

Department of Physics
School of Science
University of Tokyo

Annual Report
2003

平成15年度 年次研究報告

東京大学 大学院 理学系研究科・理学部
物理学教室

序

平成 15 年度 (2003 年 4 月 ~ 2004 年 3 月)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・理学部物理学科の年次報告をお届け致します。この小冊子が物理学教室で行われている活発な研究・教育の現状を知って頂く手がかりとなれば幸いです。

初めに教官の異動についてですが、平成 15 年度には、島野亮助教授が工学部物理工学科から着任されました。島野助教授の専門は、光物性、特にテラヘルツ領域の分光光学で、meV の光子エネルギー領域の時間分解分光法の開発に取り組んでおられます。当教室ですます研究を進展させられるとともに、教育にも大いに寄与していただけるものと期待しております。

今年度は藤川和男教授と塚田捷教授が定年退官なされました。藤川先生は素粒子理論の分野、特にゲージ理論や場の理論における量子異常の研究で優れた業績をあげられました。経路積分を用いたカイラル・アノマリーの導出は藤川の方法として広く用いられています。また、塚田先生は表面物理の理論的研究の開拓者的な存在で、この方面の研究の発展に多くの貢献を残されました。両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ご尽力に対しまして深く感謝申し上げます。

次に、本年度も喜ばしいご報告があります。まず、本学名誉教授の西島和彦先生が平成 15 年度の文化勲章を受章されました。西島先生による素粒子のストレンジネスの導入は素粒子の強い相互作用、弱い相互作用の違いを明確にし、その後の素粒子物理の発展の基礎を形作ったもので、そのお仕事は西島-ゲルマンの公式としても広く知られています。

また、本学名誉教授の小柴昌俊先生が本年度の勲一等旭日大綬章を受章されました。超新星爆発によるニュートリノを観測しニュートリノ天文学という新分野を切り開いた業績で小柴先生が 2002 年度のノーベル物理学賞を受賞されたことは物理学教室にとって大変にうれしいニュースでしたが、本年度はノーベル賞に引き続きご栄誉となります。

また、相原博昭教授が B ファクトリーの C P 非保存の実験に関する業績で井上術賞、柳田勉教授がニュートリノの質量生成機構の研究でフンボルト賞、小林孝嘉教授が高速レーザーの開発で日本分光学会賞を受賞されています。さらに院生の山口英斉君 (早野研究室) が東京大学総長賞を受賞しています。ここに物理学教室を代表いたしまして、皆様の受章 (受賞) に心からお祝いを申し上げます。

さて、平成 15 年度は物理学教室にとって慌ただしい一年でもありました。その主な理由は「21 世紀 COE プログラム」の立ち上げと、平成 16 年度から始まる国立大学法人化への取り組みです。現在物理学教室は宇宙線研究所、物性研究所、原子核科学研究センター、素粒子物理国際研究センター、ビッグバンセンターなどと共に「極限量子系とその対称性」をテーマとして「21 世紀 COE プログラム」を推進しています。このプログラムは、物理学専攻を世界の研究教育拠点を形成することを目指すもので、R A などによる院生の研究参加と財政的な支援、海外の優れた研究者による集中講義、分野横断的な国際会議の開催、学会発表などのための学生の海外派遣、院生ための実践的な英語教育の実施などの活動を行っています。このプロジェクトは今年度の後期から開始されましたがその活動は順調に立ち上がっており、本年 2 月に山上会館で行われた COE 国際会議の内容はホームページで見ることが出来ます。

さていよいよ平成 16 年度から「国立大学法人東京大学」として新たな東京大学の歴史が始まりました。法人化に伴い大学の組織・運営に大幅な変更が導入されようとしています。しかしこうした改革が我々にとって真に望ましいものとなるかどうか、まだまだ先行きは不透明といわざるをえません。私達はこれまで数多くの優れた研究者を輩出してきた理学部物理学教室の伝統的を受け継ぎつつ、21 世紀における更なる躍進を目指して不断の努力を傾けなければならないと考えております。大学法人化が開始された今年度はまさに試練の年になりそうです。諸先輩方、関係各位の皆様におかれましても、今後のご支援ならびにご助言を改めて

お願い申し上げる次第です。

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

2004年5月31日

物理学専攻長・教室主任
江口 徹

目次

I	研究室別 2003 年度 研究活動報告	1
1	原子核・素粒子理論	3
1.1	原子核理論研究室(大塚・初田)	3
1.1.1	原子核構造	4
1.1.2	ハドロンの物理	6
1.2	素粒子論研究室(藤川・江口・柳田・松尾)	12
1.2.1	弦理論	12
1.2.2	高エネルギー現象論	14
1.2.3	場の理論	15
2	原子核・素粒子実験	19
2.1	原子核実験研究室(酒井、早野、櫻井研究室)	19
2.1.1	偏極中性子-重陽子弾性散乱測定による三体力の検証(酒井研究室)	19
2.1.2	陽子-重陽子散乱における超狭幅ダイバリオンの探索(酒井研究室)	20
2.1.3	不安定核ビーム ${}^6\text{He}$ と偏極陽子固体標的の散乱実験(酒井研究室)	20
2.1.4	2 陽子系のスピンを用いたベルの不等式の検証(酒井研究室)	21
2.1.5	300 MeV における (p, n) 反応のガモフ・テラー単位断面積の精密測定(酒井研究室)	22
2.1.6	π 中間子原子を用いた物質質量起源の研究(早野研究室)	23
2.1.7	反陽子ヘリウム原子・イオン(早野研究室)	23
2.1.8	レーザー実験へ向けた反水素原子の詳細研究(早野研究室)	25
2.1.9	深束縛 π^- 中間子原子生成の新しい方法の研究(早野研究室)	26
2.1.10	η 原子核形成実験に向けた位置検出型チェレンコフ検出器の較正実験(早野研究室)	26
2.1.11	反 K 中間子の ${}^3\text{He}$ 原子核による深い束縛状態の探索実験(早野研究室)	26
2.1.12	不安定核ビーム開発(櫻井研究室)	27
2.1.13	中性子過剰核の安定性(櫻井研究室)	27
2.1.14	インビームガンマ線分光法による不安定核の構造研究(櫻井研究室)	27
2.1.15	ベータ分光を用いた核構造研究(櫻井研究室)	29
2.1.16	RIBF 開発研究(櫻井研究室)	29
2.1.17	位置感応型ゲルマニウム検出器の開発(櫻井研究室)	30
2.1.18	TOF スペクトロメータ開発(櫻井研究室)	30
2.1.19	中性子過剰核の分解反応(櫻井研究室)	31
2.1.20	天体核物理(櫻井研究室)	31
2.2	駒宮研究室	38
2.2.1	最高エネルギー電子・陽電子コライダー LEP を用いた OPAL 実験	38
2.2.2	電子・陽電子リニアコライダー GLC 計画	38
2.2.3	LHC 実験 ATLAS 検出器によるブラックホール(BH) 事象解析の研究	40
2.2.4	BES-II 実験のデータを用いた $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ 過程の研究	40
2.2.5	BESS 実験	41
2.3	衰輪研究室	44
2.3.1	暗黒物質実験	44
2.3.2	アクシオンヘリオスコープ実験	45
2.4	相原研究室	47
2.4.1	B 中間子 CP 非保存現象の精密測定による新しい物理の探索	47
2.4.2	中性 B 中間子の $\pi^+\pi^-$ 崩壊における大きな CP 非対称の発見	47

2.4.3	<i>B</i> 中間子の非常に稀な崩壊の測定	48
2.4.4	Belle 実験用第二世代シリコンバーテックス検出器の完成	48
2.4.5	次世代水チェレンコフ検出器のためのハイブリッド光検出器開発	48
2.4.6	J-PARC 長基線ニュートリノ振動実験での陽子ビームプロファイルモニターの開発	49
2.4.7	ニュートリノビームラインのシミュレーション	49
2.4.8	前置検出器についてのシミュレーション	49
3	物性理論	53
3.1	和達研究室	53
3.1.1	ボース・アインシュタイン凝縮	53
3.1.2	ソリトン理論	54
3.1.3	量子多体系	54
3.1.4	非平衡統計物理	55
3.1.5	ランダム行列理論とその応用	56
3.1.6	量子情報と量子計算	56
3.1.7	可積分系と無限次元対称性	57
3.1.8	結び目理論	57
3.2	塚田研究室	60
3.2.1	ナノ構造の電気伝導の第一原理計算	60
3.2.2	金属原子鎖の量子輸送における末端効果	60
3.2.3	テーパーポルフィリン架橋系の伝導	60
3.2.4	フェナレニル関連分子の架橋系の量子伝導	60
3.2.5	螺旋型ベンゾチオフェン重合体の量子輸送	61
3.2.6	フェノキシラジカル分子架橋系におけるスピン伝導	61
3.2.7	Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の非接触原子間力顕微鏡像における探針効果	61
3.2.8	カーボンナノチューブトラスノ永久電流	61
3.2.9	走査トンネル分光法によるグラファイトのランダウ準位の観察	61
3.2.10	グラファイトのエッジ状態の理論	62
3.3	青木研究室	65
3.3.1	超伝導	65
3.3.2	非磁性元素系の電子相関による磁性	66
3.3.3	非平衡・非線形な強相関電子系 — 強電場下のモット絶縁破壊	67
3.3.4	分数量子ホール効果	67
3.3.5	3次元における整数量子ホール効果	67
3.3.6	ヘテロ界面の電子物性	68
3.3.7	周期的極小曲面上の電子	68
3.3.8	その他	68
3.4	小形研究室	71
3.4.1	高温超伝導の理論	71
3.4.2	ルテニウム酸化物におけるスピン三重項超伝導	71
3.4.3	コバルト酸化物における異方的超伝導	72
3.4.4	有機導体に関する理論	72
3.4.5	フラストレーションのある系での電子状態	73
3.4.6	1次元モデルに関する理論	73
3.5	常行研究室	77
3.5.1	窒素原子が吸着した Cu(001) 表面の自己組織化	77
3.5.2	シリコン (100) 表面の環式炭化水素	77
3.5.3	シリコン酸化物中の原子拡散挙動	78
3.5.4	量子常誘電体 SrTiO ₃ のドーピング効果	78
3.5.5	新しい電子状態計算法の開発：トランスコリレイティッド法	78
4	物性実験	81
4.1	樽茶研究室	81
4.1.1	人工原子の電子相関の研究	81
4.1.2	人工分子の電子状態の研究	81

4.1.3	電子スピン-核スピン結合の研究	82
4.1.4	量子細線 1 次元電子系の電子間相互作用の研究	83
4.1.5	固体量子計算の基礎物理とハードウェアの研究	83
4.1.6	表面敏感走査プローブを用いた状態密度の空間分布測定法の開発	84
4.2	藤森研究室	88
4.2.1	高温超伝導	88
4.2.2	強相関遷移金属酸化物	88
4.2.3	磁性半導体	89
4.2.4	ナノ物質・ナノ構造	90
4.3	内田研究室	97
4.3.1	2003 年度の研究その 1	97
4.3.2	1 次元及び梯子型 Cu 酸化物の電子相と圧力誘起超伝導	97
4.3.3	磁場と構造制御による高温超伝導体のテラヘルツ光学スペクトル操作	98
4.3.4	高温超伝導体における超伝導 ストライプ秩序競合	98
4.3.5	高温超伝導体のナノスケール不均一性と量子現象	99
4.3.6	研究その 2	100
4.4	長谷川研究室	103
4.4.1	表面電子輸送	103
4.4.2	表面構造と相転移	104
4.4.3	新しい装置の立ち上げ	106
4.5	福山研究室	110
4.5.1	超低温における量子流体/固体の研究	110
4.5.2	走査トンネル顕微鏡/分光法による低温量子物性の研究	110
4.5.3	低次元導体における量子輸送現象	112
4.5.4	超低温実験技術の開発	113
4.6	岡本 研究室	116
4.6.1	強相関 2 次元電子系	116
4.6.2	THz 光顕微鏡・走査型電位計の開発と半導体 2 次元系の量子物性研究	116
4.6.3	整数量子ホール系における Ettingshausen 効果の観測	117
4.6.4	InAs 表面反転層における電気伝導	118
5	一般物理理論	120
5.1	宇宙理論研究室 (佐藤・須藤)	120
5.1.1	初期宇宙・相対論	120
5.1.2	観測的宇宙論	122
5.1.3	天体核・素粒子物理	125
5.1.4	その他	128
5.2	村尾研究室	138
5.2.1	有限準位系におけるエンタングルメントと量子情報処理	138
5.2.2	無限準位系におけるエンタングルメントと量子情報処理	138
6	一般物理実験	141
6.1	小林 研究室	141
6.1.1	超短光パルス発生 (非線型光パラメトリック増幅: NOPA)	141
6.1.2	超短パルス分光	142
6.1.3	マルチチャンネルロックインアンプによるポリマー膜・水溶液中の分子会合体の電場変調分光	143
6.1.4	量子光学・量子通信	143
6.2	牧島研究室	151
6.2.1	太陽と星のフレアの研究	151
6.2.2	コンパクト天体の観測的研究	151
6.2.3	星間・銀河間での高エネルギー現象	151
6.2.4	Astro-E2 衛星 硬 X 線検出器 (HXD-II) の開発製作	152
6.2.5	将来に向けての技術開発	152
6.3	高瀬研究室	158
6.3.1	TST-2 球状トカマクプラズマの生成・加熱・維持実験	158

6.3.2	プラズマ計測	159
6.3.3	JT-60U トカマクにおけるプラズマ立ち上げ実験	160
6.3.4	JFT-2M トカマク周辺部における揺動と輸送	160
6.3.5	LHD ヘリカルプラズマにおける粒子輸送	161
6.4	坪野研究室	165
6.4.1	レーザー干渉計を用いた重力波の検出	165
6.4.2	熱雑音の研究	166
6.4.3	精密計測の研究	167
6.5	佐野研究室	172
6.5.1	散逸系の研究	172
6.5.2	非線形系としての生命システム	173
6.6	山本研究室	178
6.6.1	はじめに	178
6.6.2	富士山頂サブミリ波望遠鏡	178
6.6.3	可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡	180
6.6.4	テラヘルツ帯ミクサ素子の開発	181
6.6.5	実験室分子分光	181
6.7	酒井広文 研究室	184
6.7.1	静電場とレーザー電場の併用による分子の配列制御	184
6.7.2	フェムト秒パルスの偏光状態の時間変化の制御	184
6.7.3	時間に依存した偏光状態をもつ高強度フェムト秒レーザー電場による 2 原子分子のトンネルイオン化の制御	185
6.7.4	長波長レーザー電場の併用による高効率高次和・差周波発生	185
6.7.5	アト秒台パルスの発生を目指した偏光ゲート法の原理実証	186
6.7.6	非断熱的に配向した分子からの高次高調波発生	186
6.7.7	高強度レーザー電場による Xe_2 の多光子イオン化	187
6.7.8	4 年生特別実験	187
6.7.9	その他	187
7	生物物理	191
7.0.10	蛋白質工学を用いた蛋白質のフォールディング研究	191
7.0.11	細胞内での蛋白質フォールディングに関する分子シャペロンの作用機構	192
7.0.12	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	193
7.1	能瀬研究室	198
7.1.1	シナプス特異性を決める分子の同定の機能解析	198
7.1.2	シナプス形成の生物物理	198
7.1.3	シナプス成長・可塑性の分子機構	200
8	技術部門	204
8.1	技術部門	204
8.1.1	実験装置試作室	204

II	Summary of group activities in 2003	205
1	Theoretical Nuclear Physics Group	207
2	Theoretical Particle and High Energy Physics Group	209
3	Sakai Group	212
4	Hayano Group	213
5	Sakurai Group	214
6	Komamiya group	215
7	Minowa-Group	217
8	Aihara Group	218
9	Wadati Group	219
10	Tsukada Group	220
11	Aoki Group	221

12	Ogata Group	222
13	Tsuneyuki Group	223
14	Tarucha Group	224
15	Fujimori Group	226
16	Uchida Group	227
17	Hasegawa Group	229
18	Fukuyama Group	230
19	Okamoto Group	232
20	Theoretical Astrophysics Group	233
21	Murao Group	235
22	Kobayashi Group	236
23	Makishima Group	237
24	Takase Group	238
25	Tsubono Group	239
26	Sano Group	240
27	Yamamoto Group	241
28	Sakai (Hirofumi) Group	242
29	Kuwajima Group	244
30	Nose Group	245

III 2003 年度 物理学教室全般に関する報告 247

1	学部講義概要 249	249
1.1	2 年生 冬学期	249
1.1.1	電磁気学 I : 櫻井 博儀	249
1.1.2	解析力学・量子力学 I : 相原 博昭	249
1.1.3	物理数学 I : 村尾 美緒	250
1.1.4	物理実験学 : 福山 寛、酒井広文	250
1.2	3 年生 夏学期	251
1.2.1	光学 : 山本 智	251
1.2.2	量子力学 II : 小形正男	251
1.2.3	物理数学 II : 須藤 靖	252
1.2.4	現代実験物理学 I : 樽茶清悟, 藤森淳, 能瀬聡直	252
1.2.5	電磁気学 II : 高瀬 雄一	252
1.2.6	生物物理学 : 桑島邦博, 能瀬聡直	253
1.2.7	統計力学 I : 和達三樹	253
1.3	3 年生 冬学期	253
1.3.1	電気力学 : 蓑輪 眞	253
1.3.2	現代実験物理学 II : 坪野公夫、早野龍五	254
1.3.3	物理数学 III : 松尾 泰	254
1.3.4	量子力学 III : 初田哲男	255
1.3.5	流体力学 : 佐野 雅己	255
1.3.6	統計力学 II : 青木秀夫	255
1.4	4 年生 夏学期	256
1.4.1	素粒子物理学 : 駒宮幸男	256
1.4.2	原子核物理学 : 大塚孝治・酒井 英行	256
1.4.3	固体物理学 I : 常行 真司	256
1.4.4	場の量子論 : 柳田勉	257
1.4.5	量子光学 : 小林孝嘉	257
1.4.6	一般相対論 : 佐藤勝彦	258
1.5	4 年生 冬学期	258
1.5.1	化学物理学 : 内田 慎一	258
1.5.2	物理学特別講義 I : 江口 徹	259
1.5.3	物理学特別講義 II : 桑島 邦博	259

1.5.4	物性物理学特論 : 塚田捷、長谷川修司、小森文夫	259
1.5.5	宇宙物理学 : 牧島一夫	260
1.5.6	固体物理学 II : 岡本 徹	260
2	各賞受賞者紹介	262
2.1	西島和彦先名誉教授 : 平成 15 年度 文化勲章	262
2.2	小柴昌俊名誉教授 : 勲一等旭日大綬章	262
2.3	柳田教授 : フンボルト賞	263
2.4	小林孝嘉教授 : 日本分光学会賞学術賞	263
2.5	相原博昭教授 : 第 2 0 回井上学术賞	263
2.6	松田巖助手 (長谷川研究室) : 日本表面科学会平成 15 年度奨励賞	263
2.7	中平 武 博士 (相原研究室) : 第 5 回高エネルギー物理学若手奨励賞	263
2.8	山口英斉博士 (早野研究室) 東京大学総長賞	264
2.9	藤原真琴博士 (早野研究室) 原子核談話会新人賞	264
2.10	関口仁子博士 (酒井 (英) 研) : 第 2 0 回井上研究奨励賞	264
3	人事異動	265
4	役務分担	266
5	教室談話会	267

I

研究室別 2003年度 研究活動報告

1 原子核・素粒子理論

1.1 原子核理論研究室(大塚・初田)

原子核理論研究室の概要

原子核研究室では、原子核とハドロンに関係した非常に広範囲の理論的研究を行っている。その活動は主に二つに分けられる。一つは多数の核子から成る量子多体系としての原子核の構造とそれを支配する動力学についての研究であり、ここでは「原子核構造」と呼んでいる分野である。もう一つは、多数のクォーク・グルオンから成る量子多体系としてのハドロンの構造や高温高密度核物質を、量子色力学に基づいて研究する分野で、「ハドロン物理学」と呼んでいる。

「核構造」は主に大塚孝治教授・板垣助手及び博士研究員と大学院学生らにより行なわれた。「ハドロン物理学」は主に初田哲男教授・佐々木助手及び博士研究員と大学院学生らにより行なわれた。以下に先ずそれぞれ分野での研究内容の概要を述べ、後で各々のテーマについて個別に説明する。

原子核構造

原子核構造と言われる分野には色々な問題が含まれるが、我々の研究室では

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

の3つのテーマを主に追求している。1番目のものは、対象としては原子核物理学の中で最も急速に歩している分野である。安定核とは、我々の身のまわりの物質を構成している原子核で、陽子数と中性子数が等しいか、大体等しい。一方、不安定核とは、それらの数が大きく異なるものを指す。そのため様々な特異な性質を示すことが分かっているが、研究は始まったばかりで、未知の事柄に満ち溢れたフロンティアである。その例として、魔法数があげられる。原子の場合と同じように原子核でも(陽子或は中性子の数としての)魔法数があり、構造上決定的な役割を果たす。魔法数は1949年のメイヤー・イェンゼンの論文以来、安定核では変わってこなかった。

しかし、不安定核での魔法数は安定核のそれとは系統的に異なり、そのメカニズムは核力のスピンスピン依存性による、という成果がここ数年我々の研究室で得られつつあり、殻進化と呼ばれる。この研究成果は今後の核構造論研究の方向性を左右し、進める原動力となり、その方向での平均場理論の再構築なども始めた。さらに、いわゆる原子核における分子的構造理論、確率論的配位法やゆるく束縛された粒子を含んだ殻模型計算などにより、不安定核の構造・反応の研究を様々に進めている。特に、不安定核では、球や楕円というこれまでに考えられてきた原子核の形とは異なる、三角形のようなものがクラスター構造の結晶的安定化によって現われる、という成果があげられた。また、モンテカルロ殻模型を応用しての研究の主要な対象も不安定核である。その研究は我々が1994年頃から提唱・発展させ、世界的に見てもオリジナルな理論手法であるモンテカルロ殻模型を中心に展開している。この方法は原子核に於ける量子多体系の解法における大きなブレークスルーとなり、実際の物理系への適用に当っては、記述可能な多体構造の多様性、扱う原子核の幅広さ、さらには原子核以外への応用、のどれを見ても、今後大きな発展が期待されている。平成13年度からは科学研究費特別推進研究に採択され、最終的には200個のCPUからなる超並列専用計算機を導入して、大規模な研究を展開している。3番目のテーマについては、相対論的な多体理論への入口となるべき相対論的平均場理論の発展、低い運動量空間への投影やカイラル性に注目した新しい有効相互作用理論とその多体問題への応用などを目指しての可能性を探っている。量子カオスに関しては、カオスと対称性の関係について新たな角度から研究している。

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、クォークとグルオンの強い束縛状態で、量子色力学(QCD)がその多様な構造や相互作用を支配している。QCDはその本質的な非線形性と強い量子効果のために、そのハミルトニアンからは予想もできないような様々な現象を示す。我々の研究室では、ハドロンのクォーク・グルオン構造、QCDの真空構造と高温高密度における相転移などを、QCDの量子多体問題という観点から理論的に研究している。その手法は、場の量子論における高次総和法に基づく解析的アプローチ、格子上で定義されたQCDの数値シミュレーションによる第一原理的アプローチなど、多岐にわたっている。

我々の研究対象は、ハドロンの励起状態スペクトルの構造、特に2003年に発見されたペンタクォークなど新しいハドロン状態の解明、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動的性質、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・プラズマの物性論など多岐にわたり、実験や観測と密接に関係した研究を展開している。

1.1.1 原子核構造

殻構造の進化と核力

上で述べたように原子核の殻構造は陽子数、中性子数の変化とともに進化する。メカニズムには二つあって、その2番目のものはテンソル力による事、それはスピン軌道力の消長のように見える事、などを示した。この効果により、殻構造、ひいては原子核の構造が大きく変わる事がある。例えば、ニッケルの安定な原子核では陽子の $1f_{5/2}$ 軌道は、普通の意味でのスピン軌道分岐により、 $1f_{7/2}$ 軌道よりもかなり上にある。中性子数が多い不安定なアイソトープではその差は極めて小さくなり、 $Z=28$ の魔法数が消えてしまう。

このような一粒子軌道の変化 (殻進化) は様々な原子核で起こり、それらを統一的、且つ、直観的に説明できる事を示した。また、このテンソル力による殻進化は π 及び ρ 中間子の交換という単純なプロセスだけで定量的にほぼ説明できる事も示した。[26, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 87, 105]

量子モンテカルロ対角化法によるモンテカルロ殻模型

原子核の構造の研究を大別すると (1) 単純化された模型による理解、(2) 核力から出発した第一原理的な方法、の二つに分かれる。(2) の立場では、核力から微視的な方法により導いた核子多体系の相互作用を用い、仮定が少ない定式化が可能であり、理論的には非常にすっきりとした記述が可能である。殻模型によりそのような方法論が展開可能である。ただし、殻模型のハミルトニアンに含まれる核子間の有効相互作用はまだ理論的に完成したのではなく、多少の現象論的な補正も必要である。そのような自由度まで含めて、殻模型は非常に軽いものを除いてほとんど全ての原子核の構造の理解を与えるはずのものと考えられている。そこで、これまでも殻模型計算を行なう努力が数多くなされてきた。たとえば、平均場に基づいた解法、直接対角化による解法、補助場量子モンテカルロ法などがあげられる。平均場に基づいた解法は模型的な仮定が多く入っており、一方、直接対角化による解法は大行列の対角化をしなければならず、数値計算上の制約を受けている。補助場量子モンテカルロ法による計算は負符号問題を含む多くの問題点を抱え、また、適用可能な物理量の狭さが大きな難点である。我々のグループが数年来発展させてきた量子モンテカルロ対角化 (QMCD) 法は、多体問題を解く新解法であるばかりか、有限量子多体系である原子核の特徴 (例えば、角運動量やアイソスピンの保存など) を非常にうまく取り込むことができる方法であることが明らかになった。その結果、従来全く不可能であった殻模型の問題が解くことができるようになりつつあり、モンテカルロ殻模型という新しい分野を形成しつつある。

この方法論は、高速な計算機の性能をフルに活用できるものであり、特に、パラレル計算機は大変有用となる。平成13年度からは科学研究費特別推進

研究にも採択され、従来からの理化学研究所に加え、東京大学原子核科学研究センターとも共同して、専用の大規模並列計算機の運転を行っている。このように、モンテカルロ殻模型を用いての核構造の解明を系統的に進めている。具体的な成果は下に示されている。[1, 2, 3, 4, 24, 25, 66, 67, 68, 69, 70, 72]

^{14}C における 3α クラスターの正三角形配位について

中性子過剰核 ^{14}C 核の励起状態に、3つの α クラスターが正三角形配位を持つ状態が回転帯となって現れる事を、分子軌道法に基づいた分析によって明らかにした。[5, 27]

軽い核の構造を分析する新しい枠組の開発

反対称化分子動力学 (AMD) の基底を有効にかつ大量に重ね合わせることによって、AMD - superposition of selected snapshot (AMD triple-S) と呼ばれる軽い核の構造を精度良く記述する新しい方法の確立を行った。この方法の水素、ヘリウム、ベリリウム、炭素、酸素同位体の構造計算への適用を行った。また、従来核力の中心力部分に繰り込まれていたテンソル力をあらわに取り扱った計算も開始した。[6, 28]

B 同位体、N 同位体に対する新しい有効相互作用を用いた殻模型計算

中性子過剰な B、N 同位体に対して、 $(\cdot \cdot) (\cdot \cdot)$ 項など核力のスピン・アイソスピン依存性を適切に取り入れた殻模型計算を行った。これにより、実験で知られている核のエネルギーレベル、電磁遷移確率、磁気能率などは適切に再現され、中性子過剰な多くの原子核に対して予言を行った。特に中性子過剰な核においてエネルギーが下がって来る intruder 状態に対して考察を行った。[48]

パリティ非対称な中性子過剰核での中性子状態

核子の波動関数をガウシアンとし全体の波動関数をその重ね合わせで表し、クラスター構造を仮定した。そして Ne や C の同位体での中性子過剰核のクラスターの芯に対称性のよい構造をもつときのバランス中性子の密度分布やエネルギー順位を計算した。それとともに一粒子軌道のパリティ対称性について議論した。[49, 90]

ユニタリー相関演算子法による核構造の微視的記述

核子間有効相互作用をユニタリー相関演算子法により自由空間における種々の現代的核力 (中間子交換

型相互作用、カイル摂動理論に基づく相互作用等)から導出し、それを用いて ^{16}O 、 ^{24}O 近傍の原子核の結合エネルギー、殻構造等の微視的記述を行った。また、2核子系において現代的核力から低運動量相互作用を構築し、それを用いて少数核子系における結合エネルギーの精密計算を行うことにより、核構造計算における低運動量相互作用の妥当性を議論した。[7, 52, 86, 88]

Relativistic mean field theory of the nuclear many-body problem

We investigate the connection between relativistic mean field models and the bare nucleon-nucleon interaction by using a realistic interaction in the nuclear medium. Starting from a nonrelativistic bare potential and by employing a G-matrix formalism we derive an effective interaction in the nuclear medium that depends on its density. We show that its medium- and long- range components can be described to a good extent by an effective density-dependent one-boson-exchange (OBE) potential based on a isoscalar scalar σ -meson field, a isoscalar vector ω -meson field (vector coupling only), a isovector scalar δ -meson field, a isovector vector ρ -meson field (vector and tensor couplings), and a pseudoscalar pion field (pseudo-vector coupling) π . We have extracted the mass and the coupling strength of the mesons at various Fermi momenta of nuclear matter. In such a way the density-dependence of the parameters has been studied. Moreover, a comparison with the bare parameters has allowed us to study the many-body and multi-scattering effects on their properties. We find that with an increasing density of the nuclear medium m_σ is constant to a good approximation, m_δ decreases quite strongly, while m_ω and m_ρ decrease at the same rate rather weakly consistently with the requirements of chiral symmetry and with the results of many-body theories and QCD oriented models. The coupling strengths of the fields show also a rather weak decreasing. Furthermore, these extracted values of the meson fields masses and couplings result to be rather consistent with the parameters of the effective mesons of RMF phenomenologies. Finally, we find that the tensor force of the bare interaction is essential to explain the dominance of the σ -field for the attraction. This makes RMF models more consistent with ab initio calculations. [8, 9, 10, 53, 54, 55, 56, 57]

原子核の平均場模型と有効相互作用のスピン-アイソスピン依存性

近年、原子核の殻構造の急激な変化という現象において、有効相互作用のスピン-アイソスピン依存性が重要な役割を果たしているというメカニズムが提

唱されている。その中で特に重要とされている、 $(\sigma_1 \cdot \sigma_2)(\tau_1 \cdot \tau_2)$ 相互作用とテンソル相互作用を Gogny 相互作用にとり入れ、平均場計算を試みた。その結果として、酸素、珪素、カルシウム、ニッケルの各同位体の殻構造について、従来の平均場模型では再現することができなかった急激な変化が実際に起こりうることを示した。[47, 87, 105]

密度依存性を含んだ相対論的平均場理論

相対論的に原子核を扱うための現象論的有効理論である RMF (相対論的平均場) 理論において、G-matrix 計算から得られる有効核子・核子ポテンシャルと RMF 理論に現われるポテンシャルとの比較から、各中間子の質量と結合定数の密度依存性を決定した。[89]

超重元素合成の理論的研究

超重元素合成の実験的研究は活発さを増し、今年度はロシアのドブナーで 115 番元素および 113 番元素の 2 つの新元素合成に成功した。同じ時期、理化学研究所でも 113 番元素の合成に取り組んでおり、国際間でこのような競争が激化してきている。本研究ではこの領域での反応理論を構築し、実験計画に有用な情報を与えることである。蒸発残留格段面積を求める際に不可欠な融合断面積を精度良く求めるために融合分裂反応機構の解明に焦点を当て研究を行った。微小な現象も記述できる散逸揺動模型を導入し、原子核の変形空間における形状の時間発展 (軌道) を解析をすることで融合分裂過程の解明を試みた。実験では分裂片の質量分布が測定されており、このデータと計算による軌道を比較することで、分裂片が複合核から来ているか否かを判定することが可能である。この手法を用いて融合断面積を詳細に決定した。計算結果から、超重核領域では質量対称分裂のイベントの 90 パーセント以上は複合核を経由しないで quasi-fission 過程から来ていることが分かった。さらに詳細に解析するには、分裂片の質量分布だけでなく、中性子放出多重度を用いることが有効である。計算における軌道の行程の長さは実験では中性子放出多重度と相関関係がある。すなわち軌道の時間尺度と中性子放出の時間尺度は対応し、このことを使って融合分裂過程の詳細な解析を試みた。 $^{58}\text{Ni}+^{208}\text{Pb}$ において入射エネルギーが励起エネルギーに換算して 180 MeV の場合、実験で測定された中性子多重度は 4 個と 8 個の周りにそれぞれピークをもつ。計算でもこの二山は再現され、前者は quasi-fission 過程から放出された中性子であり、後者は融合分裂過程からのものであることを示すことが出来た。超重核領域の実験でも中性子放出多重度は 2 山を持つことが測定されており、このような実験データを詳細に再現することが今後の課題である。[29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 74, 75, 76, 77, 78, 79]

1.1.2 ハドロンの物理

有限温度における格子上的スペクトル関数

J/Ψ , η_c などの重いクォーク・グルーオンや、 ϕ などの比較的軽い中間子が、クォーク・グルーオン・プラズマのような高温物質中でどのようにその性質を変化させるかは、相転移に伴う素励起の温度変化という理論的興味のみならず、相対論的重イオン衝突実験によるクォーク・グルーオン・プラズマ探索の鍵としても注目を集めている。我々は、この問題を格子量子色力学の第一原理数値シミュレーションベース統計解析を用いて研究した。その結果、クォークの非閉じ込め相転移がおこっても、相転移温度の約 1.5-2.0 倍の温度まで、様々なクォーク・グルーオン素励起として存在する証拠を得た。[11, 12, 13]

格子 QCD 数値実験によるペンタクォークの研究

昨年、Spring8 において阪大 RCNP の中野氏らによって発見された K^+n に崩壊する幅の狭いペンタクォーク・バリオン共鳴状態 $\Theta(1540)$ に関する格子 QCD を用いた研究を世界に先駆けて行った。主に実験的に確定していないペンタクォークのスピンの、パリティ、アイソスピンを特定するための研究を行い、QCD からの理論計算としてそれらを予言することを目的とした。格子 QCD 数値実験からペンタクォーク $\Theta(1540)$ のスピン・パリティが $1/2^-$ の状態の方が $1/2^+$ の状態より質量が軽く、前者は定量的にも $\Theta(1540)$ の質量をよく再現していることが判明した。こうして、本研究において $\Theta(1540)$ のスピン・パリティが $1/2^-$ であることを実験に先駆けて予言した。また、反粒子のストレンジクォークを反粒子のチャームクォークに置き換えた負のチャーム ($C=-1$) を持つエキゾチックなバリオン Θ_c の存在に関する数値実験を行い、その質量が多くの現象論模型で予測されている程軽くはなく、むしろ核子・D 中間子の崩壊閾値よりもはるかに重いことから、 $\Theta(1540)$ のように寿命の長い共鳴状態ではなく、かなり寿命が短い共鳴状態である可能性が高いことを報告した。[41, 58, 83, 91, 84, 103]

格子 QCD 数値実験による中性子 崩壊定数の研究

中性子ベータ崩壊定数は格子 QCD 数値実験を用いた核子構造関数の研究をする上でその数値計算の信頼度の指標となる重要な物理量である。この崩壊定数は軸性カレントを核子状態で挟んだ行列要素として定義されることから推察できるようにカイラル対称性の自発的破れに伴う南部・ゴールドストーンボソン (パイオン) と直接結合する行列要素である。このことからパイオンのコンプトン散乱長よりも充分大きな物理的な空間サイズを用いて数値実験をしなければ実験値を再現できないことを示し、核子構造関数の数値実験における、有限体積効果の考慮の重要性を指摘した。[15, 102]

非閉じ込めとカイラル相転移との関係

QCD は高温で相転移することが知られている。非閉じ込め相転移の秩序変数である Polyakov loop とカイラル相転移の秩序変数であるカイラル凝縮とは、本来全く別の物理量である。にも関わらず格子 QCD の測定結果に抛れば、これらの指標は全く同じ温度で相転移の様相を呈す。永らくこの「観測事実」に明快な説明が与えられずにきたが、有効ポテンシャルの性質から一般的説明を提唱し、且つ、有効模型によってその妥当性を定量的・定性的に検討した。有効模型は格子 QCD の結果を良く再現しており、提唱した動的機構が有効に働くことを確認した。[16, 17, 42, 43, 59, 60]

また相転移点の一致をグローバル・シグマ混合という見方から俯瞰し、格子 QCD 計算への示唆を与えた。[18, 19, 44, 61, 104]

格子 QCD 数値実験による Roper 共鳴状態の研究

正パリティを持つ核子の第一励起状態 (Roper 共鳴) $N'(1440)$ 、および負パリティの核子励起状態 $N^*(1535)$ の質量スペクトルに関して、格子 QCD 数値実験 (クエンチ近似) の立場から研究を行なった。Roper 共鳴の格子 QCD 数値実験による研究は、数値計算的な理由のため困難であり、この困難を回避するために最大エントロピー法 (MEM) を使用し、核子のスペクトル関数を直接復元する手法を採用した。クォーク質量を軽くしていくと非常に重かった N' が N^* よりも軽くなり実際の核子スペクトラルを再現できる可能性を世界で初めて示した。[40, 39, 62]

有限温度のカラー超伝導相転移

QCD から CJT の方法を用いて構成される Ginzburg-Landau 理論を用いて、クォークの高密度領域で実現されるカラー超伝導相からの有限温度相転移を研究した。

まず、クォーク対の場とグルーオン場の熱揺らぎが相転移に与える影響を調べた。その結果、平均場では 2 次であった相転移次数が 1 次になること、1 次転移の強さが低密度側に行くほど強くなることが明らかになった。[20, 63]

また、平均場の範囲で、クォーク質量のフレーバー非対称性とそれに伴う電気・カラーの中性条件、インスタントンの効果が相転移に及ぼす影響を調べた。その結果、クォーク質量と電気中性条件の効果により、相転移は 3 段階の 2 次相転移に分離し、中間状態に新しい相 (dSC 相) が出現することが分かった。[21, 92, 93]

高次元秩序変数による自発的対称性の破れ

高次元複合演算子を秩序変数として特徴付けられる自発的対称性の破れの可能性を議論した。 $O(2)$ 対

称性を持つ複素スカラー場 $\phi = \phi_1 + i\phi_2$ に対して一般的なギンツブルグランドウポテンシャルを構成することで、 $\langle \phi_1 \rangle = \langle \phi_2 \rangle = 0$ かつ $\langle \phi_1^2 - \phi_2^2 \rangle \neq 0$ で特徴付けられる相があるパラメータ領域で実現することを示した。この相を誘起する方向に働く力を明らかにするために、3次元 $O(2)$ ϕ^6 理論を調べた。[14, 94]

強結合極限における有限温度・有限密度格子 QCD

有限温度・有限密度における QCD の相構造を強結合格子ゲージ理論を用いて解析した。まず 2-color QCD において、強結合極限を取った格子 QCD の作用に対し $1/d$ 展開 (d は空間次元) と平均場近似を用いることで、オーダーパラメータで書かれた有効作用を解析的に導出した。その上でカイラル凝縮、ダイクォーク凝縮、バリオン密度の振る舞いを温度 (T)、バリオン化学ポテンシャル (μ_B)、クォーク質量の関数として調べた。その結果、それらの振る舞いはモンテ・カルロ数値シミュレーションの結果と定性的によく一致することが分かった。また得られた 2-color QCD の相図について考察した。[22, 45, 64, 65, 95]

次にこの強結合格子ゲージ理論の方法を有限温度・有限密度の 3-color QCD に適用した。 μ_B の他にアイソスピン化学ポテンシャル (μ_I) も考え、 T - μ_B , T - μ_I 平面での 3-color QCD の相図を明らかにした。また μ_I の入った 3-color QCD と μ_B の入った 2-color QCD とが同様の相構造を持つということも議論した。[23, 50, 96, 97]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] M. Honma, T. Otsuka, B.A. Brown and T. Mizusaki : New effective interaction for pf-shell nuclei and its implications for the stability of the $N=Z=28$ closed core, Phys. Rev. C **69**, 034335-1 - 034335-34 (2004).
- [2] S.N. Liddick, B.A. Brown, M. Honma, T. Otsuka, ..., T. Mizusaki, 他: Lowest Excitations in ^{56}Ti and the predicted $N=34$ shell closure, Phys. Rev. Lett. **92**, 072502-1 - 072502-4 (2004).
- [3] A.F.Lisetskiy, ..., M. Honma, ..., T. Otsuka, T. Mizusaki, 他: Experimental evidence for ^{56}Ni core breaking from the low-spin structure of the $N = Z$ nucleus $^{58}\text{Cu}_{29}$, Phys. Rev. C **68**, 034316-1 - 034316-10 (2003).
- [4] T. Suzuki, R. Fujimoto and T. Otsuka : Gamow-Teller transitions and magnetic properties of nuclei and shell evolution, Phys. Rev. C **67**, 044302-1 - 044302-15, (2003).
- [5] N. Itagaki, T. Otsuka, K. Ikeda, and S. Okabe : Equilateral triangular shape in ^{14}C , Phys. Rev. Lett. **92**, (2004), 142501
- [6] N. Itagaki, A. Kobayakawa, and S. Aoyama : New Description of Light Nuclei by Extending AMD approach, Phys. Rev. C **68** (2003), 054302
- [7] S. Fujii, R. Okamoto, and K. Suzuki : Charge-dependent calculations of single-particle energies in nuclei around ^{16}O with modern nucleon-nucleon interactions, Phys. Rev. C **69**, 034328 (2004).
- [8] M. Serra, T. Otsuka, Y. Akaishi, P. Ring and S. Hirose : Relativistic Mean Field Models and Realistic Nucleon-Nucleon Interactions, to be submitted to Phys. Rev. C;
- [9] M. Serra, T. Otsuka, Y. Akaishi, P. Ring and S. Hirose : Density and isospin dependencies in relativistic mean field models, in the Proceedings of the International Symposium "A New Era of Nuclear Structure Physics", (Niigata, Japan), November 19-22, 2003;
- [10] M. Serra, T. Otsuka, Y. Akaishi, P. Ring and S. Hirose : Field theoretical description of exchange terms in nuclear systems, Nucl. Phys. A **722**, 502c (2003)
- [11] M. Asakawa and T. Hatsuda : J/Ψ and η_c in the Deconfined Plasma from Lattice QCD, Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 012001.
- [12] M. Asakawa and T. Hatsuda : Hadronic Spectral Functions below and above the Deconfinement Phase Transition, Nucl. Phys. A **721** (2003) 869.
- [13] M. Asakawa, T. Hatsuda and Y. Nakahara : Hadronic Spectral Functions above the QCD Phase Transition, Nucl. Phys. A **715** (2003) 863.
- [14] Y. Watanabe, K. Fukushima and T. Hatsuda : Order Parameters with Higher Dimensional Composite Fields, to be published in Prog. Theor. Phys. (2004).
- [15] S. Sasaki, K. Orginos, S. Ohta and T. Blum : Nucleon Axial Charge from Quenched Lattice QCD with Domain Wall Fermions, Phys. Rev. D **68**, 054509 (2003).
- [16] K. Fukushima, Relation between the Polyakov loop and the chiral order parameter at strong coupling, Phys. Rev. D **68**, 045004 (2003).
- [17] K. Fukushima, Chiral effective model with the Polyakov loop. hep-ph/0310121 to be published in Phys. Lett. B.
- [18] Y. Hatta and K. Fukushima, Linking the chiral and deconfinement phase transitions. hep-ph/0307068 to be published in Phys. Rev. D.
- [19] Y. Hatta and K. Fukushima, On the nature of thermal QCD phase transitions. hep-ph/0311267.
- [20] T.Matsuura, K.Iida, T.Hatsuda, and G.Baym: Thermal fluctuations of gauge fields and first order phase transitions in color superconductivity, Phys. Rev. D **69**, 074012 (2004).
- [21] K.Iida, T.Matsuura, M.Tachibana, and T.Hatsuda: Melting Pattern of Diquark Condensates in Quark Matter, hep-ph/0312363, 投稿中.

