発現誘導されていると思われる遺伝子を 71 遺伝子、発現抑制されていると思われる遺伝子を 11 遺伝子同定することに成功した。これらは、神経支配に応じたシナプス形成に関与する遺伝子の候補であると考えられる。現在、これらの遺伝子について、突然変異体を用いた機能解析を行なうことにより、シナプス形成における役割を調べている。本研究は本学先端科学技術研究センター、油谷浩幸教授との共同研究である。

### 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。今年度は以下のような実験を進めた。

FRAP ( 蛍光消光回復法 ) を用いた幼虫シナプス部の分子動態解析 ( 東、三木 ( 4 年生特別実験 )、高坂洋史、能瀬聡直 )

成熟したシナプスは、安定した構造を保ちつつも、成長を続け、可塑性をも備えている。このシナプス構造のダイナミクスの理解には、成熟シナプス部での分子の可動性の解析が不可欠であると考えられる。近年の可視化技術の発展により、シナプス部のタンパク質が動的であることが明らかになってきた。そこで、ショウジョウバエ幼虫の神経筋結合での分子動態解析の可能性を検討するために、FRAP ( 蛍光消光回復法 ) を用いた測定を行なった。まず蛍光タンパク質 GFP と後シナプス部に局在することが知られている足場タンパク質 Dlg との融合タンパク質 ( Dlg-GFP ) を筋肉細胞に発現させた。そして麻酔によってこの三齢幼虫の蠕動運動を一時的に停止させ、共焦点顕微鏡を用いて生きた個体内でシナプス部の Dlg-GFP の可視化を行った。このシナプス部の Dlg-GFP に対して、前述の FRAP 解析を行なった。高強度レーザーによってシナプス部の Dlg-GFP を消光した後、経時的測定を行なったところシナプス部への蛍光の回復が観察された。このことから、適切な麻酔条件と消光条件の下で、ショウジョウバエ神経筋成熟シナプスでの分子動態の解析が可能であることが明らかになった。この方法と遺伝学的手法と組み合わせることにより、成熟シナプスにおける様々な分子の可動性を詳細に解析できるものと考えられる。

#### 7.2.4 その他

9 8 年度の本研究室の発足以来、助手として研究を推進してきた森本 ( 谷藤 ) 高子が、東京薬科大学に助教授として転出し、本年度より高坂洋史が助手に就任した。

今年度の研究は以下の科学研究費補助金によって支援された。ここに記し、謝意を表す。・特定領域研究「分子脳科学」、計画研究「特異的シナプス形成過程に関与する分子の同定と動態観察」( 研究代表者：能瀬聡直 )・基盤研究 ( B )「神経結合の特異性はどのように決まるのか? 単一細胞ジーンチップによるアプローチ」( 研究代表者：能瀬聡直 )

< 報文 >

( 原著論文 )

- [1] Nakayama, H., Kazama, H., Nose, A. and Morimoto-Tanifuji, T. Activity-dependent regulation of synaptic size in *Drosophila* neuromuscular junctions. *J. Neurobiol.* 66, 929-939 (2006).
- [2] Kazama, H., Nose, A. and Morimoto-Tanifuji, T. Synaptic components necessary for retrograde signaling triggered by calcium/calmodulin-dependent protein kinase II during synaptogenesis. *Neuroscience* 145, 1007-15 (2007).

( 国内雑誌 )

[3] 能瀬聡直：神経・筋シナプス形成機構の新展開 臨床麻酔 30, 1811-1818 (2006).

[4] 能瀬聡直：神経が結合相手を決める際の目印 'capricious' ( シリーズ：私が名付けた遺伝子 )、実験医学 24, 2545-2547 (2006).

( 学位論文 )

[5] 吉見愛：シナプス誘導に関わる遺伝子発現プログラムの解析 ( 修士論文 )

< 学術講演 >

( 国際会議 )

一般講演

[6] Inaki, M, Suzuki Y., Aburatani H. and Nose A.: Genome-wide search for the neuromuscular target recognition molecules in *Drosophila* using single cell expression analysis. CDB Symposium 2006.4.10-12, Kobe.

[7] Kohsaka, H., Takasu E. and Nose, A.: Early events of synaptogenesis imaged in vivo: trans-synaptic signaling mediated by Fasciclin2 recruits the synaptic scaffolding protein Dlg to the nascent synaptic sites. CDB Symposium 2006.4.10-12, Kobe.

[8] Inaki, M, Aburatani H. and Nose A.: Single-cell microarray identified Wnt4 as a local repulsive cue that determines target specificity. Cold Spring Harbor Meeting on " Axon Guidance, Synaptogenesis and Neural Plasticity " 2006.9.13-17, Cold Spring Harbor.

[9] Kohsaka, H., Takasu E. and Nose, A.: Distinct localization of cell adhesion molecules for the target recognition and synapse formation in early phase of synaptogenesis in vivo. Cold Spring Harbor Meeting on " Axon Guidance, Synaptogenesis and Neural Plasticity " 2006.9.13-17, Cold Spring Harbor

[10] Inaki, M, Aburatani H. and Nose A.: Expression profiling of synaptic specificity: target selection by Wnt4-mediated repulsion. 36th Annual Meeting of the Society for Neuroscience, 2006.10.14-18, Atlanta.

招待講演

[11] Kohsaka, H., Takasu E. and Nose, A.: Dynamism and regulation of synaptic assembly at the neuromuscular junction in *Drosophila*. 5th East Asian Biophysics Symposium and 44th annual meeting of the Biophysical Society of Japan. 2006.11.12-16, Okinawa.

( 国内会議 )

一般講演

- [12] 高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直: Initial molecular steps in synaptogenesis in vivo: trans-synaptic interaction of cell adhesion molecule is involved in postsynaptic assembly of PSD95-homolog Dlg. 第29回日本神経科学大会、京都、2006.7.19-21.
- [13] 谷藤(森本)高子、小松明、能瀬聡直: Subunit-specific and homeostatic regulation of GluR localization by CaMKII in *Drosophila* Neuromuscular Junction. 第29回日本神経科学大会、京都、2006.7.19-21.
- [14] 稲木美紀子、鈴木良枝、油谷浩幸、能瀬聡直: Genome-wide search for the neuromuscular target recognition molecules in *Drosophila* using single cell expression analysis. 第29回日本神経科学大会、京都、2006.7.19-21.
- [15] 吉見愛、油谷浩幸、能瀬聡直: シナプス形成過程における神経活動依存的な遺伝子発現解析. 日本分子生物学会2006フォーラム、名古屋、2006.12.6-8.

## (セミナー)

- [16] 能瀬聡直: 特異的シナプス形成に関わる分子. 特定領域研究「分子脳科学」、タンパク3000「脳神経系」合同セミナー、阪大・蛋白研、2006.5.27.
- [17] 能瀬聡直: シナプス構築の生体内観察: 特異性と分子集積. 第25回神経組織培養研究会、東京医科歯科大、2006.9.9
- [18] 能瀬聡直: シナプス形成の生体内観察: 特異性と分子集積. 東京大学大学院理学系研究科・生物科学専攻、動物科学特論、2006.9.27

## 8 技術部門

2. 測定器(ノギス、マイクロメーター等)の使い方
3. ケガキ、ポンチ、タツプ、ダイス、の使い方
4. 材質別による刃物の選定及び使用方法
5. 旋盤、フライス盤、ボール盤、シャーリング(切断機)の使用方法

### 8.1 技術部門

( 櫻村、大塚、佐伯、藤代、山本、\*南城 )

\* 技術補佐員

昨年度と同様、実験装置試作室業務、安全衛生・薬品管理業務、IT 関連業務、学生実験、学生実習の業務を行っている。当教室の技術部門担当の教員と技術職員とで月に 1 度の物理技術室ミーティングを行っている。

#### 8.1.1 実験装置試作室(大塚、†今西、南城)

† 地惑専攻所属

平成 18 年度より、物理・地惑両専攻による試作室の共同運用が始まった。

##### 利用状況

2006 年 4 月から 2007 年 3 月までの、実験装置試作室の主な利用状況は以下のとおりである。

- 内部(物理、地惑)製作件数(145 件)
- 設計及び部品等の問い合わせ(42 件)
- 外注発注(11 件)
- 他教室等からの作業依頼及び問い合わせ(11 件)  
(素粒子セ、生物科学、五月祭)

##### 工作実習

物理学教室及び地球惑星科学所属の大学院修士 1 年生を対象として、6 月 5 日から 7 月 5 日まで下記の内容で工作講習会を行なった。

- 参加人員：37 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

#### 8.1.2 安全衛生・薬品管理(佐伯、山本)

##### 安全管理(佐伯、山本)

- 安全衛生および薬品の管理(佐伯、山本)
- 産業医の巡視の同行(佐伯)
- 理学系研究科・理学部環境安全管理室会議へのオブザーバー参加(佐伯)

##### 薬品管理(山本)

- 実験廃棄物簡易分析 131 件
- 実験廃棄物処理 111 件
- 水銀廃棄物処理・回収 6 月、11 月
- 廃棄試薬処理依頼 14 件
- 不明試薬分析・処理依頼 6 件
- PCB 分析依頼 2 件
- 労働安全衛生法指定化学物質使用量調査 4 月、7 月、10 月、翌 1 月
- PRTR 法指定化学物質調査 4 月
- 毒物・劇物・特定毒物調査 翌 3 月
- 物理学専攻の処理可能不明廃棄物調査(環境安全研究センターによる調査) 翌 1 月、2 月
- 薬品管理システム(UTCRIIS)による物理学専攻における研究室の試薬や高圧ガスの一括管理 16 研究室
- 薬品関係の問合せ 65 件

##### 高圧ガス管理(山本)

- 高圧ガス貯蔵量削減対策 WG(高圧ガス WG) 10 月、11 月、12 月、翌 3 月
- 高圧ガス貯蔵削減対策意見交換会 翌 3 月
- 理学部環境安全管理室会議高圧ガス WG 経過報告(オブザーバー参加) 12 月、翌 3 月
- 不要ボンベ廃棄処理見積り現地調査 翌 1 月

- 理学部 1 号館高圧ガス貯蔵立ち入り調査 12 月
- 理学部 3 号館高圧ガス貯蔵立ち入り調査 翌 2 月
- 理学部 1 号館ボンベ庫立ち入り調査 12 月、翌 2 月
- 不要ボンベ廃棄処理・返却 6 本
- 高圧ガス関係の問合せ 32 件

#### 実験機器管理 (山本)

- X 線回折装置 3 台の定期点検 (漏洩放射線測定) 6 月、10 月、翌 3 月
- 色素レーザーの廃棄 (粗大ゴミとして廃棄) 7 台

#### クレーンと玉掛けの特別教育 (大塚、佐伯)



図 8.1.1: 8 月に開かれたクレーン講習の実習風景

8 月 9 日に下記の内容でクレーンと玉がけの特別教育を企画した。

参加人員：クレーン (32 名) 玉掛け (33 名)  
 講師：株式会社キトー 春日昭夫・吉野誠  
 講習内容：

- 講義
  - － クレーンに関する知識
  - － クレーンの取扱い
  - － クレーンの玉掛けの方法
  - － 関係法令
- 実技
  - － クレーンの操作

#### 8.1.3 IT 関連業務 (藤代)

- 専攻内各サーバ運用
- 専攻内ネットワークシステムの運用 (各研究室及び理学部ネットワーク室)
- 学務システム運用
- 物理学教室 web ページの刷新
- テレビ会議システムの運用と管理
- ソフトウェアのライセンス管理

#### 8.1.4 学生実験 (榎村、佐伯、藤代、山本)

- 物理学実験 II (佐伯)  
3 年生冬学期の物理学実験 II の生物物理学を指導した。
- 物理学実験 I (藤代)  
3 年生夏学期の物理学実験 I の計算機の技術指導をした。
- 物理学実験 I (佐伯)  
3 年生夏学期の物理学実験 I のエレクトロニクス I の技術指導をした。
- 学生実験 (山本)  
3 年生夏学期の物理学実験 I の X 線回折の技術指導をした。
- 学生実験 II (山本)  
3 年生冬学期の物理学実験 II のマイクロ波分光の技術指導をした。
- 3 年生実験 (物理学実験 I、II) のテーマの振り分け (榎村)
- 4 年生の研究室 (特別実験と理論演習) の振り分け (榎村)

#### 8.1.5 学生実習 (佐伯)

##### 2006 年度物理学教室生物物理学実習

当教室の大学院生を対象として、4 月 17 日から 8 月 31 日まで下記の内容で生物物理学実習を行った。

- 参加人員：3 名
- 実習内容
  1. 基本操作 (ピペットマンの使い方、試薬の調製等)
  2. 蛋白質 (蛋白質の定量、蛋白質の電気泳動)
  3. 遺伝子 (実験の準備、コンピテントセルの作製、形質転換、プラスミドの調製、プラスミドの濃度測定と制限酵素による切断、電気泳動)

## II

# Summary of group activities in 2006



## 1 Theoretical Nuclear Physics Group

**Subjects:** Structure and reactions of unstable nuclei, Monte Carlo Shell Model, Molecular Orbit Method, Mean Field Calculations, Quantum Chaos  
Quark-Gluon Plasma, Lattice QCD simulations, Structure of Hadrons, Color superconductivity  
Relativistic Heavy Ion Collisions, Relativistic Hydrodynamics, Color Glass Condensate

**Member:** Takaharu Otsuka, Tetsuo Hatsuda, Tetsufumi Hirano, Noritaka Shimizu and Shoichi Sasaki

In the nuclear theory group, a wide variety of subjects are studied. The subjects are divided into three major categories: Nuclear Structure Physics, quantum hadron physics and high energy hadron physics.

### Nuclear Structure Physics

In Nuclear Structure group (T. Otsuka, N. Shimizu and N. Itagaki (till June 2006) ), nuclear structure physics is studied theoretically in terms of the quantum many-body problem. The major subjects are the model of the nuclear force, structure of unstable exotic nuclei, shell model calculations including Monte Carlo Shell Model, cluster model and quantum chaos.

In particular, we studied extensively the tensor force effects in the nuclear force from the viewpoints of the shell model and the mean-field calculation, indicating robust and characteristic effects on the shell evolution [1, ?].

The nuclear structure of various nuclei are studied using the nuclear shell model [3]. Through the shell-model calculation and Monte Carlo Shell Model, we achieved many collaboration with experimental groups [4, 5] and the contribution in astrophysics [6].

In the relativistic mean field (RMF) model, we constructed a new Lagrangian consisting of one-meson exchange terms and point coupling terms [7].

### Quantum Hadron Physics

In Quantum Hadron Physics group (T. Hatsuda and S. Sasaki), many-body problems of quarks and gluons are studied theoretically on the basis of the quantum chromodynamics (QCD).

Main research interests are the quark-gluon structure of hadrons, lattice gauge theories and simulations, matter under extreme conditions, quark-gluon plasma in relativistic heavy-ion collisions, high density matter, neutron stars and quark stars, chiral symmetry in nuclei, 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 [8]
  - 1.2 Color superconductivity in quark matter [10]
  - 1.3 Hadrons in quark-gluon plasma [9]
2. QCD structure of hadrons
  - 2.1 Lattice QCD study of bound state signature [11]
  - 2.2 Lattice QCD studies of hadronic interaction and decay [12, 13]
3. Cold atomic gas
  - 3.1 BEC-BCS crossover in the unitary regime [14]

## High Energy Hadron Physics

In High Energy Hadron Physics group (T. Hirano), the physics of the quark-gluon plasma and dynamics of relativistic heavy ion collisions are studied theoretically based on relativistic hydrodynamics and relativistic kinetic theories. Main subjects include (1) hydrodynamic description of the space-time evolution of the quark-gluon plasma, (2) transport description of hadrons and their dissipation (3) analyses of the quark-gluon plasma through hard probes such as jets and heavy quarkonia, and (4) color glass condensate for high energy colliding hadrons/nuclei.

## References

- [1] T. Otsuka, T. Matsuo, and D. Abe, "Mean Field with Tensor Force and Shell Structure of Exotic Nuclei" *Phys. Rev. Lett.* **97**, 162501 (2006)
- [2] A. Brown, T. Duguet, T. Otsuka, D. Abe, and T. Suzuki, "Tensor interaction contributions to single-particle energies" *Phys. Rev. C* **74**, 061303 (2006)
- [3] M. Horoi, B. A. Brown, T. Otsuka, M. Honma, and T. Mizusaki, "Shell model analysis of the  $^{56}\text{Ni}$  spectrum in the full pf model space" *Phys. Rev. C* **73**, 061305(R) (2006)
- [4] A. Gade, B. A. Brown, D. Bazin, C. M. Campbell, J. A. Church, D. C. Dinca, J. Enders, T. Glasmacher, M. Horoi, Z. Hu, K. W. Kemper, W. F. Mueller, T. Otsuka, L. A. Riley, B. T. Roeder, T. Suzuki, J. R. Terry, K. L. Yurkewicz, and H. Zwahlen, "Evolution of the  $E(1/2_1^+) - E(3/2_1^+)$  energy spacing in odd-mass K, Cl, and P isotopes for N=20-28" *Phys. Rev. C* **74**, 034322 (2006)
- [5] L. Gaudefroy *et al.*, "Reduction of the Spin-Orbit Splittings at the N=28 Shell Closure" *Phys. Rev. Lett.* **97**, 092501 (2006)
- [6] T. Suzuki, S. Chiba, T. Yoshida, T. Kajino and T. Otsuka, " Neutrino-nucleus reactions based on new shell model Hamiltonians " *Phys. Rev. C* **74**, 034307 (2006).
- [7] S. Hirose, M. Serra, P. Ring, T. Otsuka and Y. Akaishi, "Relativistic mean field model based on realistic nuclear forces" *Phys. Rev. C* **75**, 024301 (2007)
- [8] Y. Maezawa, N. Ukita, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii and K. Kanaya (WHOT-QCD Collaboration), "Heavy-Quark Free Energy, Debye Mass, and Spatial String Tension at Finite Temperature in Two Flavor Lattice QCD with Wilson Quark Action," *Phys. Rev. D* **75**, 074501 (2007).
- [9] H. Iida, T. Doi, N. Ishii, H. Suganuma and K. Tsumura, "Charmonium properties in deconfinement phase in anisotropic lattice QCD," *Phys. Rev. D* **74**, 074502 (2006).
- [10] T. Hatsuda, M. Tachibana, N. Yamamoto and G. Baym, "New critical point induced by the axial anomaly in dense QCD," *Phys. Rev. Lett.* **97**, 122001 (2006).
- [11] S. Sasaki and T. Yamazaki, "Signatures of S-wave bound-state formation in finite volume," *Phys. Rev. D* **74**, 114507 (2006).
- [12] C. Dawson, T. Izubuchi, T. Kaneko, S. Sasaki and A. Soni, "Vector form factor in  $K(13)$  semileptonic decay with two flavors of dynamical domain-wall quarks," *Phys. Rev. D* **74**, 114502 (2006).
- [13] K. Yokokawa, S. Sasaki, T. Hatsuda and A. Hayashigaki, "First lattice study of low-energy charmonium-hadron interaction," *Phys. Rev. D* **74**, 034504 (2006).
- [14] Y. Nishida and D. T. Son, "An epsilon expansion for Fermi gas at infinite scattering length," *Phys. Rev. Lett.* **97**, 050403 (2006)

## 2 Theoretical Particle and High Energy Physics Group

**Research Subjects:** The Unification of Elementary Particles & Fundamental Interactions

**Member:** Tohru Eguchi, Tsutomu Yanagida, Yutaka Matsuo, Koichi Hamaguchi  
Yuji Sugawara, Yosuke Imamura, Teruhiko Kawano, Taizan Watari

The main research interests at our group are in string theory, quantum field theory and unification theories. String theory, supersymmetric field theories, and conformal field theories are analyzed relating to the fundamental problems of interactions. In the field of high energy phenomenology, supersymmetric unified theories are extensively studied and cosmological problems are also investigated.

We list the main subjects of our researches below.

1. Superstring Theory.
  - 1.1 2-dimensional conformal field theories [2, 19, 29, 30]
  - 1.2 Quantum gravity and matrix models [3, 32]
  - 1.3 Theory of membranes [1, 18]
2. Gauge theories and gauge/string duality
  - 2.1 Superconformal field theories and AdS/CFT [17, 20, 27, 28, 31, 33]
  - 2.2 Spin chains and classical strings [9, 22, 23, 24, 25, 26]
  - 2.3 Brane realization of gauge theories [14, 15, 16]
3. High Energy Phenomenology.
  - 3.1 Phenomenology of beyond the standard models [8, 13, 21]
  - 3.2 Particle cosmology [4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 34, 35, 36, 37, 38]

## References

- [1] Y. Aisaka and Y. Kazama, “Towards pure spinor type covariant description of supermembrane: An approach from the double spinor formalism,” *JHEP* **0605** (2006) 041.
- [2] T. Eguchi, Y. Sugawara and A. Taormina, “Liouville field, modular forms and elliptic genera,” *JHEP* **0703**, 119 (2007)
- [3] Y. Hatsuda and Y. Matsuo, “Symmetry and integrability of non-singlet sectors in matrix quantum mechanics,” *J. Phys. A* **40**, 1633 (2007).
- [4] W. Buchmuller, K. Hamaguchi, M. Ibe and T. T. Yanagida, “Eluding the BBN constraints on the stable gravitino,” *Phys. Lett. B* **643** (2006) 124.
- [5] W. Buchmuller, L. Covi, K. Hamaguchi, A. Ibarra and T. Yanagida, “Gravitino dark matter in R-parity breaking vacua,” *JHEP* **0703** (2007) 037.
- [6] M. Endo, K. Hamaguchi and F. Takahashi, “Moduli-induced gravitino problem,” *Phys. Rev. Lett.* **96** (2006) 211301.
- [7] M. Endo, K. Hamaguchi and F. Takahashi, “Moduli / inflaton mixing with supersymmetry breaking field,” *Phys. Rev. D* **74** (2006) 023531
- [8] K. Hamaguchi, M. M. Nojiri and A. de Roeck, “Prospects to study a long-lived charged next lightest supersymmetric particle at the LHC,” *JHEP* **0703** (2007) 046.
- [9] Y. Hatsuda and K. Okamura, “Emergent classical strings from matrix model,” *JHEP* **0703**, 077 (2007)
- [10] M. Ibe, Y. Shinbara, T.T. Yanagida, “A New Inflation Model with Anomaly-mediated Supersymmetry Breaking,” *Phys.Lett.B642:165-170,2006*.
- [11] M. Ibe, Y. Shinbara and T. T. Yanagida, “The Polonyi problem and upper bound on inflation scale in supergravity,” *Phys. Lett. B* **639**, 534 (2006)
- [12] M. Ibe, Y. Shinbara and T. T. Yanagida, “A new inflation model with anomaly-mediated supersymmetry breaking,” *Phys. Lett. B* **642**, 165 (2006)
- [13] M. Ibe, T. Moroi, T.T. Yanagida, “Possible Signals of Wino LSP at the Large Hadron Collider,” *Phys.Lett.B644:355-360,2007*.
- [14] Y. Imamura, H. Isono, K. Kimura, M. Yamazaki, “Exactly marginal deformations of quiver gauge theories as seen from brane tilings”, to appear in *Prog. Theor. Phys.*, hep-th/0702049

- [15] Y. Imamura, “Global symmetries and ’t Hooft anomalies in brane tilings”, JHEP**12**(2006)041,
- [16] Y. Imamura, “Anomaly Cancellations in Brane Tilings”, JHEP**06**(2006)011,
- [17] F. Koyama and F. Yagi, “Quantum moduli space of the cascading  $Sp(p+M) \times Sp(p)$  gauge theory,” Prog. Theor. Phys. **117** (2007) 487-499.
- [18] P.-M. Ho and Y. Matsuo, “A toy model of open membrane field theory in constant 3-form flux,” arXiv:hep-th/0701130, General Relativity and Gravitation, to appear.
- [19] Y. Nakayama, S. J. Rey and Y. Sugawara, “Unitarity meets channel-duality for rolling / decaying D-branes,” JHEP **0608**, 014 (2006)
- [20] Y. Nakayama, “Index for supergravity on  $AdS(5) \times T^{**}(1,1)$  and conifold gauge theory,” Nucl. Phys. B **755**, 295 (2006)
- [21] H. Nakajima and Y. Shinbara, “Solutions to large B and L breaking in the Randall-Sundrum model”, Phys. Lett. **B648** (2007) 294.
- [22] K. Okamura and K. Yoshida, “Higher loop Bethe ansatz for open spin-chains in AdS/CFT,” JHEP **0609**, 081 (2006)
- [23] H. Y. Chen, N. Dorey and K. Okamura, “Dyonic giant magnons,” JHEP **0609**, 024 (2006)
- [24] H. Y. Chen, N. Dorey and K. Okamura, “On the scattering of magnon boundstates,” JHEP **0611**, 035 (2006)
- [25] K. Okamura and R. Suzuki, “A perspective on classical strings from complex sine-Gordon solitons,” Phys. Rev. D **75**, 046001 (2007)
- [26] H. Y. Chen, N. Dorey and K. Okamura, “The asymptotic spectrum of the  $\mathcal{N} = 4$  super Yang-Mills spin chain,” JHEP **0703**, 005 (2007)
- [27] J. Raeymaekers and K.P. Yogendran, “Supersymmetric D-branes in the D1-D5 background,” J. High Energy Phys. JHEP12(2006)022.
- [28] J. Raeymaekers, “Open string attractors,” J. High Energy Phys. JHEP04(2007)075.
- [29] Y. Sugawara, “Aspects of infalling D-branes in two-dimensional black hole,” Mod. Phys. Lett. A **22**, 83 (2007).
- [30] T.-S. Tai, “Winding String Dynamics in a Time-Dependent Beta Deformed Background,” Prog. Theor. Phys. **116** (2006) 965-974.
- [31] T.-S. Tai and S. Yamaguchi, “Correlator of Fundamental and Anti-symmetric Wilson loops in AdS/CFT Correspondence,” JHEP **0702** 035, (2007).
- [32] T.-S. Tai, “Classical  $c=1$  Tachyon Scattering and  $1/2$  BPS Correlators,” Prog. Theor. Phys. **117** (2007) 795-801.
- [33] S. Benvenuti, L. A. Pando Zayas and Y. Tachikawa, “Triangle anomalies from Einstein manifolds,” Adv. Theor. Math. Phys. **10** (2006) 395
- [34] M. Endo, K. Kadota, K. A. Olive, F. Takahashi, T.T. Yanagida, “The Decay of the Inflaton in No-scale Supergravity,” JCAP 0702:018,2007.
- [35] M. Endo, F. Takahashi, T.T. Yanagida, “Spontaneous Non-thermal Leptogenesis in High-scale Inflation Models,” Phys.Rev.D74:123523,2006.
- [36] M. Endo, M. Kawasaki, F. Takahashi, T.T. Yanagida, “Inflaton decay through supergravity effects,” Phys.Lett.B642:518-524,2006.
- [37] M. Kawasaki, F. Takahashi, T.T. Yanagida, “The Gravitino-overproduction problem in inflationary universe,” Phys.Rev.D74:043519,2006.
- [38] M. Kawasaki, F. Takahashi, T.T. Yanagida, “Gravitino overproduction in inflaton decay.” Phys.Lett.B638:8,2006.

### 3 Sakai (Hideyuki) Group

**Research Subjects:** Experimental Nuclear Physics

**Member:** Hideyuki Sakai, Kentaro Yako

We are aiming to explore nuclear structure as well as nuclear reaction mechanisms by using an intermediate energy beam from accelerators. Particular emphasis is placed on the study of the spin degrees of freedom in nuclei. Our expertise is various “spin-polarizations”: spin-polarized beams ( $\vec{p}$ ,  $\vec{n}$  and  $\vec{d}$ ), spin-polarized targets ( $\vec{p}$  and  $^3\vec{\text{He}}$ ), and spin-polarization analysis of reaction products ( $\vec{p}$ ,  $\vec{n}$  and  $\vec{d}$ ).

Major activities during the year are summarized below.

### ICHOR project: Isospin-spin responses in CHarge-exchange exOthermic Reactions

#### —SHARAQ spectrometer

Spin-isospin response of nucleus is a unique excitation mode since it is related with mesons in nuclei and consequently it provides valuable information on nuclear forces. So far the research has been performed by using endothermic reactions by a stable beam such as  $(p, n)$  or  $(n, p)$ , which is inevitably accompanied by a finite momentum transfer to nucleus. Such reactions hamper the study of spin-isospin responses in highly excited regions. We will try to overcome this difficulty by using exothermic reactions by an unstable beam such as  $(^{12}\text{N}, ^{12}\text{C})$  or  $(^{12}\text{B}, ^{12}\text{C})$ . With this new experimental means, we pursue the study of spin-isospin responses in the highly excited region. Aiming to identify new spin excitation modes, we are constructing a high energy resolution spectrometer SHARAQ dedicated to the exothermic reactions by unstable beams. SHARAQ will be completed in 2007.

#### —Intermediate states involved in nuclear double beta decay

The double  $\beta$  decay of nuclei is the rarest process confirmed so far in nature. It is a second-order weak process, described by successive virtual Gamow-Teller transitions from the mother nucleus to the intermediate nucleus, and then from the intermediate to the daughter nucleus, emitting two neutrinos. Our aim is to obtain the GT strength distribution experimentally up to 50 MeV excitation energy by using the most reliable reaction probe, i.e., the  $(p, n)$  and  $(n, p)$  reactions. The GT strength distributions give information through which intermediate states the decay occurs. The  $^{116}\text{Cd}(p, n)$  and  $^{116}\text{Sn}(n, p)$  measurements at 300 MeV were performed Research Center for Nuclear Physics, Osaka University. It has been found that for the decay of  $^{116}\text{Cd}$ , the ground state of the intermediate  $^{116}\text{In}$  has the most important contribution to the decay matrix element.

#### Spin correlation in entangled two-nucleon system

In 1935, Einstein, Podolsky and Rosen presented a paradox to quantum correlations and concluded that the quantum mechanical description of nature is incomplete. So-called hidden variables are introduced in the classical approach to describe the correlation. The Bell’s inequality, discovered in 1964, shows that correlation produced by the hidden variables is weaker than that predicted by quantum mechanics. Although there are many experimental tests of quantum mechanical correlations by using entangled photon pairs, there are almost no severe tests in hadronic systems. Completed the study of the spin correlation between the two-proton system, we tested the quantum mechanical correlation in the proton-neutron system by measuring the spin correlation between the proton-neutron pair in  $[^1\text{S}_0]$  produced by the  $^1\text{H}(d, pn)$  reaction. The measurement was performed by using the magnetic spectrograph SMART at the RIKEN accelerator research facility, employing two polarimeters EPOL and SMART-NPOL. The two polarization measurements were performed in the space-like region from each other. It is shown that the spin correlation survives even if the proton-neutron pair is separated by several meters, which is  $10^{15}$  times larger than the range of nuclear force.

## 4 Hayano Group

**Research Subjects:** Study of fundamental symmetries using exotic nuclei and exotic atoms.

**Member:** Ryugo S. Hayano (Takashi Ishikawa)<sup>1</sup>

‘Exotic nuclei’ and ‘Exotic atoms’ are the keywords of Hayano group. We use antihydrogen atoms (antiproton + positron), antiprotonic helium atoms (helium nucleus + antiproton + electron), antiprotonic helium ions (helium nucleus + antiproton) to study matter–antimatter symmetry (CPT), the most fundamental symmetry of nature. We also study deeply bound states of mesons ( $\pi^-$ ,  $K^-$ , and  $\eta$ ) and nuclei to investigate the origin of proton mass, through the partial restoration of chiral symmetry in the nuclear medium.

### Antihydrogen and antiprotonic helium atoms – precision study of the CPT symmetry at CERN’s antiproton decelerator (AD)

- Antiprotonic helium:

We used a new pulse-amplified CW laser with an integrated absolute frequency calibration utilizing an optical frequency comb to precisely measure transition frequencies of antiprotonic helium 3 and helium 4 atoms. In 2006, we published the value for antiproton-to-electron mass ratio to be  $1836.152\,674 \pm 0.000\,005$ , which is almost as precise as the present proton-to-electron mass ratio. Our result was recently incorporated to the CODATA 2006 adjustment of fundamental constants; by including our result in the fit (assuming the CPT symmetry), the precision of proton-to-electron mass ratio has been improved from  $1836.152\,672\,61(85)$  (CODATA 2002) to  $1836.152\,672\,47(80)$  (CODATA 2006).

- Antihydrogen:

Microwave (ground-state hyperfine splitting) and laser ( $1s - 2s$ ) spectroscopic studies of antihydrogen are promising tools to test the CPT symmetry to the highest-possible precision. For the ground-state hyperfine splitting spectroscopy, a new antihydrogen source using a superconducting two-frequency radio-frequency trap, is being developed. For the  $1s - 2s$  laser spectroscopy, a neutral-atom trap based on superconducting octupole coils has been constructed, and has been commissioned at CERN during 2006.

### Exotic-atom spectroscopy – the origin of the proton mass

- $\eta$ -nucleus bound state:

We have already established that the  $1s$  binding energy of pionic atoms, produced by the  $\text{Sn}(d, {}^3\text{He})$  reaction, can be used to quantitatively determine the degree of partial chiral symmetry restoration in nuclear media. We have now extended this method to study  $\eta$ -nucleus bound states. As the first step of the data analysis, we have recently deduced the elementary cross section  $p(d, {}^3\text{He})\eta$  using the data taken in 2005 at GSI, Darmstadt, Germany.

- Precision spectroscopy of kaonic-helium  $3d \rightarrow 2p$  X-rays:

If the kaon-nucleus potential is as deep as predicted by Akaishi and Yamazaki, a large strong-interaction shift of some 10 eV is expected for the  $3d \rightarrow 2p$  X-rays of kaonic helium atoms. Theories which do not accommodate the deeply-bound states predict very small shift of  $< 0.1$  eV. We therefore carried out an experiment at KEK (E570) to measure the kaonic-helium Balmer X-rays (6.4 keV) using silicon-drift X-ray detectors. The goal is to achieve a precision of 2 eV. We are now approaching the final stage of the data analysis, and the final result will be published soon.

---

<sup>1</sup>On medical leave.

## 5 Ozawa Group

**Research Subjects:** Experimental study of non-perturbative QCD

**Member:** Kyoichiro Ozawa

We have three research activities.

- Study of quark-gluon-plasma and hadronic matter under high-temperature and high density condition at Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at Brookhaven National Laboratory
- Study of mechanism of hadronic mass generation at KEK and J-PARC
- R&D of new detector for future J-PARC experiment

### Study of quark-gluon-plasma at RHIC

In 6 years operation of Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at Brookhaven National Laboratory (BNL), many new phenomena related to hot and dense nuclear matter have been discovered. We performed the PHENIX experiment at RHIC and produced many new results on a wide range of physics subjects, including charged and neutral hadron production, single electron production, event isotropy, and many other topics.

In spite of these fruitful results, there are still remaining questions to be answered to further characterize the state of matter formed at RHIC. In particular, chiral properties of the dense matter produced has not been obtained, and should be provided. For the study of the chiral properties,  $\phi(1020)$  is an interesting meson because the restoration of approximate chiral symmetry at high temperature may modify its mass and width. These modifications can be shown directly in the line shape of the  $\phi \rightarrow e^+e^-$  peak. Here, the measurements with lepton decays are essential, since leptons are not interact with the medium and carry direct information about conditions and properties of the medium. To realize such measurements, baseline measurements in  $p + p$  collisions are important for comparison. In this year, we focused on the analysis of  $\phi \rightarrow e^+e^-$  in  $p + p$  collisions.

Figure 2.1.12 shows the  $e^+e^-$  invariant mass distribution. There are clear two peaks around the  $\omega$  mass and the  $\phi$  mass. The mass peak and width values agree with the values from the Particle Data Group and experimental mass resolution. We proved PHENIX detector has good mass resolution to detect the mass modification in Au+Au collisions.

### Study of mechanism of hadronic mass generation at J-PARC

Recently, the chiral property of QCD in hot ( $T \neq 0$ ) or dense ( $\rho \neq 0$ ) nuclear matter has attracted wide interest in the field of hadron physics. The dynamical breaking of chiral symmetry in the QCD vacuum induces an effective mass of quarks, known as constituent quark mass, which then determines the known mass of all the hadrons. In hot and/or dense matter, this broken symmetry is subject to be restored either partially or completely and, hence, the properties of hadrons can be modified. To observe such an effect, measurements of the in-medium decay of vector mesons are highly desirable for the direct determination of the meson properties in matter. We performed an experiment at KEK and are planning a new experiment at J-PARC to measure vector mesons at normal nuclear density.

As shown in Fig. 2.1.12, we observed an excess in the lower mass region of  $\phi$  meson peak. the excess is observed only the slowly moving component in larger nuclear target. The result is consistent with a view that limited number of mesons decay inside nucleus and have mass-modification by density effect.

### R&D of new detector for future J-PARC experiment

We have performed an R&D for future J-PARC experiment. The development of new detector based on Gas Electron Multiplier (GEM), which is originally developed at CERN. Using GEM, we are investigating photon detector for Cherenkov counter and 2 dimensional tracker for high rate counting. A prototype of the photon detector is constructed and tested at Hiroshima university.

## 6 Komamiya group

**Research Subjects:** (1) Preparation for an accelerator technology and an experiment for the International linear  $e^+e^-$  collider ILC; (2) Data analysis for the BES-II experiment at BEPC-I, and TOF detector construction for BES-III experiment at BEPC-II; (3) Detector development for studying gravitational quantum effects and searching for new medium range force using ultra-cold neutron beam; (4) Preparation for physics analyses in the ATLAS experiment at the LHC  $pp$  collider; (5) Data analyses for the OPAL experiment at the LEP  $e^+e^-$  collider; (6) Research on astroparticle physics with balloon-borne high resolution spectrometer (BESS experiment);

**Member:** Sachio Komamiya, Tomoyuki Sanuki

1) Preparation for the International  $e^+e^-$  Linear Collider ILC: ILC is the energy frontier machine for  $e^+e^-$  collisions in the near future. In 2004 August the main linac technology was internationally agreed to use superconducting accelerator structures, and hence the project has been accelerated as an international big-science project. We are working on ILC accelerator simulations and hardware development, especially on the beam delivery system. We have been studying possible physics scenario and the large detector concept (GLD) for an experiment at ILC.

2) BES-II/-III experiment at IHEP: The group has considered the BES-III experiment at the Beijing  $e^+e^-$  collider BEPC-II as the candidate for the middle term project before ILC. We are starting research and development for TOF detector for the BES-III experiment together with IHEP, USTC and KEK. We successfully completed a test of over 500 photomultipliers in 1[T] magnetic field. We have studied the data analysis of a search for CP violation using  $J\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  and other processes of baryon pair productions using BES-II data. In course of this analysis we are developing an efficient pattern recognition program for the charged particles in the BES-II drift chamber.

3) Detector development for studying gravitational quantum bound states and searching for new medium range force using ultra-cold neutron beam: A detector to measure gravitational bound states of ultra-cold neutrons (UCN) is under way. We decided to use CCD's for the position measurement of the UCN's. The CCD is going to be covered by a Li layer to convert neutron to charged nuclear fragments. The simulation studies on the quantum effects of UCN in a narrow slit with 100 [ $\mu$ ] height is also done.

4) ATLAS experiment at LHC: Some of our students started to work on the preparation for physics analysis at LHC. Search for supersymmetric particles and search for the effects of hidden extra-dimensions are being studied.

5) OPAL experiment at LEP: It is the experiment at the highest energy  $e^+e^-$  collider LEP of CERN. The data taking with the OPAL detector was completed in the end of 2000. Important physics subjects at LEP are (a) Higgs boson searches, (b) Supersymmetric particle searches and (c) W-boson physics. We have extensively searched for the Higgs boson at LEP. The Higgs boson was driven to a narrow mass range of 114-200 GeV. For supersymmetric particles searches the lower mass limit of the lightest neutralino, which is the most important candidate of the dark matter material, was set to be 38.0 GeV. The W boson mass was determined to be  $80.412 \pm 0.042$  GeV (statistical and systematic errors combined).

6) BESS experiment: The spectrum of cosmic muon, proton and Helium were measured at various hight. These information is important for the calculation of the neutrino flux at Superkamiokande, hence it is valuable for the atmospheric neutrino oscillation analyses. The data was taken at the heights starting from 37 km ( $4.5 \text{ g/cm}^2$ ) to 27 km ( $30 \text{ g/cm}^2$ ) for the duration of about 11 hours in the 2001 BESS flight. The kinetic energy spectrum was measured from 0.5 GeV to 10 GeV with an accuracy of 8% for proton, 10% for Helium, and 20% for muon. This information is used for optimizing the simulation program for atmospheric muons and neutrinos. In order to measure momentum of primary cosmic ray particles in the range of 100 GeV to 1 TeV, the tracking detector system was upgraded by installing a new Jet-chamber and a outer precision tracking detector. In the October 2002 flight in Canada, the primary high momentum cosmic ray flux was measured up to about 1 TeV range.

## 7 Minowa Group

**Research Subjects:** Experimental Particle Physics without Accelerators

**Member:** MINOWA, Makoto and INOUE, Yoshizumi

Various kinds of astro-/non-accelerator/low-energy particle physics experiments have been performed and are newly being planned in our research group.

We are running an experiment to search for axions, light neutral pseudoscalar particles yet to be discovered. Its existence is implied to solve the so-called strong CP problem. The axion would be produced in the solar core through the Primakoff effect. It can be converted back to an x-ray in a strong magnetic field in the laboratory by the inverse process. We search for such x-rays coming from the direction of the sun with the TOKYO AXION HELIOSCOPE. The axion helioscope consists of a cryogen-free 4 T superconducting magnet with an effective length of 2300 mm and PIN photodiodes as x-ray detectors. Previously, we put upper limits of  $g_{a\gamma\gamma} < (6.8 - 10.9) \times 10^{-10} \text{GeV}^{-1}$  to axion - photon coupling constant for the axion mass less than 0.27 eV.