- [22] Y. Nishida, K. Fukushima and T. Hatsuda: “Thermodynamics of strong coupling 2-color QCD with chiral and diquark condensates”, to be published in Phys. Rep. (2004).
- [23] Y. Nishida: “Phase structures of strong coupling lattice QCD with finite baryon and isospin density”, Phys. Rev. D **69**, 094501 (2004).
- (会議抄録)
- [24] T. Otsuka : Frontiers of the Nuclear Shell Model, AIP Conference Proceedings **656**, 190-196 (2003).
- [25] T. Otsuka : Shell model results for exotic nuclei, Eur. Phys. J. A **20**, 69-73 (2004).
- [26] T. Otsuka : Shell Evolution and Structure of Exotic Nuclei, Nucl. Phys. **A 734**, 365-368 (2004).
- [27] N. Itagaki and S. Aoyama : Exotic Cluster Structure in Light Neutron-rich Nuclei, Proc. of Int. Conf. on The Labyrinth in Nuclear Structure, an EPS Nuclear Physics Divisional Conference, AIP Conference Proceedings **701** (2004), 49
- [28] N. Itagaki, K. Hagino, T. Otsuka, S. Okabe, and K. Ikeda : Importance of Clustering in Light Neutron-rich Nuclei, Proc. of int. conf. on Nuclear Physics in Astrophysics, Nucl. Phys. **A 719** (2003) 205c-208c
- [29] Y. Aritomo, M. Ohta, T. Materna, F. Hanappe, L. Stuttge: Dynamics of fusion-fission process with neutron evaporation in superheavy mass region, Nucl. Phys. **A**.
- [30] Y. Aritomo, M. Ohta, T. Materna, F. Hanappe, L. Stuttge: Dynamics of fusion-fission process in superheavy mass region, in Proc. of *Tours Symposium on Nuclear Physics V*, (AIP, 2004), p. 147.
- [31] T. Materna, V. Bouchat, V. Kinnard, F. Hanappe, O. Dorvaux, C. Schmitt, L. Stuttge, K. Siwek-Wilczynska, Y. Aritomo, A. Bogatchev, E. Prokhorova and M. Ohta: Tracking dissipation in capture reaction, in Proc. of *Tours Symposium on Nuclear Physics V*, (AIP, 2004), p. 139.
- [32] A. Fukushima, T. Wada, M. Ohta and Y. Aritomo: On the energy for maximum cold fusion reaction in superheavy mass region, in Proc. of *Tours Symposium on Nuclear Physics V*, (AIP, 2004), p. 557
- [33] Y. Aritomo, M. Ohta, T. Materna, F. Hanappe, L. Stuttge: Problems of dynamical calculation for synthesis of superheavy elements, Prog. Theor. Phys.
- [34] Y. Aritomo, M. Ohta, T. Materna, F. Hanappe, L. Stuttge: Dynamical calculation for fusion-fission process in superheavy mass region, International Journal of modern physics E, vol. 13, No. 1, (2004) 285.
- [35] T. Materna, V. Bouchat, V. Kinnard, F. Hanappe, O. Dorvaux, C. Schmitt, L. Stuttge, K. Siwek-Wilczynska, Y. Aritomo, A. Bogatchev, E. Prokhorova and M. Ohta: Tracking dissipation in capture reaction, International Journal of modern physics E, vol. 13, No. 1, (2004) 301.
- [36] Y. Aritomo, M. Ohta, T. Materna, F. Hanappe, L. Stuttge: Analysis of fusion-fission dynamics in superheavy mass region by pre-scission neutron multiplicities, Nucl. Phys. **A**.
- [37] F. Hanappe, T. Materna, V. Bouchat, V. Kinnard, O. Dorvaux, C. Schmitt, L. Stuttge, K. Siwek-Wilczynska, Y. Aritomo, A. Bogatchev, E. Prokhorova and M. Ohta: Capture and dissipation in heavy ion induced reaction, Prog. Theor. Phys.
- [38] T. Materna, F. Hanappe, V. Bouchat, V. Kinnard, O. Dorvaux, C. Schmitt, L. Stuttge, K. Siwek-Wilczynska, Y. Aritomo, A. Bogatchev, E. Prokhorova and M. Ohta: Capture and dissipation in the superheavy region, Nucl. Phys. **A**.
- [39] S. Sasaki, K. Sasaki, T. Hatsuda and M. Asakawa, “Bayesian approach to the first excited nucleon state in lattice QCD.” Nucl. Phys. **B** (Proc. Suppl.) **119** (2003) 302-304.
- [40] S. Sasaki, “Latest results from lattice QCD for the Roper resonance.” Prog. Theor. Phys. Suppl. **151** (2003) 143-148.
- [41] S. Sasaki, “Pentaquark in lattice QCD.” Proc. of the X International Conference on Hadron 2003, September 1-6, 2003, Aschaffenburg, German.
- [42] K. Fukushima, Relation between color deconfinement and chiral restoration, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **129**, 557 (2004).
- [43] K. Fukushima, Toward understanding the lattice QCD results from the strong coupling analysis. hep-ph/0312057 to be published in Prog. Theor. Phys. Suppl. **153** (2004).
- [44] K. Fukushima, Relation between color deconfinement and chiral restoration at finite temperature and density. hep-ph/0403147 to be published in J. Phys. G.
- [45] Y. Nishida: “Thermodynamics of strong coupling 2-color QCD”, Proceedings for the International Conference on Finite Density QCD at Nara, to be published in Prog. Theor. Phys. Suppl. (2004).
- (国内雑誌)
- [46] 初田哲男：バリオン質量の起源－QCDにおける質量と相互作用、(数理科学、2003年5月号、サイエンス社)
- (学位論文)
- [47] T. Matsuo : Nuclear mean-field models and spin-isospin dependences of effective interactions, 博士論文.
- [48] D. Iida : Shell-model studies on intruder states in light nuclei, 修士論文.

- [49] 吉田亨:非対称芯のまわりの中性子軌道とエキゾチック原子核, 修士論文.
- [50] Y. Nishida : Hot and dense lattice QCD in the strong coupling limit, 修士論文.
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [51] N. Itagaki and S. Aoyama : Exotic Cluster Structure in Light Neutron-rich Nuclei, Int. Conf. on The Labyrinth in Nuclear Structure, an EPS Nuclear Physics Divisional Conference, Crete, Greece.
- [52] S. Fujii, R. Okamoto, and K. Suzuki : Shell structure in nuclei around ^{24}O described with modern nucleon-nucleon interactions, Int. Symp. on A New Era of Nuclear Structure Physics, Nov. 19-22, 2003, Niigata.
- [53] M. Serra: "Relativistic Hartree-Fock description of ground state properties of nuclear systems", WE-Heraeus Workshop on Relativistic Structure Models for the Physics of Radioactive Nuclear Beams, May, 11-16, 2003 - Physikzentrum Bad Honnef (Germany);
- [54] M. Serra: "Density dependence of relativistic mean field theories" Autumn Meeting, The Physical Society of Japan, September, 8-12, 2003 - Myazaki, Japan;
- [55] M. Serra: 'Density and Isospin Dependencies in Relativistic Mean Field Models', International Symposium "A New Era of Nuclear Structure Physics" (NENS03), November 19-22, 2003 - Niigata, Japan;
- [56] M. Serra: 'Relativistic Mean Field Models from a Realistic Nucleon-Nucleon Interaction' The 8th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamic, November 24-29, 2003 - Nara, Japan;
- [57] M. Serra: "Relativistic Mean Field Models and Realistic Nucleon-Nucleon Interactions", Workshop on Nuclear Force and Nuclear Structure, March 22-24, 2004 - RCNP-Osaka, Japan.
- [58] S. Sasaki, Exotic $S=+1$ baryon in lattice QCD, The X International Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron 2003), September 1 - 6, 2003, Aschaffenburg, Germany.
- [59] K. Fukushima, Relation between color deconfinement and chiral restoration. The 21st International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2003), Tsukuba, Ibaraki, Japan, 15-19 July 2003.
- [60] K. Fukushima, Toward understanding the lattice QCD results from the strong coupling analysis. Workshop on Finite Density QCD at Nara, Nara, Japan, 10-12 July (2003).
- [61] K. Fukushima, The 17th International Conference on Ultra Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2004), Oakland, California, 11-17 January (2004).
- [62] K.Sasaki, S.Sasaki, T.Hatsuda, M.Asakawa "Excited Nucleon Spectrum from Lattice QCD with Maximum Entropy Method" Lattice 2003, July 2003, Ibaraki, Japan.
- [63] K.Iida,T.Matsuura,M.Tachibana, and T.Hatsuda : Ginzburg-Landau Approach to the Phase Transition of Color Superconductivity at Finite Temperature, Nuclear Chiral Dynamics ,March 18-10, 2004, KEK, Tsukuba
- [64] Y. Nishida, K. Fukushima and T. Hatsuda: "Thermodynamics of strong coupling 2-color QCD with chiral and diquark condensates", Workshop on Chiral Dynamics of Hadrons and Hadrons in a Medium, Valencia, Spain, June 26-28, 2003.
- [65] Y. Nishida, K. Fukushima and T. Hatsuda: "Thermodynamics of strong coupling 2-color QCD with chiral and diquark condensates", International Conference on Finite Density QCD at Nara, Japan, July 10-12, 2003.
- 招待講演
- [66] T. Otsuka : Shell and cluster structures of exotic nuclei, Theory Symposium on Rare Isotope Accelerator Science Argonne, U.S.A., April 28 - May 2, 2003.
- [67] T. Otsuka : Evolution of shell structure and nuclear force, Int. Conf. on Relativistic Structure Models for the Physics of Radioactive Nuclear Beams, Bad Honnef, Germany, May 12 - 16, 2003.
- [68] T. Otsuka : Shells in nuclei on and far from stability, Int. Workshop on Recent Advances in the Nuclear Shell Model, Trento, Italy, June 29 - July 12, 2003.
- [69] T. Otsuka : Mechanisms of Shell Evolution and Structure of Exotic Nuclei, Int. Conf. on the Labyrinth in Nuclear Structure, Crete, Greece, July 13 - 19, 2003.
- [70] T. Otsuka : Perspectives of the shell model, Int. Symp. A New Era of Nuclear Structure Physics, Niigata, Japan, Nov. 19 - 22, 2003.
- [71] T. Otsuka : Single-particle states in exotic nuclei, Int. Workshop on Spectroscopic Factors, Trento, Italy, Mar 2 - 12, 2004.
- [72] T. Otsuka : Shell Evolution in Exotic Nuclei, Fifth Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium, Fukuoka, Japan, Mar 7 - 10, 2004.
- [73] N. Itagaki, S. Aoyama, T. Yoshida, T. Otsuka, S. Okabe, and K. Ikeda : Exotic cluster structure in light neutron-rich nuclei, Int. Conf. on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics, Nara, Japna

- [74] Y. Aritomo: Dynamics of fusion-fission process with neutron evaporation in superheavy mass region, International conference on VIII Nucleus-nucleus collision, Moscow, Russia, 17-21 June 2003.
- [75] Y. Aritomo: Dynamics of fusion-fission process in superheavy mass region, Tours Symposium on Nuclear Physics V, Tours, France, 26-29 Aug 2003.
- [76] Y. Aritomo: Fusion-fission Dynamics of Superheavy Nuclei by Fluctuation-dissipation Model, NATO Advanced study institute "Structure and Dynamics of Elementary Matter", Kemer, Turkey, 22 Sep -2 Oct 2003
- [77] Y. Aritomo: Dynamical calculation for fusion-fission process in superheavy mass region, 10th Nuclear Physics Workshop, Kazimierz Dolny, Poland, 24-28 Sep. 2003.
- [78] Y. Aritomo Problems of dynamical calculation for synthesis of superheavy elements, International conference on Fusion03, Matsushima, Japan, 12-15 2003.
- [79] Y. Aritomo: Analysis of fusion-fission dynamics in superheavy mass region by pre-scission neutron multiplicities, The 8th International conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics, Nara, Japan, 24-29 Nov 2003.
- [80] T. Hatsuda, Thermal Phase Transition of Dense QCD, International Conference on Color Confinement and Hadrons in Quantum Chromodynamics - Confinement 2003 -, July 21-24, 2003, RIKEN, Japan.
- [81] T. Hatsuda, Quarkonia in the Deconfined Plasma from Lattice QCD, International Workshop on Heavy Quarkonium, September 20-22, 2003, FERMILAB, USA.
- [82] T. Hatsuda, Thermal Phase Transitions of Dense QCD, KIAS-APCTP International Symposium in Astro-Hadron Physics Compact Stars: Quest For New States of Dense Matter November 10-14, 2003, Seoul, Korea.
- [83] S. Sasaki, Pentaquark Baryons from Lattice QCD. YITP International workshop on MULTI-QUARK HADRONS; FOUR, FIVE AND MORE?, February 17 - 19, 2004, YITP, Kyoto, Japan
- [84] S. Sasaki, Pentaquark Baryons in Quenched Lattice QCD. KEK International workshop on UNCLEAR CHIRAL DYNAMICS, March 18 - 20, 2004, KEK, Tsukuba, Japan
- [85] 板垣 直之: Cluster-shell competition in light nuclei, 大阪大学核物理研究センター研究会「核力と核構造」
- [86] 藤井 新一郎、鎌田 裕之、岡本 良治、鈴木 賢二: 原子核結合エネルギーに対する低運動量相互作用の切断運動量依存性、RCNP研究会「核力と核構造」(大阪大学RCNP、茨木、2004年3月)
- [87] 大塚 孝治: 平均場と核力、特にテンソル力、RCNP研究会「核力と核構造」(大阪大学RCNP、茨木、2004年3月)
- [88] 藤井 新一郎、鎌田 裕之、岡本 良治、鈴木 賢二: 原子核結合エネルギーに対する低運動量相互作用の切断運動量依存性、日本物理学会第59回年次大会(九州大学、福岡、2004年3月)
- [89] 広瀬俊亮、Milena Serra、大塚孝治、赤石義紀、Peter Ring: 「相対論的平均場理論と現実的な核子間相互作用」、日本物理学会 2003年秋の分科会(宮崎ワールドコンベンションセンター、宮崎、2003年9月)
- [90] 吉田亨、大塚孝治、板垣直之: 中性子過剰核におけるクラスター構造の反対称分子動力学による研究、日本物理学会 2003年秋の分科会、宮崎 2003年9月.
- [91] 佐々木勝一: 格子QCDによるペンタクォークの研究 KEK 研究会「ハドロン物理と格子QCD」(KEK、2004年1月28-30日)
- [92] 松浦妙子、飯田圭、初田哲男、橘基: 有限温度におけるカラー超伝導相転移; ストレンジクォークの効果 2003年秋の学会(宮崎コンベンションセンター、宮崎、2003年9月)
- [93] 飯田圭、松浦妙子、橘基、初田哲男: 有限温度クォーク物質における color-flavor unlocking; 電気的中性の効果: 2004年春の年会(九州大学、福岡、2004年3月)
- [94] 渡邊吉喜: 日本物理学会 秋季大会(宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット、2003年9月)
- [95] 西田祐介、福嶋健二、初田哲男: “有限温度・有限密度における強結合 2color-QCD -カイラル凝縮とダイクォーク凝縮の競合-”、日本物理学会 秋季大会(宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット、2003年9月)
- [96] 西田祐介: “強結合極限における有限温度・有限密度格子QCD”、KEK ワークショップ「ハドロン物理と格子QCD」(KEK、2004年1月)
- [97] 西田祐介: “強結合格子ゲージ理論を用いた有限バリオン・アイソスピン密度 QCD”、日本物理学会 第59回年次大会(九州大学箱崎キャンパス、2004年3月)

招待講演

- [98] 板垣 直之: エキゾチック核のクラスター構造と線、日本物理学会 2003年秋季大会(宮崎)
- [99] 初田哲男: QCD and Chiral Symmetry, 2nd CNS International Summer School (CISS03), (理化学研究所、和光市、2003年9月16日-20日)

(国内会議)

一般講演

- [100] 初田哲男：Quark Gluon Plasma と格子 QCD, KEK 大型シミュレーション研究ワークショップ「ハドロン物理と格子 QCD」, (KEK、つくば市、2003年1月28日-30日)
- [101] 初田哲男：宇宙初期のクォーク・グルオン・プラズマと重イオン衝突実験, 日本物理学会春季大会、領域2・宇宙線合同シンポジウム「プラズマ宇宙物理」 Quark Gluon Plasma と格子 QCD, (九州大学、2004年3月27日-30日)
- [102] 佐々木勝一：格子ゲージ理論による構造理解の現状' 日本物理学会第58回年次会 (東北学院大学土樋キャンパス、2003年3月28-31日)
- [103] 佐々木勝一：Pentaquark Baryons in Lattice QCD 日本物理学会第59回年次会 (九州大学箱崎キャンパス、2004年3月27-30日)
- [104] 福嶋健二：QCD相転移 - 非閉じ込め相転移とカイラル相転移との関係 -, 日本物理学会 第59回年次大会 (九州大学、2004年3月)
- [105] 大塚 孝治：不安定核のシェル構造と有効相互作用、KEK 研究会「通常核から離れた核物理の新展開」 (KEK、つくば市、2004年3月15~17日)

(セミナー)

- [106] 佐々木勝一：格子 QCD 実践入門 (実習編) RCNP 研究会「格子 QCD 実践入門」(阪大 RCNP、2004年1月14-15日)

1.2 素粒子論研究室 (藤川・江口・柳田・松尾)

素粒子論研究室では、物質の基本的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が続いている。基礎的なテーマである超弦理論や超対称性を持つ場の理論の様々な理論的な可能性の追求と同時に、高エネルギー物理や宇宙線物理に関する実験的な検証あるいは宇宙物理的な応用が研究されている。さらには、連続及び格子場の理論の定式化の改良や応用も重要なテーマになっている。

1.2.1 弦理論

江口はストリング理論の年会 strings2003、7/6-7/11 (京都国際会議場) の組織委員長を務めた。strings2003 の参加者は外国人 250 名、日本人 150 名ほどであった。会議の最終日に Witten, Gross, 戸塚による市民講演会を行った。

超対称ゲージ理論、位相的弦理論と超弦理論

江口は菅野 (名古屋大・多元数理) と共に、一種のゲージ・重力対応である geometrical transition を調べ、 S^3 上のチャーン・サイモンズ理論のリンク不変量の組み合わせをすべての表現について足しあげると、種々の非コンパクトなカラビ・ヤウ多様体上の位相的弦理論の振幅を厳密に再現することを示した [2]。この表式は固定点定理を用いて Nekrasov が導いた公式で、 \hbar や β をカラビ・ヤウ多様体のパラメータと同定したものと完全に一致する。また、ヤング図を足しあげる計算を共形場の理論で知られるパーテックス作用素を用いて書き換えると、計算が著しく簡便化され、パーテックス作用素の積の真空期待値に帰着することを示した [3]。

江口と酒井は昨年度に引き続き E 弦理論の研究を行った。超弦理論には D ブレーン以外にもソリトンが現れることが知られている。そのひとつである E 弦は、ヘテロティック弦の約半分の自由度を持ち、独自に 6 次元の非臨界弦理論 (E 弦理論) を構成する。E 弦理論は 4 次元にコンパクト化すると $\mathcal{N} = 2$ の超対称性を持つが、この種の理論の低エネルギー有効作用は、Seiberg-Witten 曲線と呼ばれる代数曲線によって完全に記述できる。江口と酒井は E 弦理論のもっとも一般的な 4 次元コンパクト化理論について、Seiberg-Witten 曲線を求めた。さらに江口と酒井はこの曲線の性質を詳しく調べ、E 弦理論の物理的モジュライパラメータの幾何学的意味づけを明らかにした。またパラメータの特殊値をとることで、6 次元 E 弦理論から 5 次元、4 次元の全ての $SU(2)$ Seiberg-Witten 理論が再現できることを具体的に示した [4, 47]。酒井はこれらの結果を元に、E 弦の発見からの経緯を含めて博士論文をまとめた [57]。

江口と菅原は Argyres-Douglas タイプの 4 次元 $\mathcal{N} = 2$ 超共形場理論の $\mathcal{N} = 1$ への拡張を論じた [5]。近

年盛んに研究された一般化された小西アノマリー方程式の手法に基づく解析により、“ $\mathcal{N} = 1$ Argyres-Douglas points” は、孤立特異点を持つ $\mathcal{N} = 2$ 曲線 (Seiberg-Witten 曲線) と $\mathcal{N} = 1$ 曲線 (行列模型曲線) の双有理同値対として特徴づけられることを示した。更に $\mathcal{N} = 1$ AD points 近傍での物理的観測量とそのスケール則や相構造について解析し、超弦理論との対応についても議論した。

4 次元 $\mathcal{N} = 2$ ゲージ理論は、IIA 型超弦理論をトーリック カラビ・ヤウ多様体にコンパクト化することで実現できる。この実現では、ゲージ理論の有効作用に関して摂動補正のみならず、全次数にわたるインスタントン補正項までもが弦理論の側から再現できる。具体的には弦理論側の世界面インスタントンのある種の足し上げが、ゲージ理論側の各インスタントン補正項に対応することが知られている。酒井は京大数研の小西と共同で、ゲージ群が $SU(N)$ の場合について、正確な対応則を調べた。その結果として、ゲージ理論側のインスタントン項は、カラビ・ヤウ上の世界面インスタントン数 (Gopakumar-Vafa 不変量) の漸近形に多重ラプラス変換を施すことによって得られることを示した。またゲージ理論に重力光子背景場を取り入れた場合についても併せて考察し、重力光子補正項と高い種数の世界面インスタントン数との間に全く同様の対応則が成り立つことを確かめた [33]。

昨年、Dijkgraaf と Vafa は $\mathcal{N} = 1$ 超対称ゲージ理論の超ポテンシャルの非摂動補正を対応する行列模型の摂動補正として計算する方法を提唱した。立川はその提唱から小西アノマリー関係式を導き、彼らの提唱の整合性を確かめた [36]。その後、その提唱は場の理論的に証明されたが、立川はまたそれを用いて、Intriligator-Leigh-Seiberg の線形性と呼ばれる予想が導出できることを示した [37]。

昨年来、Nekrasov は $\mathcal{N} = 2$ 超対称ゲージ理論のプレポテンシャルの非摂動補正をインスタントン計算で全て求める方法を開発した。立川は、この方法の 5 次元理論の S^1 コンパクト化への拡張の際に、5 次元の非可換チャーン・サイモンズ項がどのように影響するかをしらべ、位相的弦理論からの予言と完璧に一致することを示した [38]。また、立川はこの結果を Seiberg-Witten 理論、Nekrasov の計算のレビューとともに修士論文にまとめた [62]。

超対称ゲージ理論の F-term の有効作用は、小西アノマリーによって大部分が決定されるが、中山は小西アノマリーからは決定できない「積分定数」の簡便な決定法を提案し、カイラルゲージ理論などへの応用を議論した [29]。

信山は修士論文において、局所トーリック カラビ・ヤウ多様体上の位相的弦理論の Gopakumar-Vafa duality を用いた解析について最近の発展をまとめた [60]。

桜井は修士論文において、位相的弦理論に関連の深いループ群・完全可積分系 (Hitchin 系) の近年における基礎的な発展をまとめた。[61]

弦の場の理論

弦の場の理論は弦理論の off-shell の構造を規定する定式化の一つである。これまでタキオン凝縮のプロセスなどを通じてブレーンの生成消滅の記述がなされてきたが、弦の場の理論はブレーンの張力の計算などで顕著な成功を収めてきた。Bars、岸本、松尾は開弦の場の理論のスター積を、非可換幾何学で典型的に現れる Moyal 積で書き換え、それと同時に弦の理論で常に問題になる無限自由度に伴う発散の問題を、矛盾の無い正則化を行うことにより解決した [23]。またタキオン真空をこの定式化の立場で計算し、タキオン真空を中点の寄与を摂動として取り扱うことにより解析的な取り扱いを行った [22]。岸本、松尾、渡辺はブレーンを記述する境界状態が閉弦の場の理論のスター積について非常に簡単な非線形方程式を証明した。この方程式 (ベキ等方程式) はこれまで知られている平坦空間の全ての境界状態とその無限小変形により満たされることを、演算形式 [24] および経路積分法 [25] により具体的に証明した。また最も一般的な境界状態であるカーディ状態がこの枠でどのように取り扱われるべきかを議論した [26]。

大森は、component field による展開を用いて modified cubic superstring field theory の性質を詳しく調べた [31]。また、この内容を含め、これまでに行ってきた開いた超弦の場の理論におけるタキオン凝縮に関する研究成果を博士論文としてまとめた [56]。

曲がった背景上の弦理論と D ブレーン

江口と菅原は、 $\mathcal{N} = 2$ リュービル理論における D-ブレーンについて境界共形場理論による系統的な研究を行った [6]。スペクトラル・フローによって拡張された $\mathcal{N} = 2$ superconformal character を基本的なコンフォーマル・ブロックとし、“modular bootstrap” と呼ばれる手法を用いてカーディ状態の候補を与え、開弦の 1 ループ振幅等の解析を行った。特に bosonic リュービル理論における FZZT-ブレーン (extended brane) と ZZ-ブレーン (localized brane) に対応する厳密な境界状態の構成に初めて成功した。引き続き江口、菅原は、 $\mathcal{N} = 2$ リュービル理論の T-dual (mirror) として知られる fermionic 2 次元ブラックホール模型の 1-ループ分配関数の詳細な解析を行い、character level でのこれらの理論の明白な対応を与えると同時に、上で述べた extended character が基本的なコンフォーマル・ブロックとして妥当であることを示した [7]。更に elliptic genus と呼ばれる超対称指数をこうした非コンパクト模型に対して計算し、それがヤコビ形式になり得ない非自明なモジュラー変換性を示すことを指摘した。

中山は 2 次元非臨界弦におけるタドポール相殺の条件と性質を厳密なクロスキャップ状態、境界状態を利用して議論した [28]。また、修士論文 [59] において非臨界弦・リュービル場の理論のここ 10 年来の発展をレビューした。

PP-wave は AdS/CFT 対応で用いられる AdS 空

間に対してある極限操作を行うことによって得られる時空である。井手口と今村は、この時空を非可換なアイソメトリーに対応する複数の方向についてコンパクト化し、その上の弦のスペクトルを決定した。 [16]

今村はタイプ 0 弦理論における NS5-brane 上に存在する局在化した閉弦タキオンのモードに注目し、それを T-双対性によって時空の変形を表す幾何学的なモードとして解釈しなおすことによって、その凝縮が Witten の泡として知られる時空の欠損を生成することを示した。 [17]

川野と山口は、タイプ II 超重力理論の NS セクターが与える運動方程式を満たす解の中で、平行性条件を満たすものを全て分類し、その超対称性の数を調べた [20]。また、川野と山口は、Figueroa-O’Farrill (Edinburgh 大) との共同研究で、ヘテロティック超弦理論の運動方程式を満たす解の中で、平行性条件を満たすものの中で、超対称性をもつものを全て分類し、その超対称性の数を調べた [21]。

山口は、IIB 型弦理論の AdS_5 への超対称性を保つコンパクト化における D ブレーンについて調べた [42]。この弦理論の背景は、4 次元の超共形場理論に、またその中の D ブレーンは場の理論の中の defect にそれぞれ対応していると考えられている。この研究では、D ブレーンが超共形対称性を保つための幾何学的条件を D ブレーン上の場の理論の立場から求めた。また同様の解析を M 理論の AdS_4 へのコンパクト化における M5 ブレーンについても行った。

進行波を含む D ブレーンは今まで知られていなかった平坦な時空上の新しいソリトンであると同時に、時間発展する開弦の背景場でもあるため非常に興味深い。そこで高柳はハーバード大の高柳 (匡) 氏とソウル大の疋田氏とともに進行波を含む D ブレーンを閉弦の立場で記述する境界状態を構成した [39]。これは弦理論の共形対称性を壊さないローレンツ共変な形で記述されているため、弦の散乱振幅の計算等さらなる解析が可能である。特にこの境界状態を用いて開弦の 1 ループ振幅が厳密に求められる事がわかった。

弦理論には supertube と呼ばれる安定な円筒状の D ブレーンが存在するが、これは曲がった D ブレーンなので弦理論的な記述は非常に非自明である。しかしこれは T 双対性の下で進行波を含む D ブレーンと等価であるため、境界状態による記述が可能だと期待される。そこで高柳は supertube に対応する境界状態を実際に構成し、その上の開弦のスペクトルを調べた [40]。さらに supertube は Closed Timelike Curve (CTC) を含む Type IIA Gödel 宇宙にも存在し、それは CTC を調べるためのプローブとして有用だが、Gödel 宇宙上の supertube に対しても同様の方法で境界状態が構成できる。そこから開弦のスペクトルを読み取ると、CTC による開弦のタキオン不安定性が弦理論的な補正で解消されていることがわかった。

近年、タキオン凝縮の時間発展、及びそれに伴う D ブレーンの崩壊/生成過程 (“S-ブレーン”) に関する多くの研究がなされており、注目を浴びている。大森は、開弦と閉弦が共存する理論において D ブレーン

ンの崩壊現象がどのように記述されるかを考察し、さらに簡単な場の理論的モデルにおいてDブレーンが閉弦に崩壊していく様子を表す解を具体的に構成した [32]。

菅原は、S-ブレーン背景の bosonic 及び超対称開弦の有限温度系における 1-ループ分配関数について詳細な解析を行った [35]。主要な結果として、S-ブレーン背景では、初期状態としてどんなに低温であっても、十分時間が経過した後では、effective に Hagedorn 的な高温のふるまいを示し、指数関数的に増加する massive な弦の励起による紫外発散を導くことを示した。また、線形ディラトンによってこうした紫外発散を取り除く可能性についても論じた。

1.2.2 高エネルギー現象論

素粒子論的宇宙論

超対称標準模型は標準模型を越える理論の最も有力な模型であると考えられている。しかし、宇宙論への適応を考えたとき、宇宙に大量に存在すると考えられるグラヴィティーノの崩壊によって、元素合成がうまく行かなくなるといった問題がおこる。特に宇宙のバリオン数の非対称性を説明しようとするとき、この問題はより深刻なものになる。グラヴィティーノの問題から初期宇宙の温度が低いことが要求されるが、低い温度の宇宙でのバリオン数生成は比較的困難である。藤井、伊部、柳田はこの問題を避けるため、グラヴィティーノが安定な場合（即ち、グラヴィティーノが最も軽い超対称粒子の場合）における熱的レプトン生成を解析した。その場合にも、グラヴィティーノの次に軽い超対称粒子の軽元素への影響からグラヴィティーノの次に軽い超対称粒子の種類に強い制限があることを明らかにした。その結果、グラヴィティーノの次に軽い超対称粒子としては、タウ粒子、ニュートリノの超対称対でなければならず、その際グルーオンの超対称対の質量が 1.8 GeV より軽く、現在建設中の加速器 LHC で検証可能であることを示した [10]。

藤井、伊部、柳田は安定な真空を持ち、宇宙に不要な粒子が残らないような gauge-mediation 模型を考察した結果、宇宙のインフレーション後再び小さいインフレーションが起こる模型が可能であることを示した。この2度目のインフレーションによって、グラヴィティーノを暗黒物質として適当な量まで薄めることができる。そのため、グラヴィティーノの量の制限からくる宇宙の温度の上限がゆるめられ、熱的レプトン生成が自然に働くことを示した [9]。

井沢は、超重力理論の枠組みでカイラル超場単一で記述されるミニマルなインフレーション模型において、スペクトル指数を求め、模型中の高次項の効果を明らかにすることによって、WMAPなどのデータが有効作用についてもたらず情報を精度よく得る処方考察した [18]。

Affleck-Dine バリオン生成は超対称標準模型の中に存在する flat direction におけるスカラー場の運動を利用したバリオン生成機構である。このスカラー

場は振動開始後まもなく Q-ボールと呼ばれる non-topological ソリトンになる。この Q-ボールは、非常に低い温度で崩壊し、宇宙に大量の LSP を放出する。そのため、Q-ボールが存在した宇宙では、通常（Q-ボールが存在しない場合）では暗黒物質を説明するには量が少なすぎるヒグシーノやヴィーノ LSP の場合に暗黒物質の量を自然に説明することが出来る。藤井、伊部はそのようなヒグシーノやヴィーノ LSP が暗黒物質であった場合の間接検出実験の可能性について議論した。その結果、ヒグシーノやヴィーノ LSP が暗黒物質であった場合には、太陽中心からのニュートリノ線や、銀河ハローからの陽電子線が、通常の LSP 暗黒物質よりも大きく、近い将来の実験で検出が可能であることを明らかにした [8]。藤井は、博士論文において、超対称標準模型における有力な物質-反物質非対称性の生成機構の一つである Affleck-Dine バリオン生成について、これまでの研究をまとめた [53]。

小山、立川は、渡利 (Berkley) と共同で、 $K3 \times T^2$ にコンパクト化したタイプ IIB ストリングにおける D3D7 ハイブリッド・インフレーション模型を 4 次元 $N=2$ 超重力を用いて解析した。[27] 小山は、超弦理論によるインフレーション模型について修士論文でまとめた。[58]

桜井は正の宇宙項、曲率や非一様な宇宙像のポール展開を報告した近年の WMAP をうけて、相対論的宇宙論の近況を修士論文 [61] でレビューした。さらに桜井は近年のミューオンの実験結果から予想される LFV (Lepton Flavour Violation)、ニュートリノ物理学や超対称ヒッグス現象等に対するカミオカンデや WMAP などからの制限をまとめ、標準模型では説明されない現象の可能性を調べた。

超対称統一模型

超対称標準模型には、3つのゲージ相互作用が存在するが、それらの3つの結合定数が $M_{\text{GUT}} \simeq 10^{16}$ GeV 程度の非常に高いエネルギー・スケールで良く一致することが分かっている。このことは、超対称統一模型の存在を示唆しているが、最もシンプルな $SU(5)$ ゲージ群を用いた模型には、次の問題が存在する。結合定数の統一から、統一理論に存在するカラー電荷を持ったヒッグスは M_{GUT} 程度であるが、標準理論のヒッグスは 100 GeV 程度であるという非常に大きな階層性が存在する。また、カラー電荷をもつヒッグスを介した相互作用による陽子崩壊は、現在の観測よりも短めの陽子寿命を予言してしまう。伊部、渡利はこれらの問題を解決した直積群を用いた統一理論におけるゲージ粒子を介した陽子崩壊の解析をした。その結果、他の統一模型に比べ短めの陽子寿命が予言され、次世代の水層型検出器で検証可能であることを示した [15]。

井沢、渡利、柳田は、高次元の超対称 QCD を考えて、色つきのフェルミオンが余次元方向に分離した、比較的ありふれた状況が実現されていると自然に、PQ対称性が帰結として現れ、結果的にCP問題の解決が内包された4次元のQCDが得られるこ

とを示した。また、その際、超対称性の為に、MSSM粒子以外の色つき粒子の存在が一般に超対称性の破れのスケールで予想されることを指摘した [19]。

1.2.3 場の理論

量子異常と場の理論の諸問題

まず、藤川は鈴木 (茨城大) と共同して経路積分の定式化を用いた 2 次元フェルミ粒子の場の理論のボソンによる記述であるボソン化の研究を行った [11]。通常のゲージ理論における除きうるアノマリーの判定条件とボソン化における見かけ上のアノマリーの判定条件は全然異なることを示し、過去における経路積分を用いたボソン化法の基礎付けをおこなった。この分析はアーベル的なボソン化および非アーベル的なボソン化の両方に適用できるものである。

藤川は、P. Nieuwenhuizen 氏 (ニューヨーク州立大学) と共同して、2 次元の超対称性に現れる中心拡大に対する量子補正を経路積分の定式化で考察し、この量子補正は変数変換のヤコビアンとして計算される一種の量子異常と理解されることを明確にした [12]。さらに、この量子異常の詳細を考察しその特殊性を明らかにした [13]。

藤川は R. Shrock 氏 (ニューヨーク州立大学) と共同して、ニュートリノの電磁的な性質に関する一般的な考察を行った。とくに、電荷半径がどうして物理的な測定量になれないかの基本的なメカニズムを明らかにした [14]。

湯川型の短距離力しか感じない粒子は、静止状態で二乗可積分な固有関数を持たない。故にヒッグス粒子の存在を仮定せずに標準模型での電弱統一を導き、ニュートリノの小質量やカラー閉じ込めを説明しえる [55]。西川はボアンカレ群に複素 1 次元の位相が内在していることを示し、その 2 階微分を電磁/重力場；これら遠距離力を感じる固有関数のうち、距離に比例するべきを強い力、ヒッグス機構 (文字通り真空のエネルギー一定数のずれ) で生じる湯川型のべきを弱い力の源と解釈した。弱い力の L・S 相互作用からニュートンのポテンシャルが生じる。

< 受賞 >

[1] 柳田 勉, フンボルト賞, 2003 年 4 月

< 報文 >

(原著論文)

- [2] T. Eguchi and H. Kanno, "Topological strings and Nekrasov's formulas," JHEP **0312**, 006 (2003).
- [3] T. Eguchi and H. Kanno, "Geometric transitions, Chern-Simons gauge theory and Veneziano type amplitudes," Phys. Lett. B **585**, 163 (2004).
- [4] T. Eguchi and K. Sakai, "Seiberg-Witten Curve for E-String Theory Revisited," Adv. Theor. Math. Phys. **7** (2003) 419.

- [5] T. Eguchi and Y. Sugawara, "Branches of $N = 1$ vacua and Argyres-Douglas points," JHEP **0305**, 063 (2003).
- [6] T. Eguchi and Y. Sugawara, "Modular Bootstrap for Boundary $N=2$ Liouville Theory," JHEP **0401**, 025 (2004).
- [7] T. Eguchi and Y. Sugawara, "SL(2,R)/U(1) supercoset and elliptic genera of non-compact Calabi-Yau manifolds," to appear in JHEP, arXiv:hep-th/0403193.
- [8] M. Fujii and M. Ibe, "Neutralino dark matter from MSSM flat directions in light of WMAP result," Phys. Rev. D **69**, 035006 (2004).
- [9] M. Fujii, M. Ibe and T. Yanagida, "Thermal leptogenesis and gauge mediation," Phys. Rev. D **69**, 015006 (2004).
- [10] M. Fujii, M. Ibe and T. Yanagida, "Upper bound on gluino mass from thermal leptogenesis," Phys. Lett. B **579**, 6 (2004).
- [11] K. Fujikawa and H. Suzuki, "Anomalies, local counter terms and bosonization", hep-th/0305008, Phys. Rep. C (in press).
- [12] K. Fujikawa and P. van Nieuwenhuizen, "Topological anomaly from the path integral measure in superspace", Ann. of Phys. 308(2003)78.
- [13] K. Fujikawa, A. Rebhan and P. van Nieuwenhuizen, "On the nature of the anomalies in the supersymmetric kink", Int. Jour. Mod. Phys. A18(2003)5637.
- [14] K. Fujikawa and R.E. Shrock, "On a Neutrino electroweak radius", Phys. Rev. D69(2004)013007.
- [15] M. Ibe and T. Watari, "Upper bound of proton life-time in product-group unification," Phys. Rev. D **67**, 114021 (2003).
- [16] K. Ideguchi and Y. Imamura, "Strings in a PP-wave background compactified on T^8 with twisted S^1 ," Prog.Theor.Phys. 110 (2003) 1021-1035
- [17] Y. Imamura, "Decay of type 0 NS5-branes to nothing," Phys.Rev. D69 (2004) 026005.
- [18] K.-I. Izawa, "Supergravity Minimal Inflation and its Spectral Index Revisited," Phys. Lett. **B576** (2003) 1.
- [19] K.-I. Izawa, T. Watari, and T. Yanagida, "Super- and CP-symmetric QCD in Higher Dimensions," Phys. Lett. **B**, in press.
- [20] T. Kawano and S. Yamaguchi, "Dilatonic Parallelizable NS-NS Backgrounds," Phys. Lett. **B568** (2003), 78.
- [21] J. M. Figueroa-O'Farrill, T. Kawano, and S. Yamaguchi, "Parallelizable Heterotic Backgrounds," JHEP **0310** (2003), 012.
- [22] I. Bars, I. Kishimoto and Y. Matsuo, "Analytic study of nonperturbative solutions in open string field theory," Phys. Rev. **D67** (2003) 126007.

- [23] I. Bars, I. Kishimoto and Y. Matsuo, “Fermionic ghosts in Moyal string field theory,” *JHEP* **0307** (2003) 027.
- [24] I. Kishimoto, Y. Matsuo and E. Watanabe, “Boundary states as exact solutions of (vacuum) closed string field theory,” *Phys. Rev.* **D68** (2003) 126006.
- [25] I. Kishimoto, Y. Matsuo and E. Watanabe, “A universal nonlinear relation among boundary states in closed string field theory,” *Prog. Theor. Phys.* **111** (2004) 433.
- [26] I. Kishimoto and Y. Matsuo, “Cardy states as idempotents of fusion ring in string field theory,” *Phys. Lett. B* to appear.
- [27] F. Koyama, Y. Tachikawa and T. Watari, “Supergravity Analysis of Hybrid Inflation Model from D3D7 System,” hep-th/0311191, *Phys. Rev. D*, in press.
- [28] Y. Nakayama, “Effective gauge degrees of freedom and the (non)existence of the glueball superpotential,” *JHEP* **0308**, 049 (2003).
- [29] Y. Nakayama, “Tadpole cancellation in unoriented Liouville theory,” *JHEP* **0311**, 017 (2003).
- [30] M. Nishikawa, “On singular potential of the Schrödinger equation,” *Mod. Phys. Lett. A* **18** (2003) 1991.
- [31] K. Ohmori, “Level-Expansion Analysis in NS Superstring Field Theory Revisited,” arXiv:hep-th/0306096, to be published in *Int. J. Mod. Phys. A*.
- [32] K. Ohmori, “Toward Open-Closed String Theoretical Description of Rolling Tachyon,” *Phys. Rev. D* **69**, 026008 (2004).
- [33] Y. Konishi and K. Sakai, “Asymptotic Form of Gopakumar–Vafa Invariants from Instanton Counting,” *Nucl. Phys. B* **682** (2004) 465.
- [34] Y. Sugawara, “Thermal partition function of superstring on compactified pp-wave,” *Nucl. Phys. B* **661**, 191 (2003).
- [35] Y. Sugawara, “Thermal partition functions for S-branes,” *JHEP* **0308**, 008 (2003).
- [36] Y. Tachikawa, “Derivation of the Konishi anomaly relation from Dijkgraaf–Vafa with (bi-)fundamental matters,” *Phys. Lett. B* **573**, 235 (2003).
- [37] Y. Tachikawa, “Derivation of the linearity principle of Intriligator–Leigh–Seiberg,” *Prog. Theor. Phys.* **110**, 841 (2003).
- [38] Y. Tachikawa, “Five-dimensional Chern-Simons terms and Nekrasov’s instanton counting,” *JHEP* **0402**, 050 (2004).
- [39] Y. Hikida, H. Takayanagi and T. Takayanagi, “Boundary states for D-branes with traveling waves,” *JHEP* **0304** (2003) 032.
- [40] H. Takayanagi, “Boundary states for supertubes in flat spacetime and Goedel universe,” *JHEP* **0312** (2003) 011.
- [41] G. C. Cho and Y. Uehara, “Cosmological gravitino problem confronts electroweak physics,” *Phys. Rev. D* **69**, 075003 (2004).
- [42] S. Yamaguchi, “AdS branes corresponding to superconformal defects,” *JHEP* **0306**, 002 (2003).
- [43] A. Hebecker, J. March-Russell and T. Yanagida, “Higher-dimensional origin of heavy sneutrino domination and low-scale leptogenesis,” *Phys. Lett. B* **552**, 229 (2003).
- [44] G. C. Branco, R. Gonzalez Felipe, F. R. Joaquim and T. Yanagida, “Removing ambiguities in the neutrino mass matrix,” *Phys. Lett. B* **562**, 265 (2003).
- [45] J. R. Ellis, M. Raidal and T. Yanagida, “Sneutrino inflation in the light of WMAP: Reheating, leptogenesis and flavor-violating lepton decays,” *Phys. Lett. B* **581**, 9 (2004).
- [46] K. Tobe, J. D. Wells and T. Yanagida, “Neutrino induced lepton flavor violation in gauge-mediated supersymmetry breaking,” *Phys. Rev. D* **69**, 035010 (2004).
- (会議抄録)
- [47] T. Eguchi and K. Sakai, “Seiberg–Witten Curve for E -String Theory,” *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **152** (2003) 15.
- [48] T. Eguchi, Y. Sugawara and S. Yamaguchi, “Supercoset Cft’s For String Theories On Non-Compact Special Holonomy Manifolds,” *Annales Henri Poincare* **4** (2003) S93.
- [49] K. Fujikawa, “Lattice chiral symmetry, CP invariance and majorana fermions” *Proceedings of International Conference in Theoretical Physics in Paris, TH2002, July 22-27, 2002*, edited by D. Iagolnitzer, V. Rivasseau and J. Zinn-Justin (Birkhauser, 2003, Basel) P. 905.
- [50] 岸本 功, “Boundary states as exact solutions of (vacuum) closed string field theory,” 基研研究会「場の理論 2003」研究会報告, 素粒子論研究, **10-3** (2003-12) C-55.
- [51] S. Hayakawa, D. Ida, T. Shiromizu and T. Tanaka, “Gravitation In The Codimension Two Brane World,” *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **148** (2003) 128.
- [52] 渡辺 英徳, 「閉弦の場の理論における境界状態」, 基研研究会「場の理論の基礎的諸問題と応用」研究会報告, 素粒子論研究 (掲載予定).
- (学位論文)
- [53] M. Fujii, “Baryo/DM-genesis through MSSM flat directions and several important topics on Thermal Leptogenesis.”

- [54] S. Hayakawa, “Cosmological Constant and Extra Dimension”.
- [55] M. Nishikawa, “Natural beauty of the standard model -A derivation of the electro-weak unified and quantum-gravity theory without assuming a Higgs particle-”. (審査継続中)
- [56] K. Ohmori, “Open Superstring Field Theory Applied to Tachyon Condensation.”
- [57] K. Sakai, “Geometric Aspects of E -String Theory.” (修士論文)
- [58] 小山 文一, 「超弦理論におけるインフレーションモデル」.
- [59] 中山 優, “Liouville field theory: A decade after the revolution,” arXiv:hep-th/0402009.
- [60] 信山 竜二, 「Toric Calabi-Yau 多様体上の位相的弦理論」.
- [61] 桜井 真, “On the physics beyond the standard model” (標準模型を超えて).
- [62] 立川 裕二 “Supersymmetric Gauge Theory and Instanton Calculus.” (著書)
- [63] K. Fujikawa and H. Suzuki, “Path Integrals and Quantum Anomalies”, (Oxford University Press, 印刷中)
- [64] M. Fukugita and T. Yanagida, “Physics of Neutrinos,” Springer Berlin (2003).
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [65] M. Nishikawa, “A Simple Possible Cause of Color Confinement,” Color Confinement and Hadrons in Quantum Chromodynamics, Tokyo Institute of Technology, and The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Japan, July 2003.
- 招待講演
- [66] 江口 徹, “Dynamics of $\mathcal{N} = 2$ and $\mathcal{N} = 1$ supersymmetric gauge theories,” 「Bangkok school on string theory」, バンコク, タイ, 2004年1月12日-18日.
- [67] 江口 徹, “Gauge/gravity correspondence in string theory,” COE 国際会議「Prospects on Fundamental Physics in the 21st Century」, 山上会館, 東京大学, 2004年2月16日-18日.
- [68] Y. Matsuo, “Boundary states as exact solutions of (vacuum) closed string field theory,” Workshop on Branes and Generalized Dynamics, Argonne National Laboratory, US, October 2003.
- [69] T. Yanagida, “Baryo- and Leptogenesis,” DESY Workshop on “GUT and Brane”, Hamburg, Sept. 23-25, 2003.
- [70] T. Yanagida, “Large Lepton Mixing in A String Brane World,” Fujiwara seminar on “Neutrino Mass and Seesaw Mechanism”, Tsukuba, Feb. 23-25, 2004.
- [71] T. Yanagida, “Neutrino Mass and Universe’s Baryon Asymmetry,” COE 国際会議「Prospects on Fundamental Physics in the 21st Century」, 山上会館, 東京大学, 2004年2月16日-18日.
- (国内会議)
- 一般講演
- [72] 藤井 優成, “A solution to the coincidence puzzle of Ω_B and Ω_{DM} ,” 日本物理学会, 宮崎ワールドコンベンションセンター「サミット」, 2003年9月.
- [73] 伊部 昌宏, “Upper bound of Proton lifetime in product group unification,” 「素粒子物理学の進展」, 京都大学基礎物理学研究所, 2003年7月.
- [74] 伊部 昌宏, “Neutralino dark matter and Affleck-Dine Baryogenesis”, 日本物理学会, 宮崎ワールドコンベンションセンター「サミット」, 2003年9月.
- [75] 伊部 昌宏, “Upper Bound on Gluino Mass From Thermal Leptogenesis,” 日本物理学会, 九州大学, 2004年3月.
- [76] 井手口 恒太, 「9次元コンパクト化された PP-wave 上の弦理論」, 場の量子論 2003, 京都大学基礎物理学研究所, 2003年8月
- [77] 井手口 恒太, 「捻れたトーラスにコンパクト化された PP-wave 上の弦理論」, 日本物理学会, 宮崎ワールドコンベンションセンター「サミット」, 2003年9月.
- [78] 岸本 功, “Boundary states as exact solutions of (vacuum) closed string field theory,” 場の理論 2003, 京都大学基礎物理学研究所, 2003年8月.
- [79] 岸本 功, 「閉弦の場の理論における境界状態 II」, 日本物理学会, 宮崎ワールドコンベンションセンター「サミット」, 2003年9月.
- [80] 岸本 功, 「閉弦の場の理論における冪等方程式とその応用」, 日本物理学会, 九州大学, 2004年3月.
- [81] 小山 文一, 「D3D7 インフレーションモデルの解析」, 日本物理学会, 九州大学, 2004年3月.
- [82] 中山 優, 「向き付けされていない2次元非臨界弦におけるタドポールの相殺」, 日本物理学会, 九州大学, 2004年3月.
- [83] 西川 美幸, 「QCD カラー閉じ込めに関する一考察」, 素粒子物理学の進展, 京都大学基礎物理学研究所, 2003年7月.
- [84] 西川 美幸, 「シーソー機構を仮定しないニュートリノ小質量の導出」, 日本物理学会, 宮崎ワールドコンベンションセンター「サミット」, 2003年9月.
- [85] 西川 美幸, 「Natural beauty of the standard model I -A possible origin of a U(1) gauge degree of freedom-」, 日本物理学会, 九州大学, 2004年3月.
- [86] 西川 美幸, 「Natural beauty of the standard model II -Unification of the 4 interactions via a U(1) gauge symmetry without assuming a Higgs particle-」, 日本物理学会, 九州大学, 2004年3月.

- [87] 大森 一樹, “Cubic/Non-polynomial Correspondence in Open Superstring Field Theory?,” 場の量子論 2003, 京都大学基礎物理学研究所, 2003 年 8 月.
- [88] 大森 一樹, “Toward Open-Closed String Theoretical Description of Rolling Tachyon,” 日本物理学会, 宮崎ワールドコンベンションセンター「サミット」, 2003 年 9 月.
- [89] 菅原 祐二, “Branches of $N = 1$ vacua and Argyres-Douglas points,” 日本物理学会, 宮崎ワールドコンベンションセンター「サミット」, 2003 年 9 月.
- [90] 菅原 祐二, “Modular Bootstrap for Boundary $N=2$ Liouville Theory - Towards the Non-compact Gepner Models -,” 日本物理学会, 九州大学, 2004 年 3 月.
- [91] 立川 裕二, “Five-Dimensional Chern-Simons terms and Nekrasov’s Instanton Counting,” 日本物理学会, 九州大学, 2004 年 3 月.
- [92] 高柳 博充, “Boundary States for D-branes with Traveling Waves,” 場の量子論 2003, 京都大学基礎物理学研究所, 2003 年 8 月.
- [93] 高柳 博充, “Comments on Applications of D-branes with Traveling Waves,” 日本物理学会, 宮崎ワールドコンベンションセンター, 2003 年 9 月.
- [94] 高柳 博充, “Boundary States for Supertubes,” 場の量子論の基礎的諸問題と応用, 京都大学基礎物理学研究所, 2003 年 12 月.
- [95] 高柳 博充, “Boundary States for Supertubes in Gödel Background,” 日本物理学会, 九州大学, 2004 年 3 月.
- [96] 渡辺 英徳, 「閉弦の場の理論における境界状態 I」, 日本物理学会, 宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット, 2003 年 9 月.
- [97] 渡辺 英徳, 「閉弦の場の理論における境界状態」, 場の量子論の基礎的諸問題と応用, 京都大学基礎物理学研究所, 2003 年 12 月.
- [98] 渡辺 英徳, 「共形写像による閉弦の場の理論の定式化と冪等方程式」, 日本物理学会, 九州大学, 2004 年 3 月.
- [99] 山口 哲, “AdS Branes Corresponding to Superconformal Defects,” 日本物理学会 2003 年秋季大会, 宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット, 2003 年 9 月 9 日.
- [100] 山口 哲, “AdS Branes Corresponding to Superconformal Defects,” 研究会「場の量子論 2003」, 基礎物理学研究所, 2003 年 8 月 8 日.
- [103] 江口 徹, “Topological strings and Nekrasov’s formulas,” 研究会「Quantum Periods」, 奈良国際高等研, 2003 年 11 月 18 日-20 日.
- [104] 江口 徹, “Dijkgraaf-Vafa and 4 dimensional CFT,” 研究会「時代精神としての数理論理」, 名古屋大学多元数理, 2003 年 11 月 25 日-28 日.
- [105] 江口 徹, “Topological strings and Nekrasov’s formulas,” 駒場 2003, 崎田先生追悼研究集会, 2003 年 11 月 27 日-28 日.
- [106] 藤川 和男, “Gauge Theory: Its Origin, Developments and Future,” 基礎物理学研究所「場の理論」研究会, 2003 年 12 月 24 日 26 日.
- [107] 藤川 和男, “Anomalies, local counter terms and path integral bosonization,” Sapporo Winter School, Niseko, January 9-11, 2004.
- [108] 松尾 泰, “Algebra of boundary states in closed string field theory,” 駒場 2003, 崎田先生追悼研究集会, 2003 年 11 月 27 日-28 日.
- [109] 柳田 勉, 「素粒子で宇宙の進化を解く」, 第 18 回「大学と科学」公開シンポジウム, 「宇宙の誕生と未来」東京, 平成 16 年 1 月 31 日-2 月 1 日.

招待講演

- [101] 江口 徹, “Factorization of Seiberg-Witten curve and 4 dimensional $\mathcal{N} = 1$ superconformal field theory,” S.-T. Yau 氏との特別講演会, 東大数理科学研究科, 2003 年 7 月 12 日.
- [102] 江口 徹, “Topological field theory from of string theory compactified on manifolds with G_2 holonomy,” サマースクール・富士山 2003, 富士教育研修所, 2003 年 8 月 13 日-19 日.

2 原子核・素粒子実験

2.1 原子核実験研究室(酒井、早野、櫻井研究室)

原子核実験研究室は、酒井研究室、早野研究室、櫻井研究室の三研究室で構成される。互いに密接に連絡を取りながら、原子核物理を中心とし、原子物理、素粒子物理などとの境界分野も含めた領域の実験研究を行っている。

酒井研究室では、原子核のスピン・アイソスピン自由度に着目し、ハドロン多体系としての原子核の構造や、核子間の相互作用の研究を中心に行っている。実験装置として、偏極イオン源、偏極標的、散乱粒子の偏極度を測定する偏極度計などの開発を進めて来た。

今年度は、偏極中性子-重陽子弾性散乱による三体力の検証、超狭幅ダイバリオンの探索、2陽子系のスピンを用いたベルの不等式の検証、および、不安定核ビーム ${}^6\text{He}$ と偏極陽子固体標的の散乱実験を行った。また、来年度の本実験に向けて、300 MeV における (p, n) 反応のガモフ・テラー単位断面積の精密測定に向けたテスト実験を遂行した。

早野研究室では、反水素(反陽子と陽電子でできた反物質)、反陽子ヘリウム(ヘリウム原子核のまわりを反陽子と電子がまわっている原子)、中間子原子(原子核に π^- 中間子、 K 中間子、 η 中間子などが束縛された系)など、さまざまな奇妙な原子(エキゾチック原子)を研究し、基本的な対称性の解明を行っている。

特に、反水素については、スイスの CERN 研究所における大量生成の成功(2002年)を基礎に、反水素原子の高精度分光による物質・反物質対称性の研究への本格的取り組みを開始した。この研究は、科学研究費補助金「特別推進研究」(2003年度から5年間)に選定された。

また、ドイツの GSI 研究所において π 中間子原子の精密分光を行い、そのデータを詳細に解析することで、後に述べるように、「クオーク凝縮」の強さが、原子核の外と内部で変化することを初めて定量的に示し、新聞等にも大きく報道された。[156, 157, 158, 159, 160, 161] この研究は、物質質量の起源を解明する上で、大きな役割を果たすと期待されている。

櫻井研究室では、天然に存在する安定核よりも中性子数や陽子数が極端に多い不安定核を生成し、その高アイソスピンに由来するエキゾチックな性質を探る実験研究を行っている。特に中性子過剰核に現れ

る特異な現象に着目し、中性子過剰核のハロー構造や殻構造の変化(魔法数の消失や新魔法数の出現など)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 偏極中性子-重陽子弾性散乱測定による三体力の検証(酒井研究室)

原子核は、陽子・中性子が高々数百個の粒子からなる多体系である。この原子核は多様な振る舞いを示すが、核力の積み重ねでどう記述されるかは、原子核物理学の最大のテーマと言って良い。そのためには、核力が精度良く理解されていなければならないが、核子-核子間力(二体力)に加え、近年、三核子間力(三体力)効果の重要性が指摘されている。

三体力の存在に関しては、湯川の間接理論が提唱された直後から議論が成されており、その主な寄与は、 2π 交換により中間状態として Δ 粒子を励起するもの(藤田・宮沢型)と考えられている。しかし、三体力は二体力に比べて弱いため、近年までその存在を明確に示す実験結果はほとんどなかった。最近、中間エネルギー領域での陽子と重陽子の弾性散乱における散乱断面積と、三核子系を厳密に記述するファデーエフ(Faddeev)理論計算との比較から、我々は三体力の証拠を得た[1, 44, 52, 56, 90, 92, 94, 107]。しかし、現在の理論計算にはクーロン力が取り入れられていないため、陽子-重陽子間に働くクーロン力の効果を無視した上で実験値と理論計算の比較が行われている。この扱いの妥当性は明らかではないため、我々は、クーロン力の不定性がない中性子-重陽子弾性散乱の測定を行った。

実験は大阪大学核物理研究センターにて行った。今年度は (n, p) 実験施設で偏極中性子ビームを生成し、中間角度領域における微分散乱断面積および偏極分解能のデータを取得した。これまでの測定と合わせると、世界で初めて中間エネルギー 250 MeV において $\theta = 10\text{--}180^\circ$ という広い角度範囲に渡るデータセットを完成させたことになる。

微分散乱断面積の実験結果を図 2.1 a に示す。黒丸は実験結果、薄いバンドは二体力を用いたファデーエフ計算で、これに三体力を取り入れた計算が濃いバンドである。二体力のみを用いた計算より三体力を含んだ計算の方が実験値を比較的良く説明するものの、後方角度では実験値を再現しない。最近、二体力に相対論的效果を取り入れた計算が試みられ、理論計算が後方角度で部分的に改善されることが示されたが、実験値を再現するには至っていない。

図中の白丸は、同じエネルギーで行った陽子-重陽

子散乱実験の結果で、本実験結果との間には有意な差が見られる。三体力効果を詳細に研究するためには、クーロン力効果の現れない中性子-重陽子散乱実験と、理論との比較を行うことが重要であることが明らかになった。[58, 82, 91, 93, 95, 105, 118, 119, 135]

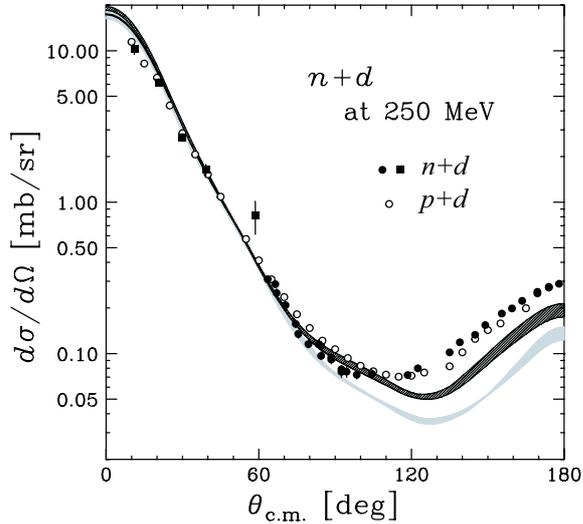


図 2.1 a: Results of the cross sections for the $\bar{n}d$ elastic scattering at 250 MeV. Black circles and squares are the data obtained at the (n,p) facility and the NTOF facility, respectively. The dark (light) shaded band represents the results of Faddeev calculations with (without) the three nucleon force. Open circles are the results of the $\bar{p}d$ elastic scattering at 250 MeV[4].

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

ダイバリオンとは6つのクォークにより構成される複合粒子である。その存在の実験的確認は未だ得られていないが、量子色力学 (QCD) の範囲内ではダイバリオンの存在が予測されており、ダイバリオンの発見は単に新粒子の存在を指し示すだけでなく、QCD の進展に対しても非常に意義深いものである。

近年のモスクワグループの報告によれば、重水素化ポリエチレンを標的とした陽子-重陽子散乱のスペクトルから幅の狭いピークが3つ観測され、超狭幅ダイバリオンの可能性を指摘した。超狭幅ダイバリオンとは、パウリ原理より強い相互作用による崩壊が禁止され、電磁相互作用によって崩壊するダイバリオンである。そのためダイバリオンの中でも特に寿命が長く、崩壊幅は1 keV 以下とされている。

今年度、我々は大阪大学核物理研究センターにて、

陽子-重陽子散乱による超狭幅ダイバリオンの崩壊ピークを探索した。300 MeV の陽子ビームを液体重水素標的に照射し、散乱陽子の質量欠損を測定した。超狭幅ダイバリオンが存在すれば、質量欠損スペクトル上で超狭幅ダイバリオンの質量に対応する箇所にピークが観測されるはずである。今回の実験では、質量分析に2台の高分解能磁気スペクトロメータを使用し、散乱陽子と超狭幅ダイバリオンの崩壊粒子を同時計数することでダイバリオン生成イベントの同定を容易にした。また、液体重水素標的を用いることで、重水素化ポリエチレン標的を使用した際に問題となる、標的起源のバックグラウンドを減少させた。以上の工夫により、高感度の探索実験を実現し、モスクワで報告されたピークを全て覆うような質量領域 1898–1953 MeV において超狭幅ダイバリオンを探索した。

結果を図 2.1 b に示す。超狭幅ダイバリオンと思われる有意なピークは観測されなかった。モスクワでの実験で得られたダイバリオン生成断面積 $\sim 3 \mu\text{b}/\text{sr}$ に対し、本実験から見積もった生成断面積の上限値は、1898–1940 MeV の質量領域では $1.5 \mu\text{b}/\text{sr}$ 以下となり、1940 MeV 以上の質量領域では $3 \mu\text{b}/\text{sr}$ 以下となった。ダイバリオン質量の大きい領域では生成断面積の統計誤差が大きいため、ピークの有無を決定するための解析を慎重に進めている。[80, 120, 138]

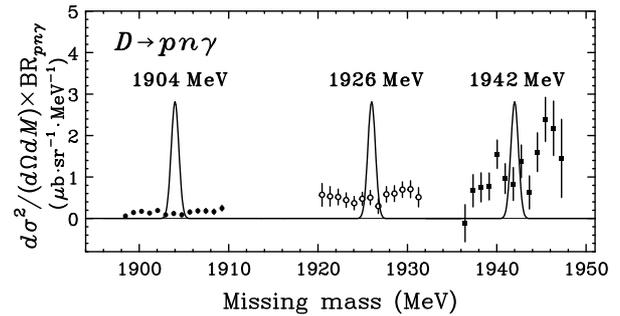


図 2.1 b: Dibaryon production cross section multiplied by the branching ratio for the $p+n+\gamma$ channel ($\text{BR}_{pn\gamma}$) around 1904, 1926 and 1942 MeV as a function of the missing mass of the $pd \rightarrow pX$ reaction. The curves are the expected spectra if the dibaryons reported by the Mowcow group are observed in this dibaryon search experiment.

2.1.3 不安定核ビーム ${}^6\text{He}$ と偏極陽子固体標的の散乱実験 (酒井研究室)

スピン偏極陽子散乱実験は、原子核の構造や反応機構について極めて重要な情報を与える研究手段となっている。スピン・軌道力の確認などはその好例であり、殻モデルの成立に重要な役割を果たした。従

来、安定原子核を対象として偏極実験はされてきたが、不安定核にまで研究対象を広げることができれば、あらたな知見が期待される。

不安定核はビームとして供給されるので、偏極陽子標的が必要である。ビームの強度は弱く偏極陽子ガス標的による実験は現実的でない。標的数の観点からは、偏極陽子固体標的が候補となる。しかしながら、従来から使われてきた偏極陽子固体標的は、強い磁場 ($\sim 2\text{T}$) と極低温 ($< 0.1\text{K}$) が必要であり、逆運動学条件で測定する不安定核ビーム実験には極めて不向きである。そこで我々は全く新しい手法による不安定核ビーム実験に利用できる偏極陽子固体標的を5年かけて開発した。

我々が開発した偏極陽子固体標的は、陽子を動的核偏極法 (DNP) により偏極させ、高温 ($\sim 100\text{K}$)、低磁場 ($< 0.08\text{T}$) で使用できるという従来にない特徴を持つ。ナフタレンにペンタセンをドープした単結晶をアルゴンレーザーにより光ポンピングし、ペンタセンの三重項状態に電子偏極を得る。この電子偏極を固体積分効果による DNP により陽子偏極に移行させる。

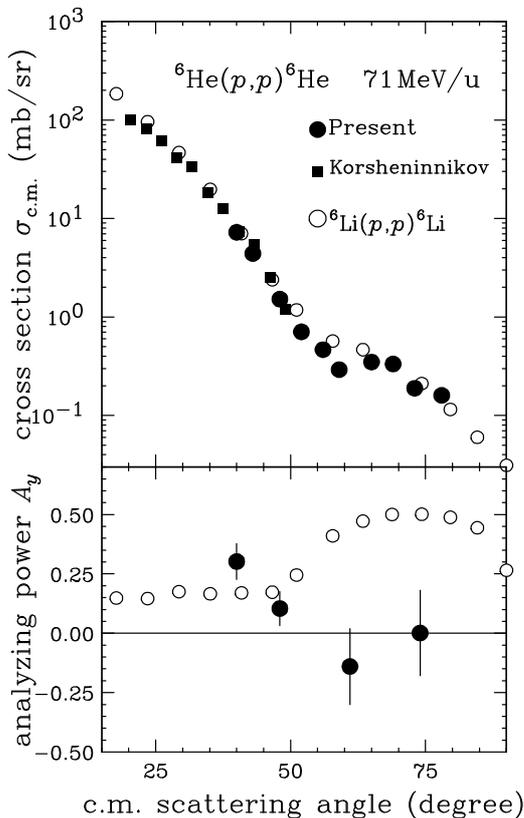


図 2.1 c: Results of the cross sections (upper panel) and analyzing powers (lower panel) for the $p + {}^6\text{He}$ elastic scattering at 71 MeV. Black circles are the present results.

不安定核 ${}^6\text{He}$ ビームによる偏極陽子 \bar{p} 標的実験を核子当り 71 MeV のエネルギーで行った。これは $\bar{p} + {}^6\text{He}$ 弾性散乱である。 ${}^6\text{He}$ 核は、中性子の密度分布が陽子の密度分布に比べて 1 fm ほど広がった中性子スキンと呼ばれるエキゾチックな構造を持つことが知られている。実験は理化学研究所の RI 分離装置 RIPS でおこなった。 ${}^6\text{He}$ ビームの強度は 10^5 個/秒、偏極固体標的は、直径 14 mm 厚さ 1 mm であり約 20% の偏極度であった。散乱された ${}^6\text{He}$ と反跳陽子の同時計数を行っている。 $\theta_{\text{cm}} = 40\text{--}80^\circ$ の範囲の角度分布を測定した。

測定結果を図 2.1 c に黒丸で示した。微分断面積の $\theta_{\text{cm}} = 20\text{--}50^\circ$ のデータは Korshenninnikov によるものであり黒四角で示した。比較のために同重核である ${}^6\text{Li}$ 核による同じエネルギーでの $\bar{p} + {}^6\text{Li}$ 弾性散乱の結果も白丸でプロットしてある。

${}^6\text{He}$ 核と ${}^6\text{Li}$ 核の微分断面積は形も大きさもほぼ同じである。このことはこれら二つの核の相互作用ポテンシャルがほぼ同じであり平均二乗半径もほぼ同じであることを示している。しかしながら、偏極分解能の値は ${}^6\text{He}$ 核は後方角度でゼロまたは負になるが、 ${}^6\text{Li}$ 核では大きな正になる。これは微分断面積の類似性から類推すると、とても考え難く異常な振る舞いである。

これらのデータについて微分断面積と偏極分解能を使って現象論的光学ポテンシャル解析を行うと、 ${}^6\text{He}$ 核のスピンの軌道ポテンシャルは ${}^6\text{Li}$ 核に比べて約 0.8 fm ほど外部に位置しているという結果が得られた。これは中性子スキンの効果によるものと考えられることもできる。更なる理論解析を進めている。

この実験は不安定核ビームによる世界で最初の偏極分解能測定であり、今後の大きな発展が期待されている。このプロジェクトは原子核科学センターの上坂グループとの共同研究である。[51, 81, 136]

2.1.4 2 陽子系のスピンを用いたベルの不等式の検証 (酒井研究室)

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

ベルの不等式の発見以来、もつれた光子対を用いた不等式の検証実験が多数行なわれ、殆どの実験が量子力学を支持する結果を得ている。しかし、ハドロン系を用いた高精度検証実験は行われていない。このような量子的な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。

そこで、我々は今年度、2 陽子のスピンを用いた

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

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

図 2.1 d に今回の実験で得られたデータの約 5% を解析して得た $C(\phi)$ を示す。まだ統計精度が悪いため、ベルの不等式との比較はできないが、2 陽子のスピン相関が確認できた。今後解析を進め、最終的には 4σ 以上の精度でベルの不等式の破れを検証できる。[66, 117, 137]

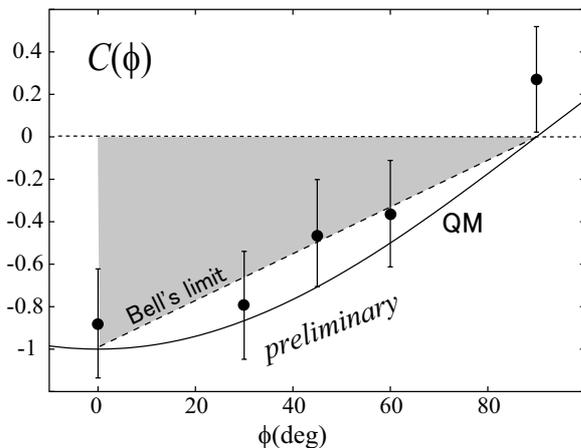


図 2.1 d: Spin correlation function $C(\phi)$. The curve shows the prediction of the quantum mechanics. The hatched region corresponds to the prediction according to Bell's inequality.

2.1.5 300 MeV における (p, n) 反応のガモフ・テラー単位断面積の精密測定 (酒井研究室)

高密度な中性子星の内部では、パイ中間子によるポーズ・アインシュタイン凝縮相が発現していると言われており、原子核物理学の長年の興味の対象であった。このパイ中間子凝縮相の臨界密度を定量的に推定するためには、核内パイ中間子相関の振る舞いを決めるランダウ・ミグダル相互作用の未知係数 g'_{ND} を実験的に求める必要がある。

遷移量子数 $\Delta S = \Delta T = 1$ 、 $\Delta L = 0$ を持つガモフ・テラー (GT) 型遷移について、総遷移強度を実験的に求め、池田の和則値 $3(N - Z)$ からの減少 (クエンチング) を精度良く求めると、 g'_{ND} を決定することができる。クエンチングの度合を表す GT 抑制係数は β^- 側反応の総遷移強度と β^+ 側反応の総遷移強度の差 ($S_{\beta^-} - S_{\beta^+}$) を和則値で割った値として定義される。我々は、既に $^{90}\text{Zr}(p, n)^{90}\text{Nb}$ 反応、 $^{90}\text{Zr}(n, p)^{90}\text{Y}$ 反応の測定により β^- 側、 β^+ 側双方の高精度データを取得済みである [45, 49, 60, 63, 65, 67, 104, 106]。

散乱断面積と GT 遷移強度を結び付ける比例係数が GT 単位断面積である。GT 単位断面積の値はエネルギーと標的質量数に依存するが、実験的困難から、300 MeV において、中重核の GT 単位断面積を高精度で測定した例はなく、160 MeV より外挿して求めた GT 単位断面積を持つ 15% の誤差が、GT 抑制係数の主な誤差になっている。このため、300 MeV での $^{90}\text{Zr}(p, n)$ 反応の GT 単位断面積を高精度で決定することが必要である。

GT 単位断面積を求めるには、何らかの方法で GT 遷移強度が正確に知られている遷移があり、同時に、それらが (p, n) 反応スペクトル中でピークとして分離されることが必要である。 ^{58}Ni 、 ^{120}Sn について、高分解能 ($^3\text{He}, t$) 反応により低励起領域の GT 遷移強度が調べられており、 (p, n) 測定のエネギー分解能 700 keV が得られれば GT 単位断面積を導出できる。これらの値を用い質量数に関して内挿することにより、 $^{90}\text{Zr}(p, n)$ 反応の GT 単位断面積を精度良く求められる。

上記の手法の有効性を確かめるため、大阪大学核物理研究センター中性子飛行時間測定施設において、入射エネルギー 200 MeV でのテスト実験を行った。このテスト実験において、エネルギー分解能 700 keV で、 $^{58}\text{Ni}(p, n)$ 、 $^{120}\text{Sn}(p, n)$ のスペクトルを測定し、200 MeV における GT 単位断面積を、それぞれ、 4.2 ± 0.3 mb/sr、 3.8 ± 0.4 mb/sr と求めた。この結果を GT 単位断面積の質量依存性に基づいて内挿し、 $^{90}\text{Zr}(p, n)$ の GT 単位断面積 4.0 ± 0.3 mb/sr を得た。

また、九州大学と共同でプラスチックシンチレータから成る中性子検出器を新たに導入し、 110 mg/cm^2 厚の ^{120}Sn 標的に対して、440 keV のエネルギー分解能を達成した。励起エネルギースペクトルを図 2.1 e に示す。入射エネルギー 300 MeV において、この検出器を用いたときのエネルギー分解能は 700 keV と期待され、300 MeV においても、200 MeV と同

様の手法で GT 単位断面積を決定できることを確認できた。[139]

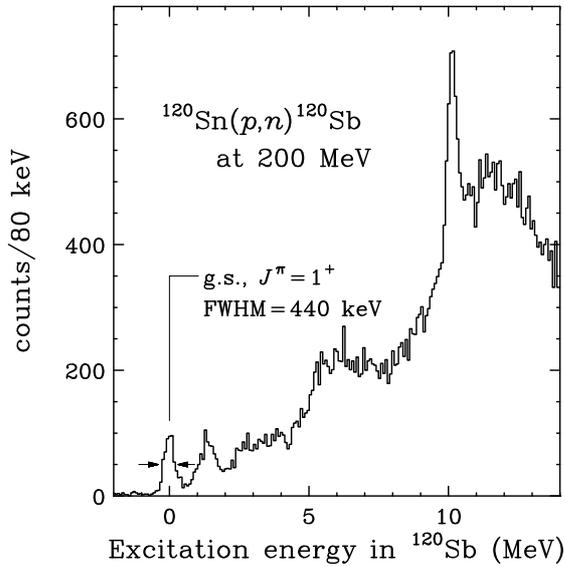


図 2.1 e: Excitation energy spectrum of $^{120}\text{Sn}(p, n)^{120}\text{Sb}$ in measurement at 200 MeV with the newly developed detection system.

2.1.6 π 中間子原子を用いた物質質量起源の研究 (早野研究室)

陽子や中性子はクォーク 3 個から構成されるので、ナイブには、クォーク 1 個は陽子の約 $1/3$ の質量を持つと思われる。ところが、クォーク 3 個の質量を足しても、たかだか陽子質量の 2% 以下であり、陽子質量には遠く及ばない。これは、「カイラル対称性の自発的な破れ」によって真空中にクォーク対が凝縮し、クォークに大きな有効質量を与えたためと考えられているが、実験的にクォーク凝縮の存在を示すことは容易でない。

我々は、 π 中間子原子を、従来とはまったく異なる方法、すなわち、高エネルギーの重陽子を原子核にぶつけ、反応で生じるヘリウム 3 を検出することで、 π 中間子が原子核に入り込むほど深く束縛された状態を生成し、その束縛エネルギーを精密に測定した。そして、束縛エネルギーとクォーク凝縮の強さを結び理論的關係を利用し、原子核の外に比べ、原子核中では凝縮の大きさが $2/3$ に減少していることを定量的に示した。これは、初田らの理論予測と良く一致している。[32, 70, 72]

クォーク凝縮に関し、定量的な実験結果が得られたのはこれが初めてであり、物質質量起源の解明に大きく近づいたと言える。

2.1.7 反陽子ヘリウム原子・イオン (早野研究室)

早野研究室が主導的役割を担う、ASACUSA 実験グループは、CERN の AD(反陽子減速器)において、反陽子ヘリウム原子・イオンに関する実験を行った。

反陽子ヘリウムイオンの系統的な測定

我々の過去の実験において、主に研究の対象になっていたのは、反陽子、ヘリウム原子核、電子から成る三体系、反陽子ヘリウム原子 ($\bar{p}\text{He}^+$) である。過去数年に渡り、 $\bar{p}\text{He}^+$ の様々な遷移に対するエネルギーが、レーザー分光の手法により決定され、また理論との比較が行われてきた。2003 年には、陽子・反陽子の質量差・電荷の絶対値の差が、相対精度で 1.0×10^{-8} より小さいという、CPT 定理精密検証の結果が発表された。[7]

一方で我々は、反陽子とヘリウム原子核から成る二体系である、反陽子ヘリウムイオン ($\bar{p}\text{He}^{2+}$) の、精密レーザー分光を目的とする実験を開始した。二体系においては、理論的な取り扱いが三体系と比較して遙かに容易であるため、より高い精度の実験・理論検証、ひいては CPT 検証を行うことが可能になると期待できる。2003 年に我々は、10 K 程度に冷却された $\bar{p}\text{He}^{2+}$ を大量 (合計 10^9 個程度) に生成し、初めて系統的な寿命測定を行った。イオンの主量子数 n は 30 程度、軌道角運動量 l は、 $n-1$ に等しい準位が調べられた。

反陽子ヘリウム原子は、ヘリウム気体標的に反陽子を止める事によって生成される。角運動量の高い ($l \sim 38$) ものは、3 マイクロ秒程度、原子状態を保つことができるが、特定の波長を持つレーザーによって、Auger 遷移の起こりやすい短寿命準位への遷移を引き起こす事が可能である。短寿命準位では、Auger 遷移により、原子は直ちにイオン準位へと移行する。過去の実験において、イオン状態は、通常のヘリウム原子との衝突により Stark 効果を受け、短時間で破壊されるため、観測された事は無かった。しかし n, l が共に 30 程度のイオン状態は、真空中ならば、放射脱励起しか起こさないため、300–500 ns 程度の寿命を持つはずである。その場合には、イオン寿命が反陽子の消滅の遅れとして観測できるはずであり、更にはイオン準位に対して精密なレーザー分光を行う事ができると期待できる。今回の実験では、標的として過去 (2000–2001 年) の実験より 2–5 桁程度低密度な (原子密度 $10^{15} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) ヘリウム気体を使い、衝突回数をできる限り少なく抑えた。そのような低密度標的に反陽子を静止させるため、RF 四重極電場による反陽子減速装置 (RFQD) を使用し、反陽子を 100 keV 以下にまで減速した。ヘリウム気体標的は、10 K 程度に冷やされている為、原子生成から十分な時間 (数 100 ns) の後、レーザーの照射により生成されるイオンも、同程度の温度まで冷えていると考えられる。

以上のような実験手続きにより、標的密度に依存して、反陽子消滅信号の時間的な伸びが変化する様

子を観測した。イオンの長寿命化による反陽子消滅信号の伸張は、数ナノ秒のオーダーで起こるため、従来の、5 ns 程度の時間分解能を持つ実験装置では、十分に対応できない。そこで、時間分解能が 1 ns より高く、ゲートのかげられる、MCP(micro channel plate) 型の光電子増倍管が新たに開発され、用いられた。また、チェレンコフ放射エータの形状にも改良が加えられ、高速な測定に対応できるようになった。

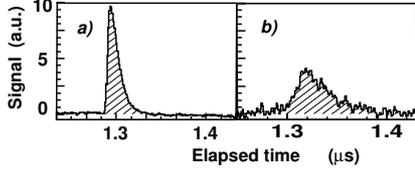


図 2.1 f: $\bar{p}^4\text{He}^+$ の遷移、 $(37,34)\rightarrow(36,33)$ の、レーザー消滅シグナル。(a) は高密度、(b) は極めて低い密度において測定。

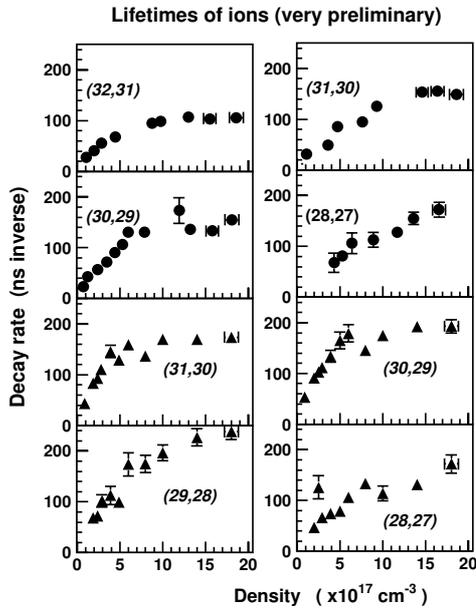


図 2.1 g: 様々な標的気体密度に対して測定された、反陽子消滅信号の減衰率。 $\bar{p}^4\text{He}^{2+}$ の準位は、 (n,l) で、 $\bar{p}^3\text{He}^{2+}$ の準位は (n,l) で示されている。

図 2.1 f (a) は、高密度標的 ($5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$) において測定された、レーザーによる反陽子消滅信号である。減衰の時定数は 6 ns 程度であり、この密度ではイオン状態が、原子衝突によってたちまちの内に破壊されてしまう事を示している。(b) は、低密度標的 ($3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) における同様の信号であるが、寿命は 30 ns 程度にまで伸びている事が分かる。

様々な波長のレーザー遷移を引き起こすことで、 $\bar{p}^4\text{He}^{2+}$ の、 $(n,l) = (32,31)$ 、 $(31,30)$ 、 $(30,29)$ 、

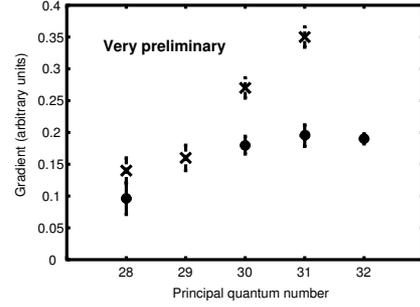


図 2.1 h: 4つの $\bar{p}^4\text{He}^{2+}$ 状態 (○)、それに4つの $\bar{p}^3\text{He}^{2+}$ 状態 (×) における、消滅レート対標的密度の傾きを、主量子数 n に対してプロットしたものの。

$(28,27)$ 状態、そして $\bar{p}^3\text{He}^{2+}$ の、 $(31,30)$ 、 $(30,29)$ 、 $(29,28)$ 、 $(28,27)$ 状態の寿命を系統的に測定した。図 2.1 g では、 $\rho = 3 \times 10^{15} \sim 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の範囲の標的気体密度に対して測定された、レーザー消滅シグナルの減衰率が示されている。気体密度の低い ($\rho < 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 領域においては、減衰率の増大はほぼ線形であるが、高い標的密度では、一定の値に飽和してしまう。この一定値は、レーザーの時間幅 (4-6 ns) 等に由来する測定装置の時間分解能と、原子準位のオーグメント崩壊率 (10 ps から数 ns) から決定されるものである。密度 0 への外挿を行うと、放射脱励起による寿命 (理論値: 300-500 ns) にほぼ相当する減衰率が得られた。低密度部分の傾きを、適当な曲線によってフィットして求め、主量子数 n に対して表したのが、図 2.1 h である。この傾きは、散乱断面積に対応する量であり、図中の傾きは、およそ $2-8 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ に相当する。

散乱断面積への変換を含め、結果は未だ解析中であるが、2つの同位体のうち、 $\bar{p}^3\text{He}^{2+}$ の方がより強く n に依存して、傾きが変化する。一方、 $\bar{p}^4\text{He}^{2+}$ は比較的弱い依存性を持つらしいという兆候が見られている。大きな n の場合、より寿命が短くなるという結果は、 n の大きな状態の原子半径が大きき場合には、より衝突が起こりやすいという、単純な描像と合致する。以上の結果は、今後、反陽子ヘリウムイオンに対するレーザー分光実験の手法を考案していく上で、本質的に重要である。

$\bar{p}\text{He}^+$ 原子の水素によるクエンチング断面積における温度依存性

2002年に、我々は、 $\bar{p}\text{He}^+$ 原子の水素分子と重水素分子との衝突によるクエンチング断面積を測定し、その温度依存性から、量子トンネル効果を見いだした。[8, 31] Sauge *et al.* によれば、クエンチング断面積 σ_q は、アレニウス型の項と、温度、準位の量子数に依存する項との和で表される。

$$\sigma_q = \sigma_0 \exp(-E_b/kT) + \sigma_t, \quad (1.7.1)$$

ここで、 σ_0 は、無限に高い温度における断面積、 E_b は、準位に依存するポテンシャル障壁の高さ、 k はボルツマン定数、 σ_t は、(重)水素分子がポテンシャル障壁をトンネル効果で通り抜けてくることによる断面積である。 σ_q を様々な温度で測定する事で、 E_b と σ_t が得られる事になる。2002年には、(38, 37) という特定の状態の温度依存性が調べられたが、2003年には引き続き、低い温度 (15 K) を含む実験が行われ、とくに (39, 35) の重水素分子、(37, 34) の水素分子によるクエンチングが調べられた。(図 2.1 i).