The axion helioscope is presently under modification to implement the buffer-gas handling system to make it sensitive to axions with a mass as high as the hadronic axion window at around 1 eV. We have successfully tested an automatic buffer-gas pressure control system at the operating temperature. The helioscope will soon become ready for the new search deployment.

Another long-running project of our group is the direct experimental search for supersymmetric neutralino dark matter in an underground cell of the Kamioka Observatory. We employed a  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  scintillator aiming at a search for spin-dependently(SD) interacting neutralinos. Our results put a stringent limit to the SD cross section competitive to the world records on it. The search has been suspended for the improvement of the  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  scintillation detector in order to get still higher sensitivity for the possible feeble neutralino signals.

The third project is an R and D of a neutrino detector with a resonance ionization mass spectroscopy, RIMS. The neutrino detection is accomplished by a trace analysis of an exotic atomic element produced by charged current interaction of an electron neutrino or an anti-electron neutrino on a nucleus in the target material. This year, we introduced a variable wavelength blue LASER diode and examined the effectiveness of the method by trying to detect a small amount of potassium vapor. The next step is to find out a way to get a high detection efficiency.

We also started a new R and D of a compact antineutrino detector with plastic scintillator to be used at a nuclear reactor station, for the purpose of monitoring the power and plutonium content of the nuclear fuel. It can be used to monitor a reactor from outside of the reactor containment with no disruption of day-to-day operations at the reactor site. This unique capability may be of interest for the reactor safeguard program of the International Atomic Energy Agency(IAEA), as well as for the precision monitoring of the antineutrino flux in the close vicinity of a reactor in a short baseline neutrino oscillation experiment for the determination of the mixing angle  $\theta_{13}$ .

## 8 Aihara Group

**Research Subjects:** Study of CP-Violation and Search for Physics Beyond the Standard Model in the  $B$  Meson System (Belle), Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment (T2K), Dark Energy Survey at Subaru Telescope (Hyper Suprime-cam), and R&D for Hybrid Photodetectors and the ILC Silicon Detector Concept (SiD).

**Members:** H. Aihara, M. Iwasaki, and H. Kakuno

The main research activity of our group has been a study of CP-violation in the  $B$  meson system using the KEK  $B$ -factory (KEKB). This past year we presented a measurement of CP violating asymmetries in the neutral  $B$  meson decaying to the  $\rho\pi$  state using a time-dependent Dalitz plot analysis. It was based on

a 414/fb data sample containing 449M  $B\bar{B}$  pairs. Combining our analysis with information on charged  $B$  decay modes, we performed a full Dalitz and isospin analysis and obtained a constraint on the CKM angle  $\phi_2$ ,  $68 \text{ deg.} < \phi_2 < 95 \text{ deg.}$  at the 68.3% confidence interval for the  $\phi_2$  solution consistent with the standard model (SM). We have also been conducting the analysis of flavor changing neutral current processes such as  $B^0 \rightarrow K_S K_S$  and  $B \rightarrow X_S \ell^+ \ell^-$  to probe physics beyond the Standard Model.

We are working on the instrumentation of J-PARC beamline for T2K long baseline neutrino oscillation experiment. In particular, we have done R&D for the position and profile monitors for the primary proton beams. We have also developed beamline simulations. We have also successfully developed 13-inch hybrid photodetector combining a large-format phototube technology and avalanche diode as photo-electron multiplier.

We have started the five-year program to construct a 1.5 Giga pixel CCD camera (Hype Suprime-Cam) to be mounted on the prime focus of the Subaru telescope. With this wide-field camera, we plan to conduct extensive wide-field deep survey to investigate weak lensing. This data will be used to develop 3-D mass mapping of the universe. It, in turn, will be used to study Dark Energy.

SiD is a detector concept based on silicon tracking and a silicon-tungsten sampling calorimeter, complemented by a powerful pixel vertex detector, and outer hadronic calorimeter and muon system. Optimized forward detectors are deployed. In order to meet the ILC physics goals, we have designed the general purpose detector taking full advantage of the silicon technology. Our R&D program includes development of a silicon tracker and a 5Tesla superconducting solenoid.

1. K. F. Chen *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of time-dependent CP violation in  $B^0 \rightarrow \eta' K^0$  decays and improved measurements of CP asymmetries in  $B^0 \rightarrow \phi K^0, K_S^0 K_S^0 K_S^0$  and  $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$  decays," Phys. Rev. Lett. **98**, 031802 (2007) [arXiv:hep-ex/0608039].
2. H. Aihara *et al.*, "Belle SVD2 vertex detector," Nucl. Instrum. Meth. A **568**, 269 (2006).
3. H. Nakayama *et al.*, "Development of a 13-in. Hybrid Avalanche Photo-Detector (HAPD) for a next generation water Cherenkov detector," Nucl. Instrum. Meth. A **567**, 172 (2006).
4. A.Kusaka, Ph.D. thesis: Measurement of  $CP$ -Violating Asymmetries in the Neutral  $B$  Meson Decaying to the  $\rho\pi$  State Using a Time Dependent Dalitz Plot Analysis.
5. K.Yamada, Master's thesis: Research and Development of Segmented Secondary Emission Beam Monitors for J-PARC Neutrino Beamline.

## 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)   | (4) Statistical Mechanics of Bose–Einstein Condensation in Trap Potentials |
| (1) Ground State Properties of a Toroidally Trapped BEC   |  |
| (2) Free Expansion of a Bose-Einstein Condensate  | 2. Nonlinear Waves   |
| (3) Dynamics of a Wavefunction for the Attractive Nonlinear Schrödinger Equation under Isotropic Harmonic Confinement Potential | (1) Noncommutative Soliton   |
|   | (2) Cellular Automaton and Crystal Base                                    |
|   | (3) Lattice $W$ Algebra and Integrable Systems                             |
|   | (4) Quantum Soliton Equation and Baxter                                    |

Equation	6. Quantum Many-Body Problem
3. Non-Equilibrium Statistical Physics	(1) $\delta$ -function Bose gas
(1) Asymmetric Simple Exclusion Process	(2) Calogero–Sutherland Model
(2) Stability of the Non-Equilibrium Steady States	(3) Exclusion Statistics and Chiral Partition Function
(3) Minority Game	7. Quantum Computing and Quantum Information
4. Strongly Correlated Electron System	(1) Geometric Aspects of Quantum Search
(1) Thermodynamics in the Hubbard Model, $t$ - $J$ Model	(2) Multipartite entanglement and embeddings in algebraic geometry
(2) Integrable Boundary Condition	8. Random Matrix
5. Knot Theory and Low-Dimensional Topology	(1) Polynuclear Growth Model
(1) Hyperbolic Volume of Knot Complement	(2) Random Walk
(2) Quantum Gravity	

## 10 Aoki Group

**Subject:** Theoretical condensed-matter physics

**Members:** Hideo Aoki, Takashi Oka

Our main interests are many-body effects in electron systems, i.e., **superconductivity, magnetism and fractional quantum Hall effect**, for which we envisage a *materials design for correlated electron systems* should be possible. Specifically we study:

- Superconductivity in repulsively interacting electron systems
  - How to optimize  $T_C$  through the “fermiology” [1,2]; Effects of spin and charge fluctuations [3]
  - Superconductivity in multi-orbital systems [4]
  - Coexistence of electron-phonon and electron-electron interactions [5]
- Magnetism in repulsively interacting electron systems
  - Flat-band ferromagnetism in a designed organic polymer
- Carbon systems
  - Quantum Hall effect in graphene [6]
  - Loop current in carbon nanotubes [7]
  - Carbon nanoribbons
- Quantum Hall systems
  - Interaction and dimensionality in the quantum Hall system
  - Electron-molecule picture for quantum dots in magnetic fields [8]
- Electronic structure and correlation effects in hetero-interfaces
  - Interface states at metal/organic interfaces [9] and polar surfaces
- Electronic structure of periodic nanostructures
  - “Supercrystal” picture in alkali-metal-loaded zeolites
  - Electrons on periodic curved surfaces
- Non-equilibrium and nonlinear phenomena in correlated electron systems
  - Landau-Zener tunnelling in the breakdown of Mott’s insulator [10]
  - Correlated electrons in intense laser lights

- [1] Hideo Aoki: Superconductivity in highly correlated systems, in H. Akai, A. Hosaka, H. Toki and F. B. Malik (eds): *Condensed Matter Theories* Vol. 21 (Nova Science, 2007), Chapter 14.
- [2] H. Aoki: Fermiology and interaction in unconventional superconductors, *Physica C* **437-438**, 11 (2006).
- [3] S. Onari, R. Arita, K. Kuroki, H. Aoki: Superconductivity from long-range interaction — a crossover between the electron gas and the lattice model, *Phys. Rev. B* **73**, 014526 (2006).
- [4] S. Sakai, R. Arita, K. Held and H. Aoki: Quantum Monte Carlo study for multiorbital systems with preserved spin and orbital rotational symmetries, *Phys. Rev. B* **74**, 155102 (2006).
- [5] M. Tezuka, R. Arita and H. Aoki: Density-matrix renormalization group study of pairing when electron-electron and electron-phonon interactions coexist *Phys. Rev. Lett.* **95**, 226401 (2005); M. Tezuka: An improved initialization procedure for the density-matrix renormalization group, *J. Phys. Soc. Jpn* **76**, 053001 (2007).
- [6] Y. Hatsugai, T. Fukui and H. Aoki: Topological analysis of the quantum Hall effect in graphene, *Phys. Rev. B* **74**, 205414 (2006).
- [7] N. Tsuji, S. Takajo and H. Aoki: Large orbital magnetic moments in carbon nanotubes generated by resonant transport, *Phys. Rev. B* **75**, 153406 (2007).
- [8] Y. Nishi, P.A. Maksym, D.G. Austing, T. Hatano, L.P. Kouwenhoven, H. Aoki and S. Tarucha: Intermediate low spin states in a few-electron quantum dot in the  $\nu \leq 1$  regime, *PRB* **74**, 033306 (2006).
- [9] M. Kiguchi, G. Yoshikawa, K. Saiki, R. Arita and H. Aoki: Metal induced gap states at tetratetracontane/Cu interface, *Journal de Phys. IV* **132**, 199 (2006).
- [10] T. Oka, N. Konno, R. Arita and H. Aoki: Breakdown of an electric-field driven system — a mapping to a quantum walk, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 100602 (2005); Takashi Oka and Hideo Aoki: Ground-state decay rate for the Zener breakdown in band and Mott insulators, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 137601 (2005).

## 11 Miyashita Group

**Research Subjects:** Statistical Mechanics, Phase Transitions, Quantum Spin systems,  
Nonequilibrium Phenomena

**Members:** Seiji Miyashita, Keiji Saito, Hiroko Tokoro (JSPS) and Keigo Hijii (JST)

### 1. Phase Transition in Spin-Crossover Materials

We studied cooperative properties of spin-crossover materials, where responses to light-irradiation have attracted a lot of interest. In particular, the so-called LIESST (light-induced excited spin state trapping) phenomena have been extensively studied. In order to trap the excited state for a long time, the system needs a kind of metastability. In the atomic level, the unit of the material has an energy-barrier between the high-spin (HS) and the low-spin (LS) states which provides a mechanism of metastability. However, we found the existence of a metastable state in the thermodynamic free energy. This metastability is caused by the cooperativity of the molecules. We studied the properties of this metastability in various cases including the Prussian blue analogues. This metastable state was also found in an experiment which was done in the collaboration with the Ohkoshi-group in the department of chemistry. We proposed that the difference between the atomic metastability and the thermodynamic metastability would appear in the dependence of relaxation processes on the initial values. The existence of the thermodynamic metastability causes a non-monotonic relaxation. We also studied the origin of the cooperativity, and we found that the elastic distortion energy due to the variation of the size of the molecule plays an important role.

### 2. Slow Relaxation in Highly Frustrated Systems

We studied the mechanism of slow relaxation caused by the entropy origin. The temperature dependence of the effective coupling of frustrated decorated bond structure causes the reentrant phase transition. We have pointed out the dynamics of the ordering becomes very slow due to the mechanism of spin-screening effect. There it is very difficult to find the ground state of the system by using the thermal annealing methods. Then, we studied how the quantum annealing works to find the ground state in this system and demonstrated in some simple cases. There, the adiabatic transition plays an important role. We also

studied the slow relaxation in the Ising-like kagome antiferromagnetic Heisenberg model which exhibits a thermodynamical phase transition with the symmetry breaking phenomenon of the magnetization. In this system, reflecting the macroscopic degeneracy as the characteristic of the corner-sharing frustrated systems, a slow relaxation process exists even after the magnetization reaches to the equilibrium value. We studied this process by observing the number of the weathervane loops which represents the variety of the degenerate states. We found the a kind of entropy-induced ordering process, and obtained characteristics of the slow relaxation.

### 3. Novel Quantum Phenomena

We have studied novel quantum phases. In the last year, we studied the conditions for the existence of the “super-solid state”. We investigated the effect of frustration of the interaction, the soft-core effect, and also the effect of inhomogeneity of the interaction. Especially, we found that the superfluid density have maximum value when the effective potential that additional particle feel becomes flat. We also studied phase diagram of the extended Bose-Hubbard model.

The localization of the electrons in one-dimensional tight-binding model was also studied in collaboration with the Nagaosa-group in applied physics department. When the magnetic system has frustrated interaction or the DM interaction, a spiral spin structure may appear. This structure affects the electron conduction. In particular, we found that the electron state may localize when the spiral is incommensurate with the lattice.

The energy gap at the avoided level crossing plays important role in the control the quantum state by external field. The gap changes with the external parameter continuously including zero which means gapless. This mechanism has been studied in term of the Berry phase. We have studied it from the view point of the spin parity. We also studied the similar behavior in the eigenvalue of the Floquet operator when the system is under the periodically oscillating field.

### 4. Quantum Dynamics

We have studied properties of quantum dynamics and manipulation in nanoscale molecular magnets and related materials, where the Landau-Zener mechanism plays an important role. In order to study further on the quantum dynamics, we are executing a crest project in JST on “Quantum-mechanical cooperative phenomena and their applications”.

In the last year, we studied dynamical properties of the transverse Ising model under the sweeping field, and also the spin-wave propagation through the domain wall in the Ising-like Heisenberg model, where we find that the transverse component is reflected by the domain wall, while the longitudinal component propagates through it. These studies were done in the collaboration with De Riedt group in the Groningen University.

As we mentioned above, to find the ground state is difficult in some frustrated systems where the entropy-origin slow dynamics takes place. We studied the quantum annealing method to find the ground state, and found that it efficiently works. We discussed the quantum annealing process from the view points of the adiabatic theorem of the quantum mechanics.

Manipulation of quantum particle by motion of potential well is important in microscopic operations of quantum lattice systems. We studied properties of conveyance of quantum particles by a moving potential-well. In particular, we study how the potential-well traps a particle when we sweep the potential-well. We also studied how the potential-well carries up the particle over a hill, i.e., from a region where the potential energy is low to a region of high potential energy. There, we found that the tunneling effect reduces the carried amount. This process is well described by the Landau-Zener mechanism. Effects of potential sweep in other potential shapes were also studied. The dynamics of particle density of non-interacting Fermi particle system under the sweeping potential-well was also studied and found the effect of the position of the Fermi level.

We studied the effects of quantum dissipation in the Landau-Zener mechanism. At zero temperature, we found that the transition probability can be completely soluble with both phononic bath and spin-bath. Especially when the thermal environment interacts with the spin-component where the driving field is applied, the probability is bath-independent and coincides with the original Landau-Zener probability.

Classical and Quantum correspondence of chaos was studied with the semiclassical periodic orbit theory. Quantum mechanics does not have the sensitivity to the initial state which is the characteristic of classical chaos. However, as well known, the quantum counterparts of classically chaotic systems show the universal-

ity in the level statistics which is well described by random matrix. We studied this empirical universality focusing on form factor.

## 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 in the strongly correlated electron systems.  
Mott metal-insulator transition and superconductivity.[1]  
Randomness and superconductivity fluctuation in high- $T_c$  superconductors.[2]
- Multi-orbital superconductivity in  $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$  [3-6]
- Organic conductors  
Quantum melting due to geometrical frustration.[7,8]  
New-type charge ordering and superconductivity in two-dimensional organic conductors.[9,10]  
Dimensional crossover and superconductivity in quasi-one-dimensional organic conductors.[11]  
Novel spin-liquid state in an organic system.[12]
- Theories of anisotropic superconductivity  
Superconductivity and antiferromagnetism in a non-centrosymmetric system.[13]  
New states of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  in magnetic fields.
- Electronic and spin states in frustrated systems  
Effects of carrier doping in a Kagomé lattice.  
Numerical simulation in classical XY spin systems with frustration.
- Novel quantities in electronic systems  
Disorder operator in two-dimensional insulators.[14]
- Kondo effect and heavy fermion systems  
Kondo effects in quantum dots.[15]  
Fermi surface reconstruction with Kondo screening at quantum critical point.[16]
- Two-dimensional  $^3\text{He}$  system on graphite  
Spin-liquid state at half-filling.  
Effects of ring-exchange interaction on the two-dimensional  $t$ - $J$  model.

- [1] H. Yokoyama, M. Ogata and Y. Tanaka: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 114706 (2006).  
[2] Y. Yanase: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 124715 (2006).  
[3] M. Mochizuki and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 113703 (2006).  
[4] M. Mochizuki and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 013704 (2007).  
[5] M. Mochizuki, H. Q. Yuan and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 023702 (2007).  
[6] M. Ogata: J. Phys.: Condens. Matter **19**, 145282 (2007).  
[7] H. Seo, J. Merino, H. Yoshioka and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 051009 (2006).  
[8] H. Seo, K. Tsutsui, M. Ogata and J. Merino: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 114707 (2006).  
[9] M. Kaneko and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 014710 (2006).  
[10] H. Watanabe and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 063702 (2006).

- [11] Y. Fuseya, M. Ogata: submitted to J. Phys. Soc. Jpn..  
 [12] Y. Hayashi and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 053705 (2007).  
 [13] Y. Yanase and M. Sigrist: J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 043712 (2007).  
 [14] R. Shindou, K-i. Imura, and M. Ogata: Phys. Rev. B **74**, 245107 (2006).  
 [15] D. Matsubayashi and M. Eto, Phys. Rev. B **75**, 165319 (2007).  
 [16] H. Watanabe and M. Ogata: arXiv:0704.1722, submitted to Phys. Rev. Lett..

## 13 Tsuneyuki Group

**Research Subjects:** Theoretical Condensed-matter physics

**Member:** Shinji Tsuneyuki and Kazuto Akagi

Computer simulations from first principles enable us to investigate properties and behavior of materials beyond the limitation of experiments, or rather to predict them before experiments. Our main subject is to develop and apply such techniques of computational physics to investigate basic problems in condensed matter physics, especially focusing on prediction of material properties under extreme conditions like ultra-high pressure or at surfaces where experimental data are limited. Our principal tool is molecular dynamics (MD) and first-principles electronic structure calculation based on the density functional theory (DFT), while we are also developing new methods that go beyond the limitation of classical MD and DFT.

Our research subjects in FY2006 were as follows:

- Electronic structures and chemical reactions at surfaces
  - Organic chemistry on Si surfaces: precursor states and Markovnikov's rule for chemical reaction
  - Effect of strong electric field on organic molecules chemisorbed on Si surfaces
- Impurity effect in ferroelectric perovskites
  - Charge-state effect on hydrogen impurities in BaTiO<sub>3</sub>
  - Temperature dependence of the charge state of Mn impurities in SrTiO<sub>3</sub>
- Structural/electronic transition of YH<sub>3</sub> under ultra-high pressure
- Electronic structure analysis of proteins by the LCMO scheme
- New methods of electronic structure calculation
  - First-principles wavefunction theory for solids based on the transcorrelated method
  - Construction of model hamiltonian of materials from first principles and its application to excitation spectrum

## 14 Fujimori Group

**Research Subjects:** Photoemission Spectroscopy of Strongly Correlated Systems

**Member:** Atsushi Fujimori and Teppei Yoshida

We study the electronic structures of strongly correlated systems using high-energy spectroscopic techniques such as photoemission spectroscopy, x-ray absorption spectroscopy and x-ray magnetic circular dichroism using synchrotron radiation. We investigate mechanisms of high-temperature superconductivity [1], metal-insulator transitions, giant magnetoresistance, carrier-induced ferromagnetism [2] and

spin/charge/orbital ordering in strongly correlated systems such as transition-metal oxides, magnetic semiconductors, and their interfaces [3].