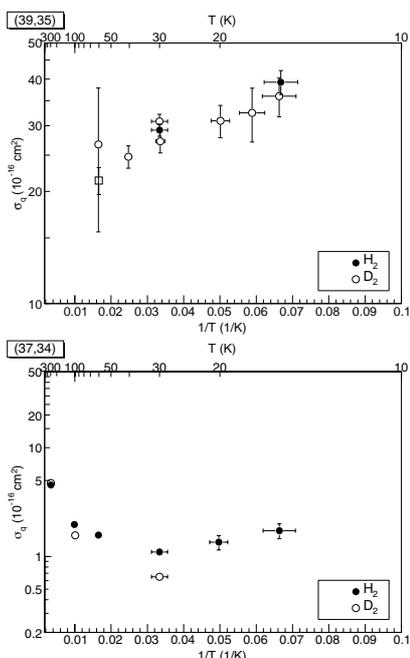


図 2.1 i: (39, 35) と (37, 34) 準位の、クエンチング断面積 σ_q の温度依存性。(過去のデータも含む。)

得られたデータは、30 K 以下での、断面積の増大を示しており、興味深い。これは上のポテンシャル障壁のモデルでは説明できない効果であり、低速度での分子衝突による、捕獲過程の可能性を示唆するものである。酸素の混入によるクエンチングの可能性も含め、その原因は未だ考察中である。

反陽子ヘリウム原子の超微細構造の研究

反陽子ヘリウム原子のエネルギー準位は、反陽子の軌道角運動量、電子のスピン、反陽子のスピンの相互作用によって 4 重項の超微細構造に分岐している。2001 年に我々は、レーザー・マイクロ波共鳴法を用いることにより、 $(n, l) = (37, 35)$ 状態の 4 重項間のマイクロ波に誘起された遷移エネルギーを 3×10^{-5} の精度で測定することに成功した。[30, 71] この実験結果は理論計算の結果と 6×10^{-5} の精度で一致している。観測された遷移は、主に反陽子の軌道角運動量に依存しているため、我々の結果は、反陽子の軌

道 g 因子を 6×10^{-5} の精度で測定したことを意味している。(反物質の存在しない我々の世界では、反陽子が軌道運動をしている粒子は存在しないため、陽子の軌道 g 因子は、測定することができない。) 観測された 2 つの共鳴周波数の差は、反陽子のスピン g 因子に比例しているが、この値に対する我々の測定精度は、過去に行なわれた実験の精度を凌駕できていない。

我々の測定精度は、主として遷移線の幅によって決まっているため、2003 年には、この幅について調べ、この幅を減少させることができないかどうかを知るための新しい測定を行なった。前回に比べ、より高温で、低密度のヘリウム標的を用いた測定の結果、標的密度に依存した遷移線のシフトや、幅の広がりはないことが分かった。

2.1.8 レーザー実験へ向けた反水素原子の詳細研究 (早野研究室)

2002 年度、冷たい反水素の大量生成の成功がスイス・ジュネーブの CERN 研究所の反陽子減速器 (AD) で実験を行った ATHENA、ATRAP の両グループによって相次いで報告された。これらの成果によって、初めて反原子を使った測定実験への展望が開け、反物質研究の推進が期待されている。

我々 ATHENA 実験ではこの生成された反水素原子を使って物理法則の基本原則のひとつである CPT 対称性の高精度検証を目的としている。通常の場合の理論では荷電共役 (C)、空間反転 (P)、時間反転 (T) の三つの同時反転のもとでは、物理法則は不変に保たれなければならないとされている。その帰結として粒子と反粒子の間に同じ質量・寿命、符号のみが異なる電荷を持つことを予言するので、物質と反物質の物理量を測定しそれらを比較することは CPT 対称性への直接検証へと繋がる。反水素原子と対になる水素原子では、2003 年度現在 $1s-2s$ のエネルギー準位差がレーザー装置によって 14 桁の精度で分光されており、比較対象となる反水素原子での分光測定結果が待たれている。我々は 2003 年度も引き続き AD にて実験を行い、レーザー実験へと続く反水素原子の詳細研究を行った。

我々の実験装置で反水素 (\bar{H}) は主に陽電子の状態に応じて陽電子が一つ生成に寄与する輻射生成過程 ($\bar{p} + e^+ \rightarrow \bar{H} + \gamma$) と、陽電子が二つ寄与する ($\bar{p} + e^+ + e^+ \rightarrow \bar{H} + e^+$) の二つの生成過程によって作られると考えられている。束縛された陽電子のエネルギー準位は生成過程によって決められるため、これらのメカニズムを明確にすることはレーザー分光を行うのに非常に有益な情報となる。

我々は実験装置中で陽電子がプラズマ状態であることを利用した制御・測定技術を開発し、陽電子の温度・形状を変えることによって反水素生成への影響を調べた。[12, 13] プラズマが持つ固有振動をラジオ周波数大域の電気信号 (RF) によって励起し陽電子の温度を上げた際にはその温度上昇に応じて反水素の生成が抑制されることが観測され、回転電場と呼

ばれるプラズマの圧縮・膨張技術によって陽電子の形状を変えた際には反水素の生成信号が時間に対して異なる振る舞いを見せることが分かった。[11, 84] これらは簡単なモデルを使った理論から予想される温度・密度の依存性の数値とは単純には一致しておらず、実験装置内で二粒子が相互作用する際に複雑な振る舞いをするのが予想される。これらの結果をモンテカルロシミュレーションと組み合わせ正確に理解し、最終的には生成過程を制御し任意のエネルギー準位を持った反水素原子を用意することが見込れる。

解析では2002年度得られたデータから当初バックグラウンドと思われていた中にも反水素を示す信号が多数含まれていたことが分かり、50,000個と見積もられた反水素の生成個数が実際にはそのおよそ10倍、瞬間最大では秒間300個以上生成されていたことが新たに分かった。[21] また、実験装置の全容、検出器により得られる特徴的な反粒子の挙動を投稿論文にまとめられ出版された。[22, 23]

以上2003年度に開発・導入された技術及び解析によって得られた結果を基に、2004年度にはレーザー装置を使った実験が計画されている。

2.1.9 深束縛 π^- 中間子原子生成の新しい方法の研究 (早野研究室)

π^- 中間子と原子核とが束縛された π^- 中間子原子では、強い相互作用の影響を受けるために古くから研究がされてきている。特に、我々は π^- 中間子が原子核にほとんど埋没しているような深い束縛状態において、核媒質中での π^- 中間子の様子からカイラル対称性の破れの指標であるクォーク凝縮の値を求めることに成功している。[32] また、束縛している原子核の核密度分布についての情報が得られるとされており、不安定核上で π^- 中間子原子を生成することは非常に有意義であると考えられる。

今まで行われてきていたこの束縛状態の観測実験は ${}^A X(d, {}^3\text{He}){}^{A-1} X \pi^-$ 反応を用いていたが、この方法では安定原子核に π^- 中間子原子を束縛させることしか出来ない。そこで、我々は不安定核上でも束縛できるような方法として、逆運動学、つまり $d({}^A X, {}^3\text{He}){}^{A-1} X \pi^-$ という反応を用いる方法の実現可能性についての検討を行った。この方法で、不安定核ビームを得ることができれば不安定核上で π^- 中間子原子を生成することができる。

この検討の結果、不安定核ビームを用いる場合は、例えば現在のドイツの重イオン研究所 (GSI)、理化学研究所ではビーム強度が足りず、それぞれ将来建設される新しい加速器を使わなければ実験ができないということが分かった。また、実際に実験を行う際には、通常の標的ではビームがターゲット中で損失するエネルギーによって溶融してしまうという問題点も確認されている。[83, 122]

2.1.10 η 原子核形成実験向けの位置検出型チェレンコフ検出器の較正実験 (早野研究室)

昨年度までに開発、動作テストを行ってきたチェレンコフ検出器の位置較正実験をドイツの GSI 研究所において行った。これまでの動作確認テストにおいて、位置分解能 1.4mm という良好な結果が得られており、 η 原子核形成実験を行うのに十分高性能である事が分かっている。

2004年度中に本実験をドイツの GSI 研究所で予定しており、位置較正実験で得られたデータと併せて解析を行う。[121]

2.1.11 反 K 中間子の ${}^3\text{He}$ 原子核による深い束縛状態の探索実験 (早野研究室)

反 K 中間子-原子核の相互作用が強く引力的、すなわち、相互作用ポテンシャルが深いのか、あるいは弱く引力的であるのかは現代のハドロン物理学において非常に重要な問題である。

反 K 中間子-原子核相互作用に関する系統的なデータとしては反 K 中間子原子が存在するが、反 K 中間子と原子核の間の平均距離が大きく、従って近距離における相互作用に対して敏感では無いため、そのような相互作用に対して決定的なことは分からない。

もしもその相互作用が強く引力的であれば、反 K 中間子の原子核における深い準束縛状態が、観測可能な幅で存在し得る一方、その引力が弱い場合、そのような状態は観測可能な幅では存在し得ない。もしもそのような深い束縛状態が存在するならば、それ自体非常に興味深いことであるが、その束縛エネルギー及び自然幅は近距離におけるそれらの相互作用に対し最も直接的な情報を与え得る。

2002年秋に KEK 陽子シンクロトロン北カウンターホールで行われた E471 実験において我々は、液体 ${}^4\text{He}$ 標の上での静止 K^- から生ずる中性子と終状態の荷電粒子の同時測定により ${}^3\text{He}$ 原子核に於ける K^- 中間子の深い束縛状態の探索を行い、理論予想である 108MeV をはるかに超える、160~170 MeV の束縛エネルギーを持つ準安定状態の形成の示唆を得た。その結果から、2003年夏には標的厚を変更して再実験を行い、2002年秋の約4倍のイベント数を得た。現在全データの解析をほぼ終了し、再び同じ束縛エネルギーの状態の形成の示唆を得た (図 2.1 j)。

しかしながら、ピークは数 10MeV の広い幅を持つことが予想される上に、その生成率は小さく、また静止 K^- 反応から生ずる中性子バックグラウンドには非常にシグナルとの分離が困難な成分が存在し、データのみからバックグラウンドを決定することは出来ない。現在、非常に詳細なモンテカルロシミュレーションを行って、観測されたピークの構造が正しくそのような準束縛状態の形成と崩壊に伴うものなのか、あるいはバックグラウンドとその統計変動

のみによって説明可能なかどうかを検討中である。[97, 98, 116]

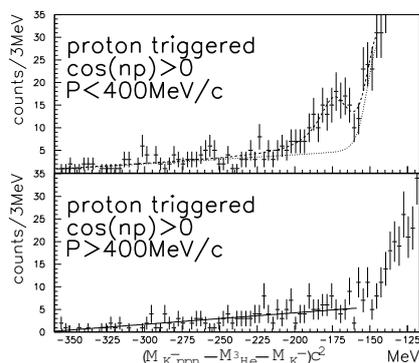


図 2.1 j: 二次荷電粒子が陽子で、中性子-陽子間の軌道の成す角度が 90 度以下である場合の missing-mass の分布の比較。上は陽子運動量が 400MeV/c 未満の場合で、シミュレーション上 signal の存在が期待される。下は陽子運動量が 400MeV/c を超える場合で、signal は存在しないことが期待される。

2.1.12 不安定核ビーム開発 (櫻井研究室)

近年軽い中性子過剰領域の核構造研究が盛んに行われ、中性子ハロー・スキン、魔法数 $N=8, 20$ の消失現象など安定核近傍で確立された従来の原子核描像とは大きく異なる性質が次々と見出されてきた。こうした不安定核のエキゾチックな核構造をより重い領域で探求するためには、これまで生成が困難であった不安定核ビームの開発が不可欠である。

不安定核ビーム生成は、中間エネルギー重イオンの優勢な反応である入射核破砕反応が用いられる。サイクロトロンで加速される大強度の重イオン 1 次ビームを標的にあて、運動量アクセプタンスの大きい破砕片分離装置を用いることによって、対象とする 2 次ビームを効率よく分離、生成することができる。ところが、中間エネルギーの重イオン核反応では、入射核破砕片の運動量分布が非対称であり、また、生成断面積に標的核依存性があるなど、高エネルギー領域に比べ未知な性質が多く、破砕片の生成断面積の予測が非常に困難である。特に、ドリップライン近傍の不安定核を対象とした実験を設計する場合、2 次ビーム強度が極めて小さくなるため、破砕片の生成断面積を精度よく測定する、また、測定に基づいた見積もりを行うことが重要である。

本年度は、近年増強された大強度の ^{86}Kr ビームを用い、Ca から Ge に至る中性子過剰核の生成断面積を測定した。今回の測定では、 $Z=20, 28$ の Ca, Ni 同位体、 $N=34, 50$ の同位体の生成断面積を求めた。また、同調体、同位体の断面積の系統性から、二重閉殻核 ^{78}Ni 、および新二重閉殻核として興味を持たれている ^{54}Ca の生成断面積の評価を行った。実験の

結果、測定された生成断面積は、半経験公式 EPAX の予測よりも 1~2 桁小さく、同公式中の U パラメータを 1.5 から 1.65~1.7 へ変更すると測定値をよく再現することがわかった。また、 ^{78}Ni 、 ^{54}Ca の生成断面積はそれぞれ 0.1 pb 程度以下、3 pb 程度と見積もられた。

2.1.13 中性子過剰核の安定性 (櫻井研究室)

中性子超過剰核の存在やその安定性は高アイソスピンに依拠する核構造の変化、有効核力の異常などを理解する上で基礎をなすものである。この観点から未開の中性子ドリップ線近傍核に関して、新同位元素探査、質量、半減期 ($t_{1/2}$) 及び β 遅発中性子放出確率 (P_{in}) の測定を試みている。[76]

2.1.14 インビームガンマ線分光法による不安定核の構造研究 (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がとられ、不安定核ビームを標的に照射し、適当な核反応で励起状態を生成し、脱励起する際の γ 線のエネルギーと絶対強度を測定する。これにより、励起準位のエネルギー、スピン・パリティ、遷移強度等の知見が得られる。我々は、対象となる不安定核の種類や得られるビーム強度、測定する物理量に応じて、様々な測定方法、励起方法を用いた研究を行っている。また、より広範囲の原子核を対象とし、多様な物理量を測定するための新しい手法の開発も行っている。以下に現在取り組んでいるテーマを測定方法で分類して述べる。[36, 38, 76, 77, 86, 150]

軽い中性子過剰核の励起状態の寿命測定法

軽い中性子過剰領域では、クラスター状態の発現、魔法数の変化など、エキゾチックな核構造が見いだされ注目を集めている。低励起状態の電磁遷移確率は、こうした核構造を端的に反映するため、重要な研究対象であるが、軽い中性子過剰核に対しては、限られた数の測定例しかない。従来、不安定核の電磁遷移確率を測定する手段として中間エネルギーでのクーロン励起法が広く適用されてきた。ところが陽子数 8 以下の原子核では、核力励起がクーロン力による励起を凌駕し、純粋なクーロン励起だけを取り扱う事が出来ない。また、遷移確率と直接結びつく励起状態の寿命測定は、軽い核では準位間隔が一般に大きく、寿命が ps 単位以下になるため、直接測定が難しい。そこで、我々は、軽い中性子過剰核を

対象とし、励起状態の寿命を測定する新たな方法として In Beam Shadow (IBS) 法を考案した。

IBS 法は γ 線を放出するまでに原子核がビーム軸方向に移動することを利用する。たとえば核子あたり 50MeV の不安定核ビームを標的に照射する。この時、励起された不安定核は、高速の 1/3 程度の速さを持ち、励起状態の寿命を 30ps とすると、平均 3mm 程度移動することになる。ここで、 γ 線の放出位置によって、検出効率の異なる二つの検出器群を用いて脱励起 γ 線測定すると、測定する γ 線の収量の比が、励起状態の寿命に依存して変化する。二つの検出器群による収量の比と寿命の関係を、シミュレーションを用いて求め、寿命を決定することができる。我々は、この手法を ^{16}C ビームに適用し、 2^+ 状態からの脱励起の γ 線を測定した。解析の結果、 ^{16}C の 2^+ 状態の寿命が $77 \pm 14(\text{sta}) \pm 19(\text{sys})$ ps であることが分かった。[41, 99]

一般に偶偶核の 2^+ 状態の励起エネルギーは原子核の変形の度合いを示す良い指標である。 ^{16}C の場合、励起エネルギーは 1766keV で他の同位体よりも低く、 ^{16}C が大きく変形していることが予想される。同様に様々な理論でも大きな変形が示唆され、3 ps 程度の短い寿命が予想されていた。ところが今回測定した 2^+ 状態の寿命は予想より 10 倍程度長く、寿命の逆数に比例する電気四重極遷移確率は予想の 1/10 程度に小さい。 2^+ 状態の励起エネルギーは、原子核全体の変形を反映し、寿命から求めた電気四重極遷移確率は、陽子分布の変形を反映していると考えられることから、今回の実験結果は、 ^{16}C 内では中性子分布が大きく変形しているにも関わらず、陽子分布はほぼ球形を成していると解釈できる。

しかし、このような陽子と中性子の形の違いが何故生じるのかは未解明である。原因解明には、先ずこの現象が起こっている領域を特定し、より包括的に理解することが不可欠であろう。そこで、来年度は ^{16}C の隣の偶偶核である ^{18}C の 2^+ 状態の励起状態の寿命を行う予定である。

軽い中性子過剰核の陽子非弾性散乱

原子核の四重極変形 (または振動) の大きさは、基底状態と 2^+ 状態とを結ぶ遷移強度に反映される。陽子非弾性散乱により、低励起 2^+ 状態を励起する場合は、散乱される際、中性子側が強く励起されると考えられるため、その遷移強度は、中性子分布の変形をより強く反映していると解釈できる。陽子非弾性散乱から求められる変形度と、電気四重極遷移確率や、 2^+ 状態の寿命から求められる陽子分布の変形度と比較することで、陽子・中性子分布間のデカップリング、変形の違いを明らかにすることができる。

我々は、 ^{16}C の陽子非弾性実験を行い、中性子側の四重極変形に対する寄与を調べた。[87, 146] ^{16}C は、先に行われた 2^+ 状態の寿命測定結果により、陽子側の変形が、異常に小さいことが示唆されている。実験では、 ^{16}C ビームを液体水素標的に入射させて第一励起状態に効率よく励起し、脱励起ガンマ線の強度 (図 2.1 k) から断面積を求めた。光学ポテンシ

ャル模型を用いて断面積が実験値と再現する変形パラメータを求めた。寿命測定から求めた変形パラメータと比較することにより、中性子側の寄与が陽子側のそれよりおよそ五倍大きいことを明らかにした。これはこれまでに観測された原子核のより二倍以上大きい値である。

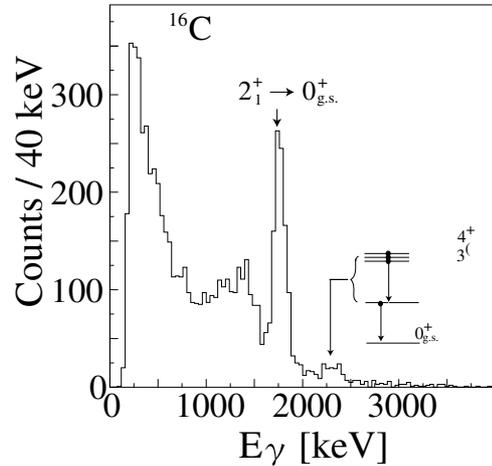


図 2.1 k: Doppler-corrected γ -ray energy spectrum obtained in the inelastic proton scattering of ^{16}C .

^{78}Ni 近傍核の陽子非弾性散乱

陽子非弾性散乱は、不安定核の励起状態を探索する最も効率のよい手法としても重要である [36]。これは、標的の質量数が小さいため、同じエネルギー損失を与える他の標的等と比べ、最大二桁程度標的数を大きくすることが出来るためである。したがって、強度の非常に弱い不安定核ビームを対象とした実験に特に有効な核分光手段となる。

本年度は、殻構造の変化・集団性に関して注目されている二重閉殻核 ^{78}Ni 近傍の ^{74}Ni 、 ^{78}Zn を対象に、陽子非弾性散乱によるインビーム線分光を行い、第一励起準位のエネルギーの決定と電気四重極遷移確率の測定を行った。 $N=40$ 、 50 の同調核では、中性子過剰度にしたがって変形が促進し、魔法数を持った硬い核からソフトな核に移行し、「魔法数の喪失」が観測される可能性がある。これら殻構造の変化による性質の変化は、超新星爆発や中性子星表面の原子核組成など、天体現象にかかわる興味深いテーマである。

実験は、米国ミシガン州立大学国立超電導サイクロトロン研究所 (NSCL) にて、日米国際共同研究として遂行された。実験計画の立案、液体水素標的の開発・運転、等に櫻井研が先導的役割を担った。特筆すべき実験上の工夫としては、不安定核ビームの純度を敢えて上げず、広範な不安定核のデータを同時に得られるようにしたこと、高分解能スペクトロメータ S800 で得られる高い粒子識別能力を利用して、S/N

の良いデータを収集すること、などが挙げられる。実験データの詳細は現在解析中であるが、測定された低励起 2^+ 状態のエネルギー、遷移強度から $N \sim 28$, $N \sim 50$ 領域の殻構造の振る舞いに関して議論する予定である。なお、本研究は、日本学術振興会・日米科学協力事業共同研究（日本側代表者：櫻井）によって推進されている。

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端的に調べる目的で、中間エネルギーの不安定核ビームを用いたクーロン励起法により広く測定されている。本年度は、クーロン励起法により、 $^{78-82}\text{Ge}$ の電気四重極遷移確率の導出を行った。周辺原子核の電気四重極遷移確率の測定値と比較することによって、魔法数 $N=50$ に起因する殻構造の中性子過剰領域での変化に関して知見が得られると期待される。

2.1.15 ベータ分光を用いた核構造研究（櫻井研究室）

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

陽子過剰核 ^{46}Cr のベータ崩壊

陽子過剰核 ^{46}Cr からその娘核である ^{46}V へのガモフテラー (GT) 遷移強度は、アイソスピン自由度が対称な核である ^{46}V 内の有効相互作用の理解や、 ^{46}Cr におけるウィグナーの超多重項理論を検証する上で重要である。 ^{46}Cr は、いままで GT- β 崩壊の観測例がなかったが、最近の研究で ^{46}V に、 1^+ の励起状態が観測され、 ^{46}Cr の GT- β 崩壊が観測される可能性が出てきた。我々は、このような背景をもとに実験を行い、 ^{46}Cr の GT- β 崩壊を初めて測定した。

実験では、 ^{50}Cr の入射核破砕反応により生成され

た ^{46}Cr をストッパーに止め、そこから放出される β 線を測定した。また、4 台のクローバー型 Ge 検出器を用いて β 遅延 γ 線の同時計測を行った。その結果、 ^{46}Cr の ^{46}V の 993 keV の 1^+ 状態への GT- β 崩壊を初めて観測し、対応する γ 線を同定した。 ^{46}Cr の基底状態から ^{46}V の 993 keV の 1^+ 状態への分岐比が当初の予想より 2 倍程度大きいことがわかった。測定された分岐比と寿命より、 $\log ft$ を 3.8 ± 0.2 とはじめて決定することができた。この結果は、 ^{46}Cr の変形によって SU(4) 対称性が破れていることを示唆する結果であった。[88, 101, 147]

陽子過剰核 $^{23,24}\text{Si}$ のベータ崩壊

ドリップライン近傍の陽子過剰核のベータ遅延陽子崩壊を測定することは、半減期、励起状態のエネルギー、スピン・パリティ、崩壊分岐比など核構造の情報を得る上で非常に重要である。我々は、ベータ線のバックグラウンドを除去できる検出器システムを新しく開発し、陽子過剰核 $^{23,24}\text{Si}$ におけるベータ遅延陽子崩壊の研究を行っている。

現在開発中のこの新しい検出器システムはガス ΔE 検出器とシリコン E 検出器から構成されている。ガス ΔE 検出器は 10 Torr の P10 ガスで満たされたプロポーションナルチャンパーであり、荷電粒子が電圧をかけたメッシュ間を通過する際のエネルギー損失を測定する。シリコン検出器はガス ΔE の後方に位置し、粒子のエネルギーを測定する。2次元の ΔE - E スペクトルを解析し、粒子識別を行い、バックグラウンドとなる β 線に起因するイベントを除去する。これにより、S/N 比のよい、 β 遅延陽子のエネルギースペクトラムを得ることが期待できる。

本実験は理研の RIPS にて行う予定である。本年度は、実験の設計、 ΔE - E 検出器の試作、基本動作テストを行った。実験設計上の工夫としては、不安定核を打ち込むストッパーを 2 組用意し運動量が広がったビームを効率よく止められるようにしたこと、各ストッパーの両側に ΔE - E 検出器を配置し、遅延陽子の統計量を稼ぐようにしたこと、などが挙げられる。これにより、弱い遷移強度の陽子崩壊のピークの同定が可能になり、 ^{23}Si におけるベータ遅延二陽子崩壊の様式を確立することが期待される。また ^{24}Si においては過去の実験で寿命の長い 0^+ 状態のアイソマーの存在が示唆されており、高統計のデータを得ることでアイソマー状態の探索を行う予定である。

2.1.16 RIBF 開発研究（櫻井研究室）

軽い中性子過剰核研究では中性子ハローや中性子スキン、魔法数の消失、新魔法数の出現など、安定核にはなかった性質が次々と見出されてきた。この研究をより重い領域の原子核に発展させることで、新たな核構造上の発見のみならず、中重領域中性子過剰核の関与する超新星爆発時における元素合成過程の理解の進展も期待できる。現在、重い不安定核ビームの

高強度化を狙い、理研の RI Beam Factory (RIBF) など世界の主要な研究施設で重イオン加速器や不安定核ビーム生成装置の更新、新規建設が計画されている。櫻井研では、理研 RIBF 計画において重い不安定核ビームに対応するための新しいスペクトロメータ、Zero-degree Forward Spectrometer (ZFS)、の建設を推進している。[151]

ZFS は、重い不安定核ビームに対応して 2 次標的の下流での粒子識別を高効率かつ高分解能で行えるように設計されている。重い不安定核を用いた場合、逆運動学の性質から標的で散乱した不安定核の散乱角がビームの広がりと同様およびそれ以下であるため、ZFS の立体角はビームの広がり程度である。また ZFS は、運動量分散面をもったダブルアクロマティックスペクトロメータであり、重い核の荷電状態の決定をも容易に行うことができる。

本年度は、標的位置や最大マグネティックリジディティを変えることで、運動量・角度アクセプタンス、運動量分解能などに特化した三種類の動作モードを導いた。今後は、飛跡再構成に必要な磁場測定の精度を見積もるとともに、2 次の効果や検出器分解能も考慮した詳細なシミュレーションを行う予定である。

2.1.17 位置感応型ゲルマニウム検出器の開発 (櫻井研究室)

脱励起 γ 線の測定は不安定核分光の強力な実験手段であり、逆運動学を用いた非弾性散乱実験や、破砕反応実験などで多くの成果が得られている。近年、対象とする不安定核や励起方法の多様化に伴い、 γ 線検出器の高分解能化、高効率化が重要になっている。

櫻井研究室ではストリップ Ge テレスコープ (以下、SGT) というインビーム γ 線分光装置を開発している。SGT は、平行平板型の位置感応 Ge 検出器 ($50 \times 50 \times 20 \text{ mm}^3$, 2mm strip) と、その後方に設置された同軸形 Ge 検出器 (直径 70mm, 長さ 70mm) からなる。SGT は、従来用いられてきた NaI(Tl) 検出器による γ 線アレイに比べ、検出器固有のエネルギー分解能、 γ 線の位置検出分解能に優れており、光速の 40 ~ 50% 程度の原子核に対しても精度よくドップラーシフト補正が可能である。また、SGT では、平板形結晶で全吸収された γ 線だけでなく、平板形結晶で散乱された後に同軸形結晶で全吸収された γ 線も測定できるため、1~2 MeV の γ 線に対しても有効な検出効率を持つ。これらの特徴により、SGT は、検出位置分解能と検出効率の両立を実現しており、高分解能・高効率のインビーム γ 線核分光に適用が可能である。

我々は 2003 年 9 月に理化学研究所の RIPS ビームラインで生成される中間エネルギーの ^{18}O 、 ^{16}C ビームを用いて、SGT によるインビーム γ 線核分光実験を行った。図 2.1 1 に ^{18}O ビームを ^9Be 標的に当てて励起させた際測定されたスペクトラムを示す。 $^{18}\text{O}(2^+ \rightarrow 0^+; 1981 \text{ keV})$ 、 $^{17}\text{N}(\frac{3}{2}^- \rightarrow \frac{1}{2}^-; 1374 \text{ keV})$ 、 $^{17}\text{O}(\frac{1}{2}^- \rightarrow \frac{1}{2}^+; 2183 \text{ keV})$ の各遷移に対応する γ 線を観測した。実験では、アンチコンプトンシールドと

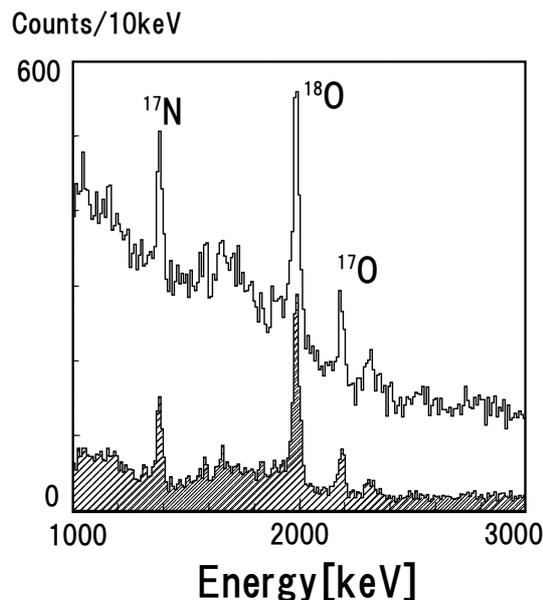


図 2.1 1: Compton-suppressed (hatched) and un-suppressed (plain) γ -ray energy spectra following the $^{18}\text{O}+^9\text{Be}$ reaction. De-excitation γ rays from the low-lying excited states in ^{17}N and $^{17,18}\text{O}$ are clearly seen.

して SGT 周辺に 30 個の NaI(Tl) 検出器を配置し、その結果ピーク対コンプトン比が 5 倍程度改善できることが確認できた (図 2.1 1)。また、観測したピークのエネルギー分解能は、約 1.5% (FWHM) であった。これは、検出位置分解能に換算すると約 2mm に対応し、当初の設計通りのインビーム γ 線核分光の精密化を達成できたといえる。[89, 142]

2.1.18 TOF スペクトロメータ開発 (櫻井研究室)

中重領域の中性子過剰核では、中性子数 28、40 の (擬)魔法数消失、中性子数 34 の新魔法数出現などが示唆され、実験による核構造の解明が望まれている。不安定核の分光手段として、逆運動学非弾性散乱を用いた γ 線核分光が盛んに行われているが、 ΔE - E 法による散乱粒子の質量識別に限界があり、これまで、主に質量数 30 程度以下の軽い不安定核にしか適用できなかった。そこで、我々は、TOF スペクトロメータ開発を行い、質量数 60 程度まで適用できる散乱粒子識別法を考案した。

TOF スペクトロメータでは、散乱粒子の質量識別法として、TOF- E 法を採用する。TOF は、二次標的的位置とその 5m 後方に、プラスチック検出器を配置し測定する。粒子のエネルギーは、最下流にシリコン検出器を置き、測定をする。また角度広がり

を持つ散乱粒子を収束させるために、理研将来計画 Big-RIPS で使用予定の超伝導三連四重極電磁石のプロトタイプを採用した。使用している超伝導三連四重極電磁石は、3つの磁石の有効長がそれぞれ、0.54 m, 0.84 m, 0.54 m で、磁石の中心同士の距離は、850 mm である。最大磁場勾配は 14.1 T/m で、内筒の半径は 14 cm となっている。TOF スペクトロメータの特徴は、質量数領域に見合った TOF 分解能を得るための飛行距離を確保しながら、下流の検出器面積を小さくし、測定効率化を図った点にある。

現在、計算コード COSY Infinity を使った軌道計算の数値シミュレーションを行い、粒子軌道、アクセプタンス計算などの基本性能を評価をした。アクセプタンスは、焦点距離の設定条件にもよるが、理想的な条件では、2度まで80%以上、4度まで50%以上が得られることがわかった。これは質量数60領域の核種を用いた実験において、陽子非弾性散乱反応の場合ほぼ100%、散乱角度が大きいアルファ粒子非弾性散乱反応やクーロン励起反応の場合でも70~80%という高い収量が確保できる程度の値である。また、検出器の時間分解能、エネルギー分解能を評価し、TOF スペクトロメータを使用した TOF-E 法による質量識別能力を見積もった結果、質量数60領域において、 3σ で隣の同位体との分離が可能であることが分かった。[143]

2.1.19 中性子過剰核の分解反応 (櫻井研究室)

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

これまで鉛標的を用いたクーロン分解反応によって中性子八ロー核 ^{11}Be 、 ^{19}C の研究を行い、連続状態の分布から八ロー中性子の波動関数に関する情報を導出してきた。より確度の高い情報を引き出すためには、核力などの寄与を調べる必要があるが、これに見合う統計が十分でなかった。また、核力励起を積極的に利用し、角度分布を精度よく測ることによって、共鳴状態の新たな分光手法を確立することも重要である。以上の観点から構造が比較的良くわかっている ^{11}Be をビームとし、鉛・炭素標的を用いた分解反応実験を高統計・高精度で行った。

解析の結果、まず、鉛標的では前方散乱を選ぶことにより、1次のクーロン成分のみを抽出することができた。これにより、 ^{11}Be の八ロー中性子の分光因子を精度よく決定した。次に炭素標的の分解反応で得られたエネルギー分布から既知の共鳴状態の観測に成功した。また、角度分布から移行角運動量を決定し、これら共鳴状態のスピン・パリティに関する情報を得ることができた。鉛標的での核力の寄与についても炭素標的のデータから初めて定量的に見積

ることができた。これらのデータは中性子八ロー核の反応機構に関する豊富な情報を含んでおり、理論研究による今後の活発な議論も期待できる。[75]

この他にも2中性子八ロー核 ^{11}Li 、 ^{14}Be 、 ^{17}B の分解反応のデータがあり、現在、詳細な解析を行っている。

2.1.20 天体核物理 (櫻井研究室)

初期宇宙、恒星内部の燃焼サイクル、超新星爆発といった個々の天体現象に関わる核反応の反応断面積はエネルギー収支および元素合成過程を理解する上で不可欠な量である。特に超新星や、X線バーストといった高温、高密度状態では平均自由時間が短くなり、原子核の崩壊よりも先に反応が起こり得る。つまり、不安定核を含んだ反応が寄与することが可能になり、これらの断面積を測定することが重要となる。

しかし、ビーム強度が低く、エネルギーの高い(数10 A MeV)不安定核ビームの場合には、天体現象で典型的なエネルギー(10 keV~1 MeV)での直接測定は極めて困難で、別な実験手法を用いなければならない。本研究室では二つの方法、クーロン分解反応法と ANC 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。この方法は、仮想光子数および詳細釣合の為に、直接測定に比べて、断面積が6~8桁程度増大する。また、エネルギーの高いビームを用いる為に、厚い標的を使うことができ、かつ前方に散乱が収束するために高検出効率が見込める。以上の様な様々な利点によって、不安定核の関与した天体核反応でも断面積の測定が可能になる。

^{23}Al 、 ^{27}P のクーロン分解反応を測定し、新星などで生じる rp-process(爆発的水素燃焼過程)で重要な働きをする $^{22}\text{Mg}(p, \gamma)^{23}\text{Al}$ 反応、 $^{26}\text{Si}(p, \gamma)^{27}\text{P}$ 反応の断面積決定を行った。これらの反応は、新星爆発直後の γ 線源となる ^{22}Na 、 ^{26}Al の生成量を左右するため、反応断面積を実験的に決定することが重要である。解析により、理論で予想された断面積を支持する結果を得た。[74]

<受賞>

- [1] 関口仁子、第20回井上科学奨励賞、井上科学振興財団、2004年2月4日。
- [2] 山口英育：平成15年度第2回 東京大学総長賞、東京大学、2004年3月25日。
- [3] 藤原真琴：原子核談話会新人賞、原子核談話会・核物理委員会、2004年3月28日。

<報文>

(原著論文)

- [4] K. Hatanaka, J. Kamiya, Y. Maeda, T. Noro, K. Sagara, H. Sakai, Y. Sakemi, K. Sekiguchi, Y. Shimizu, A. Tamii, T. Wakasa, K. Yako, H.P. Yoshida, and V.P. Ladygin: “ pd Scattering at 250 MeV and Three-Nucleon Forces”, *Eur. Phys. J. A* **18**, 293–296 (2003).
- [5] M. Yosoi, H. Akimune, I. Daito, H. Fujiwara, T. Ishikawa, M. Itoh, T. Kawabata, M. Nakamura, T. Noro, E. Obayashi, H. Sakaguchi, H. Takeda, T. Taki, A. Tamii, H. Toyokawa, N. Tsukahara, M. Uchida, T. Yamada, and H.P. Yoshida: “Structure and Decay of the s -hole State in ^{11}B Studied via the $^{12}\text{C}(p, 2p)^{11}\text{B}^*$ Reaction”, *Phys. Lett. B* **551**, 255–261 (2003).
- [6] K. Adcox, S.S. Adler, N.N. Ajitanand, *et al.*: “Centrality dependence of the high (PT) charged hadron suppression in Au+Au collisions at root $s(\text{NN})=130$ GeV” *Phys. Lett. B* **561**, 82–92 (2003).
- [7] M. Hori, J. Eades, R. S. Hayano, T. Ishikawa, W. Pirkel, E. Widmann, H. Yamaguchi, H. A. Torii, B. Juhász, D. Horváth, and T. Yamazaki: “Direct Measurement of Transition Frequencies in Isolated $\bar{p}\text{He}^+$ Atoms, and New CPT-Violation Limits on the Antiproton Charge and Mass”, *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 123401 (2003).
- [8] B. Juhász, J. Eades, R. S. Hayano, M. Hori, D. Horváth, T. Ishikawa, H. A. Torii, E. Widmann, H. Yamaguchi and T. Yamazaki: “Quantum tunneling effects revealed in collisions of antiprotonic helium with hydrogenic molecules at low temperatures”, *Chem. Phys. Lett.* **379**, 91–98 (2003).
- [9] M. Hori, R.S. Hayano, E. Widmann, and H.A. Torii: “Resolution-enhancement of $\bar{p}\text{He}^+$ atomic line profiles measured using a pulsed dye laser and Fizeau wavelength meter”, *Optics Letters* **28**, 2479–2481 (2003).
- [10] R. Schmidt, A. Trzcinska, T. Czosnyka, T. von Egidy, K. Gulda, F.J. Hartmann, J. Jastrzebski, B. Ketzer, M. Kisielinski, B. Klos, W. Kurcewicz, P. Lubinski, P. Napiorkowski, L. Pienkowski, R. Smolanczuk, E. Widmann, and S. Wycech: “Nucleon density in the nuclear periphery determined with antiprotonic x rays: Cadmium and tin isotopes”, *Phys. Rev. C* **67**, 044308 (2003).
- [11] M. Amoretti, C. Amsler, G. Bazzano *et al.*: “Antihydrogen production temperature dependence” *Phys. Lett. B*, **583**, 59–67, (2004).
- [12] M. Amoretti *et al.*: “Positron Plasma Diagnostic and Temperature Control for Antihydrogen Production”, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 055001, (2003).
- [13] M. Amoretti, G. Bonomi, A. Bouchta *et al.*: “Complete Nondestructive Diagnostic of Nonneutral Plasmas Based on the Detection of Electrostatic Modes”, *Phys. Plasma* **10**, 3056–3045 (2003).
- [14] S.S. Adler, S. Afanasiev, C. Aidala, *et al.*: “Suppressed $\pi(0)$ production at large transverse momentum in central Au plus Au collisions at root $s(\text{NN})=200$ GeV”, *Phys. Rev. Lett.* **91** 072301 (2003).
- [15] S.S. Adler, S. Afanasiev, C. Aidala, *et al.*: “Absence of suppression in particle production at large transverse momentum in root $s(\text{NN})=200$ GeV d+Au collisions”, *ibid.* 072303.
- [16] T. Abbott, L. Ahle, Y. Akiba, *et al.*: “Further observations on midrapidity E_T distributions with aperture corrected scale”, *Phys. Rev. C* **68**, 034908 (2003).
- [17] S.S. Adler, S. Afanasiev, C. Aidala, *et al.*: “Scaling properties of proton and antiproton production in root $s(\text{NN})=200$ GeV Au+Au collisions”, *Phys. Rev. Lett.* **91** 172301 (2003).
- [18] S.S. Adler, S. Afanasiev, C. Aidala, *et al.*: “Elliptic flow of identified hadrons in Au+Au collisions at root $s(\text{NN})=200$ GeV”, *ibid.* 182301.
- [19] A. Fontana M. Amoretti, G. Bazzano *et al.*: “Cold antihydrogen at ATHENA: Experimental observation and beyond”, *Acta. Phys. Pol. B* **34**, 5433–5441 (2003).
- [20] S.S. Adler, S. Afanasiev, C. Aidala, *et al.*: “Midrapidity neutral-pion production in proton-proton collisions at root s 200 GeV”, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 241803 (2003).
- [21] M. Amoretti, C. Amsler, G. Bazzano *et al.*: “High rate production of antihydrogen”, *Phys. Lett. B* **578**, 23–32 (2004).
- [22] M. Amoretti, C. Amsler, G. Bonomi *et al.*: “The ATHENA antihydrogen apparatus”, *Nucl. Inst. Meth. A* **518**, 679–711 (2004).
- [23] M. C. Fujiwara, M. Amoretti, G. Bonomi *et al.*: “Three-Dimensional Annihilation Imaging of Trapped Antiprotons”, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 065005, (2004)
- [24] M. Amoretti, C. Amsler, G. Bonomi *et al.*: “Production and detection of cold antihydrogen atoms”, *Nucl. Inst. Meth. A* **518**, 244–248 (2004).
- [25] C. Carraro, M. Amoretti, C. Amsler *et al.*: “Real-time detector for plasma diagnostic in antimatter experiment”, *ibid.* 249–251.
- [26] M. C. Fujiwara, M. Amoretti, C. Amsler, *et al.* (ATHENA collaboration): “First production and detection of cold antihydrogen atoms”, *Nucl. Inst. Meth. B* **214**, 7–10 (2004).
- [27] G. Bonomi, M. Amoretti, C. Amsler, *et al.* (ATHENA collaboration): “Temperature dependence of anti-hydrogen production in the ATHENA experiment” *ibid.* 11–16.
- [28] E. Widmann, R. S. Hayano, M. Hori and T. Yamazaki: “Measurement of the hyperfine structure of antihydrogen”, *ibid.* 31–34.
- [29] M. Hori (ASACUSA collaboration): “Atomic transition frequencies and primary populations of $\bar{p}\text{He}^+$ measured by ASACUSA”, *ibid.* 74–79.

- [30] J. Sakaguchi, J. Eades, R. S. Hayano, M. Hori, D. Horváth, T. Ishikawa, B. Juhász, H. A. Torii, E. Widmann, H. Yamaguchi and T. Yamazaki: “Study of the hyperfine structure of antiprotonic helium”, *ibid.* 89–93.
- [31] B. Juhász, J. Eades, R. S. Hayano, M. Hori, D. Horváth, T. Ishikawa, H. A. Torii, E. Widmann, H. Yamaguchi and T. Yamazaki: “Quantum tunneling effects revealed in collisions of antiprotonic helium with hydrogenic molecules at low temperatures”, *ibid.* 98–102.
- [32] K. Suzuki, M. Fujita, H. Geissel, H. Gilg, A. Gillitzer, R. S. Hayano, S. Hirezaki, K. Itahashi, M. Iwasaki, P. Kienle, M. Matos, G. Mümzenberg, T. Ohtsubo, M. Sato, M. Shindo, T. Suzuki, H. Weick, M. Winkler, T. Yamazaki, T. Yoneyama: “Precision Spectroscopy of Pionic $1s$ States of Sn Nuclei and Evidence for Partial Restoration of Chiral Symmetry in the Nuclear Medium”, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 072302 (2004).
- [33] S.S. Adler, S. Afanasiev, C. Aidala, *et al.*: “ J/Ψ production in Au-Au collisions at root $s(\text{NN})=200$ GeV”, *Phys. Rev. C* **69**, 014901 (2004).
- [34] S.S. Adler, S. Afanasiev, C. Aidala, *et al.*: “ J/Ψ production from proton-proton collisions at root $s=200$ GeV”, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 051802 (2004).
- [35] S. Shimoura, H. Iwasaki, H. Sakurai, *et al.*: “Isomeric 0^+ state in ^{12}Be ”, *Phys. Lett. B* **560**, 31–36 (2003).
- [36] Y. Yanagisawa, M. Notani, H. Sakurai, *et al.*: “The first excited state of ^{30}Ne studied by proton inelastic scattering in inverse kinematics”, *Phys. Lett. B* **566**, 84–89 (2003).
- [37] H. Ogawa, N. Fukuda, N. Imai, *et al.*: “Electric quadrupole moment of ^{17}B and anomalous E2 effective charges for neutron-rich nuclei”, *Phys. Rev. C* **67**, 064308 (2003).
- [38] N. Iwasa, T. Motobayashi, H. Sakurai, *et al.*: “In-beam γ spectroscopy of ^{34}Si with deuteron inelastic scattering using reverse kinematics”, *Phys. Rev. C* **67**, 064315 (2003).
- [39] M. Kurokawa, S. Shimoura, H. Iwasaki, *et al.*: “Pulse shape simulation and analysis of segmented Ge detectors for position extraction”, *IEEE transactions on Nuclear Science* **50**, 1309–1316 (2003).
- [40] K. Yamada, H. Iwasaki, H. Sakurai, *et al.*: “E1 strength of the subthreshold $3/2^+$ state in ^{15}O studied by Coulomb excitation”, *Phys. Lett. B* **579**, 265–270 (2003).
- [41] N. Imai, H. J. Ong, N. Aoi, H. Sakurai, K. Demichi, H. Kawasaki, H. Baba, Zs. Dombradi, Z. Elekes, N. Fukuda, Zs. Fulop, A. Gelberg, T. Gomi, H. Hasegawa, K. Ishikawa, H. Iwasaki, E. Kaneko, S. Kanno, T. Kishida, Y. Kondo, T. Kubo, K. Kurita, S. Michimasa, T. Mineura, M. Miura, T. Motobayashi, T. Nakamura, M. Notani, T. K. Onishi, A. Saito, S. Shimoura, T. Sugimoto, M. K. Suzuki, E. Takeshita S. Takeuchi, M. Tamaki, H. Watanabe, K. Yamada, K. Yoneda, and M. Ishihara: “Anomalously hindered E2 strength $B(\text{E}2; 2_1^+ \rightarrow 0^+)$ in ^{16}C ”, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 062501 (2004).
- (レビュー)
- [42] R.S. Hayano: “High precision laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms”, *Spectrochim. Acta B* **58**, 1011–1017 (2003).
- (会議抄録)
- [43] A. Tamii, K. Hatanaka, M. Hatano, *et al.*: “Search for Narrow Dibaryon Resonances by the pd to pdX and pd to ppX Reactions”, *Nucl. Phys. A* **721**, 621c–624c (2003).
- [44] K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Okamura, *et al.*: “Polarization Transfer Measurement for d - p Scattering and Three Nucleon Force Effects”, *ibid.* 637c–640c.
- [45] H. Sakai and K. Yako: “Gamow-Teller Quenching Value, Landau-Migdal Parameter $g'_{\text{N}\Delta}$ and Pion Condensation”, *Nucl. Phys. A* **722**, 294c–300c (2003).
- [46] H. Okamura, T. Uesaka, K. Suda, *et al.*: “Model Independent Spin Parity Determination by the ($d, ^2\text{He}$) Reaction and Possible Evidence for a 0^- state in ^{12}B ”, *AIP Conf. Proc.* 675, Proc. 15th Int. Spin Physics Symp. (AIP, New York), 671–675 (2003).
- [47] T. Kawabata, H. Akimune, G.P.A. Berg, *et al.*: “Polarization Transfer in the $^{16}\text{O}(p, p')$ Reaction at Forward Angles and Structure of the Spin-dipole Resonances”, *ibid.* 681–685.
- [48] Y. Satou, S. Ishida, H. Kato, *et al.*: “Isoscalar Spin Response in the Continuum Studied via the $^{12}\text{C}(\vec{d}, \vec{d})$ Reaction at 270 MeV”, *ibid.* 696–699.
- [49] K. Yako, H. Sakai, M.B. Greenfield, *et al.*: “Determination of the Gamow-Teller Quenching Factor via the $^{90}\text{Zr}(n, p)$ Reaction at 293 MeV”, *ibid.* 700–704.
- [50] K. Hatanaka, K. Sagara, Y. Shimizu, *et al.*: “Experimental Studies on Three-Nucleon Systems at RCNP”, *ibid.* 705–710.
- [51] T. Wakui, M. Hatano, H. Sakai, *et al.*: *ibid.* 911–915.
- [52] K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Okamura, *et al.*: “Polarization Transfer Measurement for d - p Elastic Scattering –a Probe for Three Nucleon Force Properties–”, *ibid.* 711–714.
- [53] T. Saito, V.P. Ladygin, T. Uesaka, *et al.*: “Study of $^3\text{He}(^3\text{H})$ Spin Structure via $\vec{d}\vec{d} \rightarrow ^3\text{He}n(^3\text{He})$ Reaction”, *ibid.* 715–719.
- [54] T. Wakasa, H. Sakai, M. Ichimura, *et al.*: “Momentum Transfer Dependence of Spin Isospin Modes in the Quasielastic Region”, *ibid.* 734–740.

- [55] A. Tamii, M. Hatano, H. Kato, *et al.*: “Search for Super-Narrow Dibaryon Resonances by the $pd \rightarrow pdX$ and $pd \rightarrow ppX$ Reactions”, Proc. Nuclear Many-Body and Medium Effects in Nuclear Interactions and Reactions (World Scientific, Singapore), 78–83 (2003).
- [56] K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Okamura, *et al.*: “Polarization Transfer Measurement for deuteron–proton Scattering and Three Nucleon Force Effects”, *ibid.* 115–119.
- [57] A. Tamii, K. Sekiguchi, K. Yako, *et al.*: “Search for Three Nucleon Force Effects in pd Elastic Scattering at 250 MeV”, *ibid.* 120–124.
- [58] Y. Maeda, H. Sakai, A. Tamii, *et al.*: “Study of Three-Nucleon-Force via Neutron-Deuteron Elastic Scattering at 250 MeV”, *ibid.* 125–129.
- [59] T. Saito, M. Hatano, H. Kato, *et al.*: “Study of Spin Structure of ${}^3\text{He}({}^3\text{H})$ via $dd \rightarrow {}^3\text{He}({}^3\text{He})$ Reaction at Intermediate Energies”, *ibid.* 169–173.
- [60] K. Yako, H. Sakai, M. Hatano, *et al.*: “Determination of the Gamow-Teller Quenching Factor via the ${}^{90}\text{Zr}(n, p)$ Reaction at 293 MeV”, *ibid.* 193–198.
- [61] Y. Nakaoka, T. Wakasa, and M. Ichimura: “Two-Step Effects in Analysis of Nuclear Responses”, *ibid.* 203–212.
- [62] H. Takeda, H. Sakaguchi, S. Terashima, *et al.*: “Extraction of Neutron Density Distributions from Proton Elastic Scattering at Intermediate Energies”, *ibid.* 269–274.
- [63] H. Sakai: “Extraction of Precise Gamow-Teller Quenching Value Q , Landau-Migdal Parameter $g'_{N\Delta}$ and Pion Condensation”, Proc. Frontiers of Collective Motions (World Scientific, Singapore), 20–29 (2003).
- [64] H. Ohnuma, T. Ichihara, M. Ishihara, *et al.*: “Isovector Quadrupole Resonance Observed in the ${}^{60}\text{Ni}({}^{13}\text{C}, {}^{13}\text{N}){}^{60}\text{Co}$ Reaction at $E/A = 100$ MeV”, *ibid.* 306–311.
- [65] K. Yako, H. Sakai, M. Hatano, *et al.*: “Determination of the Gamow-Teller Quenching Factor via the ${}^{90}\text{Zr}(n, p)$ Reaction at 293 MeV”, *ibid.* 118–123.
- [66] H. Sakai, Y. Satou, T. Saito, and A. Tamii: “Spin Entanglement measurement of Two Protons”, J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. C **72**, 193–195 (2003).
- [67] H. Sakai and K. Yako: “Experimental Determination of Gamow-Teller Quenching Value, Landau-Migdal Parameter $g'_{N\Delta}$ and Pion Condensation”, Nucl. Phys. A **731**, 94–175 (2004).
- [68] E. Widmann: “Atomic Spectroscopy and Collisions Using Slow Antiprotons – the ASACUSA Experiment at CERN-AD”, Hyperfine Interactions **146/147**, 313–317 (2003).
- [69] H. Yamaguchi, J. Eades, R. S. Hayano, M. Hori, D. Horváth, T. Ishikawa, B. Juhász, J. Sakaguchi, H. A. Torii, E. Widmann, and T. Yamazaki: “Precise laser spectroscopy of the antiprotonic helium atom and CPT test on antiproton mass and charge”, Nucl. Phys. A **721**, 473c–476c (2003).
- [70] K. Suzuki, M. Fujita, H. Geissel, H. Gilg, A. Gillitzer, R. S. Hayano, S. Hirezaki, K. Itahashi, M. Iwasaki, P. Kienle, M. Matos, G. Mümzenberg, T. Ohtsubo, M. Sato, M. Shindo, T. Suzuki, H. Weick, M. Winkler, T. Yamazaki and T. Yoneyama: “Deeply bound pionic $1s$ states of Sn isotopes”, *ibid.* 831c–834c.
- [71] J. Sakaguchi, J. Eades, R. S. Hayano, M. Hori, D. Horváth, T. Ishikawa, B. Juhász, H. A. Torii, E. Widmann, H. Yamaguchi and T. Yamazaki: “First observation of the hyperfine and superhyperfine structure of antiprotonic helium by laser-microwave spectroscopy”, *ibid.* 859c–862c.
- [72] Suzuki K, Fujita M, Geissel H, *et al.*: “Observation of pionic $1s$ states in Sn nuclei and its implications on chiral symmetry restoration”, Prog. Theor. Phys. Supp. **149**, 32–41 (2003).
- [73] 鈴木隆敏: 「静止 K^- の方法による K 中間子と原子核の深い束縛状態の探索実験 (KEK-PS E471) における最近の進展について」, KEK Proceedings 2003-18 J-PARC におけるストレンジネス核物理の展望、213–228 (2004).
- [74] T. Gomi, K. Yoneda, H. Sakurai, *et al.*: “Study of the ${}^{22}\text{Mg}(p, \gamma){}^{23}\text{Al}$ reaction with the Coulomb-dissociation method”, Nucl. Phys. A **718**, 508c–509c (2003).
- [75] T. Nakamura, N. Fukuda, H. Sakurai, *et al.*: “Coulomb dissociation of halo nuclei”, Nucl. Phys. A **722**, 301c–307c (2003).
- [76] H. Sakurai, “Spectroscopy on neutron-rich nuclei at RIKEN – present and future –”, JAERI-Conf 2003-017, 25–28, (2003).
- [77] H. Iwasaki, “Low-lying structure of neutron-rich nuclei around $N=8$ and $N=20$ from in-beam gamma-ray spectroscopy”, Proceedings of the International Symposium on Frontiers of Collective Motions (CM2002), (World Scientific), 337–342 (2003).
- (国内雑誌)
- [78] 早野龍五: 「反水素原子が大量につくられた」、パリティ、2003年6月号、58–61.
- [79] 早野龍五: 「エキゾチック原子のトピックス (特集: 物理科学、この1年)」、パリティ、2004年1月号、42–43.
- (学位論文)
- [80] 久保木浩功: “Search for Super Narrow Dibaryon via the $p+d$ scattering” (陽子-重陽子散乱における超狭幅ダイバリオンの探索、修士論文).

- [81] 波田野道夫: 「偏極陽子個体標的を用いた $\bar{p} + {}^6\text{He}$, 71 MeV/u 弾性散乱におけるベクトル偏極分解能の測定」, (博士論文).
- [82] 前田幸重: “Study of Three Nucleon Force Effects via the $n+d$ Elastic Scattering at 250 MeV” (250 MeV における中性子-重陽子弾性散乱による三体力効果の研究、博士論文).
- [83] 五味川健治: “A new method of the formation of deeply bound pionic atoms” (深束縛パイ中間子原子生成の新しい方法、修士論文).
- [84] 船越亮: “Positron Plasma Control Techniques Applied to Studies of Cold Antihydrogen” (冷たい反水素研究への陽電子プラズマ制御法の適用、博士論文).
- [85] 山口英斉: “Laser spectroscopy of the antiprotonic helium atom –its energy levels and state lifetimes” (反陽子ヘリウム原子のレーザー分光～エネルギー準位と準位寿命、博士論文).
- [86] 米田健一郎: “In-beam Gamma Spectroscopy of the Neutron-rich Nucleus ${}^{34}\text{Mg}$ via Radioactive-Isotope Projectile Fragmentation” (不安定核の入射核破碎反応を用いた中性子過剰核 ${}^{34}\text{Mg}$ のインビームガンマ線核分光、博士論文).
- [87] Hooi Jin Ong: “Proton Inelastic Scattering of ${}^{16}\text{C}$ ” (${}^{16}\text{C}$ の陽子非弾性散乱、修士論文).
- [88] 大西健夫: 「 ${}^{46}\text{Cr}$ のガモフテラーベータ崩壊」, (修士論文).
- [89] 鈴木賢: 「位置感応型ゲルマニウムテレスコープの開発」, (修士論文).
- < 学術講演 >
(国際会議)
一般講演
- [90] K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Okamura, *et al.*: “Measurement of Polarization Transfer Coefficients for $d-p$ Scattering at Intermediate Energies and Three Nucleon Force Effects”, The 17th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Duhram, USA, June 5–10, 2003.
- [91] Y. Maeda, H. Sakai, K. Hatanaka, *et al.*: “Measurement of Differential Cross Sections and Vector Analyzing Powers for the $\bar{n}+d$ Reaction at 250 MeV”, *ibid.*
- [92] H. Sakai: “ dp Elastic Scattering Experiments”, The 4th International Workshop on Chiral Dynamics 2003–Theory and Experiment–, Bonn, Germany, Sep. 8–13, 2003.
- [93] H. Sakai: “Present Status of the Nucleon-Deuteron Elastic Scattering at Intermediate Energy”, Theories of Nuclear Forces and Nuclear Systems 2N/3N Workshop, Seattle, USA, Oct. 7–10, 2003.
- [94] K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Okamura, *et al.*: “3NF Study with Polarized Deuteron Beam at 270 MeV”, Sweden-Japan Joint Symp. on Accelerator Science and Accelerator Based Sciences, Tokyo, Japan, Jan. 6–7, 2004.
- [95] Y. Maeda, H. Sakai, K. Hatanaka, *et al.*: “ nd Scattering at 250 MeV by (n, p) and NTOF Facilities at RCNP”, *ibid.*
- [96] E. Widmann: “Measurement of the hyperfine structure of antihydrogen”, Workshop on Future AD Physics Program, Max Planck Institute für Quantenoptik, Munich, Germany, May 15–16, 2003.
- [97] T. Suzuki: “A search for deeply bound kaonic nuclear state”, 8-th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2003), Jefferson Lab. USA, Oct. 14–18, 2003.
- [98] T. Suzuki for the E471 Collaboration: “An Experimental Search for Deeply Bound K-ppn states”, YITP Workshop on Nuclear Matter under Extreme Conditions (Matter03), Yukawa Institute of Theoretical Physics, Kyoto, Japan, Dec. 1–3, 2003.
- [99] N. Imai, H. J. Ong, N. Aoi, *et al.*: “Anomalous long lifetime of 2_1^+ state of ${}^{16}\text{C}$ ”, International Symposium “A New Era of Nuclear Structure Physics” (NENS03), Niigata, Japan, Nov. 19–22, 2003.
- [100] H. Sakurai: “Gamma-ray spectroscopy on unstable nuclei at RIBF”, CNS-RIKEN Joint Symposium, Frontier of gamma-ray spectroscopy and its application, March 18–19, 2004, Wako, Japan.
- [101] T. K. Onishi, *et al.*: “Gamow-Teller beta decay of ${}^{46}\text{Cr}$ ”, *ibid.*
- 招待講演
- [102] R.S. Hayano: “Future of ASACUSA”, International Workshop on “Future AD Physics Program”, Garching, Germany May 15–16 May, 2003.
- [103] R.S. Hayano: “Physics using cold antiprotons”, Cool03 - workshop on beam cooling and related topics, Lake Yamanaka, Japan May 19–23, 2003.
- [104] H. Sakai: “Experimental Determination of Gamow-Teller Quenching Value, Derivation of Landau-Migdal Parameter $g'_{N\Delta}$ and Implications for Pion Condensation”, Contributions of Short- and Long-Range Correlations to Nuclear Binding and Saturation, Trento, Italy, Jun. 2–7, 2003.
- [105] H. Sakai: “Looking for Three-Nucleon Force Effects by Nd Scattering at Intermediate Energies”, The 17th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Duhram, USA, Jun. 5–10, 2003.
- [106] H. Sakai and K. Yako: “Gamow-Teller Quenching Value, Landau-Migdal Parameter $g'_{N\Delta}$ and Pion Condensation”, The International Conference on Collective Motion in Nuclear Under Extreme Conditions, Paris, France, June 10–13, 2003.
- [107] H. Sakai: “Spin Transfer Measurement and Three-Nucleon Force Effects”, Spin and Quantum Structure in Hadrons, Nuclei and Atoms, TIT, Tokyo, Japan, Feb. 19–21, 2004.

- [108] R.S. Hayano: “Measurement of nuclear recoils”, First Meeting of the Users Group for Low-Energy Antiproton Physics at GSI, GSI, Darmstadt, Germany, Sept. 18-19, 2003.
- [109] R.S. Hayano: “CW laser spectroscopy of antiprotonic atoms”, *ibid.*
- [110] E. Widmann: “Antihydrogen hyperfine structure”, *ibid.*
- [111] R.S. Hayano: “Experiments with Stored and Cooled Antiprotons”, 2nd International workshop on the future accelerator facility for beams of ions and antiprotons, GSI, Darmstadt, Germany, Oct. 17, 2003.
- [112] E. Widmann: “FLAIR a Facility for Low-energy Antiproton and Ion Research at the future facility at GSI”, GSI-JINR Workshop, Dubna, Russia, Nov. 20, 2003.
- [113] E. Widmann, “FLAIR – a Facility for Low-energy Antiproton and Ion Research at the future facility at Darmstadt”, XLII Nuclear Physics Meeting, Bormio, Italy, Jan. 25 - Feb. 1, 2004.
- [114] R.S. Hayano: “Status report from ASACUSA”, The 66th meeting of SPS and PS experiments committee, CERN, Switzerland, Feb. 3, 2004.
- [115] R.S. Hayano: “Partial Restoration of Chiral Symmetry in Nuclear Medium”, The COE workshop on “Prospects on Fundamental Physics in the 21st Century”, Sanjo Hall, University of Tokyo, Japan, Feb. 16-18, 2004.
- (国内会議)
一般講演
- [116] 鈴木隆敏: 「静止 K^- の方法による K 中間子と原子核の深い束縛状態の探索実験 (KEK-PS E471) における最近の進展について」, J-PARC におけるストレンジネス核物理の展望, 2003 年 7 月 29-31 日, 高エネルギー加速器研究機構
- [117] 酒井英行: 「2 陽子系のスピンエンタングルメントの測定」, 研究会「少数核子系とバリオン間相互作用」, 2003 年 8 月 19-20 日, 大阪大学核物理研究センター.
- [118] 前田幸重: 「250 MeV 偏極中性子-重陽子弾性散乱における三体力の研究」, 同上.
- [119] 前田幸重: 他: 「250 MeV 中性子-重陽子弾性散乱測定による三体力の研究」, 日本物理学会 2003 年秋季大会, 2003 年 9 月, 宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット.
- [120] 民井淳、久保木浩功、他: 「陽子-重陽子散乱における超狭幅ダイバリオンの探索」, 同上.
- [121] 進藤 美紀、五味川健治、鈴木 隆敏、早野龍五、S214 collaboration: 「 η, ω 中間子と核の束縛状態の実験的研究」, 同上.
- [122] 五味川健治、板橋健太、早野龍五、進藤美紀: 「逆運動学を用いたパイ中間子原子探索実験」, 同上.
- [123] 鈴木隆敏、他: 「K 中間子の ^3He 原子核における深い束縛状態の探索実験」, 同上.
- [124] A. M. Vinodkumar, T. Nakamura, H. Sakurai, *et. al.*: “Two neutron correlation in the breakup of ^{11}Li ”, 同上.
- [125] 松山裕一、下浦享、櫻井博儀、他: 「 $^{12}\text{Be} + \alpha$ 非弾性散乱にともなう γ 線角度相関」, 同上.
- [126] 大田晋輔、下浦享、岩崎弘典、他: 「 $^4\text{He} (^{12}\text{Be}, ^{13}\text{B}\gamma)$ 反応を用いた ^{13}B の核分光」, 同上.
- [127] 杉本崇、福田直樹、櫻井博儀、他: 「 ^{17}B の分解反応 (3)」, 同上.
- [128] 小田原厚子、寺西高、岩崎弘典、他: 「 $N=51$ 同調体高アイソスピンアイソマー探索のための ^{17}N 不安定核ビーム開発」, 同上.
- [129] 峯村俊行、本林透、岩崎弘典、他: 「 ^{12}N と ^{13}O のクーロン分解反応による反応断面積の測定」, 同上.
- [130] 野谷将広、寺西高、岩崎弘典、他: 「低エネルギー ^{14}O RI ビームを使った天体核反応断面積の直接測定」, 同上.
- [131] 新倉潤、下浦享、岩崎弘典、他: 「荷電粒子測定用 NaI(Tl) カロリメーターの開発」, 同上.
- [132] 道正新一郎、下浦享、櫻井博儀、他: 「陽子移行反応を用いた中性子過剰核 ^{23}F の研究」, 同上.
- [133] J. J. He, S. Kubono, H. Iwasaki, *et al.*: “Measurement of $^{22}\text{Mg} + p$ and $^{21}\text{Na} + p$ elastic scattering with CRIB”, 同上.
- [134] 玉城充、岩崎弘典、櫻井博儀、他: 「 α 非弾性散乱を用いた中性子過剰核 ^{22}O の励起状態の研究」, 同上.
- [135] 酒井英行: 「中間エネルギーに於ける三核子力研究」, 研究会「核力と核構造」, 2004 年 3 月 22-24 日, 大阪大学核物理研究センター.
- [136] 波田野道夫、他: 「 $p + ^6\text{He}$ 弾性散乱における偏極分解能の測定」日本物理学会第 59 回年次大会, 2004 年 3 月, 九州大学.
- [137] 齋藤孝明、他: 「 $^1\text{H}(d, ^2\text{He})n$ 反応によるベルの不等式の検証 I」, 同上.
- [138] 久保木浩功、他: 「陽子-重陽子散乱における超狭幅ダイバリオンの探索」, 同上.
- [139] 笹野匡紀、他: 「300 MeV でのガモフ・テラー単位断面積の精密測定」, 同上.
- [140] 船越亮、早野龍五、藤原真琴、他 ATHENA collaboration: 「冷たい反水素研究への陽電子プラズマ制御法の適用」, 同上.
- [141] 山口英齊、堀正樹, Eberhard Widmann, Bertalan Juhász, 鳥居寛之, 石川隆, 早野龍五, Dezső Horváth, John Eades, 山崎敏光: 「反陽子ヘリウム原子とそのイオン状態」, 同上.
- [142] 鈴木賢、他: 「ストリップ型ゲルマニウム望遠鏡の開発」, 同上.
- [143] 鈴木宏、他: 「TOF スペクトロメーターの粒子軌道計算」, 同上.
- [144] 杉本崇、中村隆司、櫻井博儀、他: “Invariant-mass spectroscopy of ^{13}Be ”, 同上.

- [145] 馬場秀忠、岩崎弘典、櫻井博儀、他: 「 α 非弾性散乱による不安定核 ^{14}O の励起状態の研究」、同上。
- [146] H. J. Ong、他: 「 ^{16}C の陽子非弾性散乱2」、同上。
- [147] 大西健夫、他: 「 ^{46}Cr のガモフテラ ベータ崩壊」、同上。

招待講演

- [148] 早野龍五: 「エキゾチック原子」、東北大学素粒子・原子核物理学特別講義 2003年7月2-4日。
- [149] 早野龍五: 「反水素原子」、東北大学原子核コロキウム、2003年7月3日。
- [150] 櫻井博儀: 「エキゾチック核の集団性 軽核から中重核へ」、シンポジウム「ガンマ線とエキゾチック核」、日本物理学会2003年秋季大会、2003年9月、宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット。
- [151] 櫻井博儀: 「ゼロ度スペクトロメータ」、ワークショップ「RIビームファクトリーと研究計画」、2003年12月、理化学研究所、和光市。
- [152] 櫻井博儀: 「不安定核ビームを用いた核構造研究」、北海道大学大学院理学研究科物理学専攻 集中講義、2003年7月8-11日。

(ドイツ物理学会 招待講演)

- [153] E. Widmann: “Atomphysikalische Experimente mit Antiprotonen an der GSI-Zukunftsanlage”, Atomic Physics Spring Meeting of the German Physical Society, Munich, Germany, Mar. 22–26, 2003.

(セミナー)

- [154] E. Widmann: “Measurement of the Hyperfine Structure of Antihydrogen” Helmholtz-Institut für Strahlen und Kernphysik Seminar, University of Bonn, Bonn, Germany, May 19, 2003.
- [155] E. Widmann: “Low Energy Antiproton Physics”, KVI Kolloquium, KVI Groningen, The Netherlands, Oct. 9, 2003.

(記者発表)

- [156] 「質量の謎解く「クオーク凝縮」東大・早野教授らが確認」、読売新聞、2004年3月7日。
- [157] 「クオーク凝縮現象「実験で確認」論文 東大教授ら、米学会誌に」、朝日新聞、2004年3月7日。
- [158] 「クオーク凝縮：質量生み出す仕組み裏付け 東大など確認」、毎日新聞、2004年3月7日。
- [159] 「東大教授ら「クオーク凝縮」裏付け 質量生む仕組み 理論値と一致」、産経新聞、2004年3月7日。
- [160] 「東大教授ら、質量生み出す仕組み発見」、日本経済新聞、2004年3月7日。
- [161] 「「クオーク凝縮」確認 「質量」解明に期待 早野東大教授に聞く」、日本経済新聞、2004年3月22日。

2.2 駒宮研究室

素粒子物理の本質的な問題を実験的なアプローチで解明することを目指している。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に加えて、粒子検出器の開発研究、次世代加速器である電子・陽電子リニアコライダー加速器の研究開発と、リニアコライダーでの実験の検討、CERNの次期基幹計画 LHC での物理の検討も行なっている。旧折戸研究室のメンバーによる飛翔体を利用した宇宙線観測実験も行なってきた。

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

世界最高エネルギーの電子・陽電子衝突型加速器 (e^+e^- コライダー) LEP を用いて、国際協同実験 OPAL を素粒子物理国際研究センターと共同で行なってきた。この実験の目的は、統一ゲージ理論の精密検証、質量の起源であるヒッグス粒子の探索、超対称性などの素粒子物理学上の根源的な問題の研究を、素粒子反応の素過程を明確に観測できる電子・陽電子衝突を用いて、世界最高エネルギーで行なうことにある。

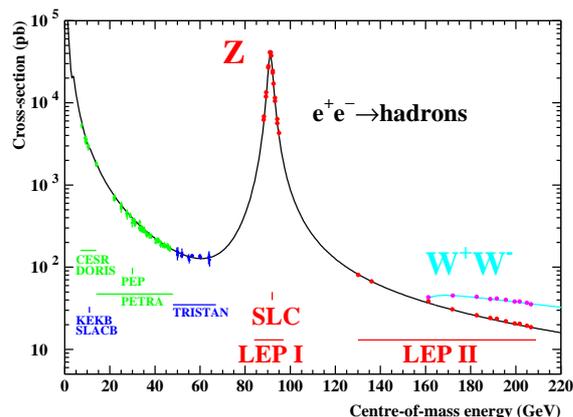


図 2.2 a: e^+e^- 衝突からクォーク対が生成される断面積の測定値と理論の予言。W ボソン対が生成される断面積はこれに足されている。LEP-I と LEP-II やその他の e^+e^- コライダーのエネルギー領域が示されている。

1989 年に重心系エネルギー 90GeV 近辺で実験を開始して以来、弱い相互作用を媒介するゲージ粒子である Z^0 粒子を総数 500 万事象観測し、「統一ゲージ理論（標準理論）の精密検証」、「クォーク・レプトン群の世代数の決定」、「大統一理論の検証」等を行ってきた (LEP-I)。1995 年からは衝突エネルギーを徐々に上げて行き (LEP-II)、2000 年には 209GeV に達した。2000 年 11 月に実験が終了し、基本的なデータ解析は 2003 年度で終了し、主要な解析毎に総合的な論文を投稿した。

ヒッグス粒子の探索

「局所ゲージ対称性」を仮定すると全ての粒子が質量を持たないのが自然な姿である。「局所ゲージ対称性」を破り素粒子に質量を与えるのが、ヒッグス粒子の役割である。このヒッグス粒子がどのような形で発見されるかが「標準理論」を検証する上で、またこれを越えたより大きな理論の枠組を決定する上での鍵であり、素粒子物理学において極めて重要且つ緊急な課題である。 e^+e^- 衝突では、ヒッグス粒子は極めて明確に検出できると考えられる。LEP の四実験のデータ解析結果を総合すると質量が 114 GeV 以下の標準理論で予言されるヒッグス粒子の存在が棄却された。LEP-I などでの電弱相互作用に関わる物理量の精密測定からヒッグス粒子の質量は約 210 GeV 以下であることが結論されるので、ヒッグス粒子を 114 GeV から 210 GeV の狭い範囲に追いつめた。

超対称性粒子の探索

現在、超対称性理論は「標準理論」を越える学説の中で最も有望なものであり、重力相互作用を含めた全ての相互作用の統一への道を開く可能性がある。超対称性理論では現在知られているすべての素粒子にパートナーの超対称性粒子が存在し、これらの粒子のうち種類でも発見されれば、重力をも含めた究極の統一理論への大きな方向が定まる。超対称性粒子群が生成されている証拠は発見されていないが、宇宙質量の大きな部分を担っているとされる暗黒物質の候補である最も軽い超対称性 (ニュートラリーノ) に対して質量の下限値 36.3 GeV を得ている。暗黒物質の直接的な探索実験は、半導体の結晶などの検出器を用いて世界数箇所の研究機関で行なわれているが、OPAL 実験は、直接的な探索実験においては探索不可能な非常に低い質量の領域をほぼ棄却した。

2.2.2 電子・陽電子リニアコライダー GLC 計画

電子と陽電子 (e^+ と e^-) は、素粒子とみなすことができるので、それらの衝突は素過程である。また、 e^+ と e^- は粒子と反粒子の関係にあるので、衝突によって対消滅が起こり、その全ての衝突エネルギーは新たな粒子の生成に使われる。従って、エネルギーフロンティア (世界最高エネルギー) での e^+e^- 衝突反応の実験研究は、素粒子の消滅生成の素過程反応そのものを直接、詳細に観測できるという本質的利点を有する。しかし、LEP のような円形の e^+e^- コライダーではシンクロトロン放射によって電子や陽電子のエネルギーが急速に失われる。LEP が到達したエネルギーよりも高いエネルギーに到達するためには半径を非常に大きくする必要があるので、LEP よりも大型の円形の e^+e^- コライダーは予算上建設不可能である。従って、電子・陽電子を向かい合わせて直線的に加速して正面衝突させるリニアコライダーのほうが経済的である。現在 e^+e^- リニアコライダーの開発研究が日本、ドイツ、米国などで盛んに

続けられている。日本はいち早く e^+e^- リニアコライダーを高エネルギー物理の次期基幹計画として取り上げ、技術開発を進めてきた。既に主加速器の殆ど全てのコンポーネントは、衝突エネルギー 500 GeV のコライダーの仕様を満たすところまで進んだ。2 年ほど前から ICFA など国際的にリニアコライダーを推進する体制を整えつつある。わが国にリニアコライダーを誘致するべく、全国の研究者と共に努力を重ねている。

一方、LEP のデータは電弱統一ゲージ理論の正しさを圧倒的な精度で検証したのみならず、強い相互作用をも統一する大統一理論、及び超対称性の正しさを示唆している。もしこれが正しいとすれば、理論は 130 GeV 以下の質量を持った軽いヒッグス粒子の存在を予言しており、また超対称性粒子があまり高くないエネルギーに存在する可能性が高く、LHC での実験と相補い合う形でリニアコライダーでの実験が極めて急務である。

本研究室はリニアコライダーでの物理・測定器の研究を行ってきたが、GLC (Global Linear Collider) の加速器自体の研究開発にも参加している。KEK では、2003 年度から GLCTA (GLC Test Accelerator) の建設が始められたが、加速管のモニター系の開発や加速器の tuning などに貢献している。又、現在想定されている加速周波数の X-band よりも 2 倍長い波長の C-band を主線形加速器に用いて、加速勾配は低いがいり安定で信頼性の高くすることの検討、X-band 主線形加速器でのビーム散乱の研究なども行なっている。

エネルギーアップグレードの検討 (C+X オプション)

GLC 加速器計画が、諸外国の LC 計画と比較して圧倒的に優れている点は、エネルギー増強の余地が十分にあることである。すなわち、LEP-II での詳細な研究が行なわれたエネルギー領域のすぐ上のエネルギーを狙う加速器を直ちに建設し、存在が期待される軽いヒッグス粒子を中心とした研究を行なった後に、その研究結果を踏まえて加速器の性能を向上し、超対称性粒子等の研究を目指すというシナリオを描ける。このシナリオでは、リニアコライダーの初期は、到達エネルギーは十分に高くはないが量産や運転が比較的容易であると考えられる C バンド加速管 (加速に用いる高周波の周波数が 5.712GHz) を用いて確実に実験をスタートする。ヒッグス粒子を中心とした詳細な研究を行なうことで、その後のアップグレードの方向性 (速やかにエネルギーを上げるべきか、ビームの強度を上げるべきか、検出器の大幅な改造を行なうか等) を見極める。最終的には、製作にも運転にも高度な技術を要する X バンド加速管 (加速器に用いる高周波の周波数が 11.424GHz) を投入し、1 TeV、ないしは、1.3TeV にまで到達する。このシナリオを活かすために、加速周波数の異なる C バンド (5.712GHz) 加速管と X バンド (11.424GHz) 加速管を連結する際の問題点と解決策を探った。加速周波数が変わると高周波の波長が変わることに伴い、荷電粒子束の進行方向の長さを最適化する必要があ

る。検討の結果、異なる加速周波数の加速管を直結しても、加速後のビームが持つエネルギーの単色性を維持しつつ、空間的な広がりを十分に小さくできることが分かった。すなわち、将来的には 1TeV を越える高エネルギーでの実験を行なう準備をしつつ、早期に建設・実験を開始できる。

GLCTA における加速管の放電現象の研究

GLCTA (GLC Test Accelerator) は、GLC に必要な X-band 加速技術の確立を目指して、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) にて建設がすすめられている。国内で唯一の X-band 高電界、ビーム加速試験設備である。KEK のアセンブリホール内に、現在、モジュレータ、クライストロン各 3 基が設置され、高周波電力が導波管 (WR90) を通して KEK で開発された加速管 (KX01) 一基に電力 (~60MW) を供給している。

X-band 加速技術の現状における最大の課題は、加速管内で起きる放電現象をいかに減少させるかにある。加速管内で放電が起きると、ビームが正常に加速されないため、加速管の放電頻度を一定以下に保つことは、加速器の運転にとって必要不可欠である。また、度重なる放電は、加速管自体にダメージを与え、加速管の寿命を縮めることにもなる。

加速管での放電を減少させるためには、加速管で実際に放電が起きた際の放電位置、強度をはじめとした様々な測定を行い、放電のメカニズムを突き止めることがきわめて重要である。駒宮研では、この加速管の各種放電モニターを設置して、放電検知、記録を行なうシステムを開発し、現在加速管を継続的にモニター中である。また、各種放電データをもとに、放電位置の特定、放電の予兆の発見、放電のエネルギー収支などについても研究をすすめている。

リニアコライダー主線形加速器内でのビームエミッタンス増大に関するシミュレーション研究

距離の長いリニアコライダーの主線形加速器部分では、ビームのエミッタンス保存を維持できるかが極めて重要な課題となるが、これに悪影響を及ぼす要因として、各四重極電磁石内で発生する非線形磁場誤差や加速管内でのビーム散乱等が挙げられている。そこで我々は、GLC 主線形加速器を想定したビーム軌道追跡シミュレーションを行い、非線形磁場誤差やビーム散乱がビームコアに及ぼす影響についての詳細な調査を進めた。加速器内におけるビームのベータトロン振動は複雑な振舞いであるため、ビーム軌道に与えられる影響の理解には困難を伴う。本研究では、軌道への影響についての体系的理解を一から進め、そのうえでビームエミッタンス増大への影響がほとんど問題にならないとする結論を得ている。

主線形加速器内でのダークカレントの発生

開発中の GLC 主線形加速器では、65MV/m という非常に高い加速勾配を用いるため、ディスク表面等から大量のダークカレントが発生する可能性がある。発生したダークカレントが加速器内でビームエネルギーレベルにまで加速された場合、最終収束系での除去が困難となるため、衝突点における大きなバックグラウンドになりかねない。我々は、ダークカレントについての軌道追跡シミュレーションを進めており、加速器出口において 250GeV 程度の電子がどのくらい発生してしまうかについての定量的評価を目指している。

2.2.3 LHC 実験 ATLAS 検出器によるブラックホール (BH) 事象解析の研究

我々の 4次元を越える高次元を仮定した Large Extra Dimension のモデルでは、異次元の領域にまで力を及ぼす重力の基本スケール (プランクスケール) が、従来の 10^{19} GeV から 1 TeV 程度にまで下がる可能性がある。コンパクト化されたスケール以下の長さスケールでは、重力相互作用の大きさも十分に大きくなるため、LHC において、重力によるブラックホール (BH) の大量生成が初めて発見される可能性が指摘されている。これを受け、我々は ATLAS 日本の物理グループとの共同で BH 事象の解析に関する研究を進めた。ATLAS 検出器による BH 発見能力の評価や、測定器にあらわれる BH 事象特有の特徴に関する研究等で具体的な成果をまとめた。

2.2.4 BES-II 実験のデータを用いた

$J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$ 過程の研究

中国の高能研究所 (IHEP) で稼働している e^+e^- コライダー (BEPC) における汎用 detector である BES-II detector (図 2.2 b) により 1999 年から 2000 年にかけて測定されたデータ 2.86×10^7 (ハドロンイベント) を用い、 $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$ 崩壊過程の解析を行った。

BES-II detector は、粒子の軌跡、運動量、 dE/dx 測定を行うドリフトチェンバー、飛行時間を測定する TOF カウンター、光子と電子のエネルギー測定のためのシャワーカウンター、ミュオン同定のためのミュオンカウンターからなり、 e^+e^- 反応で生成される粒子を効率的に測定できる。

$\Lambda \bar{\Lambda}$ 終状態では、CP の直接的破れ (mixing にはよらない) を探索し、 $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$ の崩壊分岐比を測定した。解析においては Λ の主な崩壊過程である $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ ($Br = 63.9\%$) を用いた。特に、CP Violation の解析においては、CP-odd な observable の asymmetry を評価した。

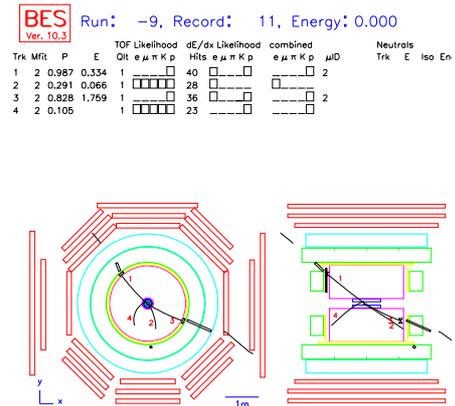


図 2.2 b: BES-II detector のイベントディスプレイ

$J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$ の branching fraction の測定値は、

$$Br(J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}) = (1.34 \pm 0.02(stat.) \pm 0.03(syst.)) \times 10^{-3}$$

となり、Particle Data Book の値より、精度の良い結果が得られた。また CP-odd な observable についても、統計的にはまだ有意ではないが、 2.5σ のずれを測定した。

さらに進んだ解析として、BES-II 実験で得られた J/ψ の全データを用いることや、異なる CP-odd な observable を用いた解析を行なうことを計画している。

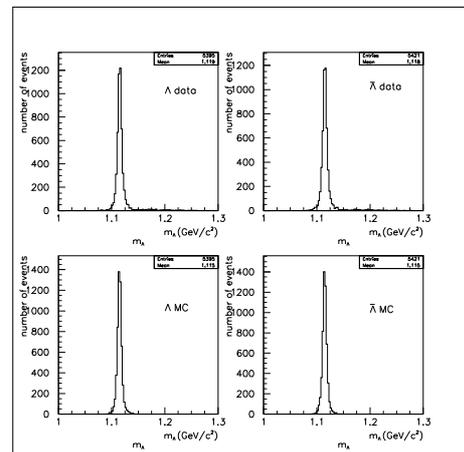


図 2.2 c: $\Lambda(\bar{\Lambda})$ の質量分布. 上段がデータ, 下段がモンテカルロ. グラフの横軸が質量 (GeV), 縦軸がイベント数. ピークが Λ の質量とよく一致し、カットが適切に行われたことを示している.