[1] K. Tanaka, W.S. Lee, D.H. Lu, A. Fujimori, T. Fujii, Risdiana, I. Terasaki, D. J. Scalapino, T.P. Devereaux, Z. Hussain and Z.-X. Shen: Distinct Fermi-Momentum Dependent Energy Gaps in Deeply Underdoped Bi2212, *Science* **314** (2006) 1910-1913.

[2] K. Mamiya, T. Koide, A. Fujimori, H. Tokano, H. Manaka, A. Tanaka, H. Toyosaki, T. Fukumura and M. Kawasaki: Indication of Intrinsic Room-Temperature Ferromagnetism in  $\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$  Thin Film: An X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study, *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 062506–1-3.

[3] M. Takizawa, H. Wadati, K. Tanaka, M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, K. Shibuya, T. Mihara, T. Ohnishi, M. Lippmaa, M. Kawasaki, H. Koinuma, S. Okamoto and A. J. Millis: Photoemission from Buried Interfaces in  $\text{SrTiO}_3/\text{LaTiO}_3$  Superlattices, *Phys. Rev. Lett.* **97** (2006) 057601–1-4.

## 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  $\text{CuO}_4$  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  $180^\circ$  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,  $\mu\text{SR}$  and neutron facilities, and STM/STS to reveal electronic structure/phenomena of cuprates in real- and momentum-space.

### 2. Accomplishment

#### (1) Ladder Cuprate

Significant progress has been made in the experimental study of a hole-doped two-leg ladder system  $\text{Sr}_{14-x}\text{Ca}_x\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$  and undoped  $\text{La}_6\text{Ca}_8\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$  :

- 1) From the high pressure ( $P$ ) study we constructed an  $x$ - $P$  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  $\text{Yb}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.8}$  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  $\text{CuO}_2$  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, Iwao MATSUDA, and Toru HIRAHARA**

Topics in our research group are (1) electronic/mass transports, (2) atomic/electronic structures, (3) phase transitions, (4) electronic excitations, and (5) epitaxial growths of coherent atomic/molecular layers on semiconductor surfaces and nano-scale phases. Peculiar atomic arrangements and surface electronic

states, characteristic of the surface superstructures and ultra-thin films, on semiconductor surfaces, are our platforms for studying physics of atomic-scale low-dimensional systems by using ultrahigh vacuum experimental techniques such as electron diffractions, scanning electron microscopy, scanning tunneling micro/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy, and *in-situ* 4-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-4-point probes. Main results in this year are as follows.

**(1) Surface electronic transport:** Metal-insulator transitions, hopping conduction, and Hall effect in surface states. Quantitative evaluation of surface-state conductivity from Fermi surface mapping. Conductance of individual Cobalt silicide nanowires and metal-coated carbon nanotube tips.

**(2) Surface phases, ultra-thin films, and phase transitions:** Order-disorder phase transition and charge-density-wave transition on various metal-induced surface superstructures of Si and Ge. Quantum-well state in ultra-thin Pb, Bi, and Ag films. Ge nanodots layer.

**(3) Construction of new apparatuses:** Green's-function STM (low-temperature four-tip STM). Metal-coated carbon nanotube STM tips.

- [1] N. Nagamura, I. Matsuda, N. Miyata, T. Hirahara, S. Hasegawa, and T. Uchihashi: *Quasi-quantum-wire states in an epitaxial Ag film on a one-dimensional surface superstructure*, Physical Review Letters **96**, 256801 (Jun 2006).
- [2] T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, Yu. M. Koroteev, P. M. Echenique, M. Saito, and S. Hasegawa: *Role of Spin-Orbit Coupling and Hybridization Effects in the Electronic Structure of Ultrathin Bi Films*, Physical Review Letters **97**, 146803 (Oct 2006).
- [3] S. Yoshimoto, Y. Murata, K. Kubo, K. Tomita, K. Motoyoshi, T. Kimura, H. Okino, R. Hobara, I. Matsuda, S. Honda, M. Katayama, and S. Hasegawa: *Four-Point Probe Resistance Measurements Using PtIr-Coated Carbon Nanotube Tips*, Nano Letters **7**, 956 (May 2007).
- [4] Y. Nakayama, I. Matsuda, S. Hasegawa, and M. Ichikawa: *Quantum regulation of Ge nanodot state by controlling barrier of the interface layer*, Applied Physics Letters **88**, 253102 (Jun 2006).
- [5] T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, Yu. M. Koroteev, and S. Hasegawa: *Quantum-well states in ultrathin Bi films from angle-resolved photoemission spectroscopy and first-principles calculations study*, Physical Review B **75**, 035422 (Jan 2007).
- [6] T. Hirahara, I. Matsuda, R. Hobara, S. Yoshimoto, and S. Hasegawa: *Direct measurement of the Hall effect in a free-electron-like surface state*, Physical Review B **73**, 235332 (Jun 2006).
- [7] C. Liu, I. Matsuda, M. D'angelo, and S. Hasegawa: *Self-Assembly of Two-Dimensional Nanoclusters: From Surface Molecules to Surface Superstructure*, Physical Review B **74**, 235420 (Dec 2006).
- [8] H. Konishi, Y. Murata, W. Wongwiriyanpan, M. Kishida, K. Tomita, K. Motoyoshi, S. Honda, and M. Katayama, S. Yoshimoto, K. Kubo, R. Hobara, I. Matsuda, S. Hasegawa, M. Yoshimura, J.-G. Lee and H. Mori: *High-yield synthesis of conductive carbon nanotube tips for multiprobe scanning tunneling microscope*, Review of Scientific Instruments **78**, 013703 (Jan 2007).
- [9] R. Hobara, N. Nagamura, S. Hasegawa, I. Matsuda, Y. Yamamoto, K. Ishikawa, and T. Nagamura: *Variable-Temperature Independently-Driven Four-Tip Scanning Tunneling Microscope*, Review of Scientific Instruments **78**, 053705 (May 2007).
- [10] R. Hobara, S. Yoshimoto, S. Hasegawa, and K. Sakamoto: *Dynamic electrochemical-etching technique for tungsten tips suitable for multi-tip scanning tunneling microscopes*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **5**, 94 (Apr 2007).

## 17 Fukuyama Group

**Research Subjects:** Low Temperature Physics (Experimental):

Two-dimensional (2D) quantum fluids and solids with strong correlations and frustration; Low temperature scanning tunneling microscopy and spectroscopy of 2D electron systems (2DES) and exotic superconductors.

**Member:** Hiroshi Fukuyama, Hiroshi Kambara

Our current interests are (i) new quantum phases with strong correlations and frustration in 2D  $^3\text{He}$ . (ii) quantum phenomena in 2DES like the quantum Hall effect and (iii) superconductivity with unconventional Cooper pairing. We are investigating these phenomena at very low temperatures down to 50  $\mu\text{K}$ , using various experimental techniques such as NMR, calorimetry, STM/STS, *etc.*

### 1. Novel quantum phases in strongly correlated fermions in 2D:

#### (a) Zero-point vacancies in 2D $^3\text{He}$ :

We obtained a thermodynamic evidence for the zero-point vacancies (ZPVs), which are atomic vacancies hopping on crystalline lattice sites even at absolute zero, in monolayer solid  $^3\text{He}$  adsorbed on a graphite surface. Our heat capacity measurements at densities ( $\rho$ ) just below that ( $\rho_{4/7}$ ) for the low-density commensurate phase (the 4/7 phase) show anomalies associated with the 2D hole band created by the strong correlation effects. Various theoretical analyses support the ZPV scenario even quantitatively.

#### (b) Spin dynamics in 2D $^3\text{He}$ near localization:

We are investigating spin dynamics of 2D  $^3\text{He}$  near localization with the spin echo technique of pulsed-NMR. The density dependence of measured spin-spin relaxation time ( $T_2$ ) shows a “V” shaped minimum at  $\rho_{4/7}$ . The increase of  $T_2$  at  $\rho \leq \rho_{4/7}$  can be understood as the motional narrowing due to doping the ZPVs and that at  $\rho \geq \rho_{4/7}$  as the exchange narrowing due to the interlayer exchange with an overlayer.

### 2. STM/STS studies of 2DES:

#### (a) Real-space imaging of the quantum Hall state at graphite surface:

Previously we demonstrated that spatial distributions of the electronic states in the quantum Hall regime can be mapped in nm scale with STS near point defects at graphite surface. We have extended this investigation to graphite surfaces with many defects created by Ar-ion sputtering. In addition to the localized state with a central peak and a satellite ring (Type-I) which had been observed near the point defects, we found another state with a different distribution consisting only of the satellite ring (Type-II). Theoretical calculations for 2DES in magnetic fields show that the Type-I and Type-II states correspond to the localized states in Coulomb and harmonic potentials, respectively.

#### (b) STM/STS studies of 2DES in semiconductors:

In our previous STS measurements on the 2DES confined in an InAs thin film on a GaAs substrate, a strange oscillation of the density of states (DOS) with a 60 meV periodicity was found in the positive energy range. We have studied the origin of this oscillation in detail by changing the InAs film thickness, inserting an undoped GaAs thin layer in between the film and substrate, and replacing the substrate from GaAs to InAs. It was concluded that the oscillation is caused by modulation of the tunnel probability in the presence of the Schottky barrier between the film and substrate.

### 3. STM/STS studies of unconventional superconductors:

#### (a) Impurity-induced resonant states in a d-wave superconductor:

We studied the temperature dependence of impurity-induced resonant states in Zn-doped  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  to identify the origin of the sharp near-zero-energy peak observed in STS experiments. We found that the resonant peak survives even at  $T = 52$  K which is much higher than the estimated Kondo temperature ( $\sim 15$  K). This result supports the impurity-scattering resonance scenario.

#### (b) Surface electronic states of $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ :

Surface electronic states of the spin-triplet superconductor  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  have been studied with STS. A large gap structure ( $\Delta \sim 5$  meV) in the tunnel spectrum is always observed at surface SrO planes cleaved at low temperatures possibly because of the surface reconstruction. On the other hand, surfaces cleaved or exposed at room temperature show a disordered DOS with 3D correction term of Anderson localization.

## 18 Okamoto Group

**Research Subjects:** Experimental Condensed Matter Physics,

Low temperature electronic properties of two-dimensional systems.

**Member:** Tohru Okamoto and Ryuichi Masutomi

We study low temperature electronic properties of semiconductor two-dimensional systems.

The current topics are following:

1. Two dimensional electrons at cleaved semiconductor surfaces:

At the surfaces of InAs and InSb, conduction electrons can be induced by submonolayer deposition of other materials. Research on electrons at semiconductor surfaces has great future potential because of the variety of adsorbates and the application of scanning probe microscopy techniques. Recently, we have successfully performed the first low-temperature ( $T = 1.5$  K) magnetotransport measurements on Ag-induced electron systems (ESs) formed at in situ cleaved surfaces of  $p$ -type InAs. However, a high magnetic field above 10 T was required for the observation of the QH effect. In this year, we extended the study to InSb surfaces. The quantum Hall effect was observed even at low magnetic fields around 2 T. The surface electron density and the electron mobility exhibit strong dependence on the Ag-coverage and the annealing temperature in the range of 15-40 K. The annealing effect suggests that the surface morphology strongly affects the properties of the two-dimensional electron systems.

2. Strongly correlated two dimensional systems:

We have studied anisotropic magnetotransport in a silicon quantum Hall system. By controlling the angle of the magnetic field with respect to the two dimensional plane, the ratio of the Zeeman energy to the cyclotron gap can be adjusted. At the angle, where the Landau levels ( $n = 1, \uparrow$ ) and ( $n = 0, \downarrow$ ) have the same energy, giant anisotropy of the longitudinal resistivity was found. With decreasing temperature, the longitudinal resistivity in the direction parallel to the in-plane magnetic field steeply increases while that in the perpendicular direction decreases. The results might be related to the formation of a striped spin density wave.

3. Spin current in the quantum Hall regime detected by dynamic nuclear polarization:

We have studied the spin current and heat flow in the spin-resolved quantum Hall regime around Landau level filling factor  $\nu = 3$  in GaAs/AlGaAs two-dimensional electron systems (2DESs). First, we demonstrated that dynamic nuclear polarization (DNP) can be caused by a change in  $T_e$  in the breakdown regime at  $\nu = 3$ . The sample used has a narrow channel, where the width varies stepwise along the electron flow. We found that electron cooling (heating) causes the polarization of nuclear spins against (toward) the external magnetic field at liquid helium temperatures. Secondly, spin current perpendicular to the electric current was investigated in the transition regions of  $2 < \nu < 3$  and  $3 < \nu < 4$ . A specially designed Hall bar was used in order to detect DNP in the vicinity of one of the edges after applying a large electric current. The observed polarity of DNP, which depends on those of the electric current and magnetic field, indicates that the directions of the spin current and the Hall electric field are the same for  $\nu > 3$ , but are opposite for  $\nu < 3$ . It is suggested that the spin of the majority carriers of the dissipative current determines the direction of the spin current.

## 19 Shimano Group

**Research Subjects:** Optical and Terahertz Spectroscopy of Condensed Matter

**Member:** Ryo Shimano and Shinichi Watanabe

We study light-matter interactions and many body quantum correlations in: 1) optically excited high density electron-hole systems in semiconductors, low dimensional systems such as 2) carbon nanotubes, 3) quasi-1D organic conductors, 4) superconductors, and 5) strongly correlated electron systems. In order to investigate the dynamics of phase transition in those materials, we are focusing on their low energy electromagnetic responses in terahertz (THz) (1THz $\sim$ 4meV) frequency range where quasi-particle excitations and various collective excitations exist. The research summary in this year is as follows.

1. **THz spectroscopy**

(1) **Carbon nanotubes:** Carbon nanotubes are considered as one of the promising materials for the study of one dimensional electronic systems. The dynamical aspects of their transport properties, and photo-excited dynamics are important issues to understand the Coulomb correlation in such 1D electron system. In this context, we are studying the low energy ( $\sim$  meV) electromagnetic responses of their ground state and photo-excited state. We determined the complex dielectric function of HiPco

single-wall carbon nanotubes (SWNTs) by terahertz time-domain spectroscopy in the broad spectral range from 0.2 to 20 THz. Real part of the dielectric function exhibits extremely large and positive value at low frequency below 2THz, indicating the response of small gap SWNTs.

(2)**Superconductors:** Vortex lattice, or glass in superconductor can be recognized as a new class of material phase which can be controlled by external perturbation such as magnetic field or temperature. We study the interaction among the vortices and their dynamics as well as the quasi-particle dynamics by THz conductivity measurements. A clear gap at 1.1THz is observed in NbN film of  $T_c=15K$ , which disappears with increasing the applied magnetic field. The conductivity spectrum is analyzed based on effective medium theory.

(3)**Multiferroics:** Antiferromagnetic resonance is observed in multiferroic material  $DyMnO_3$ , where ferroelectric and antiferromagnetic order coexist at low temperature. The correlation between ferroelectricity and magnetism is systematically examined in THz frequency range, in order to investigate the collective excitation of the ferroelectric order.

## 2. Instrumental Developments

(1)**THz time domain ellipsometry at low temperature and under high magnetic field:** THz time domain ellipsometry at low temperature as low as 1.6K and under high magnetic field as high as 7T is achieved. The available frequency range is between 0.2 to 2THz, which covers the BCS gap of conventional superconductors, antiferromagnetic resonances, and cyclotron frequencies in typical semiconductors such as Si, InAs, GaAs under the relevant magnetic field. A high sensitive polarization spectroscopy, namely the THz time domain ellipsometry, is combined with this system, which allows one to measure the magneto-optical Faraday rotation angle as small as 0.5mrad.

(2)**Broadband THz spectroscopy system:** In order to extend the conventional THz spectroscopy range of 0.2 to 3THz of which upper limit is restricted by the laser pulse width 160fs, we installed a much shorter femtosecond laser system with pulse width of 14fs. By adopting the optical rectification and dipole antenna for THz generation and detection scheme, we succeeded in obtaining a broad spectral range of 0.5 to 30THz(600 $\mu$ m to10 $\mu$ m), which covers interesting response range of those abundant materials listed above.

(3)**Development of compact THz spectroscopy system:** Compact and mobile terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS) measurement system is quite useful as one can perform the measurements anywhere including what conventional setup cannot be accessible, e.g. inside a cryogenic system with no optical windows. Also useful is a diffraction-limited THz imaging system with high spatial resolution, as one can quantitatively extract the spectroscopic information of small objects, particularly when their sizes are in the order of mm, comparable to the wavelength of THz waves. For this purpose, we have developed a very compact THz-TDS imaging system with high diffraction-limited spatial resolution, which is designed so as to put the whole system except for pump and probe laser lines inside a cryostat with 25 millimeter diameter sample space.

## 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

The Theoretical Astrophysics Group carries out a wide range of research programmes. However, astrophysics is a very broad field of research, and it goes without saying that our group alone cannot cover all the various important astrophysical research topics on hand; we therefore place particular emphasis on the following three areas of research - "Physics of the Early Universe", "Observational Cosmology", and "Particle and Nuclear Astrophysics". Let us delve into the specifics of these areas below.

The understanding of the very early universe saw a sort of renaissance in 1980's by applying the ideas of particle physics around the epoch close to the Planck time, of which the prime example is the inflationary universe scenario. On the basis of such recent development, "Physics of the Early Universe" aims at describing the birth of the universe within the language of physics. Our group activities include inflationary universe models, cosmological phase-transition and topological defects, big-bang nucleosynthesis, the cosmic no-hair conjecture and the fundamental problem of general relativity.

“Observational Cosmology” attempts to understand the evolution of the universe on the basis of the observational data in various wavebands. The proper interpretation of the recent and future data provided by COBE, ASCA, the Hubble telescope, SUBARU, and large-scale galaxy survey projects is quite important both in improving our understanding of the present universe and in determining several basic parameters of the universe which are crucial in predicting the evolutionary behavior of the universe in the past and in the future. Our current interests include nonlinear gravitational evolution of cosmological fluctuations, formation and evolution of proto-galaxies and proto-clusters, X-ray luminosity and temperature functions of clusters of galaxies, hydrodynamical simulations of galaxies and the origin of the Hubble sequence, thermal history of the universe and reionization, prediction of anisotropies in the cosmic microwave background radiation, statistical description of the evolution of mass functions of gravitationally bound objects, and statistics of gravitationally lensed quasars.

“Particle and Nuclear Astrophysics” explores the interfaces between particle physics, nuclear physics, and astrophysics. We place particular attention on the physics of supernovae. This includes a rich variety of micro- and macro-physics, for example, neutrino transport, equation of state of high density matter, r-process nucleosynthesis, convective instability, fast rotation of a stellar core, strong magnetic field, gravitational radiation, and so on. In particular, the mechanism of the Type II supernovae itself has not been properly explained for more than 25 years. It is, therefore, important to make clear the physics of supernova phenomena not only for astrophysics but also for other fields of elementary physics. We are currently working on the multi-dimensional aspects of supernovae such as rotating core collapse, asymmetric neutrino emission, convective energy transfer near the neutrino sphere, possibility of r-process nucleosynthesis in the hot bubble region, and gravitational radiation from an asymmetrically bouncing core. Additionally, we have also recently been working on the effects of magnetic fields on the explosion mechanism.

Let us summarize this report by presenting recent titles of the doctor and master theses in our group; 2006

- Numerical studies on cosmological perturbations in braneworld
- Inflationary braneworld probed with primordial black holes
- Galaxy Biasing and Higher-Order Statistics
- Probing circular polarization of Gravitational Wave Background with Cosmic Microwave Background Anisotropy
- Gravitational Collapse of Population III Stars

2005

- Brane gravity and dynamical stability in warped flux compactification
- Neutrino Probes of Galactic and Cosmological Supernovae
- Detectability of cosmic dark baryons through high-resolution spectroscopy in soft X-ray band
- Propagation of Ultra-High Energy Cosmic Rays in Cosmic Magnetic Fields
- The study of nuclear pasta investigated by Quantum Molecular Dynamics

2004

- Strong Gravitational Lenses in a Cold Dark Matter Universe
- Effect of Rotation and Magnetic Field on the Explosion Mechanism and Gravitational Wave in Core-Collapse Supernovae
- ”Bulk Fields in Braneworld”
- “Gravitational collapse and gravitational wave in the brane-world”
- Magnetohydrodynamical Simulation of Core-Collapse Supernovae
- A Search for the Atmospheric Absorption in the Transiting Extrasolar Planet HD209458b with Subaru HDS

- Baryogenesis and Inhomogeneous Big Bang Nucleosynthesis
- The large-scale structure of SDSS quasars and its cosmological implication

2003

- Non-Gravitational Heating of Galaxy Clusters in a Hierarchical Universe
- Discoveries of Gravitationally Lensed Quasars from the Sloan Digital Sky Survey
- One, Two, Three – measuring evolved large scale structure of the Universe
- Higher-order Statistics as a probe of Non-Gaussianity in Large Scale Structure
- Primordial black holes as an imprint of the brane Universe
- Probing the Extra Dimensions with Gravitational Wave Background of Cosmological Origin

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

## 21 Murao Group

**Research Subjects:** Quantum Information Theory

**Member:** Mio Murao and Damian Markham

Quantum information processing seeks to perform tasks which are impossible or not effective with the use of conventional classical information, by using quantum information described by quantum mechanical states. Quantum computation, quantum cryptography, and quantum communication have been proposed and this new field of quantum information processing has developed rapidly especially over the last 10 years. Entanglement is nonlocal correlation that appears in certain types of quantum states (non-separable states) and has become considered as a fundamental resource for quantum information processing. In our group, we investigate new properties of multipartite and multi-level entanglement and the use of these properties as resources for quantum information processing. Our current projects are the following:

- Relationship between LOCC copying and LOCC discrimination of maximally entangled states [1]
- Two-way classical communication remarkably improves LOCC distinguishability
- Multipartite distance like measure of entanglement for a class of symmetric states
- A computable bound of deterministic LOCC discrimination in a multipartite system

- Entanglement and local information access for graph states [2]
- Local encoding of classical information onto quantum states [3]
- Remote destruction of spread qubit information
- Generalization of measurement based quantum computation
- Searching for the maximally entangled tripartite state
- Survival of entanglement in thermal states [4]
- The role of entanglement in quantum information and in statistical physics [5]
- Entanglement in one dimensional spin systems
- Enhancement of security by using blind quantum computation

Please refer our webpage: <http://eve.phys.s.u-tokyo.ac.jp/indexe.htm>

## References

1. Masaki Owari, Masahito Hayashi, *Local Copying and local discrimination as a study for non-locality of a set of states*, Physical Review A, **74**, 032108 (2006)
2. D. Markham, A. Miyake and S. Virmani, *Entanglement and local information access for graph states*, arXiv:quant-ph/0609102 (to appear in N. J. Phys.)
3. Y. Tanaka, D. Markham and M. Muraio, *Local encoding of classical information onto quantum states* arXiv:quant-ph /0702190 (to appear in J. Mod. Opt.)
4. D. Markham, J. Anders, V. Vedral and M. Muraio, *Survival of entanglement in thermal states* arXiv:quant-ph/0606103
5. J. Anders, D. Markham, V. Vedral and M. Hajdusek, *How much of one-way computation is just thermodynamics?* arXiv:quant-ph/0702020
6. M. Owari, S. L. Braunstein, K. Nemoto, Mio Muraio,  *$\epsilon$ -convertibility of entangled states and extension of Schmidt rank in infinite-dimensional systems*, arXiv:quant-ph/0609167

## 22 Makishima Group & Nakazawa Group

**Research Subjects:** High Energy Astrophysics using Scientific Satellites, X-Ray Probing of the Universe, Development of Cosmic X-Ray/ $\gamma$ -Ray Instruments

**Member:** Kazuo Makishima, Kazuhiro Nakazawa

We study cosmic and solar high-energy phenomena in the X-ray and  $\gamma$ -ray frequencies, using scientific satellites launched by the Japan Aerospace Exploration Agency, as well as foreign missions.

**The *Suzaku* satellite:** In collaboration with several domestic and US groups, we have developed the Hard X-ray Detector (HXD) [1,2] which has an unprecedented sensitivity to cosmic hard X-rays in the 10–600 keV range. The *Suzaku* satellite, carrying onboard the HXD and CCD cameras (coupled to X-ray telescopes), has been launched successfully by an M-5 rocket on 2005 July 10. After the initial performance-verification phase, the first guest-observation cycle of *Suzaku* was completed in the end of March 2006.

**Physics of Compact Objects:** Mass accretion onto compact objects is our favorite research subject, and extensive *Suzaku* studies have been carried out. From two binary X-ray pulsars, the HXD successfully detected spectral features due to electron cyclotron resonance [4]. Rotation-powered pulsars, including the Crab pulsar in particular, provided accurate calibration to the HXD timing function. Combining the  $\sim 0.3$  keV to  $\sim 200$  keV spectra of several black-hole binaries (including the prototypical Cygnus X-1) obtained with *Suzaku*, we have discovered that their spectra require, in terms of thermal Compton scenario, at least two different optical depths. We keep our quest for the nature of enigmatic Ultra-Luminous X-ray sources

(ULXs) in nearby galaxies, candidates for intermediate-mass black holes. A dozen active galactic nuclei also yielded the *Suzaku* detection at least up to 100 keV. In particular, the data from the type 2 Seyfert galaxy NGC 4945 has provided valuable information on the geometry of obscuring materials.

**Cosmic Nucleosynthesis:** X-ray observations provide powerful diagnostics to cosmic nucleosynthesis, from individual stars to clusters of galaxies. Our observations of a planetary nebula with the *Suzaku* CCD camera revealed an extreme carbon overabundance relative to oxygen [3]. This is a rare occasion where the carbon-rich material produced deep inside an evolved star is being witnessed. Using *Suzaku* and *XMM-Newton* data of a fair number of clusters of galaxies, we discovered that Oxygen in their hot X-ray emitting plasma is much more widely distributed than Silicon and Iron. This can be explained if their member galaxies have been falling to the cluster centers over the Hubble time, presumably due to magneto-hydrodynamic interactions with the plasma.

**Plasma Heating and Particle Acceleration:** Using *Suzaku* and other missions, we are revealing that vast inter-stellar and inter-galactic space is a site of ubiquitous plasma heating and particle acceleration. Examples include; giant flares around young stars; colliding stellar winds; and globular clusters moving through the Galactic halo gas. *Suzaku* observations have demonstrated that the Galactic plane near the Galactic center is filled with hot thermal X-ray emission (detected with the CCD camera), and non-thermal hard X-ray signals (detected with the HXD). The origin of these “Galactic diffuse X-ray emissions” is still unclear. Using *Suzaku*, we are searching clusters and groups of galaxies for non-thermal emission from the anticipated relativistic particles.

**Future Instrumentation:** We are making various attempts toward future instrumentation. These include Fourier-synthesis gamma-ray imagers, coded-mask imagers employing small-pixel inorganic scintillators, new single- and poly-crystalline and inorganic scintillators, and avalanche photo diodes. Some of them are meant for the future mission called *NeXT* (New X-ray Telescope), which is being planned as a successor to *Suzaku*, hopefully to be launch in 2012.

1. Takahashi, T., Ezoe, Y., Fukazawa, Y., *et al.*: “Hard X-Ray Detector (HXD) on Board Suzaku”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **59**, S35-S51 (2007)
2. Kokubun, M., Makishima, K., *et al.*: “In-Orbit Performance of the Hard X-Ray Detector on Board Suzaku”, *Publ. Astr. Soc. Japan* **59**, SS53-S76
3. Murashima, M., Kokubun, M., Makishima, K., *et al.*: “*Suzaku* Reveals He-burning Products in the X-ray Emitting Planetary Nebula BD +30° 3639”, *Astrophys. J. Lett.*, **647**, L131-L134 (2006)
4. Terada, Y., Mihara, T., Nakajima, M., Suzuki, M., Isobe, N., Makishima, K., Takahashi, H., Enoto, T., Kokubun, M., Kitaguchi, T., (21): “Cyclotron Resonance Energies at a Low X-Ray Luminosity: A0535+262 Observed with *Suzaku*”, *Astrophys. J. Lett.* **648**, L139-L142 (2006)

## 23 Takase Group

**Research Subjects:** High Temperature Plasma Physics Experiments, Spherical Tokamak, Nonlinear Physics, Collective Phenomena, Fluctuations and Transport, Advanced Plasma Diagnostics Development

**Members:** Yuichi Takase, Akira Ejiri

Thermonuclear fusion, the process that powers the sun and stars, is a promising candidate for generating abundant, safe, and clean power. In order to produce sufficient fusion reactions, isotopes of hydrogen, in the form of hot and dense plasma, must be confined for a long enough time. A magnetic configuration called the tokamak has reached the level where the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) would be constructed to study the behavior of burning plasmas. However, improvement of the cost-effectiveness of the fusion reactor is still necessary. The spherical tokamak (ST) offers a promising approach to increasing the efficiency by raising the plasma beta (the ratio of plasma pressure to magnetic pressure). High beta plasma research using ST is a rapidly developing field worldwide, and is being carried out in our group using the TST-2 spherical tokamak. TST-2 is now located in a new experimental building in Kashiwa Campus. Our group is tackling the problem of creating and sustaining a high beta plasma using a variety of approaches.

**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). The physics of noninductive plasma initiation by RF power in the presence of a vertical magnetic field with positive decay index is being investigated on TST-2. Analysis based on single particle orbits has successfully reproduced the main features of the experimental dependences on the magnetic geometry and the magnetic field strength, showing that the plasma current maximizes when  $R\Omega_p$  becomes comparable to the electron thermal velocity, where  $R$  is the major radius of the plasma and  $\Omega_p$  is the cyclotron frequency evaluated with the poloidal magnetic field. Plasma heating by the high harmonic fast wave (HHFW) is also being investigated. A nonlinear process known as parametric decay was observed by both RF magnetic probes and microwave reflectometry. A clear evidence of electron heating, as evidenced by increased soft X-ray emission, was observed only when parametric decay activity was made sufficiently weak by pushing the plasma inward.

The high beta plasma produced in ST is highly autonomous. Spontaneous deformation of the plasma by an instability and subsequent recovery are observed. This process involves reconnection of magnetic field lines, and is called the reconnection event (RE). A large increase in ion temperature is observed, confirming ion acceleration and thermalization predicted by theory. The mode structure is being revealed by simultaneous singular value decomposition (SVD) analysis of soft X-ray and magnetic data. Internal modes as well as external modes, which are consistent with predictions of nonlinear MHD simulations, have been identified in TST-2. On MAST it was found that the electron pressure gradient increases to  $dP/dr \sim 9 \times 10^3$  Pa/m before an RE and relaxes to  $dP/dr \sim 4 \times 10^3$  Pa/m after an RE, suggesting that the instability is driven by the pressure gradient.

**Formation of Ultra-High Beta Plasma by Plasma Merging**

A new ST device, UTST, aiming at formation of ultra-high beta plasma by plasma merging has been constructed and plasma formation experiments have started. Two ST plasmas will be formed by induction from external coils. Strong ion heating due to magnetic reconnection is expected to form one ST plasma with very high beta (30–50%). Access to the second stability regime becomes much easier using this unique method. It is a challenge to maintain the plasma in such a state for long enough time (exceeding the energy confinement time) after reconnection is over. This is planned to be accomplished by innovative methods of heating and current drive using RF waves (such as the HHFW) or neutral beam injection.

**Collaborations**

Collaborative experiments are being carried out on the JT-60U tokamak at Japan Atomic Energy Agency (JAEA). Plasma current sustainment by the bootstrap current, driven spontaneously by the pressure gradient, was demonstrated using the newly developed constant surface flux control algorithm, which eliminates the possibility of inductive current drive. Collaborations with larger ST devices NSTX (USA) and MAST (UK) are also being carried out.

## 24 Tsubono Group

**Research Subjects:** Experimental Relativity, Gravitational Wave, Laser Interferometer

**Member:** Kimio TSUBONO and Masaki ANDO

The detection of gravitational waves is expected to open a new window into the universe and brings us a new type of information about catastrophic events such as supernovae or coalescing binary neutron stars; these information can not be obtained by other means such as optics, radio-waves or X-ray. Worldwide efforts are being continued in order to construct detectors with sufficient sensitivity to catch possible gravitational waves. Now the detection of the gravitational waves is one of the biggest challenges in the field of physics and astronomy.

TAMA300 is a 300-m baseline laser interferometric gravitational wave detector constructed in Mitaka. We started the operation of the detector in 1999. The achieved sensitivity,  $h \sim 3 \times 10^{-21}/\sqrt{\text{Hz}}$  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, and have accumulated over 3,000 hours data. We are now analyzing the obtained data searching for the gravitational waves from coalescing binaries, supernovae and pulsars.

A space laser interferometer, DECIGO, was proposed through the study of the gravitational wave sources with cosmological origin. DECIGO could detect primordial gravitational waves from the early Universe at the inflation era. We have just started the theoretical and technical investigation for the realization of the DECIGO space detector.

We summarize the subjects being studied in our group.

- Laser interferometric gravitational wave detectors
  - Current status of TAMA project
  - Systematic analysis of TAMA monitoring signal
  - Search for continuous gravitational waves from unknown pulsars
  - Study of the next-generation laser interferometer, LCGT
- Space laser interferometer
  - Space laser interferometer DECIGO
  - DECIGO pathfinder
  - Small size detector SWIM
- Study of the precise measurements
  - Laser stabilization using optical fiber
  - Study of magnetic levitation
- Study of the thermal noise
  - Study of the thermal noise in a space interferometer
  - A new analysis method for the thermal noise caused by an inhomogeneous distributed loss

#### references

- [1] Kazuhiro Yamamoto, Masaki Ando, Keita Kawabe, and Kimio Tsubono: Theoretical approach to thermal noise caused by an inhomogeneously distributed loss: Physical insight by the advanced modal expansion, *Phys. Rev. D* (2007) in press.
- [2] Tomomi Akutsu, and the TAMA Collaboration, Results of the search for inspiraling compact star binaries from TAMA300's observation in 2000-2004, *Phys. Rev. D* **74**-12 (2006) 122002.

## 25 Sano Group

**Research Subjects:** Nonlinear Dynamics and Fluid Mechanics

**Member:** Masaki Sano and Yoshihiro Murayama

Our research group studies nonlinear dynamics and pattern forming phenomena in dissipative nonlinear systems. Oscillation, chaos, and turbulent behavior of fluid, solid, granular systems, chemical reactions and biological systems are investigated based on dynamical system's theory and laboratory experiments. Through these efforts we search for novel phenomena, and to develop new methods in understanding complex phenomena arising in the systems far from equilibrium. The followings are main subjects of our study.

### 1. Study of turbulence

- (1) Search for the ultimate scaling regime in developed thermal turbulence

- (2) Study of statistical properties and coherent structures in turbulence
- (3) Turbulence - turbulence transition in electro hydrodynamic convection of liquid crystals

### 2. Nonlinear Dynamics and Chaos

- (1) Pattern forming phenomena and their universalities in dissipative systems
- (2) Spatio-temporal dynamics in spatially extended dissipative systems

### 3. Dynamical aspects of biological systems

- (1) Single molecule level measurement of DNA collapsing, DNA-protein interaction, and gene expression
- (2) Collective behavior of the activities in biological neural assemblies

### References

1. K. Takeuchi: Can the Ising critical behavior survive in non-equilibrium synchronous cellular automata?, *Physica D*, 223, 146-150 (2006).
2. A. Awazu and K. Kaneko : Pulse Replications and Spatially Differentiated Structure Formation in One dimensional lattice dynamical System, *Mathematical Bioscience*, 201, 90-100 (2006).
3. H. Shiba, J. R.-Felsot, Y. Takahashi, Y. Murayama, Q. Ouyang, and M. Sano: Elastic Convection in Vibrated Viscoplastic Fluids, *Phys. Rev. Lett.* 98, 044501 (2007).
4. K. Takeuchi and M. Sano: Role of unstable periodic orbits in phase transitions of coupled map lattices, *Phys. Rev. E*, 75, 036201 (2007).
5. S. Toyabe, H. R. Jiang, T. Nakamura, Y. Murayama and M. Sano: Experimental Test of a New Equality: Measuring Heat Dissipation in an Optically Driven Colloidal System, *Phys. Rev. E* 75, 011122 (2007).
6. Y. Murayama, H. Wada, R. Ishida, and M. Sano: Unfolding Dynamics of Single Collapsed DNA Molecules, *Prog. Theo. Phys. Suppl.* 165, 144-163 (2006).

## 26 Yamamoto Group

**Research Subjects:** Submillimeter-wave and Terahertz Astronomy, Chemical Evolution of Interstellar Molecular Clouds, Star Formation, Development of Terahertz Detector

**Member:** Satoshi Yamamoto and Tomoharu Oka

Molecular clouds are birthplaces of new stars, and understanding their physical and chemical properties provides us with fundamental bases for detailed studies on star formation, which is an elementary process in evolution of the Galaxy. Toward this goal, we are conducting observational studies in the millimeter- and submillimeter-wave region.

Our group operated the Mount Fuji Submillimeter-wave Telescope on the top of Mount Fuji (alt. 3770 m) from 1998 to 2005. With this telescope, we explored formation processes, detailed structure, and chemical evolution of interstellar molecular clouds by observing the fine structure lines of the atomic carbon ( $^3P_1-^3P_0$  492 GHz;  $^3P_2-^3P_1$  809 GHz). Owing to the high sensitivity of our superconductor receiver, the fully remote controlled operation, and the excellent observing condition from Mount Fuji, we were able to observe more than 50 square degrees of the sky with the 492 GHz line. This is the largest survey of the atomic carbon line so far made. Furthermore, a few representative clouds such as Orion A, Orion B, and NGC1333 were mapped with the 809 GHz line. By comparing the distribution of the atomic carbon lines with the CO

distribution, we have been studying formation and evolution of molecular clouds in detail. The Mount Fuji Submillimeter-wave Telescope is a research project of Research Center for the Early Universe (RESCEU) in collaboration with researchers of National Astronomy Observatory and other Japanese institutes.

In addition, our group has developed a transportable 18 cm submillimeter-wave telescope in order to conduct a survey of the 492 GHz line of the atomic carbon over the Milky Way. In 2003, we successfully operated the telescope at Pampa la Bola (alt. 4800 m) in Chile, and observed the southern Milky Way in the atomic carbon line. From the result, we are studying molecular cloud formation in the galaxy scale [1].

We are also studying chemical evolution of star forming regions with the Nobeyama 45 m telescope and Nobeyama Millimeter Array. Particularly we are interested in behaviors of complex organic molecules ( $\text{HCOOCH}_3$ ,  $(\text{CH}_3)_2\text{O}$ , etc.) in hot cores around low mass protostars. These molecules can be used as potential tracers to study the early stage of protostellar evolution. In fact, we have detected the  $\text{HCOOCH}_3$  line from an extremely young low-mass protostar, NGC1333 IRAS4B [2].

Along with the above observational studies, we are developing a hot electron bolometer (HEB) mixer that can be used at 1.5 THz for a survey of the fine structure line of  $\text{N}^+$ . For this purpose, we have introduced an electron beam lithography system and a mixer fabrication system in our laboratory, and have started fabrication of a diffusion-cooled type HEB mixer using Nb as a superconductor and a phonon-cooled type HEB mixer using NbTiN.

- [1] T. Oka, K. Kamegai, M. Hayashida, M. Nagai, M. Ikeda, N. Kuboi, K. Tanaka, L. Bronfman, and S. Yamamoto: Atomic Carbon in the Southern Milky Way, *Astrophys. J.*, **623**, 889-896 (2005).
- [2] N. Sakai, T. Sakai, and S. Yamamoto: Detection of  $\text{HCOOCH}_3$  toward a Low-Mass Protostar NGC1333, *Pub. Astron. Soc. Japan*, **58**, L15-L18 (2006).

## 27 Sakai (Hirofumi) Group

**Research Subjects:** Experimental study of quantum optics and atomic/molecular physics

**Member:** Hirofumi Sakai and Shinichirou Minemoto

Our research interests are as follows: (1) Manipulation of neutral molecules based on the interaction between a strong nonresonant laser field and induced dipole moments of the molecules. (2) Controlling quantum processes in atoms and molecules using shaped ultrafast laser pulses. (3) High-intensity laser physics typified by high-order nonlinear processes (ex. multiphoton ionization and high-order harmonic generation) and ultrafast phenomena in atoms and molecules. (4) Attosecond pulses generated with high-order harmonics and their reliable measurements. (5) Structures and dynamics of molecules studied by the laser induced Coulomb explosion. A part of our recent research activities is as follows:

### (1) Laser field free molecular orientation with combined electrostatic and shaped laser fields

The control of the spatial direction of molecules is especially important for molecular control experiments as well as stereodynamics of chemical reactions. In fact, a sample of aligned or oriented molecules is an ideal anisotropic quantum system to investigate many interesting phenomena such as multiphoton ionization and high-order harmonic generation, which are related to symmetry and directions of a molecule, and are spatially averaged out with randomly oriented molecule. As for the molecular orientation, 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. These experiments were

performed in the adiabatic regime, where the pulse width of the laser field is rather long compared to the rotational period of the molecules. In this case, the degree of molecular orientation follows the temporal profile of the laser pulse and reaches the maximum at the peak of the laser pulse.

On the other hand, in precise spectroscopic measurements and experiments including the observation of photoelectrons, it is desirable to prepare a sample of oriented molecules in the field-free condition. Noting that molecules can be oriented with combined electrostatic and intense, nonresonant laser fields in the adiabatic regime, we propose that we use a shaped pulse which has a relatively long rising edge compared to the rotational period of the molecule and is suddenly switched off at the peak of the pulse. Such a suddenly switched-off pulse can be shaped with the plasma shutter technique. Thereby, in the laser-field-free condition after the shaped pulse, we can expect the same degree of orientation as that could be adiabatically achieved at the peak of the pulse. The feasibility of this approach was recently confirmed by our numerical studies and the proof-of-principle experiment is now in progress in our lab.