2.2.5 BESS 実験

気球搭載型超伝導スペクトロメータ (BESS) は、同種の宇宙線観測装置と比べて非常に大きな面積立体角と優れた粒子識別能力を誇る。この特徴を活かして、宇宙線に僅かに含まれる反陽子の観測や、反ヘリウムの探索等を行ってきた。一方、宇宙線の大部分を占める陽子やヘリウムや大気中で観測される μ 粒子を非常に高い統計精度で測定できるという特徴もある。これらの精密測定の結果は宇宙線物理学の基礎データであると同時に、大気ニュートリノの観測で発見されたニュートリノ振動を詳細に研究し振動パラメータ ($\sin \theta, \Delta m^2$) を決定するためにも不可欠である。

一次宇宙線の精密測定

BESS 実験では、これまでに 100GeV までの一次宇宙線を精密に測定した。エネルギー領域を飛躍的に向上させるために BESS 測定器の大規模な改良を行った (BESS-TeV 測定器)。2002 年にカナダで行った一次宇宙線の観測データを解析し、各種測定器が設計通りの性能を発揮していることを確認した。さらに、検出効率の詳細な見積もりを行い、1~540GeV の陽子、1~250GeV/n のヘリウムについて精度の高いエネルギースペクトルを得ることに成功した (図 2.2 d)。得られた結果は、1998 年の BESS 実験の結果と非常に良く一致している。

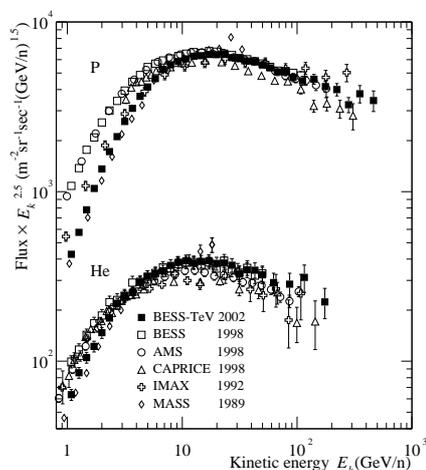


図 2.2 d: 一次宇宙線陽子とヘリウムの絶対強度。縦軸は絶対強度にエネルギーの 2.5 乗をかけてある。比較のために他実験の結果も示している。

大気 μ 粒子の精密測定

上で紹介した BESS-TeV 測定器を用いて、地上で観測される大気 μ 粒子を測定した。0.6~400GeV/c という 3 桁に渡る広い運動量領域に渡るスペクトルを得ることができた (図 2.2 e)。

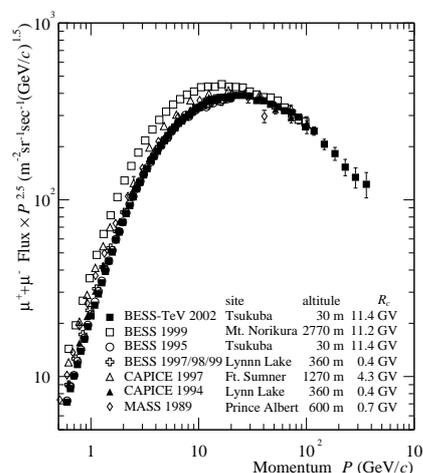


図 2.2 e: 地表で観測される大気 μ 粒子の絶対強度。縦軸は絶対強度に運動量の 2.5 乗をかけてある。比較のために他実験の結果も示している。30GeV/c 以下で観測された絶対強度に違いが見られるのは、観測高度が異なるためである。

BESS 実験では 1999 年から 2001 年の 3 年間に亘り北米で大気ミューオンの観測を行った。鉛を使ったシャワーカウンターを搭載することで、ミューオンのバックグラウンドである電子成分を見積もることができる。打ち上げ直後から大気最上層 (37km) に到る気急上昇時にデータをとることによってミューオン強度の高度依存性を観測できる。図 2.2 f が 3 年間のフライトデータの解析結果である。一次宇宙線と大気原子核との相互作用の結果生成したミューオンが大気最上層から徐々に増加し、200g/cm² 辺りでピークを迎え、その後地表に近づくにつれ減少していくという傾向がはっきりと示されている。これは主にミューオンの生成と崩壊のバランスにより生じる高度依存性である。これは、かつてない高精度の測定データであり、今後長期に渡って基礎的データとなる。

大気ニュートリノの詳細計算

スーパーカミオカンデで観測されているニュートリノ振動から振動パラメータ ($\sin \theta, \Delta m^2$) を詳細に決定するためには、大気ニュートリノを精密に計算することが必須である。この計算のためには、(i) 一次宇宙線、(ii) 地磁気が大気ニュートリノに与える影響、(iii) 宇宙線と大気の相互作用を詳細に知る必要がある。BESS

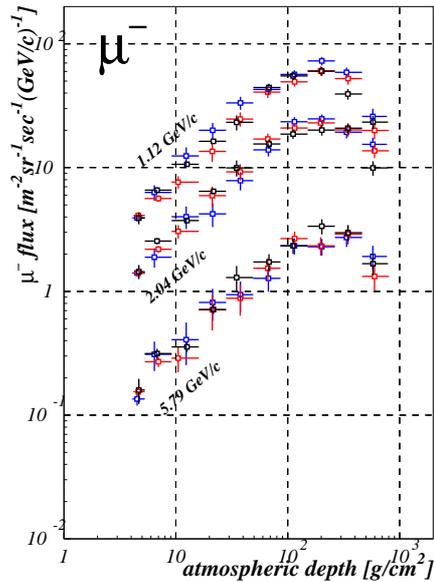


図 2.2 f: 大気ミューオンの絶対流束の高度依存性 (グロスカーブ)

実験では、一次宇宙線の精密測定を行ってきた。また、大気 μ 粒子の精密測定は、地磁気の影響や相互作用モデルについて、極めて重要な情報を与える。即ち、BESS 実験の結果を組み合わせることで、大気ニュートリノの詳細計算が可能になる。計算精度の向上には莫大な時間がかかることが問題であったが、大気ニュートリノ計算に特化した PC クラスターを構築し、ソフトウェアを徹底的に最適化することで、高速の計算を可能にした。現在は、大気 μ 粒子の観測結果と計算結果を詳細に比較し、相互作用モデルの最適化を進めている。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the Mass of the W Boson in e^+e^- Collisions Using the Fully Leptonic Channel, Eur. Phys. J. C26 (2003) 321-330
- [2] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Decay-mode Independent Searches for New Scalar Bosons with the OPAL Detector at LEP, Eur. Phys. J. C27 (2003) 311-339
- [3] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Inclusive Analysis of the b-Quark Forward-Backward Asymmetry in Z Decays at LEP, Eur. Phys. J. C29 (2003) 463-478
- [4] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Charged Particle Momentum Spectra in e^+e^- Annihilation at $\sqrt{s} = 192\text{-}209$ GeV, Eur. Phys. J. C26 (2003) 331-344
- [5] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of Cross-Section for Process $\gamma\gamma \rightarrow p\bar{p}$ at $\sqrt{s} = 183\text{-}189$ GeV, Eur. Phys. J. C28 (2003) 45-54
- [6] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Low Mass CP-Odd Higgs Boson in e^+e^- Collisions with the OPAL Detector at LEP2, Eur. Phys. J. C27 (2003) 483-495
- [7] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Nearly Mass Degenerate Charginos and Neutralinos at LEP, Eur. Phys. J. C29 (2003) 479-489
- [8] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for the Standard Model Higgs Boson with the OPAL Detector at LEP, F_2^γ at LEP2, Eur. Phys. J. C26 (2003) 479-503
- [9] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : A Measurement of $\tau \rightarrow \mu\nu\nu$ Branching Ratio, above the Z^0 Peak, Phys Lett B 551 (2003) 35-48
- [10] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : A Measurement of Semileptonic B Decays to Narrow Orbitally-Excited Charm Mesons, Eur. Phys. J. C30 (2003) 467-475
- [11] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Di-jet Production in Photon-Photon Collisions at \sqrt{s}_{ee} from 189 GeV to 209 GeV, Eur. Phys. J. C31 (2003) 307-325
- [12] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Bose-Einstein Correlations of π^0 Pairs from Hadronic Z^0 Decays, Phys. Lett. B559 (2003) 131-143
- [13] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Test of Non-Commutative QED in the Process $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ at LEP, Phys. Lett. B568 (2002) 181-190
- [14] The ALEPH, DELPHI, L3 and OPAL Collaborations, : Search for the Standard Model Higgs Boson at LEP, Phys. Lett. B565 (2003) 61-75
- [15] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Stable and Long-Lived Massive Particles in e^+e^- Collisions at $\sqrt{s} = 183$ GeV-209 GeV, Eur. Phys. J. C31 (2003) 281-305
- [16] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Pair-Produced Leptoquarks in e^+e^- Interaction at $\sqrt{s} = 189$ GeV-209 GeV, Eur. Phys. J. C31 (2003) 281-305
- [17] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of Isolated Prompt Photon Production in Photon-Photon Collisions $\sqrt{s} = 183$ GeV-209 GeV, Eur. Phys. J. C31 (2003) 491-502
- [18] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for R-Parity Violating Decays of Scalar Fermions at LEP, Eur. Phys. J. C33 (2004) 149-172
- [19] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : A Study of $W^+W^-\gamma$ Events at LEP, Phys. Lett. B580 (2004) 17-36

- [20] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of Heavy Quark Forward-Backward Asymmetries and Average B Mixing Using Leptons in Hadronic Z Decays, Phys. Lett. B577 (2003) 18-36
- [21] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Study of Z Pair Production and Anomalous Couplings in e^+e^- Collisions at \sqrt{s} between 190 and 209 GeV, Eur. Phys. J. C32 (2004) 303-322
- [22] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. Search for Anomalous Production of Di-Lepton Events with Missing Transverse Momentum in e^+e^- Collisions at $\sqrt{s}=183-209$ GeV, Eur. Phys. J. C32 (2004) 453-473
- [23] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for the Single Production of Doubly-Charged Higgs Bosons and Constraints on their Couplings from Bhabha Scattering, Phys. Lett. B577 (2003) 18-36
- [24] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Tests of the Standard Model and Constraints on New Physics from Measurements of Fermion-Pair Production at 189-209 GeV at LEP, at $\sqrt{s}=183-209$ GeV, Eur. Phys. J. C33 (2004) 173-212
- [25] The BESS Collaboration, M. Motoki, T. Sanuki, S. Orito et al. : Precise measurements of atmospheric muon fluxes with the BESS spectrometer, Phys. Letts. B564 (2003) 8-20
- [26] The BESS Collaboration, K. Abe, T. Sanuki et al. : Measurements of proton, helium and muon spectra at small atmospheric depths with the BESS spectrometer, Astropart. Phys. 19 (2003) 113-126
- [27] The BESS Collaboration, T. Sanuki, M. Fujikawa, H. Matsunaga et al. : Measurements of cosmic-ray proton and antiproton spectra at mountain altitude, Phys. Letts. B577 (2003) 10-17
- (会議抄録)
- [28] T. Sanuki, M. Fujikawa et al. : "Measurement of Cosmic-Ray Proton, Antiproton and Muon Spectra at Mountain Altitude", Proc. 28th Intl. Cosmic Ray Conf. (Tsukuba) (2003) 1127-1132
- [29] K.Tanizaki, K.Abe, T.Sanuki et al. : "Geomagnetic Cutoff Effect on Atmospheric Muon Spectra at Ground Level" Proc. 28th Intl. Cosmic Ray Conf. (Tsukuba) (2003) 1163-1166
- [30] Y.Yamamoto, K.Abe, T.Sanuki et al. : "Measurements of the Absolute Flux of Atmospheric Muons with BESS" Proc. 28th Intl. Cosmic Ray Conf. (Tsukuba) (2003) 1167-1170
- [31] K. Abe, M. Honda, K. Kasahara, T. Kajita, S. Midorikawa, T. Sanuki : "Calculation of Muon Fluxes at the Small Atmospheric Depths", Proc. 28th Intl. Cosmic Ray Conf. (Tsukuba) (2003) 1463-1466
- (学位論文)
- [32] 山本康史: 「Measurement of Atmospheric Muon Flux at Various Altitudes」, 博士論文(東京大学大学院理学系研究科), 2004年3月
- [33] 山村大樹: 「リニアコライダー主線形加速器での電子ビーム輸送」, 修士論文(東京大学大学院理学系研究科), 2004年3月
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [34] S. Komamiya : "Review of ACFA Linear Collider Project", ACFA Linear Collider Symposium in India (April 2003) CAT, Indore, India
- [35] S. Komamiya : "Linear Collider Activities in Japan", ACFA Planary Meeting (Oct. 2003) NSRRC, Shinchu, Taiwan
- [36] T. Sanuki : "GLCTA -Status and Future Prospect" 6th ACFA Workshop on Physics and Detector at Linear Collider (December 2003) TIFR, Mumbai
- [37] T. Sanuki : "Atmospheric cosmic-ray muons, protons, and antiprotons" 5th Workshop on "Neutrino Oscillations and Their Origin" (Feb. 2004) Tokyo
- 招待講演
- [38] S. Komamiya : "International Linear Collider Steering Committee", ACFA Workshop on Linear Colliders (Dec. 2003) TIFR, Mumbai, India
- [39] S. Komamiya : "The international Linear Collider Project", Asian-Pacific Accelerator Conference (March 2004) Gyeongju, Korea
- (国内会議)
- 一般講演
- [40] 倉田正和 : "J/ψ→ΛΛ̄過程の研究", 10th ICEPP シンポジウム, 2004年2月, 白馬
- [41] 山村大樹 : "リニアコライダー主線形加速器におけるビーム輸送", 10th ICEPP シンポジウム, 2004年2月, 白馬
- 招待講演
- [42] 駒宮幸男 : 「リニアコライダー計画の状況」, 日本物理学会 (2003年9月) 宮崎シーガイア
- [43] 駒宮幸男 : 「リニアコライダー GLC 計画」加速器科学研究会発表会 (2003年11月) 筑波国際会議場
- (セミナー)
- [44] 駒宮幸男 : 「リニアコライダーの推進」, リニアコライダー研究会総会 (2003年4月) 学士会館
- [45] 駒宮幸男 : 「リニアコライダーの推進と素粒子物理学」, 岡山大学物理学教室談話会 (2003年6月) 岡山大学
- [46] 駒宮幸男 : 「リニアコライダー計画の現状と将来」, (2003年8月) 東芝那須電子管工場
- [47] 駒宮幸男 : 「リニアコライダーを巡る最近の動き」, リニアコライダー研究会設立一周年記念 (2003年10月) 東京ガーデンパレス
- [48] 駒宮幸男 : 「リニアコライダーの物理」, 東京都立大学理学研究科セミナー (2003年11月) 東京都立大学

2.3 衰輪研究室

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

2.3.1 暗黒物質実験

数多くの観測結果から、我々の宇宙、銀河に存在する物質の大部分が暗黒物質が占めることが確実になっている。Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) として分類される neutralino という素粒子は、超対称性理論から予言され、宇宙物理学及び素粒子物理学両方の観点から、暗黒物質の候補として最も有力であり、我々の研究室ではこの粒子の直接検出を目的とした検出器の開発を行い、それを用いて実際に neutralino 暗黒物質探索を行っている。

神岡地下実験室における暗黒物質探索

これまで、我々が開発した極低温検出器（ボロメータ）を使って、宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設で暗黒物質観測を行ってきた。検出には、スピんに依存した相互作用に大きな断面積をもつとされている ^{19}F を含む結晶であるフッ化リチウム (LiF) 及びフッ化ナトリウム (NaF) をボロメータの吸収体として使用している。この測定から、ニュートラリーノと陽子および中性子とのスピんに依存したカップリング (a_p, a_n) に対して、強い制限を与えている。この結果は、スピんに依存した散乱断面積に対して最も厳しい制限をつけている NaI 検出器を用いた英国の UKDMC 実験 から許されていた a_p - a_n 平面の領域の一部を新しく排除するものである。この UKDMC 実験は、同じく NaI 検出器を用いてスピんに依存しない相互作用をする暗黒物質の直接検出に成功したという報告を行った イタリアの DAMA 実験とほぼ同程度の感度を有している。

我々はまた、暗黒物質発見に向けた新たな検出技術として、方向感度を有する暗黒物質検出器の開発を始めている。暗黒物質は銀河ハローにも付随していると考えられているが、地球は銀河の回転運動として 220km/s で動いている。このことに起因した地球上での“暗黒物質の風”に感度を持った検出器の開発を行っている。暗黒物質は検出器中の原子核の反跳によってとらえられる。我々は原子核反跳によって発光量が変化する有機単結晶シンチレーターに着目し、これまでに、スチルベンシンチレーターの原子核反跳に対する応答を詳細に測定してきた。

本年度は実際に地下 2700m.w.e. の低バックグラウンド環境である神岡地下実験室で、スチルベンシンチレーター 116g を用いてパイロット実験を行った。

セットアップの最適化

スチルベンによる暗黒物質探索用に低バックグラウンド仕様の光電子増倍管を開発してきたが、現状

ではダイノード構造部のセラミックや、プリーダー回路とのフィードスルーに依然放射性不純物が多く含まれることが分かった。そこでスチルベン結晶と光電子増倍管の間に低バックグラウンド仕様の NaI(Tl) シンチレーターを導入し Active Shield として動作させ、実際にバックグラウンドの減少を確認した。また、光電子増倍管の暗パルスが問題になることが判明したため、光電子増倍管を冷却しその影響を押さえるためのシステムを導入した。その他、神岡鉱山特有の高濃度ラドンガスを通さない特殊シートで検出器全体をを密封するなどの対策を行った。

暗黒物質探索実験

暗黒物質の風は地軸から約 42 度の方から吹いている。したがって、北緯 36 度の神岡では結晶軸を南北に向け水平に置けば、地球の自転により結晶軸と風向きの角度が一日で約 78 度変化し、スチルベンの発光量もそれに合わせて変化するはずである。上記のように現状で最適化した検出器を厳重に遮蔽した放射線シールドの中に設置し、2003 年 11 月より 12 月までスチルベンの発光量の観測を行った。

この観測によって、発光量の変化をとらえることはできなかったが、陽子と neutralino のスピんに依存しない相互作用に対する断面積 $\sigma_{\chi-p}^{\text{SI}}$ に対する上限値を得た (図 2.3 a)。50GeV の質量をもつ neutralino に対して $\sigma_{\chi-p}^{\text{SI}} = 7.4\text{pb}$ という上限値である。この結果は、暗黒物質の方向に関する特徴から求められた最初の制限である。116g という小質量で、バックグラウンドレートがまだ高いため、これまで行われた実験から得られている制限には及ばないものの、方向感度が暗黒物質を探索する上で有効であることを実証することができた。

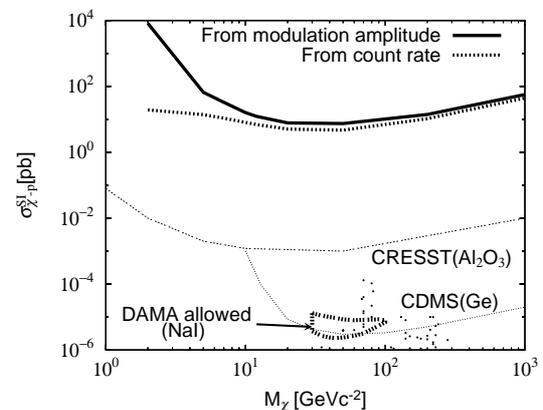


図 2.3 a: 陽子と neutralino のスピんに依存しない相互作用に対する断面積 $\sigma_{\chi-p}^{\text{SI}}$ に対する上限値。太線が本実験により暗黒物質の方向に関する特徴から求められた制限。

中性子 flux 測定法の開発

暗黒物質探索の上でのバックグラウンドのうち、特に原子核反跳をおこす中性子は非常に問題になる。しかし、神岡地下暗黒物質実験室の環境中性子はこれまでに詳細に測定されていない。スチルベンシンチレーション発光の時定数が dE/dx の大きい粒子ほど大きく、非常に優れた中性子- γ 弁別能力を持っている。中性子によるスチルベン発光効率率は詳細に測定してあるので、環境中性子のエネルギーを再構成できると期待される。そこで暗黒物質探索実験とともにスチルベンを用いて環境中性子を測定する手法の評価を行っている。

今回初めてスチルベンシンチレーターを用いて、神岡地下暗黒物質実験室の中性子バックグラウンドを測定した。中性子のエネルギースペクトルを $1/E$ とする近似を用い、測定した反跳エネルギースペクトルに対して簡易 unfolding を行ない、中性子 flux として $(6.159 \pm 0.835) \times 10^{-6} [\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}]$ が得られた。同じ神岡鉱山内ではあるが、暗黒物質実験室からはかなり離れた現在のカムランド実験装置のある地点で、われわれは 1994 年に ^3He カウンターにより中性子 flux を測定している。今回得られた値は、この過去の測定値と consistent であった。

有機シンチレーターを用いた新しい暗黒物質検出器開発のための研究

暗黒物質の検出には「暗黒物質の風」を捕らえるための方向感度のある検出器が有効である。スチルベンシンチレーターに変わる検出器として、プラスチックシンチレーターの磁場中でシンチレーション効率が増すという性質に着目した方向感度のある暗黒物質検出器の可能性を探った。およそ 1T の磁場をプラスチックシンチレーターにかけると線に対するシンチレーション効率が約 3% 上昇することが確認された。同様の測定をスチルベンシンチレーターについて行ったところ約 4% の上昇が見られ、プラスチックシンチレーターよりも大きな変化が見られた。

また、暗黒物質とのスピンの依存する相互作用で大きな断面積を持つとされる ^{19}F を含む検出器として、フッ素化合物を混合した液体シンチレーターの利用可能性を確かめた。フッ素化合物として有機溶媒と混合可能な液体であるハイドロフルオロエーテル $\text{C}_4\text{F}_9\text{OC}_2\text{H}_5$ を用いた。これを液体シンチレーターに用いられる一般的な溶媒 pseudocumene 及び溶質 DPO と混合し、混合する割合を変えながらガンマ線を当てて発光量を観測した (図 2.3 b)。 $\text{C}_4\text{F}_9\text{OC}_2\text{H}_5$ の割合を増やすにしたがって発光量の低下が見られ、暗黒物質検出実験で必要と考えられるアントラセンの 50% 程度の発光量を得るためには $\text{C}_4\text{F}_9\text{OC}_2\text{H}_5$ の割合を 20% 以下にする必要があることが分かった。

現在、スチルベンよりも方向依存性が強いとされるナフタレンシンチレーター及び、 ^{19}F を含むオクタフルオロナフタレンシンチレーターの研究を進めている。

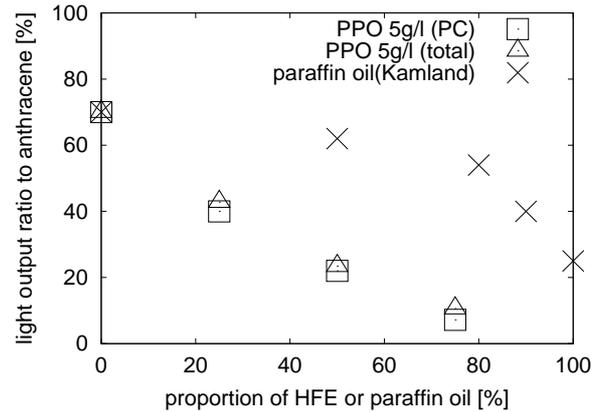


図 2.3 b: $\text{C}_4\text{F}_9\text{OC}_2\text{H}_5$ の割合を変えたときの液体シンチレーターの発光量。アントラセンの発光量に対する割合で表した。比較としてカムランド実験で用いられている paraffin oil を混合した場合の発光量を併記。

2.3.2 アクシオンヘリオスコープ実験

強い相互作用の理論である量子色力学 (QCD) には実験事実と反し CP 対称性を破ってしまう問題があることが知られている。アクシオン (axion) 模型はこの矛盾を解消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もった中性擬スカラーボソンであり、物質や電磁場とはほとんど相互作用しないと考えられている。予想される質量範囲はまだ広いが、このうち 1eV 付近では太陽がよいアクシオン源となることが知られている。

我々は太陽由来の太陽アクシオンを捕らえるため、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 の超伝導磁石と PIN フォトダイオード X 線検出器をそなえ、仰角 $\pm 28^\circ$ でほぼ全方位角について自由に天体を追尾可能なアクシオンヘリオスコープを開発した。これまでの観測ではアクシオンによると考えられる有意な事象は捕らえられていないが、これからアクシオンと光子の結合定数に制限がついて、0.27eV 以下のアクシオンに対して $g_{a\gamma\gamma} < 6.8\text{--}10.9 \times 10^{-10} \text{GeV}^{-1}$ (質量依存) という上限値を得た。

2002 年度末からは装置を理学部 1 号館地下に移設して組立て・再立上げを行っている。並行して、運転に人手を要するため長時間観測に向かなかった問題を解決するため全自動化の開発を進めている。また、さらに重い 1eV までの太陽アクシオンを探すために必要となる高密度の低温ヘリウムガスを制御するための開発を進めている。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Namba, Y. Inoue, S. Moriyama, M. Minowa: An x-ray detector using PIN photodiodes for the axion helioscope, astro-ph/0109041, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 489 (2002) 224-229.
- [2] Hiroyuki Sekiya, Makoto Minowa, Yuki Shimizu, Yoshizumi Inoue, Wataru Suganuma: Measurement of Anisotropic Scintillation Efficiency for Carbon Recoils in a Stilbene Crystal for Dark Matter Detection, Physics Letters B571 (2003) 132-138.
- [3] A. Takeda, M. Minowa, K. Miuchi, H. Sekiya, Y. Shimizu, Y. Inoue, W. Ootani, Y. Ootuka: Limits on the WIMP-Nucleon Coupling Coefficients from Dark Matter Search Experiment with NaF Bolometer, astro-ph/0306365, Physics Letters B 572 (2003) 145-151.

(会議抄録)

- [4] M. Minowa: Axion Telescope Experiment, Proceedings of the 5th RESCEU International Symposium, New Trends in Theoretical and Observational Cosmology, 2002, 87-96.
- [5] H. Sekiya, M. Minowa, K. Miuchi, A. Takeda, Y. Shimizu, W. Suganuma, Y. Inoue: The Tokyo dark matter experiment, Proceedings of the 1st Yamada Symposium on Neutrinos and Dark Matter in Nuclear Physics, (Yamada Science Foundation, 2003) XIII-3-10.

(学位論文)

- [6] 関谷洋之: 原子核反跳に対するスチルベン結晶の非等方的発光応答の実験的研究および方向有感型暗黒物質探索への応用、Experimental Study on Anisotropic Scintillation Response of a Stilbene Crystal to Nuclear Recoils and its Application to the Direction Sensitive Dark Matter Search、平成 16 年 3 月博士(理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻。
- [7] 菅沼 亘: 神岡地下暗黒物質実験室における中性子バックグラウンドの測定、平成 16 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)

- [8] H. Sekiya, M. Minowa, K. Miuchi, A. Takeda, Y. Shimizu, W. Suganuma, Y. Inoue: The Tokyo dark matter experiment, The 1st Yamada Symposium on Neutrinos and Dark Matter in Nuclear Physics (NDM03), Nara, Japan, June 9-14, 2003.
- [9] Y. Inoue, H. Sekiya, M. Minowa, K. Miuchi, A. Takeda, Y. Shimizu, W. Suganuma: Current status of Tokyo dark matter experiment, International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2003 (OMEG-03), Wako, Saitama, Japan, 17 November 2003.

- [10] H. Sekiya, M. Minowa, Y. Shimizu, W. Suganuma, Y. Inoue: Dark Matter search with Direction Sensitive Scintillators, The 5th Workshop on Neutrino Oscillations and their Origin (NOON2004), Tokyo, Japan, February 11-15, 2004.

(国内会議)

一般講演

- [11] 関谷洋之: 神岡地下実験室における暗黒物質探索実験、RESCEU 研究会 宇宙における時空・物質・構造の進化、千葉県鴨川市、2003 年 9 月 2 日。
- [12] 関谷洋之: スチルベンシンチレーターによる暗黒物質探索実験、日本物理学会 2003 年秋季大会、宮崎ワールドコンベンションセンター 2003 年 9 月 11 日。
- [13] 清水雄輝: 磁場中でのシンチレーション検出器の特性変化、日本物理学会 2003 年秋季大会、宮崎ワールドコンベンションセンター 2003 年 9 月 11 日。
- [14] 菅沼 亘: 神岡暗黒物質実験室におけるバックグラウンド、日本物理学会 2003 年秋季大会、宮崎ワールドコンベンションセンター 2003 年 9 月 11 日。
- [15] 清水雄輝: 暗黒物質の探索、平成 15 年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表会、東京大学宇宙線研究所柏キャンパス 2003 年 12 月 19 日。
- [16] 衰輪 眞: ダークマターの正体は何か、第 18 回「大学と科学」公開シンポジウム『ビッグバン宇宙の誕生と未来』、有楽町朝日ホール 2004 年 2 月 1 日。
- [17] 関谷洋之: Dark Matter Search with Stilbene Scintillators、第 10 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 2004 年 2 月 16 日。
- [18] 清水雄輝: 磁場によるシンチレーターの発光効率の変化、第 10 回粒子物理国際センターシンポジウム、長野県白馬村 2004 年 2 月 19 日。
- [19] 関谷洋之: スチルベンシンチレーターによる暗黒物質探索、日本物理学会第 59 回年次大会、九州大学 2004 年 3 月 29 日。
- [20] 清水雄輝: 有機フッ素化合物を含むシンチレーターを用いた暗黒物質検出器の開発、日本物理学会 第 59 回年次大会、九州大学箱崎キャンパス 2004 年 3 月 29 日。

(セミナー)

- [21] 衰輪 眞: 未発見素粒子を宇宙で探すための検出器、2003 年度 天文・天体物理若手の会 夏の学校、岩手県雫石町 2003 年 7 月 30 日。
- [22] 衰輪 眞: 暗黒物質の探し方、第 5 回「高エネルギー物理学と宇宙像」セミナー、KEK 国際交流センター 2004 年 4 月 6 日。

2.4 相原研究室

当研究室は、高エネルギー粒子加速器を用いた素粒子物理学実験を専門としている。近年は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の B ファクトリーを使った実験 (Belle 実験) を中心に活動して来た。今年度は、特に、B 中間子系における CP 非保存現象の精密測定と超対称性など標準理論 (The Standard Model) を超える新しい物理が出現すると期待されている B 中間子の稀崩壊現象についての研究に大きな進展があった。この研究に関する昨年度の博士論文 1 編には、『第 5 回 (2003 年度) 高エネルギー物理学若手奨励賞』 [74] が与えられ、また、2001 年の「B 中間子系における CP 不変性の破れの発見」に対して『第 20 回 (2003 年度) 井上学术賞』 [75] が与えられた。また、当研究室は、茨城県東海村で建設が進む J-PARC 施設の 50GeV 陽子シンクロトロンを用いたニュートリノ振動実験のためのニュートリノビームラインモニターの開発設計を担当している。さらに将来の大型ニュートリノ検出器用の半導体を使ったハイブリッド型光電子増倍管の開発を行っている。

2.4.1 B 中間子 CP 非保存現象の精密測定による新しい物理の探索

中性 B 中間子がファイ ϕ 中間子と K_S 中間子に崩壊する過程の CP 非対称度が、小林益川理論による期待値からずれていることを発見した。この崩壊過程は、ペンギンダイアグラム (図 2.4 a) と呼ばれる量子効果のため、小林益川理論を超える新たな物理に対する感度が高い。本年度は、1 億 5 2 0 0 万個の B 中間子反 B 中間子ペアのデータから、1 つの中性 B 中間子が ϕ 中間子と K_S 中間子に崩壊する事象を 6 8 例見つけた。それらの事象について、時間に依存する CP 非対称について測定を行なった [20]。その結果、非対称度の測定値は、 $S = -0.96 \pm 0.50^{+0.09}_{-0.11}$ で、図 2.4 b からわかるように $B \rightarrow J/\psi K_S$ の非対称度測定から得ら

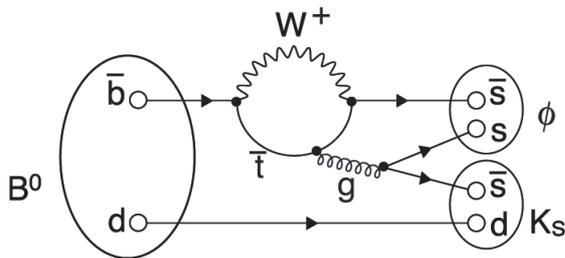


図 2.4 a: B 中間子が ϕ 中間子と K_S 中間子に崩壊する過程で B 中間子を構成するボトムクォークが量子効果により、35 倍も重いトップクォークと 16 倍重い W 粒子に化ける過程を示したペンギンダイアグラム。

れている $S = +0.733 \pm 0.057(\text{stat}) \pm 0.028(\text{syst})$ [21] からずれている。この結果が統計のゆらぎである確率は 0.05% で、 3.5σ の統計的有意さに相当している。このずれが新しい物理に起因するかどうか確定するには、さらにデータ量を増やして統計精度を向上させる必要があるが、全く予想もしていなかったたいへん興味深い結果である。

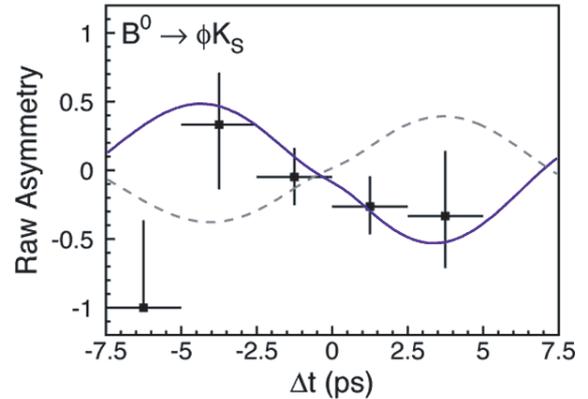


図 2.4 b: B 中間子が ϕ 中間子と K_S 中間子に崩壊する事象 68 例をもとに CP 対称性の破れを解析した結果。破線は、B 中間子が J/ψ 中間子と K_S 中間子に崩壊する事象から得られた CP 非対称度 ($S = +0.733$) で、理論は、 ϕK_S の非対称度もこれと一致するはずであると予測する。実線は ϕK_S の測定結果 (データポイント) をフィットした得られた非対称度 ($S = -0.96$) である。

2.4.2 中性 B 中間子の $\pi^+\pi^-$ 崩壊における大きな CP 非対称の発見

中性 B 中間子の二つの荷電パイ中間子への崩壊 ($B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$) は、CP 非対称の出現が期待される崩壊モードの一つであるが、分岐比が 10^{-6} と $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ と比べて 2 桁小さく、かつグルーオンを含むプロセスからの寄与もあり、CP 非対称かどうか決定することができなかった [7]。今年度は、統計精度の向上に成功し、1 億 5 200 万個の B 中間子・反 B 中間子ペアから得られた約 370 個の $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 崩壊を含むペアを用いて CP 非対称パラメータの解析を行った。その結果、世界ではじめて 5.2σ の統計的有意さで CP 非対称を証明することに成功した [39]。さらに、粒子と反粒子の崩壊幅自身の非対称である直接的 CP の破れについても、 3.2σ の証拠を得た。CP 非対称パラメータ S と A について、

$$S = -1.00 \pm 0.21(\text{stat}) \pm 0.07(\text{syst}),$$

$$A = +0.58 \pm 0.21(\text{stat}) \pm 0.07(\text{syst})$$

と決定した。CP 対称性が成り立っているにもかかわらず、この観測結果が得られる確率は 2.48×10^{-7} しかない。

2.4.3 B 中間子の非常に稀な崩壊の測定

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

$$Br(B \rightarrow X_S e^+ e^-) = (4.45 \pm 1.32_{-0.79}^{+0.84}) \times 10^{-6},$$

$$Br(B \rightarrow X_S \mu^+ \mu^-) = (4.31 \pm 1.06_{-0.70}^{+0.74}) \times 10^{-6},$$

これら e と μ のモードを平均して、

$$Br(B \rightarrow X_S l^+ l^-) = (4.39 \pm 0.84_{-0.73}^{+0.78}) \times 10^{-6}$$

と決定した [52]。ここで、 X_S はストレンジネスを含む任意の終状態である。この結果の測定精度は世界一であり、新しい物理からの寄与に強い制限を与えるものとなっている。さらにこれまで未発見であった、B 中間子の K^* 中間子とレプトンペア (e^+e^- , $\mu^+\mu^-$) への崩壊モードの発見に成功し、その分岐比を $(11.5_{-2.4}^{+2.6} \pm 0.8 \pm 0.2) \times 10^{-7}$ と決定した [27]。

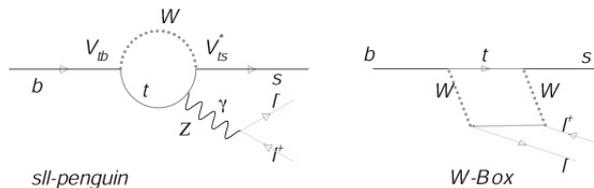


図 2.4 c: $b \rightarrow sl^+l^-$ electroweak penguin process.