## (2) Controlling high-order harmonic generation from nonadiabatically aligned molecules

We have developed an original technique to generate ultrashort light pulses in the XUV region by using high-order harmonic generation (HHG) from aligned molecules. First, we have succeeded in the optimal control of multiphoton ionization processes in aligned I<sub>2</sub> molecules with time-dependent polarization pulses. This means that we have developed the most advanced technique to control tunnel ionization which is the first step of HHG. Second, our novel technique to observe both ion yields and harmonic signals under the same experimental conditions enabled us to observe the first clear evidence of quantum interference of electron de Broglie waves in the recombination process, i.e., the third step of HHG from aligned CO<sub>2</sub> molecules. Third, we applied the polarization gate technique to HHG from non-adiabatically aligned N<sub>2</sub> molecules. Contrary to our expectations based on ellipticity dependence of HHG from aligned molecules, we have found that the spectral width of each harmonic tends to be broader when the molecular axis is perpendicular to the major axis of elliptical polarization. Theoretical calculations show that our observations are characteristic of time-dependent polarization pulses. This means that molecular alignment can be used as an important control parameter in addition to the carrier envelope phase when we generate attosecond pulses with polarization gated few-cycle pulses.

- [1] 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,” *Phys. Rev. A* **75**, 041801(R) (4 pages) (2007).
- [2] Shinichirou Minemoto and Hirofumi Sakai, “Anomalous angular distribution of fragment ions from rare-gas diatomic molecules with intense, femtosecond, near-infrared laser pulses,” *Phys. Rev. A* **75**, 033413 (6 pages) (2007).
- [3] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, “Ellipticity dependence of high-order harmonic generation from aligned molecules,” *Phys. Rev. Lett.* **98**, 053002 (4 pages) (2007).

## 28 Kuwajima Group

**Research Subjects:** Protein Folding, Molecular Chaperones, Protein Stability, Physico-chemical Studies of Biological Macromolecules

**Member:** Kunihiro Kuwajima & Kosuke Maki

We are studying mechanisms of *in vitro* protein folding and mechanisms of molecular chaperone function. Our goals are to elucidate the physical principles by which a protein organizes its specific native structure from the amino acid sequence and to elucidate how these principles are utilized or qualified by the molecular chaperones in the 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.

The equilibrium and kinetics of canine milk lysozyme folding/unfolding were studied by peptide and aromatic circular dichroism and tryptophan fluorescence spectroscopy. The  $\text{Ca}^{2+}$ -free apo form of the protein exhibited a three-state equilibrium unfolding, in which the molten globule state is well populated as an unfolding intermediate. A rigorous analysis of the holo protein unfolding, including the data from the kinetic refolding experiments, revealed that the holo protein also underwent three-state unfolding with the same molten globule intermediate. Although the observed kinetic refolding curves of both forms were single-exponential, a burst-phase change in the peptide ellipticity was observed in both forms, and the burst-phase intermediates of both forms were identical to each other with respect to their stability, indicating that the intermediate does not bind  $\text{Ca}^{2+}$ . This intermediate was also shown to be identical to the molten globule state observed at equilibrium. The  $\phi$ -value analysis, based on the effect of  $\text{Ca}^{2+}$  on the folding and unfolding rate constants, showed that the  $\text{Ca}^{2+}$ -binding site was not yet organized in the transition state of folding. A comparison of the result with that previously reported for  $\alpha$ -lactalbumin indicated that the folding initiation site is different between canine milk lysozyme and  $\alpha$ -lactalbumin, and hence the folding pathways must be different between the two proteins. These results thus provide an example of the phenomenon wherein proteins that are very homologous to each other take different folding pathways. It is also shown that the native state of the apo form is composed of at least two species that interconvert into each other.

- [1] S. Enoki, K. Maki, T. Inobe, K. Takahashi, K. Kamagata, T. Oroguchi, H. Nakatani, K. Tomoyori & K. Kuwajima: The Equilibrium unfolding intermediate observed at pH 4 and its relationship with the kinetic folding intermediates in green fluorescent protein. *J. Mol. Biol.* (2006) **361**, 969-982.
- [2] H. Nakatani, K. Maki, K. Saeki, T. Aizawa, M. Demura, K. Kawano, S. Tomoda & K. Kuwajima: Equilibrium and Kinetics of the Folding and Unfolding of Canine Milk Lysozyme. *Biochemistry* (2007) **46**, 5238-5251.

## 29 Nose Group

**Research Subjects:** Molecular Mechanism of Neural Network Formation

**Member:** Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka and Etsuko Takasu

What is the physical basis of formation of the brain? The aim of our laboratory is to elucidate the molecular mechanism of neural development and function by using, as a model, the simple nervous system of the fruitfly, *Drosophila*. We focus on the synapses between motor neurons and their target muscles, and study the molecular mechanisms of how specific synaptic partners recognize each other and form synaptic connections. The following research plans are in progress.

1. Molecular mechanism of the neuromuscular target recognition 1.1. Genome-wide search for target recognition molecules by microarray To systematically identify novel genes involved in neuromuscular target recognition, we performed microarray analysis. We compared the expression of genes in two neighboring

muscles, 12 and 13, which are innervated by distinct motor neurons, and identified 200 genes that are differentially expressed. We conducted functional analyses of genes encoding transmembrane or secreted proteins and showed that Wnt4, a secreted protein of WNT family plays a major role in target specificity.

2. Molecular Mechanisms of Synaptogenesis 2.1 Live imaging of neuromuscular synaptogenesis Cell adhesion molecules (CAMs) have been proposed to mediate interactions between innervating axons and their targets. However, such interactions have never been directly observed *in vivo*. We studied the function and dynamics of Fasciclin2, a homophilic CAM expressed both pre- and postsynaptically during the formation of neuromuscular synapses in *Drosophila*. By live-imaging of functional Fas2-GFP, we showed that postsynaptic Fas2 accumulates at the synaptic contact site soon after the arrival of the nerve. The accumulation of postsynaptic Fas2 was dependent on its extracellular domain and the presence of axonal Fas2, consistent with recruitment by presynaptic Fas2. This notion was further supported by photobleaching experiments, which demonstrated presynaptic-Fas2-dependent reduction of postsynaptic Fas2 motility. In *fas2* mutants, we found reduced postsynaptic accumulation of glutamate receptors and Dlg/PSD-95, a scaffolding protein known to bind Fas2. These results suggest that Fas2 mediates trans-synaptic adhesion that is necessary for the initiation of postsynaptic assembly.

2.2. Innervation and activity dependent changes in postsynaptic oxidative metabolism The level of mitochondrial energy metabolism is highly correlated with neuronal activity to ensure the balance of energy consumption and production. Yet it remains largely unknown whether this relationship holds in the postsynaptic cell during synaptogenesis when it receives increasing amount of inputs from the presynaptic neuron. We have studied the changes in postsynaptic oxidative metabolism by monitoring the redox of mitochondrial flavoproteins during neuromuscular synaptogenesis. Flavoproteins cycle between fluorescent and non-fluorescent states as they are oxidized and reduced in the respiratory chain. We found that the postsynaptic muscle cells spontaneously emit green autofluorescence transients originating in flavoproteins under blue light excitation. The fluorescence transient is dependent on external  $Ca^{2+}$  and correlates with an increase in intracellular  $Ca^{2+}$  concentration. Notably, the rate of transients in muscle cells increases during synapse formation presumably through a contact with motoneuronal axon. The rate is also influenced by the magnitude of synaptic inputs. Thus, our results indicate that presynaptic cells dynamically regulate the level of postsynaptic energy metabolism during the early stage of neuromuscular synapse formation.

### III

## 2006年度 物理学教室全般に関する報告



# 1 学部講義概要

## 1.1 2年生 冬学期

### 1.1.1 電磁気学 I : 駒宮 幸男

#### 1. 講義の概要

1.1 物理学の体系における電磁気学の位置

#### 2. 特殊相対性理論

2.1 相対性原理

2.2 ローレンツ変換

2.3 ミンコウスキー時空

2.4 速度の変換則

2.5 時間のパラドクス

2.6 スカラー、ベクトル、テンソル

2.7 質点の相対論的運動方程式

2.8 重心系 (CMS) 座標

2.9 相対論的運動

#### 3. 電場

3.1 動いている電荷

3.2 異なる座標系での電場

3.3 動いている電荷に働く力

3.4 動いている電荷どうしに働く力

#### 4. 磁場

4.1 磁場の性質

4.2 ベクトルポテンシャル

4.3 電磁場の変換則

4.4 ローレンツ力とローレンツ変換

#### 5. 電磁誘導とマックスウエルの方程式

5.1 電磁誘導

5.2 電磁場に蓄えられたエネルギー

5.3 変位電流

5.4 マックスウエルの方程式

#### 6. 準静的過程と交流回路

6.1 静電場・静磁場の適用限界

6.2 交流回路

#### 7. 電磁場内の電荷の運動

7.1 電磁場中での荷電粒子の運動方程式

7.2 静電場中での運動

7.3 静磁場中での運動

7.4 一様な電磁場中での運動

#### 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 電場, 磁場のテンソル表示

8.3 マックスウエルの方程式の相対論的共変形

### 1.1.2 解析力学・量子力学 I : 藤森 淳

#### 1. 講義の目的

#### 2. ラグランジュ方程式

ダランベールの原理, 変分原理

#### 3. 一般化座標

一般化運動量, 一般化された力, 循環座標

#### 4. ハミルトンの正準方程式

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>5. 正準変換<br/>母関数，ポアソンの括弧式，リウビルの定理<br/>ハミルトン・ヤコビの偏微分方程式，断熱不変量</li> <li>6. 前期量子論<br/>古典力学の限界，ボーアの対応原理</li> <li>7. シュレディンガー方程式<br/>物質波，1次元ポテンシャル問題，</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>波動関数の物理的意味，位置と運動量の観測</li> <li>8. 演算子とヒルベルト空間<br/>状態と演算子の表示，保存量，時間発展</li> <li>9. ハイゼンベルグ方程式<br/>シュレディンガー表示とハイゼンベルグ表示<br/>ハイゼンベルグの運動方程式，調和振動子</li> </ul> |
|---|---|

### 1.1.3 物理数学 I：常行 真司

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1. 複素関数の性質 <ul style="list-style-type: none"> <li>1.1 物理学における複素数の使い方</li> <li>1.2 複素平面</li> <li>1.3 複素関数</li> <li>1.4 リーマン面</li> <li>1.5 初等関数と収束半径</li> <li>1.6 対数関数と一般のべき乗関数</li> <li>1.7 無限乗積</li> </ul> </li> <li>2. 複素関数の微分と正則性 <ul style="list-style-type: none"> <li>2.1 微分可能性</li> <li>2.2 コーシー-リーマンの関係式</li> <li>2.3 調和関数</li> </ul> </li> <li>3. 複素積分 <ul style="list-style-type: none"> <li>3.1 定義といくつかの性質</li> <li>3.2 コーシーの積分定理</li> </ul> </li> <li>4. コーシーの積分公式とその応用 <ul style="list-style-type: none"> <li>4.1 コーシーの積分公式</li> <li>4.2 テーラー展開</li> <li>4.3 ローラン展開</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>4.4 特異点と留数</li> <li>4.5 解析接続</li> <li>4.6 部分分数展開と無限乗積</li> <li>4.7 関数と主値積分</li> <li>5. 等角写像 <ul style="list-style-type: none"> <li>5.1 写像としての正則関数</li> <li>5.2 等角写像の例</li> </ul> </li> <li>6. ガンマ関数 <ul style="list-style-type: none"> <li>6.1 ガンマ関数</li> <li>6.2 ガンマ関数の無限乗積表示</li> <li>6.3 ハンケル表示</li> <li>6.4 スターリングの公式と漸近展開</li> <li>6.5 鞍点法</li> </ul> </li> <li>7. フーリエ級数とフーリエ変換 <ul style="list-style-type: none"> <li>7.1 固有関数展開</li> <li>7.2 フーリエ級数</li> <li>7.3 フーリエ変換</li> <li>7.4 関数</li> </ul> </li> <li>8 ラプラス変換</li> </ul> |
|---|---|

### 1.1.4 物理実験学：島野 亮

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1. 誤差論 <ul style="list-style-type: none"> <li>1.1 平均値と分散</li> <li>1.2 不偏分散</li> <li>1.3 種々の確率統計 (二項分布、ポアソン分布、正規分布)、大数の法則、中心極限定理</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>1.4 曲線のフィッティング (最小二乗法、最小<math>\chi^2</math>法、相関係数)</li> <li>1.5 区間推定と仮説検定</li> <li>2. 単位系と基本物理定数 <ul style="list-style-type: none"> <li>2.1 SI 単位系</li> </ul> </li> </ul> |
|---|--|

## 2.2 MKSA 単位系の標準

## 2.3 電磁気学の単位系

## 3. 標準

3.1 時間、周波数標準(原子のエネルギー構造、原子時計、光計測の基礎)

3.2 抵抗標準(抵抗測定の基礎、ホール効果、量子ホール効果)

3.3 電圧標準(ジョセフソン効果)

## 4. 信号処理の基礎

4.1 フーリエ級数、フーリエ変換

4.2 自己相関関数、パワースペクトル、ウィナーヒンチンの定理

4.3 サンプリング定理

4.4 線形系と応答関数

4.5 フィルター

4.6 雑音(熱雑音、ショット雑音)

## 1.2 3年生 夏学期

## 1.2.1 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

## 1.2.2 量子力学 II: 村尾 美緒

## 1. 中心場系における量子力学

1.1 波動関数を用いた量子力学の復習と中心場の導入

1.2 軌道角運動量と球面調和関数

1.3 中心場中の定常状態の Schrödinger 方程式の解

1.4 水素原子

## 2. 角運動量

2.1 ブラ・ケットを用いた量子力学の復習

2.2 角運動量の一般化

2.3 角運動量の合成

## 3. スピン角運動量と量子力学の本質

3.1 スピン 1/2 系の量子力学

3.2 測定演算子と確率、密度演算子

3.3 結合系の量子力学と LS 結合

## 4. 摂動論

4.1 時間によらない摂動

4.2 時間による摂動

4.3 WKB 近似

## 1.2.3 現代実験物理学 I : 岡本 徹、能瀬 聡直

## 1. 物性物理実験学 (岡本)

- 1.1 さまざまな物質の作製と構造解析
- 1.2 実験環境の実現
- 1.3 多様な物性測定手法
- 1.4 物性物理入門
- 1.5 歴史的な物性実験の紹介
- 1.6 低次元系、磁性、超伝導

## 2. 生物物理実験学 (能瀬)

- 2.1 生物物理学とは：歴史的な生物物理実験
- 2.2 遺伝子を操る：遺伝子クローニング技術の基礎
- 2.3 ゲノム時代の生物物理：バイオインフォマティクス
- 2.4 生体内での分子の役割を探る：個体レベルの遺伝子操作
- 2.5 生命現象を見る：バイオイメージングの最先端

## 1.2.4 物理数学 II : 松尾 泰

## 1. Fourier 変換と偏微分方程式

- 1.1 Fourier 級数
- 1.2 Fourier 変換
- 1.3 偏微分方程式の分類
- 1.4 Fourier 級数, Fourier 変換を用いた解法
- 1.5 Green 関数

## 2. 直交多項式

- 2.1 直交多項式の定義
- 2.2 Rodrigues の公式
- 2.3 直交多項式の微分方程式
- 2.4 規格化条件
- 2.5 母関数
- 2.6 Hermite 多項式と調和振動子
- 2.7 Laguerre 多項式と水素原子

## 3. 角運動量の量子化

## 3.1 Legendre 陪関数

- 3.2 球面調和関数
- 3.3 角運動量演算子の作用
- 3.4  $SU(2)$  と  $SO(3)$  の違い

## 4. Bessel 関数

- 4.1 Bessel 関数とその基本的な性質
- 4.2 積分表示：第 2 種 Bessel 関数, Hankel 関数
- 4.3 Bessel 関数の直交性
- 4.4 球 Bessel 関数

## 5. 確定特異点型微分方程式と超幾何関数

- 5.1 確定特異点型微分方程式
- 5.2 超幾何関数
- 5.3 積分表示とモノドロミー関係式
- 5.4 合流型超幾何関数

## 1.2.5 統計力学 I : 和達 三樹

## 1. 熱力学

- 1.1 序論
- 1.2 熱力学第一法則
- 1.3 熱力学第二法則
- 1.4 熱力学第三法則
- 1.5 熱力学関数

## 2. 統計力学の手法

- 2.1 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：小形正男

#### PART I 群論およびその表現論

##### 1. 群の基本概念

- 1.1 群の定義
- 1.2 群表
- 1.3 組み換え定理
- 1.4 同型
- 1.5 部分群と剰余類
- 1.6 共役
- 1.7 不変部分群

##### 2. 群の表現論

- 2.1 表現とは
- 2.2 表現の基底
- 2.3 同値な表現、可約と既約表現
- 2.4 可約表現の例
- 2.5 同次多項式による表現
- 2.6 一般論
- 2.7 既約表現行列の直交性
- 2.8 指標
- 2.9 正則表現と指標定理
- 2.10 指標の直交性
- 2.11 既約表現の求め方

##### 3. 表現論と量子力学

- 3.1 対称操作群
- 3.2 表現の例

##### 3.3 摂動によるエネルギー準位の分裂

- 3.4 選択則
- 3.5 積表現
- 3.6 3次元回転群

##### 4. 点群

- 4.1 点群の例
- 4.2 分子軌道
- 4.3 2原子分子への応用
- 4.4 ベンゼンの  $\pi$  電子への応用例
- 4.5 混成軌道
- 4.6 分子振動への応用
- 4.7 赤外吸収とラマン散乱の選択則

##### 5. 連続群と Lie 代数

- 5.1 Lie 群と Lie 代数
- 5.2 構造定数
- 5.3 連結成分
- 5.4 単連結と Lie の定理
- 5.5  $SU(2)$  の例

##### 6. 対称群

- 6.1 対称群の性質
- 6.2 対称群での類
- 6.3 ヤング図形

#### PART II 微分形式

##### 7. 微分形式とは

- |                 |                    |
|-----------------|--------------------|
| 7.1 外積と外微分      | 8.2 接空間            |
| 7.2 $p$ -ベクトル空間 | 8.3 多様体上の微分形式      |
| 7.3 微分形式        | 8.4 $m$ 単体         |
| 7.4 外微分の性質      | 8.5 多様体上の積分        |
| 7.5 微分方程式との関係   | 8.6 Stokes の定理     |
| 8. 多様体          | 8.7 Stokes の定理の具体例 |
| 8.1 微分可能多様体     |                    |

### 1.3.2 量子力学 III : 大塚 孝治

- |                        |                         |
|------------------------|-------------------------|
| 1. 電磁場中の粒子の運動          | 2.9 共鳴散乱                |
| 1.1 古典論                | 2.10 クーロン散乱             |
| 1.2 量子論への移行            | 3. 同種粒子系                |
| 1.3 一様な磁場中の荷電粒子        | 3.1 同種粒子                |
| 1.4 量子論におけるゲージ変換       | 3.2 多数の同種粒子から成る系        |
| 2. 散乱問題                | 3.3 スレーター行列式とパウリの排他律    |
| 2.1 散乱断面積              | 3.4 ボゾンからなる系            |
| 2.2 ポテンシャルによる散乱        | 3.5 フェルミオンの第 2 量子化      |
| 2.3 ボルン近似              | 3.6 第 2 量子化による物理量の表現    |
| 2.4 散乱での流れと光学定理        | 3.7 2 体演算子の第 2 量子化による表現 |
| 2.5 ボルン近似の成り立つ場合       | 3.8 ハートリーフォック法          |
| 2.6 広がりのあるポテンシャル源による散乱 | 3.9 原子の中の電子系の構造         |
| 2.7 部分波展開と位相のずれ        | 3.10 ボゾンの多体系            |
| 2.8 低いエネルギーでの散乱        |                         |

### 1.3.3 流体力学 : 江尻 晶

- |                     |                          |
|---------------------|--------------------------|
| 1. 流体の基礎方程式         | 3. 粘性流                   |
| 1.1 流体を特徴づける量       | 3.1 Reynolds 数           |
| 1.2 連続の式            | 3.2 ストークス近似              |
| 1.3 力と運動方程式         | 3.3 一様等方乱流と Kolmogorov 則 |
| 1.4 粒子の方程式から流体の方程式へ | 3.4 フラクタルによる乱流の表現        |
| 1.5 渦度と渦度方程式        | 4. 水波                    |
| 2. 関数による流れの表現       | 4.1 長い波                  |
| 2.1 ポテンシャル流         | 4.2 表面波                  |
| 2.2 複素速度ポテンシャル      | 4.3 表面張力波                |
| 2.3 揚力              | 5. 不安定性                  |