2.4.4 Belle 実験用第二世代シリコンバーテックス検出器の完成

上に述べたような B 中間子の物理の研究には、B 中間子の崩壊点を精度よく決定できるシリコンバーテックス検出器 (SVD1) が、非常に重要な役割を果たした。我々は SVD1 を上回る精度を持つ第二世代シリコンバーテックス検出器 SVD2 を完成した。SVD2 は、これまで本研究室が中心になって開発してきた高い耐放射線性 (20Mrad までの耐性) を持つ IC(VA1-TA) や新しいシリコンストリップセンサーを用いて、B 中間子崩壊点の位置測定精度を現在の約 $100\mu\text{m}$ から $70\mu\text{m}$ へ向上させることができる。また、レイヤー数を 3 層から 4 層に増やし、運動量の低い荷電粒子の飛跡再構成の効率の向上も目指している。また、

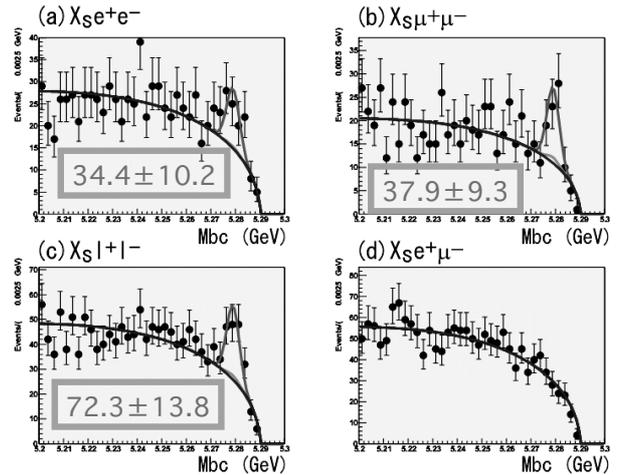


図 2.4 d: 1 億 5200 万個の B 中間子・反 B 中間子ペアを使って $X_S l^+ l^-$ 終状態を再構成した結果得られた B 中間子の質量分布。信号は 5.28 GeV のまわりにピークを成す [52]。枠内の数は得られた信号事象数。

VA1-TA はトリガー機能を有しており、B 中間子反応データのより効率良い収集が可能である。SVD2 は 2003 年夏にビーム衝突点に設置された。今後は、この SVD2 を使って時間に依存した CP 非保存の測定を行なう。

2.4.5 次世代水チェレンコフ検出器のためのハイブリッド光検出器開発

次世代メガトン級の水チェレンコフ検出器を使うニュートリノ検出器の計画が、日本、米国、ヨーロッパ等でさかんに検討されている。これらの計画のいずれもが、新しい大口径光電子増倍管の開発を必要としている。従来のダイノード構造による光電子増倍管よりも優れた時間分解能を持ち、かつ安価な光検出器の開発が望まれている。当研究室は、浜松ホトニクス、東大宇宙線研、KEK 回路と共同で Hybrid Photodetector (HPD) を開発している。このデバイスは、光電面から出た光電子を電場で加速し、アバランシェダイオード (AD) に打ち込みさらに増幅するものである。今年度は、5 インチの試作品によって HPD の基本性能を確認した。この結果をもとに 13 インチ HPD (図 2.4 e 参照) の開発に着手した [46] [58] [64]。



図 2.4 e: 13 インチ Hybrid Photodetector の試作品

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

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

当研究室では、モニターの中でも、高いビーム強度下での使用が難しいとされる、プロファイルモニターの開発を行っている [47][53][54][59][62][63]。具体的には、破壊型と非破壊型、二種類のモニターの開発を進めている。破壊型では、ビームライン上に金属のストリップまたはワイヤーを設置し、二次電子放出を利用して、プロファイルを測定する。また、非破壊型では、残留ガスがビームで電離されることにより生成された電子を収集して、プロファイルを測定する。

上記二種類のモニターの試作機を作成し、それぞれ K2K ビームラインに設置してビームテストを行った。破壊型のモニターの金属ストリップには物質量が少なく、熱上昇に強い、チタンを選定した。二度目のビームテストでは、チタンのストリップを用いた試作機 (図 2.4 f) を作成し、ビームプロファイルの測定を行った。また、非破壊型のモニターの試作機を作成して、ビームテストを行い、その基本的動作の確認を行った。現在、新しい試作機を作成し、さらに詳細な開発を進めている。

2.4.7 ニュートリノビームラインのシミュレーション

J-PARC の 50 GeV 陽子ビームは、非常に強度が高く、ビーム損失に由来する、周囲の構造物への影響、具体的にはビームライン上に配置された電磁石等への影響を詳細に見積もることが重要となる。特に神岡方向へビームを向ける機能のあるアーク部では、多数の超伝導磁石が配置され、ビーム損失を 1W/m 以下に抑える必要がある。

そこで我々は、GEANT4 を用いたビームラインシミュレーションを構築し、ビームラインにおけるエネルギー損失の影響を見積もった [47]。ここで、ビームのエネルギーの誤差、配置する磁石の位置の誤差、および磁場の誤差が与える影響についても詳細に検討を行った。また同時に、ビームハローを削り、Arc section でのエネルギー損失を抑えるために設置されるコリメーターのデザインを行い、シミュレーションを用いた詳細な研究を行った。

SEM (Secondary Emission Monitor)

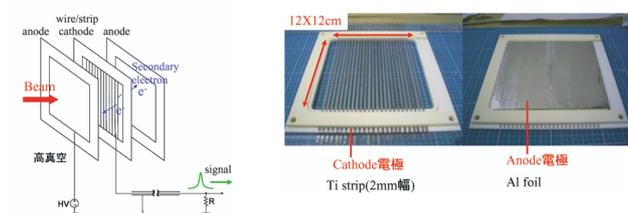


図 2.4 f: J-PARC 長期線ニュートリノ振動実験での陽子ビーム用プロファイルモニター (Segmented Secondary Emission Monitor) の試作品

2.4.8 前置検出器についてのシミュレーション

前年度に引き続き、シミュレーションを用いて、ハドロン生成の不定性がニュートリノフラックスの予想値に与える影響の研究を行った [60]。ハドロン生成モデルとして、FLUKA、MARS 二種類のモデルを使用し、前置検出器とカミオカンデ検出器でのニュートリノスペクトラムの比における、モデル間の違いを見積もった。結果、 π 中間子のスペクトラムの分布で比較すると、モデル間の違いは 9%であったが、ニュートリノのスペクトラムの比をとると、ニュートリノエネルギーがピーク値近傍 (約 1 GeV 付近) で 2%、それより高いエネルギー領域で 5%であることが見積もられた。

また、前置検出器の設置位置は、Off-Axis ビームの角度に比べて、ビーム軸からの角度が小さい位置に設置した方が、より不定性が減少することが明らかになった。具体的には、2度の Off-Axis ビームに対しては、1.95 の位置に設置すると、最も不定性が

小さくなることがわかった。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] H. Tajima *et al.*, “Proper-time resolution function for measurement of time evolution of B mesons at the KEK B-factory,” arXiv:hep-ex/0301026.
- [2] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Evidence for CP-violating asymmetries $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ decays and constraints on the CKM angle $\phi(2)$,” Phys. Rev. D **68**, 012001 (2003) [arXiv:hep-ex/0301032].
- [3] M. Z. Wang *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of $B^0 \rightarrow p \bar{\Lambda} \pi^-$,” Phys. Rev. Lett. **90**, 201802 (2003) [arXiv:hep-ex/0302024].
- [4] S. K. Swain *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of branching fraction ratios and CP asymmetries in $B^+ \rightarrow D(\text{CP}) K^+$,” Phys. Rev. D **68**, 051101 (2003) [arXiv:hep-ex/0304032].
- [5] Y. Unno *et al.* [Belle Collaboration], “Improved measurement of the partial-rate CP asymmetry in $B^+ \rightarrow K^0 \pi^+$ and $B^- \rightarrow \bar{K}^0 \pi^-$ decays,” Phys. Rev. D **68**, 011103 (2003) [arXiv:hep-ex/0304035].
- [6] J. Zhang *et al.* [BELLE Collaboration], “Observation of $B^+ \rightarrow \rho^+ \rho^0$,” Phys. Rev. Lett. **91**, 221801 (2003) [arXiv:hep-ex/0306007].
- [7] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Comment on ‘ $e^+ e^-$ annihilation into $J/\psi + J/\psi$,’” arXiv:hep-ex/0306015.
- [8] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Study of $B^- \rightarrow D^{*0} \pi^-$ ($D^{*0} \rightarrow D^{*+} \pi^-$) decays,” arXiv:hep-ex/0307021.
- [9] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of the $D/sJ^*(2317)$ and $D/sJ^*(2460)$ in B decays,” arXiv:hep-ex/0307041.
- [10] K. Abe *et al.*, “Measurements of the D/sJ resonance properties,” Phys. Rev. Lett. **92**, 012002 (2004) [arXiv:hep-ex/0307052].
- [11] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of $B^+ \rightarrow \psi(3770) K^+$,” arXiv:hep-ex/0307061.
- [12] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Observation of $B^+ \rightarrow D(\text{CP}) K^{*+}$ decays,” arXiv:hep-ex/0307074.
- [13] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Evidence for $B^+ \rightarrow \omega \pi^+ \nu$,” arXiv:hep-ex/0307075.
- [14] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Studies of $B^0 \rightarrow \rho^+ \pi^-$ and evidence of $B^0 \rightarrow \rho^0 \pi^0$,” arXiv:hep-ex/0307077.
- [15] A. Garmash *et al.* [Belle Collaboration], “Study of B meson decays to three-body charmless hadronic final states,” Phys. Rev. D **69**, 012001 (2004) [arXiv:hep-ex/0307082].
- [16] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the $e^+ e^- \rightarrow D^{*+} D^{*-}$ cross-sections,” Surveys High Energ. Phys. **18**, 221 (2003) [arXiv:hep-ex/0307084].
- [17] P. Krokovny *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of the $D/sJ(2317)$ and $D/sJ(2457)$ in B decays,” Phys. Rev. Lett. **91**, 262002 (2003) [arXiv:hep-ex/0308019].
- [18] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of a new narrow charmonium state in exclusive $B^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- J/\psi$ decays,” arXiv:hep-ex/0308029.
- [19] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Measurement of the D^0 - anti- D^0 lifetime difference using $D^0 \rightarrow K \pi / K K$ decays,” arXiv:hep-ex/0308034.
- [20] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of time-dependent CP-violating asymmetries in $B^0 \rightarrow \Phi K^0(\text{S}), K^+ K^- K^0(\text{S}),$ and $\eta' K^0(\text{S})$ decays,” Phys. Rev. Lett. **91**, 261602 (2003) [arXiv:hep-ex/0308035].
- [21] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of CP-violation parameter $\sin(2\phi(1))$ with 152 million B anti-B pairs,” arXiv:hep-ex/0308036.
- [22] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of radiative decay $D^0 \rightarrow \Phi \gamma$,” Phys. Rev. Lett. **92**, 101803 (2004) [arXiv:hep-ex/0308037].
- [23] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Measurement of the CP asymmetry in $B \rightarrow X/s \gamma$,” arXiv:hep-ex/0308038.
- [24] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Measurement of branching fraction for $B \rightarrow \psi(2\text{S}) K^*(892)$ decays,” arXiv:hep-ex/0308039.
- [25] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Evidence for $B^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$,” Phys. Rev. Lett. **91**, 261801 (2003) [arXiv:hep-ex/0308040].
- [26] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the angle $\phi(3)$ with Dalitz analysis of three-body D^0 decay from $B \rightarrow D^0 K$ process,” arXiv:hep-ex/0308043.
- [27] A. Ishikawa *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of the electroweak penguin decay $B \rightarrow K^* l^+ l^-$,” Phys. Rev. Lett. **91**, 261601 (2003) [arXiv:hep-ex/0308044].
- [28] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Study of CP violating effects in time dependent B^0 (\bar{B}^0) $\rightarrow D^{*+} \pi^+ \pi^-$ decays,” arXiv:hep-ex/0308048.
- [29] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], “Study of time-dependent CP-violation in $B^0 \rightarrow J/\psi \pi^0$ decay,” arXiv:hep-ex/0308053.
- [30] A. Drutskoy *et al.* [BELLE Collaboration], “Observation of radiative $B \rightarrow \Phi K \gamma$ decays,” Phys. Rev. Lett. **92**, 051801 (2004) [arXiv:hep-ex/0309006].
- [31] S. K. Choi *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of a new narrow charmonium state in exclusive $B^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- J/\psi$ decays,” Phys. Rev. Lett. **91**, 262001 (2003) [arXiv:hep-ex/0309032].

- [32] S. L. Zang *et al.* [BELLE Collaboration Collaboration], “Search for $B^- \rightarrow J/\psi \Lambda \bar{p}$ decay,” Phys. Rev. D **69**, 017101 (2004) [arXiv:hep-ex/0309060].
- [33] M. C. Chang *et al.* [BELLE Collaboration], “Search for $B^0 \rightarrow l^+ l^-$ at Belle,” Phys. Rev. D **68**, 111101 (2003) [arXiv:hep-ex/0309069].
- [34] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of $K^+ K^-$ production in two-photon collisions in the resonant-mass region,” Eur. Phys. J. C **32**, 323 (2003) [arXiv:hep-ex/0309077].
- [35] M. Z. Wang *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of $B^+ \rightarrow p \bar{p} \pi^+$, $B^0 \rightarrow p \bar{p} K^0$, and $B^+ \rightarrow p \bar{p} K^{*+}$,” arXiv:hep-ex/0310018.
- [36] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “An upper bound on the decay $\tau \rightarrow \mu \gamma$ from Belle,” arXiv:hep-ex/0310029.
- [37] H. Kakuno *et al.* [BELLE Collaboration], “Measurement of $|V(ub)|$ using inclusive $B \rightarrow X/u l \nu$ decays with a novel X/u reconstruction method,” Phys. Rev. Lett. **92**, 101801 (2004) [arXiv:hep-ex/0311048].
- [38] Y. Chao *et al.* [Belle Collaboration], “Improved measurements of branching fractions for $B \rightarrow K \pi$, $\pi \pi$ and $K \bar{K}$ decays,” arXiv:hep-ex/0311061.
- [39] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], “Observation of large CP violation and evidence for direct CP violation in $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ decays,” arXiv:hep-ex/0401029.
- [40] T. Uglov *et al.* [BELLE Collaboration], “Measurement of the $e^+ e^- \rightarrow D^{(*)+} D^{(*)-}$ cross-sections,” arXiv:hep-ex/0401038.
- [41] C. Schwanda *et al.* [Belle Collaboration], “Evidence for $B^+ \rightarrow \omega l^+ \nu$,” arXiv:hep-ex/0402023.
- [42] M. Nakao *et al.* [BELLE Collaboration Collaboration], “Measurement of the $B \rightarrow K^* \gamma$ branching fractions and asymmetries,” arXiv:hep-ex/0402042.
- [43] P. Koppenburg *et al.* [Belle Collaboration], “An inclusive measurement of the photon energy spectrum in $b \rightarrow s \gamma$ decays,” arXiv:hep-ex/0403004.
- [44] C. H. Wang *et al.* [Belle Collaboration], “Measurement of the branching fractions for $B \rightarrow \omega K$ and $B \rightarrow \omega \pi$,” arXiv:hep-ex/0403033.
- [45] Y. Yusa *et al.* [Belle Collaboration], “Search for neutrinoless decays $\tau \rightarrow 3l$,” arXiv:hep-ex/0403039.
- (学位論文)
- [46] 修士論文, 日下 暁人: Research and Development of a Hybrid Photo Sensor for a Water Cherenkov Detector
- [47] 修士論文, 田邊 健治: Design of J-PARC Neutrino Beamline and R&D of Beam Monitors
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [48] H. Aihara: Charmless B Decays Involving η, η' and Vector Mesons, Flavor Physics and CP Violation, June 3-6, 2003, Paris, France.
- [49] M. Iwasaki: Measurement of the Electroweak Penguin Process $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$, The 11th Annual International Conference on Supersymmetry and the Unification of the Fundamental Interactions (SUSY2003), June 5-10, 2003. Tucson, Arizona.
- [50] H. Aihara: Results from B-factories and perspectives, Advanced Studies Institute Physics at LHC (LHC-Praha-2003), Prague, July 6 - July 12, 2003.
- [51] H. Aihara: Rare B Decays at Belle and BaBar, 31st SLAC Summer Institute Topical Conference, Aug 6-8, 2003.
- [52] M. Iwasaki: Observation of B to $K^* l l$ and related modes,” 39th Rencontres De Moriond On Electroweak Interactions And Unified Theories, 21-28 Mar 2004, La Thuile, Aosta Valley, Italy
- 一般講演
- [53] K. Tanabe: “Primary Proton Beam Simulation,” “Primary Proton Beam Monitors - Segmented SEC,” NBI2003 (4th International Workshop on the Neutrino Beams and Instrumentation) KEK 4号館セミナーホール Nov.7.2003
- [54] R. Ishida: “R&D of Residual Gas Beam Profile Monitor,” “Hadron Production Model Dependence of Neutrino Flux Estimation,” NBI2003 (4th International Workshop on the Neutrino Beams and Instrumentation) KEK 4号館セミナーホール Nov.7.2003
- (国内会議)
- 招待講演
- [55] 相原 博昭: 素粒子シンポジウム「小林益川理論の検証と将来のCPの破れの物理」 “理論家のための小林益川理論の実験的検証,” 日本物理学会 秋季大会, 宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット, 2003/9/9-12
- [56] 中平 武: 第5回高エネルギー物理学奨励賞受賞講演 “Study of CP Asymmetry in the Neutral B Meson Decays to Two Charged Pions,” *ibid.*
- 一般講演
- [57] 岩崎 昌子: “Belle 実験における $B \rightarrow X_s \ell \ell$ 崩壊過程の研究” 物理学会 2003年 秋季大会, 2003年 9/9-12, 宮崎
- [58] 日下 暁人: “水チェレンコフ検出器用半導体フォトセンサーの開発,” *ibid.*

- [59] 田邊 健治：“J-PARC・神岡ニュートリノ振動実験における陽子ビームプロファイルモニターの研究開発,” *ibid.*
- [60] 石田 亮介：“J-PARC Kamioka ニュートリノ振動実験におけるニュートリノビームのシミュレーション,” *ibid.*
- [61] 伊藤 康：Belle 実験における $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$ 崩壊過程の研究、日本物理学会 第 59 回年次大会 九州大学 箱崎地区 2004 年 3 月 27 日 - 30 日
- [62] 田邊 健治：“J-PARC・神岡ニュートリノ振動実験における 2 次電子放出型陽子ビームプロファイルモニターの研究開発,” *ibid.*
- [63] 石田 亮介：“J-PARC ニュートリノビームライン用残留ガスビームプロファイルモニターの研究開発,” *ibid.*
- [64] 日下 暁人：“水チェレンコフ検出器用ハイブリッドフォトディテクタの開発,” *ibid.*

その他

- [65] 相原 博昭：B ファクトリーにおける CP 非保存の発見，物理教室談話会（4 月 25 日）
- [66] H. Aihara, Results from B-factories and Perspectives, July 14, 2003, University of Lausanne, Switzerland.
- [67] M. Iwasaki, "Primary Proton Beam Monitors" Neutrino Facility Technical Advisory Committee (nu-TAC) for J-PARC neutrino project, 2003 Nov. 12-13, KEK, Japan.
- [68] 田邊 健治：“Fast 用陽子ビームモニター：SSEC,” 第 4 回 50GeV-BT、3NBT 合同技術開発報告会 原研東海研 2003 年 12 月 9 日
- [69] 石田 亮介：“R&D of Residual Gas Beam Profile Monitor,” *ibid.*
- [70] 田邊 健治：“Primary Proton Beam Profile Monitors -Segmented Secondary Emission Monitor-,” 加速器 G モニター組とのモニター情報交換会 KEK 2004 年 1 月 30 日
- [71] 石田 亮介：“R&D of Residual Gas Beam Profile Monitor,” *ibid.*
- [72] 岩崎 昌子：“Recent results on $b \rightarrow s \ell \ell$ decays with Belle K ”科研費特定領域 第二回研究会「質量起源と超対称性物理の研究」, 2004 年 3/8-9, 筑波大学
- [73] M. Iwasaki, "Primary Proton-Beam Monitors for the J-PARC neutrino oscillation experiment" Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, 2004 March 29, Lausanne, Switzerland,

(受賞)

- [74] 中平 武：第 5 回（2003 年度）高エネルギー物理学若手奨励賞 “Study of CP Asymmetry in the Neutral B Meson Decays to Two Charged Pions.”
- [75] 相原 博昭：第 20 回（平成 15 年度）井上學術賞：B 中間子系における CP 不変性の破れの発見

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。

これまでの研究では、ソリトン、非線形波動、光学ソリトン、厳密に解ける模型、結び目理論、幾何学的模型、1次元量子系、確率的拡散モデル、ランダム行列、高分子膜と液晶、ボース・アインシュタイン凝縮、量子情報などを考察してきた。以下では、本年度の研究テーマを大別して説明する。

3.1.1 ボース・アインシュタイン凝縮

スピン自由度をもつ物質波ソリトンの厳密解

2002年、米・仏の両グループにより、ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)の物質波ブライトソリトンが観測された。物質波ソリトンは、気体原子のBEC実現の過程で派生してきた原子光学の分野において、原子レーザー、コヒーレント物質輸送などへの応用が期待されており、さらには量子情報・通信の素子としても注目を集めはじめた。こういった将来の応用面を考えた場合、気体原子のBECにはもうひとつ長所がある。それは、原子が内部自由度もち、多成分のチャンネルを扱うことができるという点である。

そこで、これら2つの性質 物質波ソリトンと内部自由度を融合させた状況を想定し、多成分非線形シュレーディンガー方程式を用いて内部自由度を有する凝縮体のダイナミクスを解析した。内部自由度としては、多くのアルカリ原子がそうであるような、 $F=1$ 超微細基底状態を選定した。この場合、凝縮体は3成分スピノールと呼ばれる超微細スピン空間で回転対称なベクトル秩序パラメータ $\{\phi_1, \phi_0, \phi_{-1}\}$ で特徴付けられる。我々は、これらの場の従う時間発展方程式が、フェッシュバハ共鳴による結合定数の調整、及び適当なスケール変換を行うことによって、完全可積分系に帰着できることを証明し、逆散乱法を適用することでソリトン解を厳密に求めた [35, 36]。

さらに、ソリトン解が、その内部自由度の持つ対称性に応じて、強磁性的なものと極性的なものに分類できることを示し、強磁性的なソリトン同士の衝突が、巨視的なスピン歳差運動として解釈できるこ

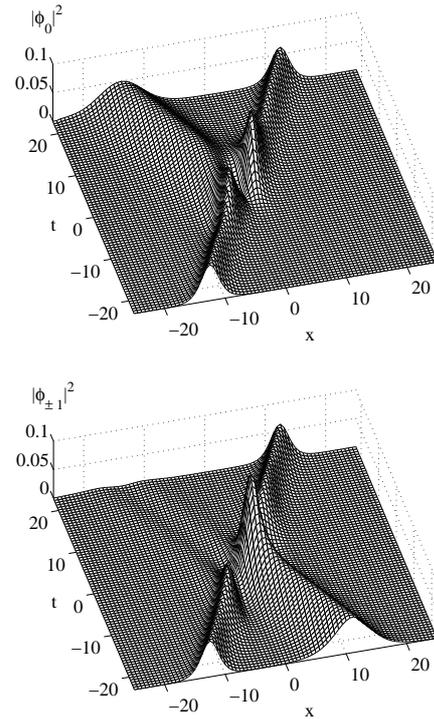


図 3.1 a: 2-ソリトン解における内部自由度間のスイッチング。

とを指摘した [37]。一方、極性的なソリトンにはピークが二山に分かれるような解が含まれており、別種のソリトン方程式である佐々・薩摩型の高階非線形シュレーディンガー方程式との関連性が示唆されるなど、ソリトン理論の観点からも新たな発展が見込まれる。

また、2-ソリトン解の表現を解析することによって、パラメータの制御により、内部自由度間のスイッチングが実現できることを示した [41]。図 3.1 a にその例を示す。ここでは、簡単のため $\phi_{\pm 1}$ が同じ値になるように設定し、 $|\phi_0|^2$ 、及び $|\phi_{\pm 1}|^2$ の包絡ソリトンを表示した。ともに手前から左奥へ向け時間軸、左右に空間軸が設けてある。今、左に進むものをシグナル、右に進むものをスイッチとみなす。シグナルのソリトンに注目すると、 $t=0$ の衝突領域を境に ± 1 成分が消え、0 成分の振幅がそれを補うように増大していることがわかる。

これらの設定は、BEC 研究における近年の実験技術の進展からすると、十分に実現可能であり、物質波での量子情報処理への道が開かれることを期待する。

3.1.2 ソリトン理論

非可換ソリトン方程式

ひも理論の発展の中で、非可換場の理論や非可換時空におけるソリトン理論に多くの注目が集まっている。非可換時空における可解模型は、場の理論として興味深いばかりでなく、座標の非可換性がもたらす物理的意義を調べる恰好な場を与えてくれる。まず、 $\bar{\partial}$ (D-bar) 法と呼ばれるソリトン理論の技法を、非可換時空の場合に拡張した [1]。 $\bar{\partial}$ -法の拡張は多くあるが、非可換時空への拡張はこの仕事が初めてである。可換の場合、すなわち、通常のソリトン方程式では、その解は線形な代数方程式に帰着される。しかし、非可換な場合は、代数方程式の係数は非可換であり解を求めるのは難しい。KP 方程式を例にとり、非可換ソリトン方程式の解法を提唱した [2]。さらに、初期値問題や境界値問題を統一的に考察するため、零曲率表示やモノドロミー表現の幾何学的定式化を進展させた。特に、非線形シュレーディンガー方程式系の可積分性を証明した [3]。現在、これらの理論の背後にある代数構造や佐藤理論の τ 関数の研究を行っている。

超南部-ハミルトン系

南部-ハミルトン系はハミルトン系の拡張であり、その時間発展において拡張された位相空間の体積を保存する、という性質を持つ。我々は超南部括弧を用いて、フェルミオン自由度を持つ系の基本的性質を考察し、いくつかの具体例を与えた。また、ボゾンのみの場合と同様に、作用原理を持つことを示した。この作用により、系が拘束条件を持つハミルトン系と見なせることが分かる。また、その拘束条件を解き、静的ゲージにおけるディラック括弧を計算した [18]。

3.1.3 量子多体系

量子可積分模型の有限温度解析

量子可積分系と呼ばれる解析が最も進んでいる一群の系においても、厳密に解析的に熱力学的量を計算する事は極めて困難であり、現在知られている方法としては熱力学的ベーテ仮説法 (TBA) と量子転送行列法 (QTM) の 2 つのみしか解析方法はなかった。しかし、そのどちらにも、計算できる物理量が少ない、数学的厳密性に欠ける、等の問題点が存在していた。特に、その解析途中に現れる、ストリング仮説と呼ばれる仮定は広く知られていながら、その数学的裏付けはいまだなされていなかった。この様に、量子可積分系であっても、有限温度解析には多くの困難が残されているのが現状である。

そこで、我々は、数学的に厳密にできる事、一般性を持って多くの物理量・量子可積分系に適用できる事、の 2 点を目的として新しい方法論を構築・提

案している。過去において我々はその具体例として、連続系で最も単純な 関数型ボース系の自由エネルギーを導出した。さらに、束縛状態のある中でも最も単純な XXX 模型における自由エネルギーも導出した。これら過去の研究成果は、我々の方法が量子可積分系における有限温度解析として、数学的に厳密で、多くの量子可積分系に適用できる方法である事を示唆していた。そこで、本年は一般論へ拡張を目指した。その結果として、束縛状態の存在しない多くの量子可積分系における自由エネルギーを統一的に導出することに成功した [8]。この成果により、我々の提案する方法の有効性を示す事が出来た。さらに、去年行った XXX 模型の自由エネルギーの導出に関して、複雑な解析を詳細に議論した [20]。その結果として、XXX 模型における束縛状態に関する知見が十分に得られたと考える。今後は、束縛状態のある他の量子可積分系をも統一的に扱って、自由エネルギーを導出する事を期待したい。またさらには、我々が提案する方法は、他の物理量を解析する能力も備わっていると考えており、この方向の発展も期待したい。

XXZ 模型の多点相関関数

XXZ 模型において、絶対 0 度における N 点の隣接するスピン間の任意の相関が N 重積分で書く事ができる事は良く知られた事実である。しかし、この表現には物理的に扱おうとした場合に次のような問題がある。まず、この被積分関数はそれぞれの積分変数が互いに非常に強く相関しており、それ以上の代数的解析は困難である。さらに、数値的解析においても、 $N = 4$ ですでに有効数字が一桁でるかどうかといった状態で、 $N > 4$ では数値計算では精度さえ保証できなくなる。他方この積分表示の代数的解析は、XXX 模型の場合には最近若干進んでる。具体的には、この N 重積分はリーマンの 関数の多項式になるという予想がある。さらに、 $N = 4$ までは、全ての相関関数を 関数の多項式として具体的に導出されている。しかし、あくまで、XXX 模型のみでしかこの様なきれいな結果は得られていなかった。

我々は昨年度、XXZ 模型においても、この積分表示が同様に变形される事を $N = 3$ を具体例として示した。同様の变形とは、被積分関数に相関のある多重積分を 1 重積分 (XXX 模型への極限でリーマンの 関数になるような積分) の多項式で書けるという事である。この变形は、 $N > 3$ の場合でも可能であろうと予想していた。そこで本年は、この予想に対して検討するに必要な情報を増やすため、 N が 3 以下の場合と独立な全ての 4 点相関関数として 10 個の表式を具体的に導出した [9, 20, 32, 40]。一般の値を検討する事も可能なほどに十分な量の情報を得られたため、今後は、XXZ 模型の一般多点相関関数が同様の表式で系統的に与えられる事を期待したい。

ペーテ仮説積分方程式の解析

1次元量子多体系の厳密解は、ペーテ仮説法により系統的に求めることができる。Lieb-Liniger は1次元 δ 関数ボース気体の基底状態が、準粒子の運動量分布関数に対する積分方程式 (L-L 積分方程式) で記述されることを示した。Yang-Yang はその定式化を有限温度に拡張し、準粒子のエネルギー分布関数に対する積分方程式 (Y-Y 積分方程式) を得た。

一方、 $T = 0$ における1次元量子多体系の相関関数の漸近的な振る舞いは時空 $(1+1)$ 次元の共形場の理論により記述されることが知られている。臨界指数は、上記2つの方程式を含んだ dressing equations とよばれる、共通の積分核を持つ一連の積分方程式の解を用いて表される。これらの結果は非常に有名であるが、方程式をどのように解くかについてはあまり研究が行われていない。

我々は以前、L-L 積分方程式の解法として、ベキ級数展開法による方法を提唱した [24]。同様の方法を用いることにより、 $T = 0$ において Y-Y 積分方程式を解き、展開パラメータの2次の範囲で厳密な表式を得た [16, 34]。さらに、2次の範囲で相関関数の臨界指数の計算を行った [23]。

弱い相互作用の極限は古典静電気学の摂動計算とも類似し、以前より数理物理の難問として知られている。我々は、この極限において、L-L 積分方程式の解の係数に現れる発散級数を適切に規格化することで、1877年に Kirchhoff が得た結果が再現されることを確かめた [24, 17]。

3.1.4 非平衡統計物理

1次元非平衡モデル

1次元格子上で体積排除相互作用及び左右非対称にランダムホッピングする粒子の多体系のモデルとして知られる非対称単純排除過程 (Asymmetric Simple Exclusion Process) は、定常状態に緩和した後も一定の粒子の流れを生じているという意味で非平衡なモデルである。

このモデルの定常状態は様々な物理量が解析的に表せることが知られており、特に粒子流や粒子密度といったバルク量は分配関数に相当する量によって書き表される。我々は以前、境界から粒子の出入りを許す系において分配関数を境界条件の自由度を最大限に増やした場合について書き下し、その結果は Askey-Wilson 多項式と呼ばれる最も一般的とされる q 直交多項式のウェイト関数に関するモーメント積分の形になることを示した。我々は更に考察を深め、行列の方法として知られていた定常状態の確率分布を陰に得る方法と Askey-Wilson 多項式の関係を直接導くことによって分配関数の積分表示の数学的側面を明らかにした。また分配関数だけでなく一般の n 点関数についても具体的に積分表示を書き下した [15, 33]。

少数派ゲーム

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

我々は少数派ゲームの多次元空間での拡張を試み、系がただひとつのパラメータを含む簡約化された定式化に帰着可能であることを示した。このパラメータは履歴状態数とゲームプレイヤー数の比によって表されるものであり、パラメータがある臨界値を超えたとき、プレイヤーのとりうる戦略に優劣が生じる非対称相が現れる。

さらに、我々は少数派ゲームの定式化を、系の履歴状態のラベルを道のラベルと読み替えることにより交通渋滞のモデル化に応用した。このモデルでは、道の混雑状態を、待ち時間の確率分布としてよく知られた Erlang 分布に従うものとして表現した。Chapman-Kolmogorov 方程式から出発し生成汎関数を考えることにより、熱力学極限においてある Gauss 雑音のもとでの一体の確率過程に帰着されることを示した。また、特にその定常状態の存在可能性を議論した。その結果、非対称分布である Erlang 分布のもとでは、対称な確率分布に従うとする標準的な少数派ゲームの場合と異なり、自己無撞着な定常状態が存在できないことを導いた [22]。

無限系における非平衡現象

温度や化学ポテンシャルの異なる二つの熱浴を接触させると、熱平衡状態から遠くはなれた非平衡状態がつくられる。特に、この初期状態から到達する定常状態は、非平衡定常状態と呼ばれ、近年注目をあつめている。我々は、 XX -スピンモデルおよび格子上的自由フェルミオンモデルにおいて、この設定の下での非平衡現象の研究を作用素環の手法を用いて行った。

非平衡定常状態は巨視的に安定であるか否かという問題について、格子上的自由フェルミオン気体に対して解析を行った [10]。この結果、この系の熱平衡状態は巨視的安定性を持つのに対し、非平衡定常状態は持たないということがわかった。これは、熱平衡状態が詳細釣り合いを持つのに対し、非平衡定常状態がそれを持たないということによる。

また、非平衡定常状態を特徴付ける試みとして、熱力学の変分原理により、非平衡定常状態は、長距離相互作用を持つ有効ハミルトニアンについての熱平衡状態と見ることが出来ることを示した [11]。

この視点は、非平衡定常状態に対する興味深い描像を与えている。

3.1.5 ランダム行列理論とその応用

ランダム行列とは行列要素がランダムな値をとる行列のことであり、量子重力、QCDからメソスコピック系さらには確率論、整数論など、スケールや分野を超えた応用が活発に議論されている。

このような様々な分野への応用を可能にするランダム行列の重要な特徴として固有値分布の普遍性があげられる。近年この普遍性が低次元非平衡統計力学の普遍クラスである、1+1次元 Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 普遍クラスと密接に関連していることが示唆され多くの研究が行なわれている。

本年度はKPZクラスに属する1次元多核成長模型 (Polynuclear growth model, PNG 模型) をランダム行列を用いて詳細に解析することによりKPZ系とランダム行列との深いつながりを明らかにした。具体的には以下の通りである。

半無限系における PNG 模型と Dyson のブラウン運動モデル

半無限系における PNG 模型において、高さ揺らぎの同時刻多点相関関数の厳密解を得た [14, 38]。この解析は PNG 模型の時間発展を非交差ランダムウォークの問題と読み変えることによって可能になるものである。ここで非交差ランダムウォークとは Vicious walk と呼ばれ離散化されたランダム行列とみなせる。

解析の結果得られた同時刻多点相関関数は、Dyson のブラウン運動モデルと呼ばれる2つのランダム行列の遷移を記述する動的なランダム行列の最大固有値揺らぎの多時刻相関関数と等しくなることが明らかになった。これにより次の描像が得られた。半無限系として原点から正の方向にのびた半直線上の PNG 模型を考える。原点での高さ揺らぎは原点での核生成レートに応じて GOE または GSE ランダム行列の最大固有値分布 (Tracy-Widom 分布) で記述される。また原点から離れた点での高さ揺らぎは、原点から離れるに従って GUE の Tracy-Widom 分布に遷移していく。

外場のある PNG 模型

端に外場のある PNG 模型に対しても高さ揺らぎの分布関数とその相関を厳密に解析した [39, 42]。このモデルの特徴は、端では外場の影響で揺らぎはガウスのようになるのに対し、バルクでは GUE のランダム行列の Tracy-Widom 分布として記述できることである。したがってある点でその2つのプロセスが競合することが考えられるが、その競合点付近での揺らぎの相関関数を厳密に導出した。

その結果、揺らぎは競合点では GOE^2 (2つの GOE の独立な重ね合わせ) からバルクでは GUE の Tracy-Widom 分布へ遷移していくことがわかった。さらに外場の生成レートを大きくすると競合点で F_0 と呼

ばれるランダム行列との対応が知られていない確率分布からバルクへ行くに従いガウス分布へ遷移することがわかった。

3.1.6 量子情報と量子計算

量子多体系のエンタングルメントの性質

エンタングルメントと呼ばれる非局所的量子相関は、古くは Einstein, Podolsky, Rosen (EPR) によって量子論のパラドックスとして提案されたものであったが、現在では量子情報処理を行うために必須の資源と考えられており、同時に量子論の根本に多くの新しい理解を与えている。それ故、エンタングルメントの特徴付け・定量化は大きな関心事である。特に、現代情報化社会はネットワークを構成し多くの構成要素が作用しあうことで高度な情報処理を遂行しているため、量子情報においても多体構成要素間の量子情報処理およびそれを可能とする多体系のエンタングルメントはとても重要なテーマとなっている。加えて、量子系を制御・操作する実験技術の進歩は目を見張るものがあり現在3体以上の多体系を扱えるようになりつつあるので、呼応して理論も進展することが望まれている。多体系での困難は、2体系でのエンタングルメントの構造はよく調べられていたが、それは簡明な一方かなり特殊であり、その際有効な手法は多体系に単純に適用できないことにあった。加えて、古典的には見られない純粋な量子多体効果があって、多体系を順に2つのサブグループから構成していくような考えでは捉えきれなかった。

私達の成果はこの状況に、任意の多体系で適用できるアイデアを導入することで打開策を見出し、多体系エンタングルメントの基本性質を明らかにすることができたことである。エンタングルメントの基本性質は、その「量子的非局所性」から推察されるように古典情報の通信を許した上で量子系の局所操作 (Local Operations and Classical Communication: LOCC) の制御操作の下で増やすことのできない点にある。つまり、エンタングルメントの基本性質は LOCC の制御操作に応じてどうすれば保存して、或いは消費してしまうかの変換性にあり、これはエンタングルメントの階層構造として現れる。私達は前年度からの成果である双対性と超行列式を指針として、エンタングルメントの変換における様々な純粋多体効果が、対応する超行列式の大きさによって与えられることを示した。そして、量子情報処理への応用面で興味ある2量子ビットとその他の $(2 \times 2 \times n)$ 系に対して、実際系統的にエンタングルメントのこの階層構造を明らかにした [12, 13]。従来このような分類は、3量子ビットと、部分的に4量子ビットの場合が考えられていただけなので私達の研究は貴重な例解を加えている。エンタングルメントを保存する LOCC 操作の下で9つのクラスに分かれ、消費の仕方によって5段階の階層構造をなしている。3以上の多体量子ビットの系の場合には階層の最上位に複数のクラスがあり全てのエンタングルメントを用意

できる万能な資源は無いが、この系のように1人が大きな自由度を利用できれば最上位に唯一のクラスが存在し万能資源となり得るといった著しい差異を見出した。この階層構造からマルチパーティ量子情報処理、量子コンピュータの理解を深める知見も得られている。

3.1.7 可積分系と無限次元対称性

Virasoro 代数と Calogero-Sutherland 模型

Virasoro 代数は 70 年代初頭にひも理論に関連して導入され、1984 年の Belavin- Polyakov-Zamolodchikov による共形場理論に関連して広く注目された無限次元対称性である。一方 Calogero-Sutherland 模型 (以下略して CS 模型) は距離の 2 乗に反比例する斥力相互作用を持つ粒子系の運動を記述する模型で、1960 年代末から広く研究され、古典系、量子系共に厳密に解けることが知られている。特に量子力学的な場合の波動関数は Jack 多項式と呼ばれる。CS 模型は空間スケール不変性を持つことから、共形場理論との何らかの関連があることが予想されてきた。

そこで我々は Jack 多項式のボソンのアナログを構成し、Virasoro 代数の Verma 加群への埋め込みを考察した。Mimachi-Yamada により Virasoro 代数の特異ベクトルは長方形のヤング図に対応する Jack 多項式に比例することが知られていたが、その具体的な形を比例係数を込めて決定した [47]。更に一般的なヤング図に対応する Jack 多項式が Verma 加群の自然な基底となることを発見した。この事実により Virasoro 代数の生成元の最高ウェイト表現の具体的な行列要素を決定し、更に Kac の行列式公式および Mimachi-Yamada の公式の直感的な理解および極めて簡明な別証明を得た。副産物としてこれまで知られていなかった、Jack 多項式に冪和対称関数をかけたり、冪和対称関数で微分した際の公式が Virasoro 代数の最高ウェイト表現の行列要素とほぼ同じ式で表されることを発見した。

また上記の理論を q 変形した理論を研究した。すなわち変形 Virasoro 代数の Verma 加群に Macdonald 多項式を埋め込んだ。この時 Jack 多項式の場合に冪和対称関数が果たしていたのと同様な役割を持つ、変形 Virasoro 代数に関連した複雑な作用素を見出した。この作用素を Macdonald 多項式に作用させると、Jack 多項式に冪和対称関数を作用させた場合に表れた係数を素直に変形した部分と、更に因子化しない 2 変数の多項式の積となることが分かった。現在この新たに発見された 2 変数の多項式の詳しい性質を調べている。

3.1.8 結び目理論

量子群の発見以降、多彩な量子結び目普遍量が提出されてきたが、こうした量子普遍量の幾何学的な理解は全くなされていなかった。この手がかりとさ

れるのが「体積予想」、つまり、双曲結び目に対する色つき Jones 多項式の漸近的なふるまいが結び目の補空間の双曲体積を与える、という予想である。我々は、非双曲結び目であるトラス結び目・絡み目についての Jones 多項式の特殊値が半整数ウェイトの保型形式の Eichler 積分と一致することを見だし、保型性を用いて厳密な漸近展開を得た [5, 6, 7]。いくつかの双曲結び目については数値実験を行った [4]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] N. Wang and M. Wadati : Noncommutative Extension of $\bar{\partial}$ -Dressing Method, J. Phys. Soc. Jpn. **72** (2003) 1366-1373.
- [2] N. Wang and M. Wadati : Exact Multi-line Soliton Solutions of Noncommutative KP Equation, J. Phys. Soc. Jpn. **72** (2003) 1881-1888.
- [3] N. Wang and M. Wadati : A New Approach to Noncommutative Soliton Equations, J. Phys. Soc. Jpn. **72** (2004) 3055-3062.
- [4] K. Hikami: Volume conjecture and asymptotic expansion of q -series, Exp. Math. **12**, 319-337 (2003).
- [5] K. Hikami: q -series and L -functions related to half-derivatives of the Andrews-Gordon identity, The Ramanujan J., to appear
- [6] K. Hikami and A. N. Kirillov: Torus Knot and Minimal Model, Phys. Lett. B **575**, 343-348 (2003).
- [7] K. Hikami: Quantum invariant for torus link and modular forms, Commun. Math. Phys. **246**, 403-426 (2004).
- [8] G. Kato and M. Wadati: Bethe ansatz cluster expansion method for quantum integrable particle systems, J. Phys. Soc. Jpn. in press
- [9] G. Kato, M. Shiroishi, M. Takahashi and K. Sakai: Third-neighbor and other four-point correlation functions of spin-1/2 XXZ chain, J. Phys. A, **37** (2004) 5097
- [10] Y. Ogata: The Stability of the Non-Equilibrium Steady States, Commun. Math. Phys. **245** (2003) 577-609.
- [11] T. Matsui and Y. Ogata: Variational Principle for Non-Equilibrium Steady States of the XX Model, Rev. Math. Phys. **15** (2003) 905-923.
- [12] A. Miyake and F. Verstraete: Multipartite entanglement in $2 \times 2 \times n$ quantum systems, Phys. Rev. A **69**, 012101 (2004).
- [13] A. Miyake: Multipartite entanglement under stochastic local operations and classical communication, Int. J. Quant. Info. 印刷中 (2004).
- [14] T. Sasamoto and T. Imamura: Fluctuations of the One-Dimensional Polynuclear Growth Model in Half-Space, J. Stat. Phys. **115** (2004) 749-803.

- [15] M. Uchiyama, T. Sasamoto and M. Wadati: Asymmetric Simple Exclusion Process with Open Boundaries and Askey-Wilson Polynomials, *J. Phys. A: Math. Gen.* **37** (2004) 4985–5002
- [16] T. Iida and M. Wadati: Solutions of the Yang-Yang integral equation at zero-temperature, *J. Phys. Soc. Jpn.* **72** (2003) 1874–1880.

(会議抄録)

- [17] M. Wadati, G. Kato and T. Iida: Statistical Mechanics of Quantum Integrable Systems, in “Non-linear Waves: Classical and Quantum Aspects,” eds. V. V. Konotop and F. Kh. Abdullaev, 2004.

(博士論文)

- [18] 榊原: Supersymmetrization and Deformation Quantization of Nambu-Hamilton Systems
- [19] 緒方: The Stability of the Non-Equilibrium Steady States
- [20] 加藤: Analytical Study of the One-Dimensional Heisenberg Model
- [21] 三宅: Quantum Multipartite Entanglement: Classification and Use for Quantum Information.

(修士論文)

- [22] 黒沼: Statistical Physics of Minority Game.
- [23] 飯田: Exact Analysis of a One-Dimensional δ -Function Bose Gas at Zero Temperature

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [24] M. Wadati: Statistical Mechanics of Quantum Integrable Systems, NATO ARW “Nonlinear Waves: Classical and Quantum”, Estoril, Portugal, July 13-17, 2003
- [25] K. Hikami: Knot invariant and hyperbolic geometry (“Recent developments in the theory of integrable systems”, Yukawa Institute., 2003年4月)
- [26] K. Hikami: Quantum Invariant and Modular Form (Workshop on “Hyperbolic Volumes”, Waseda Univ., 2003年12月)
- [27] K. Hikami: Quantum Invariant for Torus Knot and Modular Form (第3回保型形式周辺分野スプリングコンファレンス, 浜名湖, 2004年2月)

一般講演

- [28] A. Miyake and F. Verstraete: Multipartite entanglement distributed with one party holding many resources (4th European QIPC Workshop, Oxford, UK, 2003年7月).
- [29] A. Miyake and F. Verstraete: Multipartite entanglement in $2 \times 2 \times n$ quantum systems (ERATO Workshop on Quantum Information Science 2003 “EQIS03”, Kyoto, Japan, 2003年9月).

(国内会議)

招待講演

- [30] 樋上: Quantum knot invariant for torus link and modular forms (弦理論と重力理論の数学的構造解明に関する学際的研究, 立教大学, 2003年12月)

一般講演

- [31] 三宅, F. Verstraete: Multipartite entanglement of finite classes cases (8th Quantum Information Technology Symposium “QIT8”, 北海道大学, 2003年6-7月).
- [32] 加藤, 城石, 高橋, 堺: 非対称ハイゼンベルグ模型の Massless region における多点相関の1重積分を用いた多項式表示 (日本物理学会 2003年秋大会, 岡山大学, 2003年9月)
- [33] 内山, 笹本, 和達: 1次元非対称単純排他過程の定常状態と q 直交多項式 (同上)
- [34] 飯田, 和達: 1次元デルタ関数ボース気体の厳密解を与える積分方程式の解析 (同上)
- [35] 家田: Multi-Component NLS for Spinor Condensates (RIMS 共同研究集会「波動の非線形現象とその応用」, 京都大学 数理解析研究所, 2003年10月)
- [36] 家田: Matter-Wave Solitons in a Multi-Component Bose-Einstein Condensate (YITP 研究会「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, 2003年12月)
- [37] 家田, 宮川: Matter-Wave Solitons in a $F=1$ Spinor Bose-Einstein Condensate (ISSP「物性理論の新潮流 若手研究会」, 東京大学 物性研究所, 2004年2月)
- [38] 今村: 多核成長模型とランダム行列 (確率モデルの統計力学, 京大基礎物理学研究所, 2003年12月)
- [39] 今村: Random Matrix Theory and Polynuclear Growth Model (スペクトル幾何学, 漸近解析とその周辺, 慶応大学, 2004年2月)
- [40] 加藤: Analytical study of correlation functions for the 1D XXZ model (東京大学物性研究所, 2004年2月)
- [41] 家田, 宮川, 和達: $F=1$ 凝縮体におけるブライトソリトン間のスイッチング (日本物理学会 第59回年次大会, 九州大学, 2004年3月)
- [42] 今村, 笹本: 外場のあるランダム行列理論と GOE^2 (同上)

(セミナー)

- [43] K. Hikami: Zagier’s q -series identity and knot invariant (Infinite Analysis Seminar, 京都大学数理解析研究所, 2003年4月)
- [44] 三宅: On classifications of multipartite entanglement (University of Bristol, 2003年7月).
- [45] 三宅: Multipartite entanglement associated with graphs and its applications to quantum information processing (今井量子計算 ERATO プロジェクト, 2003年8月).