5.1 安定・不安定

5.3 レイリー・テイラー不安定性

5.2 ケルビン・ヘルムホルツ不安定性

## 1.3.4 現代実験物理学 II：蓑輪 眞、早野 龍五

素粒子・原子核・宇宙物理学実験の基礎

1. 誤差と統計処理の方法

5. SI 単位系と基礎物理定数

2. 同軸ケーブルとインピーダンス整合

6. 粒子と物質の相互作用

3. 物理量の測定

7. 断面積と崩壊率

4. 振動現象の物理学

8. 加速器

9. 粒子検出器

## 1.3.5 電磁気学 III：内田 慎一

1. 電磁波の放射

3. 荷電粒子の運動と電磁波

1.1 電磁、遅延ポテンシャル

3.1 運動する荷電粒子がつくる電磁場

1.2 双極子放射

3.2 相対論的運動がつくる電磁波

2. 光学

2.1 電磁波の反射・屈折・回折

- 軌道放射

2.2 空洞共振器、導波路

- チェレンコフ放射

## 1.3.6 生物物理学：桑島 邦博、能瀬 聡直

1. 序

5. 蛋白質の物性

1.1 生物物理学とは何か、細胞の組成と構造、蛋白質や核酸などの生体分子

5.1 蛋白質の熱力学的安定性、可逆変性の熱力学的解析、二状態モデル

1.2 分子レベルの生命現象

5.2 蛋白質の構造形成（フォールディング）

2. 熱力学的取り扱い

6. 脳神経系の生物物理

2.1 熱力学の第一法則とエネルギー保存則、第二法則とエントロピー

6.1 神経ネットワークの構造と機能、ネットワーク解析の方法論

2.2 自由エネルギー（自発性の指標）、化学ポテンシャルと化学平衡

7. 脳高次機能：視覚系を例として

3. 生体系の物理的相互作用

7.1 網膜・1次視覚野における情報抽出、大脳視覚野における高次処理

3.1 静電相互作用・van der Waals 相互作用・水素結合、水の性質と疎水性相互作用

8. 記憶システム

3.2 電解質溶液中での静電相互作用

8.1 記憶とは何か、記憶の起こる仕組み、記憶のモデル

4. 蛋白質の構造

9. 記憶の分子機構

4.1 アミノ酸の特性と化学構造、蛋白質の立体構造

9.1 シナプス可塑性、長期増強現象、分子イメージングによる可塑的变化の観察

## 10. 神経系における信号の生成と伝達機構

- 10.1 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

## 11. 神経ネットワーク形成機構

- 11.1 脳と遺伝子、神経配線の仕組み、神経活動依存的過程

## 1.3.7 統計力学 II: 宮下 精二

## 1. 相互作用がある系での相転移

- 1.1 相互作用のある系での統計力学の方法  
1.2 相転移(気相・液相相転移, 強磁性相転移)  
1.3 分子場近似  
1.4 転送行列  
1.5 スケーリング則と繰り込み群の考え方

## 2. 非平衡統計力学

- 2.1 オンサーガーの相反定理  
2.2 線形応答理論  
2.3 ブラウン運動  
2.4 ランジェバン方程式とフォッカープランク方程式  
2.5 マスター方程式

## 1.4 4年生 夏学期

## 1.4.1 場の量子論 I: 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

## 1.4.2 固体物理学 I: 青木 秀夫

## 1. 固体の凝縮メカニズム

- 1.1 序: 何故固体物理か  
1.2 結合形態と凝集力

## 2. 結晶構造

## 3. 電子のバンド構造とフェルミ面

- 3.1 Bloch の定理  
3.2 バンド・ギャップとフェルミ面

## 3.3 殆ど自由な電子 vs 強結合模型

## 4. 半導体

- 4.1 バンド構造と電子物性  
4.2 電子と正孔

## 5. 金属と絶縁体

- 5.1 Wilson の理論  
5.2 Mott の金属・絶縁体転移

## 1.4.3 一般相対論: 須藤 靖

## 1. 特殊相対論とミンコフスキー時空

- 1.1 ニュートン力学とガリレイの相対性原理

- 1.2 ガリレイ変換からローレンツ変換へ
  - 1.3 エーテル仮説と光速不変の原理
  - 1.4 ミンコフスキー時空
  - 1.5 ミンコフスキー時空におけるスカラー, ベクトル, テンソル
  - 2. 数学的準備
    - 2.1 特殊相対論の限界: 慣性系とは? 重力は“力”か?
    - 2.2 一般共変性とテンソル
    - 2.3 平行移動と共変微分
    - 2.4 一般のテンソルの(共変)微分
    - 2.5 リーマン接続とクリストッフェル記号
    - 2.6 平行移動とリーマンの曲率テンソル
  - 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  $A^{\mu}$
  - 4. 重力場の方程式
    - 4.1 マッハの原理
    - 4.2 エネルギー運動量テンソル
    - 4.3 アインシュタイン方程式への道
    - 4.4 ニュートン理論との対応
    - 4.5 宇宙定数
  - 1.4.4 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
        - 4.6 変分原理による定式化
        - 5. シュワルツシルド時空
          - 5.1 球対称重力場の計量
          - 5.2 シュワルツシルド 解導出の概略
          - 5.3 シュワルツシルド 計量
          - 5.4 一般相対論の検証
        - 6. コンパクト天体
          - 6.1 トールマン・オッペンハイマー・ボルコフ 方程式
          - 6.2 TOV 方程式の解き方
          - 6.3 シュワルツシルドの内部解
          - 6.4 重力質量と固有質量
          - 6.5 エネルギー運動量保存則
          - 6.6 ポリトロープ星とレイン・エムデン方程式
          - 6.7 エムデン解
          - 6.8 ビリアル定理と星の安定性
          - 6.9 白色矮星
          - 6.10 チャンドラセカール質量
          - 6.11 中性子星
        - 7. 重力波
          - 7.1 アインシュタイン方程式の弱場近似
          - 7.2 重力波の平面波解
          - 7.3 測地線偏差の方程式と重力波検出原理
- 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

## 4.4 流体プラズマの不安定性

## 4. 流体プラズマ中の波動と不安定性

## 5. プラズマの運動論

## 4.1 非等方分散媒体中の小振幅波動

## 5.1 ヴラソフ方程式

## 4.2 磁場のないプラズマ中の波動

## 5.2 プラズマ波動の運動論的效果

## 4.3 磁場のあるプラズマ中の波動

## 5.3 速度空間不安定性と非線形理論

## 1.4.5 原子核物理学：初田 哲男

## 1. 物質の階層構造と宇宙の進化

## 5.2 中性子による核分裂と連鎖反応

## 1.1 物質の基本構成要素と4つの基本相互作用

## 5.3 軽い原子核の核融合反応

## 1.2 宇宙進化の概略

## 5.4 恒星の内部での核融合反応

## 2. ハドロン構造と核力

## 6. 宇宙における元素合成

## 2.1 ハドロン構造のクォーク・グルオン複合モデル

## 6.1 軽元素の起源と恒星の進化

## 2.2 中間子交換による核力

## 6.2 重元素の起源と超新星爆発

## 2.3 湯川ポテンシャルの導出

## 6.3 ビッグバン宇宙での軽元素合成

## 3. 原子核の安定性

## 6.4 陽子・中性子の起源とクォーク-ハドロン相転移

## 3.1 原子核の半径と密度の飽和性

## 7. 原子核の量子構造

## 3.2 原子核の質量公式と結合エネルギーの飽和性

## 7.1 原子核の魔法数と殻モデル

## 4. 原子核の崩壊

## 7.2 原子核の集団運動

## 4.1 原子核のベータ崩壊とハイゼンベルグの谷

## 7.3 原子核の超流動

## 4.2 原子核のアルファ崩壊とガモフの理論

## 8. 最近のトピックス

## 4.3 原子核崩壊を利用した地球の年齢測定

## 8.1 中性子星の構造と高密度核物質

## 5. 核分裂と核融合

## 8.2 クォーク・グルオン・プラズマと高温核物質

## 5.1 自然核分裂

## 8.3 深く束縛した中間子原子核

## 1.4.6 統計物理学特論：高山 一

## 1. 序

## 3.1 臨界指数

## 1.1 協力現象、スピン系、スピングラス、計算(物性)物理

## 3.2 スケーリング不変性

Kadnoffの粗視化、ハイパースケーリング

## 2. 相転移現象(簡単なモデル)

## 3.3 有限サイズスケールリング

## 2.1 平均場近似、平均場モデル

補 計算物理1:モンテカルロ法

## 2.2 球(無限成分)モデル

## 4. 実空間くりこみ群法

## 2.3 Ginzburg-Landau(GL)モデル

## 4.1 1D Ising 模型

## 3. 臨界現象とスケールリング則

## 4.2 三角格子 Ising 模型

- 4.3 RG 変換と臨界現象
    - Migdal-Kadanoff 法
  - 5. くりこみ群の理論の枠組み
    - 5.1 くりこみ群変換
      - 固定点、RG フロー、臨界多様体
    - 5.2 自由エネルギー密度の変換とスケーリング則
    - 5.3 クロスオーバー現象
  - 4.4  $\epsilon$ -展開法
    - $\phi^4$  模型、波数空間 RG 法、Wilson-Fisher 固定点
  - 6. スピングラス現象と Edwards-Anderson 理論
    - 6.1 レプリカ法
  - 7. スピングラスの平均場理論
    - 7.1 Sherrington-Kirkpatrick 模型
    - 7.2 レプリカ法とハリジのレプリカ非対称 (RSB) 解
    - 7.3 実磁化空間法—TAP の方法
    - 7.4 TAP 自由エネルギーの多谷構造とパリジの RSB 解
      - 多谷構造の階層性
    - 7.5 スピングラス平均場理論描像の展開
      - K-SAT 問題
  - 8. 現実 (短距離相互作用) のスピングラスが示す現象
    - ドロップレット描像
- 補 計算物理 2 : 計算機実験によるスピングラス相の研究

#### 1.4.7 量子光学：酒井 広文

- 1. 原子と放射の相互作用
  - 1.1 時間に依存する Schrödinger 方程式
  - 1.2 相互作用ハミルトニアン
  - 1.3 遷移速度
  - 1.4 B 係数の表式
  - 1.5 光学 Bloch 方程式
  - 1.6 Rabi 振動
  - 1.7 放射広がり
  - 1.8 飽和広がり
  - 1.9 放射減衰を伴う Rabi 振動
  - 1.10 衝突広がり
  - 1.11 Doppler 広がり
  - 1.12 合成吸収線の形状
- 2. 電磁場の量子化
  - 2.1 古典電磁場のポテンシャル論
  - 2.2 Coulomb ゲージ
  - 2.3 自由古典場
  - 2.4 量子力学的調和振動子
  - 2.5 場の量子化
  - 2.6 場の交換の性質
  - 2.7 零点エネルギー
- 2.8 モード位相演算子
- 2.9 単一モード個数状態の物理的性質
- 2.10 コヒーレント光子状態
- 2.11 単一モードコヒーレント状態の物理的性質
- 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
- 4. レーザーの基礎
  - 4.1 光共振器のモード
  - 4.2 光共振器の安定性
  - 4.3 発振条件
  - 4.4 各種のレーザー
    - 4.4.1 3 準位レーザーと 4 準位レーザー
    - 4.4.2 固体レーザー
    - 4.4.3 気体レーザー
    - 4.4.4 色素レーザー
    - 4.4.5 半導体レーザー

## 1.5 4年生 冬学期

### 1.5.1 宇宙物理学：須藤 靖

#### 1. 自然界と宇宙物理学

##### 1.1 自然界の論理構造

##### 1.2 宇宙物理学とは何か

#### 2. 宇宙の階層構造

##### 2.1 地球：惑星

##### 2.2 月：衛星

##### 2.3 太陽：恒星

##### 2.4 太陽系：我が惑星系

##### 2.5 天の川：我々の銀河系

##### 2.6 銀河

##### 2.7 銀河群

##### 2.8 銀河団

##### 2.9 銀河宇宙

##### 2.10 宇宙の大構造

##### 2.11 宇宙の階層構造のまとめ

#### 3. 物理法則と天体

##### 3.1 物理法則と初期条件

##### 3.2 木星型(ガス)惑星

##### 3.3 地球型(岩石)惑星

##### 3.4 恒星(主系列星)

##### 3.5 白色矮星

##### 3.6 中性子星

##### 3.7 銀河

##### 3.8 銀河団

##### 3.9 宇宙の階層と基本物理定数

#### 4. 相対論的宇宙モデル：膨張宇宙の力学

##### 4.1 宇宙原理と宇宙の一様等方性

##### 4.2 ロバートソン・ウォーカー計量の幾何学的性質

##### 4.3 アインシュタイン方程式からフリードマン方程式へ

##### 4.4 宇宙の状態方程式と宇宙定数

##### 4.5 アインシュタイン・ドジッター宇宙モデル

##### 4.6 フリードマン宇宙モデル

##### 4.7 宇宙の加速膨張と宇宙定数・ダークエネルギー

#### 5. 宇宙の熱史

##### 5.1 輻射優勢期におけるフリードマン方程式

##### 5.2 素粒子と宇宙の熱史

##### 5.3 輻射優勢期における宇宙の温度の進化

##### 5.4 粒子数の凍結

##### 5.5 宇宙背景ニュートリノ

#### 6. ビッグバン元素合成: from $\alpha\beta\gamma$ to XYZ

##### 6.1 元素の存在量 (X, Y, Z)

##### 6.2 元素合成の場所

##### 6.3 ビッグバン元素合成 vs 星内部での元素合成

##### 6.4 軽元素の起源: the first three minutes – $\alpha\beta\gamma$ 理論 –

##### 6.5 軽元素存在量のパラメータ依存性

##### 6.6 軽元素存在量の観測値と宇宙のバリオン密度

#### 7. 宇宙マイクロ波背景輻射

##### 7.1 マイクロ波背景輻射とは

##### 7.2 宇宙の晴れ上がりとマイクロ波背景輻射

##### 7.3 宇宙の再結合: 化学平衡とサハの式

##### 7.4 陽子の decoupling: 化学平衡からのずれと宇宙の電離度

##### 7.5 宇宙の光学的深さ

##### 7.6 宇宙マイクロ波背景輻射の温度揺らぎ

##### 7.7 バリオン・光子弾性振動と暗黒エネルギー

##### 7.8 温度揺らぎの起源と宇宙論パラメータ依存性

## 1.5.2 素粒子物理学：相原 博昭

## 1. フェルミオンフレーバーとゲージボゾン

## 1.1 レプトンとクォーク

## 1.2 相互作用とゲージボゾン

## 2. ゲージ理論と電弱統一理論

## 2.1 ラグランジアンのとめ

## 2.2 U(1) ゲージ理論

## 2.3 フォトンの質量

## 2.4 SU(2) ゲージ理論

## 2.5 ワインバーグ・サラムのラグランジアン

## 2.6 ゲージボゾン同士の相互作用

## 2.7 強い相互作用のゲージ理論

## 3. 質量の起源とヒッグス粒子

## 3.1 自発的対称性の破れ

## 3.2 ローカルゲージ対称性の自発的な破れ

## 3.3 ヒッグス機構

## 3.4 フェルミオンの質量とヒッグス粒子

## 3.5 標準理論の 18 個のパラメータ

## 4. フェルミオンの質量と小林益川理論

## 4.1 2世代のフェルミオンとカッピボ角

## 4.2 3世代(6つのクォーク)

## 4.3 小林益川行列と CP 対称性

## 5. ニュートリノ

## 5.1 ニュートリノの質量

## 5.2 ニュートリノフレーバー振動

## 1.5.3 場の量子論 II：濱口 幸一

## 1. 自由スカラー場の量子化

## 2. 相互作用するスカラー場

## 2.1 摂動論

## 2.2 S 行列

## 2.3 相互作用表示

## 2.4 Wick の定理

## 2.5 Feynman diagram

## 2.6 S 行列 遷移確率

## 3. 経路積分による量子化

## 1.5.4 生物物理学特論：桑島 邦博

## 1. 生体高分子溶液の熱力学・統計力学

## 1.1 熱力学関係式

## 1.2 化学平衡

## 1.3 生体系への統計力学の応用

## 2. 生体高分子のリガンド平衡

## 2.1 リガンド結合

## 2.2 Scatchard プロット

## 2.3 結合の協同性と Hill 定数

## 3. 生体高分子の酸-塩基平衡と静電自由エネルギー

## 3.1 酸-塩基平衡

## 3.2 解離基間相互作用

## 3.3 Debye-Hückel の理論

## 4. 鎖状高分子の統計的性質

## 4.1 末端間距離と回転半径

## 4.2 ランダムフライト鎖

## 4.3 非摂動鎖と実在鎖

## 4.4 生体高分子

## 5. 蛋白質のアロステリック転移

## 5.1 生体高分子の協同現象

## 5.2 アロステリック転移

## 5.3 MWC モデルと KNF モデル

## 4.4 アロステリック転移の実例

## 6. ポリペプチドと蛋白質の二次構造転移

- 6.1 ヘリックス - コイル転移
- 6.2 ジッパーモデルと Zimm-Bragg モデル
- 6.3  $\alpha$  ヘリックスのキャッピング相互作用
- 6.4  $\beta$  構造転移
- 7. 蛋白質のアンフォールディング転移
  - 7.1 二状態転移
  - 7.2 アンフォールディング自由エネルギー
  - 7.3 モルテン・グロビュール
- 8. 化学反応速度論
  - 7.1 経験的反応速度式と反応の次数
  - 7.1 Arrhenius の式と活性化エネルギー
  - 8.2 遷移状態説
  - 8.2 拡散律速反応
- 9. 蛋白質のフォールディング
  - 9.1 フォールディング問題
  - 9.2 フォールディング中間体
  - 9.2 フォールディング速度論と遷移状態解析法
- 10. 酵素反応速度論
  - 10.1 Michaelis-Menten の式
  - 10.2 酵素反応の阻害機構

### 1.5.5 固体物理 II : 長谷川 修司

- 1. 格子振動と熱的性質
  - 1.1 格子振動; 単一原子 1 次元格子の波動、二種原子の 1 次元格子、
  - 1.2 格子振動の量子化
  - 1.3 フォノン分光
  - 1.4 比熱; 実験事実、Dulong-Petit の法則、格子比熱、電子比熱、
- 2. 電子輸送現象
  - 2.1 Ohm 則と電気伝導度
  - 2.2 結晶内での電子の運動 (I)-電子波の波束-
  - 2.3 結晶内での電子の運動 (II)-バンド内での電子の運動-
  - 2.4 電子と正孔
  - 2.5 Boltzmann 方程式
  - 2.6 電気伝導度 - Boltzmann 描像 -
  - 2.7 不純物散乱とフォノン散乱
  - 2.8 熱電効果
- 3. 半導体
  - 3.1 半導体とは
  - 3.2 真性半導体中のキャリア濃度
  - 3.3 半導体のドーピング
  - 3.4 ドープされた半導体中のキャリア濃度
  - 3.5 半導体中の伝導度
- 3.6 pn 接合とトランジスタ; 熱平衡における pn 接合、バイアスされた pn 接合、
- 3.7 ヘテロ接合と 2 次元電子ガス、量子井戸
- 4. 超伝導
  - 4.1 超伝導の歴史
  - 4.2 完全導体と完全反磁性 (マイスナー効果)
  - 4.3 London 方程式
  - 4.4 その他の実験事実; エネルギー・ギャップ、比熱、同位体効果、
  - 4.5 超伝導の機構 - Fröhlich の理論 -
  - 4.6 Cooper 対の形成
  - 4.7 BCS 理論
  - 4.8 超伝導電流と臨界電流
  - 4.9 BCS 基底状態とマイスナー効果
  - 4.10 磁束の量子化
- 5. 磁性
  - 5.1 原子・イオンの常磁性・反磁性 (気体の磁性)
  - 5.2 自由電子ガスの磁性
  - 5.3 自由電子間の交換相互作用
  - 5.4 強磁性体のバンドモデル
  - 5.5 バンド強磁性体の自発磁化の温度依存性
  - 5.6 局在電子間の強磁性結合

## 1.5.6 化学物理学：山本 智

## 1. 原子の電子状態とスペクトル

## 1.1 水素および水素類似原子

## 1.2 ヘリウム原子

## 1.3 HF-SCF 法

## 1.4 原子スペクトル

## 1.5 スピン軌道相互作用

## 2. 分子の対称性と群論

## 2.1 対称操作と点群

## 2.2 既約表現と可約表現

## 2.3 指標表による表現の簡約

## 2.4 直積の表現

## 2.5 積分の評価

## 3. 分子の電子状態とスペクトル

## 3.1 Born-Oppenheimer 近似

## 3.2 水素分子

## 3.3 分子軌道法の考え方

## 3.4 2原子分子の電子状態

## 3.5 電子相関

## 3.6 ab initio 計算

## 3.7 近似的分子軌道法計算

## 3.8 化学反応への応用

## 3.9 分子スペクトルの概要

## 3.10 星間分子への応用

## 4. 分子集合体

## 4.1 分子間力

## 4.2 分子衝突と化学反応

## 4.3 化学平衡

## 2 各賞受賞者紹介

### 2.1 内田慎一教授：カマリング - オンネス賞

内田慎一教授がカマリング - オンネス賞を受賞された。この賞の名前となっているカマリング - オンネス (Kammerling Onnes) とは、1911年に超伝導現象を発見したオランダの物理学者の名前で、これに因んで超伝導に関する実験のうち、特に際立った業績に対して与えられる。この賞は3年に一度「超伝導・高温超伝導の物質とメカニズムに関する国際会議」において発表され、2006年の会議において、内田教授らの「銅酸化物高温超伝導体における異常金属相に対する先駆的かつ根本的な輸送特性の実験」に対して授与された。

ちょうど20年前の1986年、それまでの予想をはるかに越えた高い温度で超伝導を示す一連の銅酸化物として高温超伝導体が見出された。内田教授は当時工学部において高木氏(当時大学院生)、北澤教授、田中教授と共に世界に先駆けて高温超伝導体の結晶構造をつきとめた。この研究をきっかけとして、世界中で高温超伝導体の真剣な物性研究が始まり、その後も内田教授は高精度の試料と共に、非常に興味深い高温超伝導体の性質を次々と明らかにしてきた。例えば研究の初期の段階で、光学伝導度の実験から、絶縁体に注入された電気伝導を担う粒子(キャリア)の性質の特異性を明らかにした。また、高温超伝導を示す2次元面内と面間の電気抵抗が非常に珍しい特徴をもつことを示し、通常の金属では理解できないということを明確に示した。さらに、現在「ストライプ状態」と呼ばれている状態は、内田教授の国際共同研究によって見出されたものである。この状態は、電荷とスピンの2次元面内で規則的に並ぶという状態で、他の固体物理学の分野へも大きな影響を及ぼしている。このように内田教授は高温超伝導体における異常な物理現象を、とくに電荷の自由度という観点から明らかにするという研究を、世界をリードして行ってきたことが評価されたものである。

### 2.2 牧島一夫教授、中澤知洋講師、釜江常好名誉教授、高橋忠幸教授 (JAXA, 協力講座) ほか：日本天文学会欧文研究報告論文賞

Makishima *et al.*: *Publ. Astr. Soc. Jp.* **53**, 401–420, “X-Ray Probing of the Central Regions of Clusters of Galaxies” (2001) が、「過去5年以内に掲載された論文のうち独創的なもの」として、第11回(2006年度)日本天文学会欧文研究報告論文賞を受賞した。本論文は、「銀河団を満たす高温プラズマは宇宙年齢かけて放射冷却する」という従来の定説を、「あすか」衛星による銀河団のX線観測を通じ、覆したものである。特筆すべきは、13名の共著者のうち6名が本教室を拠点に博士学位を取得しており、彼らの学位論文を統一することで、本論文のシナリオがおのずと浮上したという点にある。6名のうち池辺靖(1994年; 現・日本科学未来館勤務)、田村隆幸(1998年; 現・JAXA助手)、松下恭子(天文学専攻1997年、現・東京理科大講師)の3名は牧島研の課程博士、江澤元(1998年; 現・国立天文台助教)は釜江研の課程博士、深沢泰司(牧島研出身、元・釜江研助手、現・広島大準教授)は論文博士(1997年)、徐海光(Xu HaiGuan; 現・上海国立大学教授)は上海国立大学より牧島研に国費留学し、その成果にもとづき帰国後に母校より博士学位を授与されている。

### 2.3 所裕子(宮下研究室): 第 87 日本化学会年会 「優秀講演賞」

宮下研究室の所裕子氏が、日本化学会年会で発表された講演のうち発表内容・プレゼンテーション・質疑応答などにおいて特に優れた講演に対して送られる、第 87 日本化学会年会「優秀講演賞」を受賞しました。この賞は、若手研究者の今後の一層の研究活動進展と活性化をはかることを目的として、満 35 歳以下若手研究者に対して授与されるものです。所氏は、本専攻の宮下精二教授、理学系研究科化学専攻の大越慎一教授、工学系研究科応用化学専攻の橋本和仁教授と共同で、金属錯体を舞台に新しいタイプの光誘起相転移現象を見出し、その現象を熱力学的に解明する研究に取り組んできたことが評価されました。

### 2.4 金井恒人博士(酒井広文研究室): 第 23 回井上研究奨励賞

金井恒人氏(現在、理化学研究所基礎科学特別研究員)が、第 23 回井上研究奨励賞を受賞した。井上研究奨励賞は、優れた博士論文を提出した若手研究者を対象とするものであり、同氏の博士論文 Ultrafast Tomography of Molecular Orbitals with High-Order Harmonic Generation (高次高調波発生を用いた分子軌道の超高速トモグラフィ)が高く評価された。一連の研究は、配列分子中からの高次高調波発生の物理過程の解明に大きく貢献するものである。実験的には、配列した二酸化炭素分子を試料とし、高調波とイオンを同一条件下で観測する独自の実験手法の導入により、高調波発生の再結合過程において電子の波の量子干渉効果(ここでは強く打ち消しあう効果)が起こっていることを示す異論の余地のない結果を得ることに初めて成功した。この干渉効果は、世界の複数の研究機関がその観測に鎬を削っていた効果であり、分子の瞬間的な構造を 1 フェムト秒 (=  $10^{-15}$  秒) の極限的短時間精度で調べるための全く新しい手法になりうると期待されている。さらに、高調波発生の楕円率依存性が分子軸と楕円偏光の長軸の配置によって異なることや楕円率依存性にも量子干渉効果が現れることを初めて観測した。理論的には、原子に対して提案されていたモデルと分子軌道法を組み合わせた新たなモデルを構築し、実験結果を説明することに見事に成功した。

### 2.5 松浦妙子博士(初田研究室): 第 23 回井上研究奨励賞

受賞対象となった松浦妙子氏の博士論文“Ginzburg-Landau approach to color superconductivity”「カラー超伝導のギンツブルグ・ランダウ理論による研究」では、カラー超伝導から常伝導への相転移やカラー超伝導相の相構造の研究が、電気的中性条件・平衡条件・ストレンジクォーク質量を考慮したギンツブルグ・ランダウ型の有効理論を基礎に行われています。特に、新しいタイプのカラー超伝導相(dSC相)を理論的に発見したこと、カラー超伝導相中の新しいタイプの渦励起を発見したことが高く評価されました。

### 2.6 西田祐介博士(初田研究室): 第 1 回日本物理学会若手奨励賞・第 8 回核理論新人論文賞

受賞対象となったのは西田祐介博士の論文“Epsilon expansion for a Fermi gas at infinite scattering length”(Yusuke Nishida and Dam Thanh Son), Physical Review Letters **97** (2006) 050403 です。短距離相互作用するフェルミ気体において、散乱長が発散する強相関領域はユニタリー極限と呼ばれます。西田博士の論文では、ユニタリー極限にある強相関フェルミ気体に対する新しい手法として、空間次元の 4 次元からのずれ ( $\epsilon = 4 - d$ ) をパラメータとする展開法が提唱され、その有効性が示されています。これは、強相関系に対する独創的な方法であり、ユニタリー・フェルミ気体の系統的分析を初めて可能にしたことが高く評価されて

います。また、この方法は、BEC-BCS クロスオーバー領域における原子気体のみならず、中性子星などの核物質系に対しても広く応用が期待されています。

### 2.7 竹内一将君 (佐野研究室) : 東京大学総長特別賞、東京大学総長賞、理学系研究科研究奨励賞

竹内一将君が、平成 18 年度第 2 回学生表彰「東京大学総長賞」を受賞した。また、今年度から新たに設けられた総長大賞の審査会において、総長特別賞に選ばれた。竹内氏は非平衡系における相転移現象の重要性を早くから認識し、手法に捉われない多角的なアプローチによって実験・理論の双方において業績を挙げてきた。中でも特筆すべきは Directed Percolation (DP) 転移普遍性の実在証明である。入ったら出られない状態への転移は DP 転移と呼ばれ、理論の上では物理・化学・生物のあらゆる分野で普遍的な挙動が見られるが、十分な実験的証拠は存在しなかった。同氏は液晶の乱流間転移に着目し、従来謎であった履歴現象が DP 転移に起因することを看破し、高精度実験によって DP 普遍性がそこに実在することを示した。これは約 20 年間懸案であった問題に決着をつける快挙であり、重要な学術成果である。

### 2.8 酒井志朗氏 (青木研究室) : 第 1 回理学系研究科研究奨励賞 (博士)

酒井氏は、博士論文において、多軌道強相関電子系の優れた理論を構築した。1980 年代に銅 (遷移金属) の酸化物において発見された高温超伝導は、物性物理学の流れを変える強いインパクトを与え、強く相互作用する (強相関) 電子系は物性物理学の中心テーマとして発展をとげているが、残された大きな問題の一つに、軌道自由度がある。遷移金属化合物では各原子が複数の d 軌道をもち、軌道間交換相互作用 (Hund 結合) が存在し、これが磁性、超伝導にどの様に効くかを探求するのは急務であった。強相関問題は単一軌道ですら難しいが、酒井氏は、強相関系に対する方法である動的平均場を量子モンテカルロ法 (QMC) で解く枠組みを多軌道系に拡張した。この方法で Hund 結合を正しく取り入れるのは困難なことが知られていたが、酒井氏はこれを新たなアルゴリズムを開発することで乗り越え、世界に先駆けて定式化を行った。さらに最近わが国で発見された超伝導体であるルテニウム酸化物に適用した。酒井氏のこの仕事は、博士課程在学中に、ドイツの Max-Planck 研究所に数ヶ月滞在したときに、第一原理電子状態の国際的リーディング・グループの一つである Karsten Held 博士と行った共同研究が推進力の一つであり、Held 博士からも高い評価を得た。酒井氏は国内外の学会でも積極的に発表している。

### 2.9 西田祐介博士 (初田研究室) : 第 1 回理学系研究科研究奨励賞 (博士)

西田祐介博士は、博士課程において、高密度クォーク物質における超流動・カラー超伝導や BCS-BEC クロスオーバーの理論的研究を行うとともに、ユニタリー極限における強相関フェルミ原子気体に関する新しい解析手法を提唱するなど、分野を越えて広く多体問題の理論研究に取り組み顕著な成果をあげました。

### 2.10 和達大樹博士 (藤森研究室) : 第 1 回理学系研究科研究奨励賞 (博士)

強相関電子系は、高温超伝導など既存のバンド理論で理解できない現象が多く、物性物理学における最重要かつ最難関と考えられる課題である。光電子分光法はこれらの系の研究において最も有力な情報を与える実験手法であるが、物質によっては表面処理の難しさから適用が不可能で行き詰まっていた。和達氏は試料

を薄膜化し *in situ* ( その場 ) で光電子分光を行うことで、この行き詰まりを打破した。薄膜の単結晶表面を用いた Fe 酸化物の研究、薄膜の基板からのひずみの効果を観測した Mn 酸化物の研究、薄膜でしか存在しない界面に着目した V 酸化物の研究など特筆すべき研究成果をあげ、その業績が高く評価された。

## 2.11 日下暁人博士 (相原研究室): 第 1 回理学系研究科研究奨励賞 (博士)

日下君の博士論文: "Measurement of CP-Violating Asymmetries in the Neutral B Meson Decaying to the  $\rho$  State Using a Time-Dependent Dalitz Plot Analysis" に対して、平成 18 年度理学系研究科研究奨励賞が授与された。日下氏は、本論文において B 中間子の  $\rho$  中間子と  $\pi$  中間子への崩壊における粒子と反粒子の対称性の破れ ( CP 対称性の破れ ) を、終状態の運動学を記述する Dalitz plot と B 中間子崩壊の時間発展測定とを組み合わせるといふ新しい解析手法を用いて、世界に先駆けて測定した。その結果、素粒子の標準理論の検証に新たな精密データを提供しただけでなく、今後の B ファクトリー実験での CP 非対称測定の新しい方向を打ち出し、その業績が高く評価された。

## 2.12 榎戸輝揚君 (牧島研究室): 第 1 回理学系研究科研究奨励賞 (修士)

榎戸君 (現・牧島研博士 1 年) は、修士課程における優れた研究業績により、標記の荣誉に輝いた。同君は「すざく」衛星を用いた X 線パルサーの観測や、搭載された硬 X 線検出器の時刻づけ検証を中心となって遂行するとともに、修士論文では、宇宙における電場加速のモデルケースとして、雷に伴う粒子加速の実験的検証に取り組んだ。研究室メンバーの協力や、試作室・大塚技術職員の懇切な指導を得て、彼は自律機能をもった小型ガンマ線計測装置を設計・製作・校正し、本郷キャンパスでの試験観測ののち、12 月下旬に柏崎の刈羽原子力発電所に装置した。遠隔運転を続けたところ、2007 年 1 月 7 日の未明、強い冬型気圧配置に伴う活発な雷雲活動のさい、落雷の前駆現象と思われる、約 1 分間つづくガンマ線の到来を、みごと検出することに成功したものである。ガンマ線のエネルギーは 10 MeV にも達しており、雷雲の強い電場で粒子が加速されていることを明確に検証することに成功した。

## 2.13 川崎真介君 (駒宮研究室): 第 1 回理学系研究科研究奨励賞 (修士)

修士論文: 「超冷中性子用ピクセル検出器の開発」重力場中での超冷中性子の量子化分布を精密に観測することで、短距離での重力相互作用を検証する。更に新たな近接力が探索できると期待される。実験装置は中性子の分布を拡大する光学系と中性子検出器からなる。これまでに光学系の設計を終え、中性子検出器のプロトタイプを製作し、実験に供し得るを確認した。中性子検出器は、CCD 表面に  ${}^6\text{Li}$  中性子コンバータ膜を蒸着することにより、中性子を荷電粒子に変換して検出するものである。高い位置分解能を持ち、かつ、リアルタイムに測定のできるこのような中性子検出器は従来ない。今後、物性物理などの科学計測に用いられるだけでなく広く一般に利用される検出器となるはずである。

## 2.14 高吉慎太郎君、中村栄太君、森本高裕君: 第 1 回理学部研究奨励賞 受賞者

### 3 人事異動

#### [物理学教室にいられた方々]

濱口 幸一	助教授	2006年4月1日	採用
高坂 洋史	助手	2006年4月1日	採用
新井 烈	物理事務室	2006年4月1日	配置換(附属演習林秩父演習林)
森本 知草	物理事務室	2006年4月1日	採用(京都大学工学研究科総務課)
原 真美	第二事務分室	2006年4月1日	採用
小野田 恵子	第三事務分室	2006年4月1日	配置換(理学系研究科事務部)
三宅 千夏	第一事務分室	2006年4月16日	採用
上間 よしみ	物理教務	2006年7月1日	配置換(学生部キャリアサポートグループ)
奥村 知恵子	第一事務分室	2006年7月1日	採用
板垣 直之	特任助教授	2006年6月16日	採用
枅富 龍一	助手	2006年9月1日	採用
小沢 恭一郎	講師	2006年10月16日	昇任(原子核科学研究センター助手)
平野 哲文	講師	2006年10月16日	採用
北川 眞弓	物理事務室	2006年12月1日	採用
加藤 眞里子	物理教務	2006年12月18日	採用
渡利 泰山	助手	2007年1月1日	採用
平原 徹	助手	2007年1月1日	採用
藤森 淳	教授	2007年3月1日	配置換(新領域創成科学研究科教授)
吉田 鉄平	助手	2007年3月1日	配置換(新領域創成科学研究科助手)

#### [物理学教室から移られた方々]

三宅 千夏	第一事務分室	2006年5月2日	辞職
板垣 直之	助手	2006年6月15日	辞職
藪下 篤史	助手	2006年6月30日	辞職
長島 優子	物理事務室	2006年7月1日	昇任(海洋研究所総務課主任)
小幡 寿美	物理事務室	2006年9月22日	辞職
江尻 信司	助手	2006年10月15日	辞職
高山 紅美	物理教務	2006年11月30日	辞職
国分 紀秀	助手	2006年11月30日	辞職(宇宙航空研究開発機構助教授)
松田 巖	助手	2006年12月1日	昇任(物性研究所助教授)
桑島 邦博	教授	2006年12月31日	辞職(自然科学研究機構教授)
和達 三樹	教授	2007年3月31日	定年退職
櫻村 圭造	技術専門員	2007年3月31日	定年退職
江口 徹	教授	2007年3月31日	辞職(京都大学基礎物理学研究所教授)
槇 互介	助手	2007年3月31日	辞職(自然科学研究機構助手)
能瀬 聡直	助教授	2007年4月1日	昇任(新領域創成科学研究科教授)
森本 知草	物理事務室	2007年4月1日	配置換(理学系研究科事務部)

## 4 役務分担

役務	教官	技術職員・事務職員・事務補佐員
専攻長・学科長	内田	新井, 川崎, 森本, 佐々木
幹事	大塚, 山本	新井, 川崎, 森本, 佐々木
専攻主任	駒宮	佐々木, 河島, 高山
専攻副主任	福山	佐々木, 河島, 高山
常置委員	青木, 須藤	佐々木, 河島, 高山
教務係	坪野(理学部教務委員), 宮下, 長谷川, 常行(大学院)	佐々木, 河島, 高山
学生実験	蓑輪, 佐野, 島野	檜村
就職係	牧島(大学院他部局: 榊原)	横山
奨学金	佐野	佐々木
会計係	須藤(COE 担当), 島野, (小形)	新井, 川崎
号館関係	酒井(英)(1号館運営委員), 坪野(旧1号館運営委員)	新井
部屋割	岡本	新井
技術部門		
統括	坪野	大塚(茂)
試作室	坪野	大塚(茂)
薬品管理	岡本	山本
研究材料・回路	酒井(広)	檜村, 蝦原
IT関連	早野	藤代
衛生安全	早野	佐伯
低温	岡本	
電頭	長谷川	
図書係	初田(理図書委員), 青木, 長谷川, 能瀬	小野澤, 南, 森村
談話会	柳田, 初田, 須藤, 常行	田中, 原
年次報告	酒井(広)	横山
記録係	酒井(広), 浜口, (島野)	
物品供用官	酒井(英)	新井
環境安全	岡本	川崎
放射線管理	蓑輪	新井
事務分室	第1: 相原, 第2: 須藤, 第3: 福山	新井
理交会	浜口	新井
教職員親睦会	岡本	親睦会委員持ち回り
建物	相原, 酒井(英)	新井
進学指導	宮下	佐々木
ホームページ	松尾	藤代

注: 太字は責任者

## 5 教室談話会

場所：理学部4号館1320号室(3階)または1220号室(2階)

- 2006年6月23日 16:30~17:30  
濱口 幸一 氏 ( 東京大学大学院理学系研究科 )  
「グラビティーノが拓く新しい物理」
- 2006年9月29日 16:30~17:30  
岡田 真人 氏 ( 東京大学大学院新領域創成科学研究科&理化学研究所脳科学総合研究センター )  
「脳科学と情報科学への統計力学的アプローチ」
- 2006年10月6日 16:30~17:30  
中迫 雅由 氏 ( 慶應義塾大学 理工学部 )  
「ナノメートルスケールで探る生命と水の関わり」
- 2006年10月27日 16:30~17:30  
金子 邦彦 氏 ( 東京大学大学院 総合文化研究科 )  
「生命システムの物理 -コンシステンシー原理による普遍法則探求-」
- 2006年12月1日 16:30~17:30  
小林 誠 氏 ( 国際高等研究所 )  
「素粒子物理学はどこへ向かうのか」
- 2006年12月8日 16:30~17:30  
樋口 秀男 氏 ( 東北大学 先進医工学研究機構 )  
「1分子計測から生命の理解へ」
- 2007年2月9日 16:30~18:00  
和達 三樹 氏 ( 東京大学大学院理学系研究科 )  
「私の物性基礎論・統計力学 - 研究者として、教育者として - 」(最終講義)

## 6 物理学教室コロキウム

- 平成 18 年 4 月 21 日 ( 金 ) 16:30-18:00  
高安 秀樹 氏 ( ソニー CSL )  
「物理学が解き明かす経済現象」
- 平成 18 年 5 月 26 日 ( 金 ) 16:30-18:00  
Harry L. Swinney 氏 ( University of Texas at Austin )  
“Emergence of Spatial Patterns in Physical and Biological Systems”
- 平成 18 年 7 月 7 日 ( 金 ) 16:30-18:00  
初田 哲男 氏 ( 東京大学 )  
「超高温物質：クォーク・グルオン・プラズマに迫る」
- 平成 18 年 10 月 20 日 ( 金 ) 16:30-18:00  
永長 直人 氏 ( 東京大学 )  
「固体電子が見る“時空” - 強相関電子系のゲージ理論 - 」
- 平成 18 年 11 月 10 日 ( 金 ) 16:30-18:00  
柴田 大 氏 ( 東京大学 )  
「数値相対論への招待 - 連星中性子星の合体と重力波 - 」
- 平成 18 年 12 月 15 日 ( 金 ) 16:30-18:00  
Jose N. Onuchic 氏 ( University of California, San Diego )  
“Introduction to Theoretical Biophysics”  
- Energy Landscape for Folding and Function of Proteins -