-
- [46] 今村: Polynuclear Growth Model and Related Topics (中央大学 2003 年 8 月)
 - [47] R.Sakamoto: Explicit formula of the singular vector of the Virasoro algebra (Laboratoire d'Annecy-le-vieux de physique théorique, 2003 年 9 月)
 - [48] 三宅: Shareability of quantum multipartite entanglement: tutorial and topics (東京大学・国立情報学研究所合同量子情報セミナー, 2003 年 10 月).
 - [49] 家田: Matter-Wave Solitons in a $F = 1$ Spinor Condensate (東京工業大学, 2003 年 11 月)
 - [50] 家田: Bose-Einstein Condensation in Trap Potentials (東京大学・駒場原子核理論セミナー, 2003 年 11 月)
 - [51] 家田: スピン - 1 ボース・アインシュタイン凝縮体における物質波ソリトン (早稲田大学, 2003 年 12 月)
 - [52] 三宅: Quantum multipartite entanglement (高エネルギー加速器研究機構, 2004 年 1 月).
 - [53] K. Hikami: Introduction to Volume Cojecture (York University, 2004 年 2 月)

3.2 塚田研究室

1982年1月に開設された本研究室は、塚田の定年退官によって2003年3月末日をもって閉じられた。この間、大学院生として本研究室に在籍し、理学博士の学位を取得したものの21人、理学修士の学位を取得したものの6人である。共同研究を実施するために企業や研究機関から派遣され在籍したものの、外部資金による博士研究員、外国からの派遣留学生・研究員なども相当数に上る。これらの本研究室に在籍した多くの方々は、現在、大学、企業研究所、独立法人研究機関などで活発な研究活動に邁進し、我が国における科学技術の推進における指導的な役割を果たしている。本研究室で一貫して追求したテーマは、表面電子状態と表面過程の理論、表面構造と表面反応の理論的研究、超伝導近接効果の理論、走査トンネル顕微鏡、摩擦顕微鏡、原子間力顕微鏡など走査プローブ顕微鏡のメカニズム解明と理論シミュレーション法の開発、クラスター、カーボンナノチューブ、原子架橋、分子架橋系などナノ構造体の理論、原子マニピュレーションの理論、計算物性物理学の新たな開拓的研究などである。物理教室構成員をはじめ多数の方々のご協力とご支援によって、本研究室における活発な研究活動を展開できたことに深く感謝申し上げます。

3.2.1 ナノ構造の電気伝導の第一原理計算

原子細線や分子架橋の電子輸送を解析するための第一原理的な方法を開発している。我々はこれまでに、非平衡開放系のためのDFT理論として第一原理リカーゾン伝達行列法(RTM法)を開発し、成功をおさめてきた。さらに、ここ数年はLippman-Schwinger方程式の数値解を用いる方法も開発した。もともとのRTM法では、局所擬ポテンシャルに対応する部分のみが完成していたが、今年度は広瀬賢二(NEC)、小林伸彦(産総研)の協力を得て、非局所擬ポテンシャルをこの方法に組み込むことに成功した。すなわち、まず一個の原子だけが非局所擬ポテンシャルを含むKohn-Sham方程式の解は、局所項に対してRTM法で解いた境界条件を満たす斉次方程式解から構成するグリーン関数と、非局所擬ポテンシャルを角運動量成分に分解した射影成分との積の積分として表される。後者は、各原子の中心付近に局在するためこの積分計算は容易である。すると系のすべての原子が非局所ポテンシャルを含んだKohn-Sham方程式の解は、斉次方程式に対する一般解と上述の非斉次方程式に対する特殊解の和として表せる。このようにして、一般に擬ポテンシャルを含む系の、RTM方程式の数値解を効率良く計算する手法を開発した[1]。

3.2.2 金属原子鎖の量子輸送における末端効果

上述の非局所擬ポテンシャルを取り入れた第一原理RTM法を用いて、6原子のAl原子鎖の量子輸送およびバイアス電位分布を調べた。第3周期の種々の原子を左端に置換した時のコンダクタンスは、Alとの原子番号の差が増すにつれ系統的にその値が大きく低下することがわかった。Naが左端にあるとき、バイアス電圧はこの周辺に局在してかかり、架橋内に一様に広がらない。左端がSi原子の場合にも同じ用にバイアス電場は左側に集中するが、Naの系より広がる。左端を置換しない場合も、バイアス電場は左側に集中するが、その大きさはSi原子と同程度である。バイアスを印可した状況での原子架橋内部の電子分布は、左端がNaの系では、Na原子と右隣のAl原子の間で電荷の移動があり、負の分極が生じている。一方、左端がSiの系ではこの電荷移動はより大きな空間スケールに涉っており、左端のSiから右側の数個のAl原子への電子の移動が認められる。

3.2.3 テープポルフィリン架橋系の伝導

田上と塚田は、オリゴポルフィリンを用いた架橋系の量子伝導特性を調べた[5, 6, 7, 8, 9]。現在、ポルフィリンを構成単位にもつオリゴマーは数種類合成されているが、中でもテープポルフィリンと呼ばれる完全共役ポルフィリンは、分子長の増加と共にHOMO(最高占拠準位)-LUMO(最低非占拠準位)ギャップが著しく低下するため、分子架橋として用いたとき高コンダクタンスが期待される。しかし、分子骨格のみならず、電極と分子の接合部の構造も重要な因子である。実際、分子端のmesoあるいは位を電極に繋ぐと、それぞれ金属的あるいは半導体的なデバイスになることが分かった。また、中心に遷移金属が配位した場合は、フェルミレベル近傍にd軌道が現れるため-d系となる。すなわち、ゲートなどで分子架橋部分のバイアスを変えることにより、その磁性が強磁性から反強磁性へと調節できることが分かった。

3.2.4 フェナレニル関連分子の架橋系の量子伝導

3つのベンゼン環が D_{3h} の対称性をもってつながった分子のうち、特に中心原子Xが炭素の場合フェナレニルとよぶ。同分子の半占有軌道(SOMO)はπサイト上だけに波動関数の振幅を持ちスピン分極している。なお、Xをホウ素(B)あるいは窒素(N)に置換することで電子数は偶数となるためスピン密度分布は消失する。フェナレニルのπサイトを金電極につなぐと、その透過スペクトルは金属的な伝導を示す。これは、フェルミレベルのごく近傍に分子のSOMOに由来する伝導チャンネルがあるためである。X=Nとした場合も、この傾向は変わらない。

い。一方、この分子を電極と サイトでつないだ場合の透過スペクトルは、フェナレニル分子の SOMO が サイトに節を持つことに対応して、半導体的になってしまう。しかし、 $X=B$ の場合は強いピークが残り、伝導が期待できる。このように、分子架橋系の伝導特性は、分子のみならず電極との接合構造で支配される [10]。

さらに我々はフェナレニル架橋系に対して、第 3 端子が独立な電極に接続される場合の透過スペクトルへの影響を調べた。量子共鳴によるスペクトルの切れ込み構造が消失すること、内部ループ電流の経路が変わる等の効果が認められた [11]。

3.2.5 螺旋型ベンゾチオフェン重合体の量子輸送

ベンゾチオフェン重合体は硫黄原子が交互に向くように重合させると直線型、同じ向きになるよう重合させると螺旋状分子になる。これらの重合体について、密度汎関数法計算でパラメータ設定した強結合近似により、電子の透過スペクトルを計算した [12]。末端はチオール基により金電極と結合するモデルを用いた。ドープしない場合には、両方の分子でバイアス電圧を 1 V 以上かけないと電流は流れないことが示された。しかし、特に螺旋状分子の場合、ヨウ素ドープによりフェルミ準位付近に透過スペクトルのピークが現れ、電流が流れることが示された。これは、同デバイスが分子ソレノイドとして機能することを意味している。

3.2.6 フェノキシラジカル分子架橋系におけるスピン伝導

スピン分極した状態をもつラジカル分子の架橋系が、スピンに依存した電子量子輸送を示すかどうかは、興味ある問題である。田上と塚田は、二つの金電極を架橋するフェノキシラジカル分子について、スピンに依存する量子伝導を調べた [13]。計算法は、密度汎関数法からパラメータを決めた self-consistent 強結合近似モデルである。この分子の 4 量体を架橋部にとって計算したところ、電子状態はスピンの向きに依存し、対応して、透過スペクトルもスピンの向きに依存した。これは分子によるスピンバルブ系として用いることができる。また、ラジカルが不純物などで終端されるとコンダクタンスが著しく低下することが分かった。すなわち、同架橋系は化学センサーとしての性質も期待できる。

3.2.7 Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の非接触原子間力顕微鏡像における探針効果

上記表面の非接触原子間力顕微鏡像については、これまで詳細な研究が佐々木 (成蹊大)、塚田、渡辺

(東大工)によって進められてきた。この表面は室温では、二つの IET 構造の間を激しく揺れ動く“動的表面”であり、探針の接近によって二つの構造間の相対エネルギーが影響を受けるために、非接触原子間力顕微鏡像に温度変化があらわれることも明らかにされた。興味深い例として、低温では室温と異なり 3 つの輝点が逆三角形となる像が予測されたが、実験よってもこれが確認されている。探針高さがやや低い場合には、低温の像とは角度が変わった逆三角形をなす 3 つの輝点が室温で観察されている。この像は、これまでの理論シミュレーションでは決して再現することはできなかった。今回、佐々木と塚田とは探針頂点に二つの頂点原子が存在する状況を考え、そのような探針による非接触原子間力顕微鏡像をシミュレーションした。このモデルでは長距離力の部分は共通とし、短距離力の部分は二つの頂点原子が独立にある場合のそれぞれの寄与の和になると仮定した。二つの頂点原子の相対位置を適当にとると、理論シミュレーションの結果は実験の像を良好に再現することを見出した。

3.2.8 カーボンナノチューブトラスノ永久電流

単層カーボンナノチューブ (SWCNT) のトラス構造が安定に存在することは、コンピュータによる数値計算によって確認されているが、超音波処理によっても実際に形成できる。共有結合を損なうことなく、曲面形成による局所歪みを解消するには、トラスの外側に 5 員環、内側に同数の 7 員環を導入する必要がある。これらは回位と呼ばれる位相欠陥であるために、電子状態に独特の影響を与えることが期待される。実際、CNT の螺旋について回位が様々な種類のバンド構造を導入することを我々は既に見い出しているが、この系は無限に長いトラスに数学的に同等である。今回は、ある種のトラスでは、その内側の孔に磁束を通すと孔を巡る永久電流が流れることを理論的に予測した。これはこのトラス構造に対応する CNT 螺旋構造のバンド構造と関係しており、それが半金属的なバンドになっている場合にトラスに大きな正の磁化率を起こす永久電流が流れる。

3.2.9 走査トンネル分光法によるグラファイトのランダウ準位の観察

物理教室の福山研究室では、強磁場下の低温 STM / STS によってグラファイトのランダウ準位構造を観察することに成功した。田上と塚田は、ランダウ準位をグリーン関数法によって理論的に解析し、実験で観測されたスペクトルは、結晶中のランダウ準位ではなく最表面に作られたランダウ準位を反映していることを解明した [15]。また、フェルミレベル近傍のピークは磁場強度によって位置を変えない特徴があり、磁場中のグラファイトに固有なレベルが初

めて観測されたものであることを明らかにした。本研究は福山研究室との共同研究である。

3.2.10 グラファイトのエッジ状態の理論

田上と塚田は、グラファイト表面のステップ端における電子状態を、強結合モデルを用いて理論解析した [16]。理想的なステップ端に切れ込みなどが入り、部分的にジグザグ端やアームチェア端ができると、ハニカムパターンや $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$ などの長周期パターンが現れることを見出した。実際に STM において、ステップ端の不均一な形状やそのまわりの長周期構造が観察されており、端構造の乱れが STM 像に大きく影響することが分かった。本研究は福山研究室との共同研究である。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] K.Hirose, N.Kobayashi, and M.Tsukada: Ab-initio calculations for quantum transport through atomic bridges by the recursion-transfer-matrix method, Phys.Rev.B, in press.
- [2] N.Kobayashi, K.Hirose and M.Tsukada: First-principles calculation of field emission from adsorbed atoms on metallic electrode, Appl. Surf. Sci., in press.
- [3] K.Hirose, N.Kobayashi and M.Tsukada: Ab initio calculations of quantum transport through Al atomic wire mixed with various atoms, Thin Solid Films, in press.
- [4] K.Hirose, N.Kobayashi and M.Tsukada: Ab initio calculations of transport properties of atomic bridges by recursion-transfer-matrix method, Superlattices & Microstructures, in press.
- [5] K.Tagami, M.Tsukada, T.Matsumoto, T.Kawai: Electronic transport properties of free base tape porphyrin molecular wires studied by selfconsistent tight binding calculations, Phys. Rev. B67 (2003) 2453241-2453247.
- [6] K.Tagami and M. Tsukada: Theoretical predictions of electronic transport properties of differently conjugated porphyrin molecular wires, Jpn. J. Appl. Phys. 42 (2003) 3606-3610.
- [7] K.Tagami and M.Tsukada: Current controlled magnetism in T-shape tape porphyrin molecular bridges, Curr. Appl. Phys., 3 (2003) 439-444.
- [8] K.Tagami and M. Tsukada: Chemical contact promising for coherent transport through tape porphyrin molecular bridges, e-J. Surf. Sci. Nanotech. 1 (2003) 45-49.
- [9] K. Tagami and M.Tsukada: Electronic transport through tape-porphyrin molecular bridges, Thin Solid Films, in press.
- [10] K.Tagami and M.Tsukada: Interface Sensitivity in Quantum Transport through Single Molecules, Nano Letters, 4 (2004) 209-212.
- [11] L.Wang, K.Tagami, and M.Tsukada: Quantum Transport Through Multiterminal Phenalenyl Molecular Bridges, Jpn. J. Appl. Phys. 43 (2004) 2779-2785.
- [12] K.Tagami, M.Tsukada, Y.Wada, T.Iwasaki and H.Nishide: Electronic transport of benzothiophene-based chiral molecular solenoids studied by theoretical simulations J. Chem. Phys., 119 (2003) 7491-7497.
- [13] K.Tagami and M.Tsukada: Spintronic Transport through Polyphenoxyl Radical Molecules, J. Phys. Chem. B. 108 (2004) 6441-6444.
- [14] R.Tamura, M.Ikuta, T.Hirahara and M.Tsukada: Large positive magnetic susceptibility of nanotube toras, Phys. Rev.B, submitted.
- [15] T.Matsui, H.Kambara, Y.Niimi, K.Tagami, M.Tsukada, and H.Hukuyama: STS Observation of Landau Levels at Graphite Surfaces, Phys. Rev. B, submitted.
- [16] Y.Niimi, T.Matsui, H.Kambara, K.Tagami, M.Tsukada and H.Fukuyama: Scanning tunneling microscopy and spectroscopy studies of graphite edges, Appl. Surface Sci., in press
- [17] J.Nara, H.Kino, N.Kobayashi, M.Tsukada, M.Aono and T.Ohno: Theoretical investigation of contact effects in conductance of single organic molecule, Thin Solid Films, 438/439 (2003) 2210224.

(会議抄録)

- [18] N.Kobayashi, K.Hirose and M.Tsukada: First-principles calculation of electron emission from atoms adsorbed on metallic electrode, AIP Conf.Proc. 696 (2003) 934.
- [19] K.Hirose, N.Kobayashi and M.Tsukada: First-principles theory for quantum transport and field emission of nanostructures, AIP Conf.Proc. 696 (2003) 942.
- [20] Theoretical Predictions of Transport Properties of Oligoporphyrin Molecular Bridges, AIP Conf.Proc. 696 (2003) 545.

(国内雑誌)

- [21] 田上勝規、塚田捷：ポルフィリン分子架橋系の量子輸送の理論予測、表面科学、24 (2003) 400-405
- [22] 長嶋雲兵、塚田捷：第一原理 DVX 法計算専用ロジック組込型のプラットフォーム：EHPC DVX の開発、情報処理学会論分誌、投稿中
- [23] 佐々木成朗、塚田捷：非接触原子間力顕微鏡における摩擦の物理、トライボロジスト、投稿中
- [24] 塚田捷、佐々木成朗、田上勝規：非接触原子間力顕微鏡の理論 固体物理 38 (2003) 257-268.

(著書)

- [25] 塚田捷: 物理数学 II - 対称性と振動・波動・場の記述- 基礎物理学シリーズ 4 朝倉書店 (2003)
- [26] 佐々木成朗, 塚田捷: 「複雑現象工学 複雑系パラダイムの工学利用」5.2 原子間力顕微鏡におけるナノと複雑系の物理 印刷中

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [27] M.Tsukada, R.Tamura* and Y.Kasahara: Cap of single wall carbon nano-tubes Electronic and geometric structures ECOS 22 Sept.7-12,2003 Praha, Czech
- [28] M.Tsukada, R.Tamura* and Y.Kasahara: Structure and electronic states of capped carbon nanotubes by a tight-binding approach ACSIN7 2003 Nara, 11.16-20, 2003
- [29] N.Sasaki and M.Tsukada: Effect of the tip atomic structure on the NC-AFM images of Si(111) surface 6th International Conference on noncontact atomic force microscopy Dingle, Ireland, 8.31-9.3, 2003
- [30] N.Kobayashi, K.Hirose and M.Tsukada: First-principles calculation of electron emission from atoms adsorbed on metallic electrode, Int.Conf.on STM '03, Eindhoven, 7.21-25, 2003.
- [31] K.Hirose, N.Kobayashi and M.Tsukada: First-principles theory for quantum transport and field emission of nanostructures, Int.Conf.on STM '03, Eindhoven, 7.21-25, 2003.
- [32] K.Tagami and M.Tsukada: Theoretical Predictions of Transport Properties of Oligoporphyrin Molecular Bridges, Int.Conf.on STM '03, Eindhoven, 7.21-25, 2003.
- [33] N.Kobayashi, K.Hirose and M.Tsukada: First-principles calculation of field emission from adsorbed atoms on metallic electrode, ACSIN7, Nara, 11.16-11.20, 2003.
- [34] K.Hirose, N.Kobayashi and M.Tsukada: Ab initio calculations of quantum transport through Al atomic wire mixed with various atoms, ACSIN7, Nara, 11.16-11.20, 2003.
- [35] K.Tagami and M. Tsukada: Electronic transport through tape-porphyrin molecular bridges, ACSIN7, Nara, 11.16-11.20, 2003.
- [36] N.Kobayashi, T.Ozaki, K.Hirose and M.Tsukada: First-principles calculations of quantum transport in a single molecule using the Green's function method, APS March Meeting, Montreal, 3.22-3.26, 2004.

- [37] K.Hirose, N.Kobayashi, and M.Tsukada: Ab initio calculations for transport properties through atomic bridges by recursion-transfer-matrix method, APS March Meeting, Montreal, 3.22-3.26, 2004.

招待講演

- [38] M.Tsukada, *K.Hirose, N.Kobayashi and K.Tagami: Theoretical prediction for quantum transport of atomic and molecular bridges Korean Vacuum Society Meeting 2004, Feb.11-12, Souel
- [39] M.Tsukada: Theoretical problems in non-contact atomic force microscopy Japan-Spain Joint Seminar Oct.21, 03, Univ. Osaka
- [40] M.Tsukada: Scanning probe microscopy, atom wires and molecular bridges-Their theoretical aspects, Special Lecture at Southern Yangtze University, 2003.10.24
- [41] M.Tsukada,N.Kobayashi, K.Hirose and K.Tagami; Theoretical prediction of quantum transport through atom and molecular bridges, SPS '03 Poznan-Malta, Poland July 16-19,2003
- [42] M.Tsukada;First Principles Theory of Non-contact Atomic Force Microscopy ICMAT2003, Singapore, 12.7-12, '03
- [43] M.Tsukada,N.Kobayashi,K.Hirose,K.Tagami and R.Tamura: Prediction of quantum transport features of molecular bridges IUMRS-ICAM 2003, Yokohama, Japan, October 8-13, 2003

(国内会議)

一般講演

- [44] 王利光, 田上勝規, 塚田捷: 「3 端子分子架橋系の量子輸送」, 日本物理学会 2003 年秋季大会 岡山大学 9 月 20 日
- [45] 田上勝規, 塚田捷: 「テープポルフィリン及びベンゾチオフェンらせん分子の量子輸送」, 日本物理学会 2003 年秋季大会 岡山大学 9 月 20 日
- [46] 小林伸彦, 尾崎泰助, 田上勝規, 塚田捷: 「グリーン関数による単分子の電気伝導の第一原理計算」, 日本物理学会 2003 年秋季大会 岡山大学 9 月 20 日
- [47] 松本卓也, 田上勝規, 前田泰, 川合知二: 「固体表面上における DNA の変形と電気伝導」, 日本物理学会 2003 年秋季大会 岡山大学 9 月 21 日
- [48] 松井朋裕, 飯田貴敏, 神原浩, 田上勝規, 塚田捷, 福山寛: 「走査トンネル分光法によるグラファイト表面のランダウ準位の観測」, 日本物理学会 2003 年秋季大会 岡山大学 9 月 23 日
- [49] 王利光, 田上勝規, 塚田捷: 「3 端子分子架橋系の量子輸送」, 日本表面科学会 第 23 回表面科学講演大会 早稲田大学 11 月 28 日
- [50] 田上勝規, 王利光, 塚田捷: 「有機ラジカル分子架橋系のスピントロニクス」, 日本表面科学会 第 23 回表面科学講演大会 早稲田大学 11 月 28 日

- [51] 田上勝規, 塚田捷: 「有機ラジカル分子架橋系の量子輸送」, 日本物理学会 第 59 回年次大会 九州大学 3 月 27 日
- [52] 松井朋裕, 神原浩, 新見康洋, 田上勝規, 塚田捷, 福山寛: 「超低温走査トンネル分光法によるグラファイト表面のランダウ準位観測」, 日本物理学会 第 59 回年次大会 九州大学 3 月 30 日
- [53] 松本卓也, 片岡誠, 前田泰, 田上勝規, 塚田捷, 川合知二: 「マクロ分子のトンネル伝導: DNA, チトクロム c, ポルフィリン」, 日本化学会 第 84 春季年会 関西学院大学 3 月 28 日

招待講演

- [54] 塚田捷: ナノ構造の理論ナノテクノロジー総合シンポジウム東京ビッグサイト 平成 16 年 3 月 16 日
- [55] 塚田捷: 原子細線および分子架橋系の量子伝導分子研究会分子スケールエレクトロニクス研究会平成 16 年 4 月 8 - 9 日
- [56] 塚田捷: ナノテクノロジーの原点から退官記念講演会東京大学 21 世紀 COE 「極限量子系とその対称性」平成 16 年 3 月 15 日
- [57] 塚田捷: 原子・分子架橋系の量子輸送の理論 現状と展望電極問題 WS 2 平成 16 年 2 月 16 日
- [58] 塚田捷: 原子・分子架橋とカーボンナノチューブ系の物性予測ナノテクノロジーの研究開発における超高速コンピュータシミュレーションの役割、平成 16 年 3 月 18 日
- [59] 塚田捷: ナノ構造の理論予測青山学院大学特別講義平成 16 年 2 月 23 日
- [60] 塚田捷 将来への期待 理論および基礎研究の立場から開放融合研究「分子ハーモニック構造の生成」大阪 平成 16 年 1 月 27 日
- [61] 塚田捷: 単層カーボンナノチューブの接合・キャップ・トーラス・螺旋構造の理論、応用電子物性分科会研究会「カーボンナノチューブ 物理とトランジスタ応用」、機会振興会館
- [62] 塚田捷: 物質科学・物性物理の必要とする計算資源、「第 2 回次世代高性能計算機環境に関する調査研究会」、海洋科学技術センター東京連絡所 平成 15 年 11 月 28 日
- [63] 塚田捷: 個々の原子の力をどのように視るか? 「大学と科学」公開シンポジウム、「極微な力で拓くナノの世界—原子・分子のナノ力学最前線—」、仙台市情報・産業プラザ 平成 15 年 11 月 22 - 23 日
- [64] 塚田捷: 分子架橋のコヒーレント伝導 ポスト山田コンファレンス「表面低次元ナノ構造機能物質の創製と物性」、平成 15 年 7 月 8-10 日
- [65] 塚田捷: 分子エレクトロニクスへの挑戦、成蹊大学特別講義平成 15 年 7 月 2 日
- [66] 塚田捷: 走査プローブ顕微鏡の理論的展開、物理学会特別講演、岡山大学 平成 15 年 9 月 20 日

3.3 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している。これらの現象では、電子相関（電子間斥力相互作用のために生じる量子効果）により、対称性（特にゲージ対称性）が自発的に破れる。

3.3.1 超伝導

非連結フェルミ面を持つ斥力模型における超伝導

高温超伝導銅酸化物の模型と考えられる正方格子上の斥力ハバード模型は、 $O(0.01t)$ の転移温度 T_C を持つ ($t \sim$ バンド幅 ~ 10000 K) スピン揺らぎ媒介超伝導を示す。これは銅酸化物の $T_C \sim 100$ 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必然的にクーパー対は異方的になり、ギャップ関数が node をもつためである。最近、黒木（電通大）と有田は、フェルミ面が非連結な系においては、 T_C が飛躍的に上昇し得ることを指摘した。一方、通常の（単連結フェルミ面）系での一般論として、「位相空間体積効果から、3次元系より2次元系の方が斥力からの超伝導には有利」ということが有田等によって示されていた。

大成等はこの観点から非連結フェルミ面系は3次元ではどうなるかを調べ、フェルミ面が適当にコンパクトなポケットから成れば（図1）、3次元としては高い T_C を実現できることを示した。超伝導にはスピン揺らぎが強ければ強い程良いのではなく、スピン感受率のピークが適当に広がっていることも必要なことが分かった [1]。

一方、木村等は、Shastry-Sutherland 格子という、ダイマーがヘリンボン状に並んだ格子を考察した。この系は、「スピン・ギャップを持つ系にキャリアをドープすると超伝導が生じるか」という基本的問題からも興味深い。結果から、超伝導がもっとも強くなるのは、フェルミ面が非連結になる quarter filling 近傍であることがわかった [2, 17]。

最近我国で、非銅（コバルト）酸化物であり三角格子であることから注目を集めている超伝導体 Na_xCoO_2 が発見されたが、この系はポケット状の非連結フェルミ面をもつ。三角格子は、元々の黒木・有田理論でも典型例とされた格子であり、有田は黒木、田仲（名大）等とともに、非連結フェルミ面が実際超伝導に有利に働く可能性について議論した [39, 48]。

長距離斥力からのスピン・トリプレット超伝導

近年、有機導体 $(\text{TMTSF})_2\text{X}$ やルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 においてスピン・トリプレット超伝導（スピンの揃ったクーパー対で軌道対称性は p, f 等）の可能性が実験的に指摘されて注目を集めている。黒木、木村、有田、田仲はこれらの系に対応する格子上的

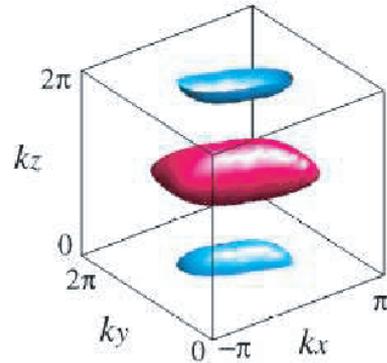


図 3.3 a: An example of the disconnected Fermi surface in three-dimensional systems after Ref.[1].

斥力ハバード模型に対して、量子モンテカルロ法によりペアリング相互作用を計算した結果、TMTSF に対しては triplet f は p, d に勝り得るが、ルテニウム酸化物では singlet d が triplet p に勝ち、実験を説明できないことがわかった [3, 26, 40]。

そこで、有田は大成、黒木、青木とともに、ハバード (on-site クーロン斥力) 相互作用だけでなく、隣接サイト間の斥力（これは電荷揺らぎ、従ってトリプレット超伝導を有利化する）も重要ではないかという観点から、 Sr_2RuO_4 に対応する格子上で拡張ハバード模型を考え、動的クラスター近似を用いて解析した。その結果、off-site の斥力によって d 波が抑制され、 p 波が有利になり得ることがわかった。詳しくは、時間反転対称性を自発的に破った $p_{x+y} + ip_{x-y}$ ペアリングという新たな提案であり、この対称性は最近の回転磁場下の比熱の実験結果とも整合する。この成果は *Phys. Rev. Lett.* 誌に掲載される [4]。

より一般的に、大成は、電荷揺らぎとスピン揺らぎが共存する場合の超伝導という観点から、揺らぎ交換近似を用いて拡張ハバード模型に対する相図を求め、超伝導のペアリング対称性が電子密度と off-site 斥力のパラメータ空間でどのように変化するかを明らかにした [27, 28, 41]。

磁場誘起トリプレット超伝導の可能性

一般に強磁性スピン揺らぎ交換はトリプレット超伝導を利するが、シングレット超伝導に比べればペアリング相互作用が小さい等非常に不利である。最近 Kirkpatrick 等によって、トリプレット超伝導が強磁性秩序と共存すれば、より高い T_C となり得ることが現象論的に指摘された。一方有田理論からは、電子相関による超伝導では3次元系よりも2次元系の方が有利であるが、強磁性転移温度は2次元では小さくなってしまふ。有田、黒木、青木は、2次元系に磁場をかけて有限の磁化を立たせれば、このジレンマを解消できることを提案し、非連結フェルミ

面をもつ三角格子に対してこの提案を数値的に確かめた [5, 49]。

多軌道系における超伝導

近年、軌道の自由度がもたらす強相関効果に注目が集まっているが、酒井は、このような系における超伝導を考察した。興味は、多軌道系に特有な交換相互作用（フント結合）の効果である。そこで、モット転移を記述できる等の利点をもつ動的平均場理論を多軌道に拡張することにより超伝導感受率を計算した。動的平均場では、系を有効不純物模型にマップし、これを量子モンテカルロ法で解く。しかし、多軌道の場合はフント結合が深刻な負符号問題（量子モンテカルロ・サンプリングにおける数値的困難）を引き起こす。これに対して酒井は、量子モンテカルロ法における補助場変換（単一軌道の場合は Hubbard-Stratonovic 変換）に新たなものを考案した。新しい変換は実で厳密であり、かつ負符号を大幅に軽減する。特に、負符号の割合が電子密度にほとんど依らないため、相図上の広いパラメータ空間での超伝導感受率の計算に成功し、スピン・トリプレット ⊗ 軌道・シングレットという特徴あるペアリングが広い範囲で安定であることを見出した [42, 50]。酒井はこれを修士論文にまとめた [55]。

電子間斥力と電子・フォノン相互作用が共存する系

強い電子・フォノン相互作用が強い電子・電子相互作用と共存する系は、理論的に興味深いだけでなく、アルカリ金属をドーブしたフラレン超伝導体などで実現しており、典型的に Hubbard-Holstein 模型が調べられてきた。特に、電子間斥力とフォノン媒介引力とが拮抗する場合に興味もたれるが、電子・フォノンと電子・電子相互作用の共存を扱うのは、adiabatic 近似あるいは anti-adiabatic 近似のような極限以外では困難であった。そこで手塚は、Hubbard-Holstein 模型を、1次元電子・フォノン共存系に対する密度行列繰り込み群 (DMRG) を用いて解析し、基底状態における種々の相関関数を計算した。DMRG は通常はフェルミオン系を扱うのに対し、フォノン（ボゾン）を含む系では大きな Hilbert 空間を扱う必要があるが、Jeckelmann 等が提案した自由度を分割して系に取り込む方法を採用して、計算を実行した。この方法でも、電子相関の強い場合は問題があるが、手塚はこれに対処する新たなアルゴリズムを考え、比較的広い領域で計算を行うことができた [43, 51]。手塚はこれを修士論文にまとめた [56]。

3.3.2 非磁性元素系の電子相関による磁性

非磁性元素からなる物質で磁性体が作れるかという問題 [52] も、電子相関の基本的、かつチャレンジングな問題といえる。

有機高分子強磁性の物質設計

平坦なバンドをもつ格子の上の斥力ハバード模型においては、ある条件が満たされた場合強磁性が実現し得ることが 1990 年代に Mielke や田崎によって厳密に証明された。有田は、この条件を満たさせ易いのは奇数員環からなる高分子であろうという観点から、諏訪（日立基礎研）、黒木、青木と共に局所スピン密度第一原理計算と、ハバード模型計算の両面建てで、新物質（五員環高分子 polyaminotriazole）が合成できれば平坦バンドが実現し、適当なバンド・フィリングにおいて強磁性が実現する可能性を指摘した。さらに、この高分子が結晶化したときにバルク強磁性を持つ可能性があること、バンド・フィリング制御のためにどのような化学ドーパントが良いかを議論した。[7, 6, 18, 44]。本学化学教室の西原研の協力を得て、合成が試みられている。

シャトルコック型フラレン誘導体の電子状態と磁性

有田、青木は、本学化学教室中村研究室で合成されたシャトルコック型フラレン（ C_{60} に他分子の“羽”を生やさせたもの）の電子状態計算を、岡田、押山（筑波大）とともにスピン密度汎関数を用いて行った。その結果、この物質のフェルミ面近傍の電子状態は、羽のためにフラレンの 60 個の炭素の sp 混成が変わり、波動関数は 5 個と 50 個に局在したものに分かれること、この「分子欠」の効果によりフェルミ面近傍のバンド幅が極めて狭くなり、反強磁性が期待できることを見出した。[29]

アルカリ金属吸蔵ゼオライト — supercrystal

ゼオライトは、(ケージと呼ばれる) 隙間の多い興味深い結晶構造をもつが (図 2)、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（東北大、現阪大）により、単純金属 (K) を吸蔵したゼオライトにおいて強磁性が約 10 年前に実験的に発見されたが、その発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・ケージを球形井戸と近似し、そこに閉じ込められた状態 (“superatom”) の並びと見るような単純な電子構造と考えると良いか、(ii) 強磁性等の多体効果が期待できるほど強相関電子系であるか、である。この観点から、有田は、三宅（東工大）、小谷（阪大）、van Schilfgaarde（アリゾナ大）、岡、黒木、野末、青木とともに、この系の第一原理計算を初めて行った [8, 30]。その結果、フェルミ準位近傍の電子構造は単純な tight-binding 模型で驚くほどよくフィットでき、各ケージを superatom とみなし、系全体をその集合である “supercrystal” とみなす描像を支持する。第一原理計算の波動関数から評価したクーロンや交換相互作用は、この系が確かに強磁性領域を含む強相関領域にあり、多彩な多体効果や物質設計を期待できることを示す。

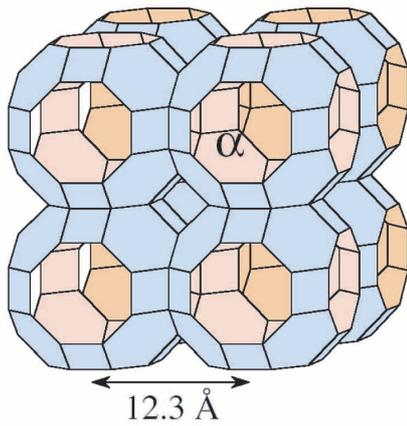


図 3.3 b: A polyhedral representation of a zeolite (after Ref.[21]).

3.3.3 非平衡・非線形な強相関電子系 — 強電場下のモット絶縁破壊

モット絶縁体のような強相関電子系における非平衡・非線形な現象は、開拓の余地の大きい興味深い問題である。岡、有田、青木は、モット絶縁体に強電場をかけた場合にどの様に絶縁破壊が起きるかを、1次元ハバード模型に電場をかけ、時間依存多体 Schrödinger 方程式を積分することにより解析した。その結果、Mott 絶縁相が電場、電子相関の強さ U/W の大きさに応じて破壊され、これが Landau-Zener による量子準位の間の非断熱トンネリングを、多体電子系に初めて拡張することにより、統一的に説明されることを見出した [9, 31, 32, 53, 54, 33, 38]。この成果は *Phys. Rev. Lett.* 誌に掲載された。また、非平衡多体系における非線形光学も考察した [45]。

3.3.4 分数量子ホール効果

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

青木研では、この数年様々な面から分数量子ホール系の物理を探索してきたが、本年度は、小野田 (強相関研) 等による分数量子ホール液体における有効質量とフェルミ液体論、小野田、水崎 (専修大)、青

木による分数量子ホール系における BCS 状態 (異方的ペアリング ($p+ip$) 状態) の性質、下で述べる 3次元における整数量子ホール効果などを中心に、「量子ホール効果」国際シンポジウムにおいて総合報告を行った [19, 35]。

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 ~ 100 Å) 程度の量子零点振動を行いながら斥力で避け合い、「電子分子」構造をとり、「魔法数」角運動量をもつことを Maksym (Leicester 大)、今村 (東北大)、青木は提案してきた。本年度 Maksym、西、樽茶、青木は、このような電子分子だけでなく、「分数量子ホール液滴」領域も含め、樽茶グループの実験において見えはじめた励起スペクトルとの比較をまとめた [34]。

3.3.5 3次元における整数量子ホール効果

量子ホール効果は普通は 2次元系に特有と考えられている。それでは量子ホール効果は 3次元では存在し得ないであろうか。越野、黒木、青木、長田 (物性研)、鹿児島 (総合文化) は、異方的な 3次元系で存在し、しかも 3次元に特有である (2次元での名残りではない) ことを示していた。すなわち、3次元系ではランダウ準位の分離は一般には潰れるが、格子構造などの周期性をもつ 3次元系に磁場を斜めにした場合には、磁場を傾ける角度の関数としてエネルギー・スペクトルにフラクタル的なギャップが開く。越野 (現東工大)、青木は、これが等方的な 3次元系でも存在することを見出した [13, 20]。エネルギー・ギャップが存在すれば、3次元では 3成分 ($\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}$) をもつホール伝導度の各々に対して整数量子ホール効果が起きることは知られていたが、この 3次元系フラクタル・スペクトルに対してその量子化値 (トポロジカル量子数) も求めた (巻頭カラー口絵参照)。フラクタル的スペクトルは 2次元周期系が強磁場中での butterfly と呼ばれるものに似るが、物理的起源は異なり、直感的には多重連結フェルミ面上での半古典軌道間の量子トンネリングとして理解できる。

現実的に、3次元量子ホール効果が期待される周期構造をもった 3次元系を用意するには、異方的有機金属の他に、磁場中での多体相互作用から生じる磁場誘起スピン密度波状態 (不完全にネストした多重連結フェルミ面におけるランダウ量子化効果) を提案した。これらに要する磁場の大きさは現実的 (~ 10 T) である。さらに一般的な系として、通常の 3次元金属に、外部から音響波などの変調を 2方向から加えると、butterfly が発生することも提案した [14, 20]。

3.3.6 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、齋木(新領域)を代表とする学術創成「高度界面制御有機・無機複合構造による量子物性」の理論分担として研究をすすめており、本年度は以下の成果を挙げた。

金属/絶縁体界面における金属誘起状態

半導体/金属界面は良く理解されており、界面に発生する金属誘起ギャップ状態 (MIGS) が Schottky 障壁などを支配することは知られていた。一方、絶縁体/金属界面ではギャップの大きな絶縁体には (バンド描像では) 電子が染み込まないので MIGS は無視できるとされていた。実験的にも、原子レベルできれいな絶縁体/金属界面を作ることには困難なために殆ど調べられなかったが、最近木口(新領域)、齋木等により、アルカリ・ハライド/銅において MIGS が初めて観測された。有田は、谷田(富士通)、青木とともに、絶縁体/金属系の第一原理計算を行い、界面の原子1層の薄さの中に、絶縁体/金属界面特有な(しかし金属の詳細には依らない) MIGS が存在することを示し、実験を再現した。多体効果の観点からは、MIGS が絶縁体/金属界面における exciton 機構超伝導に有利に働き得ることを提案した。これらの成果は、*Phys. Rev. Lett.* 誌に掲載された [10, 11, 46]。

極性面における金属・絶縁体転移および磁性

極性面(イオン結晶において、陰(あるいは陽)イオンだけが表面に出た面で、金属化が期待される)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。有田等は、これに対して第一原理電子状態計算を行い、MgO 1層で既に極性界面が実現し、実験と整合することが分かった。金属化した極性面の局所状態密度は大きく、基板の格子定数に応じては、界面での金属・絶縁体転移や界面強磁性を制御できる可能性を議論した。[12]。

3.3.7 周期的極小曲面上の電子

越野、黒木、青木、森瀬、武田は、C₆₀ ゼオライトのように負曲率をもつ無限曲面からなる超周期系上の電子を考えた。ゼオライト構造の模型として極小曲面を採用し、極小曲面に対する Weierstrass 表示を援用して、プロッホ電子のエネルギー・バンド構造を求めた。また、一つの極小周期曲面と別の極小周期曲面が Bonnet 変換と呼ばれる共形変換で結ばれているときは、それらのバンド構造の間に関連があることも示した。これらは、負曲率フラレンやグラフィイト・スポンジで実現される可能性がある

[22]。

3.3.8 その他

青木は、1,2,3次元における電子相関 [15]、高温超伝導の機構はどこまで解明されたか [23]、フラストレートした系における超伝導 [16]、界面およびナノ構造における電子相関設計 [21, 36, 37]、物性物理におけるトポロジ [24]、金属誘起ギャップ状態 [25] について、また有田は理論物質設計 [47] についての総合報告、講演を行った。青木は、2003年7月より約一月 Cambridge 大学 Cavendish 研究所に滞在し、半導体物理、optoelectronics グループ等と研究交流を行った。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] A. Onari, R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: Superconductivity in repulsive electron systems having three-dimensional disconnected Fermi surfaces, *Phys. Rev. B* **68**, 024525 (2003).
- [2] T. Kimura, K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki: Possibility of superconductivity in the repulsive Hubbard model on the Shastry-Sutherland lattice, *Phys. Rev. B* **69**, 054501 (2004).
- [3] K. Kuroki, Y. Tanaka, K. Kimura and R. Arita: Quantum Monte Carlo study of the pairing symmetry competition in the Hubbard model, *Phys. Rev. B*, in the press.
- [4] R. Arita, S. Onari, K. Kuroki and H. Aoki: Off-site repulsion-induced triplet superconductivity — a possibility for chiral p_{x+y} -wave pairing in Sr₂RuO₄, *Phys. Rev. Lett.*, in the press.
- [5] R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: Magnetic-field induced triplet superconductivity in the repulsive Hubbard model on the triangular lattice, *J. Phys. Soc. Jpn.* **73**, 533 (2004).
- [6] Y. Suwa, R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: Flat-band ferromagnetism in organic polymers designed by a computer simulation, *Phys. Rev. B* **68**, 174419 (2003).
- [7] R. Arita, Y. Suwa, K. Kuroki and H. Aoki: Flat-band ferromagnetism in undoped and doped polyaminotmazole crystal, *Phys. Rev. B* **68**, 140403(R) (2003).
- [8] R. Arita, T. Miyake, T. Kotani, M. van Schilf-gaarde, T. Oka, K. Kuroki, Y. Nozue and H. Aoki: Electronic properties of alkali-metal loaded zeolites — a “supercrystal” Mott insulator, *Phys. Rev. B*, in the press.
- [9] T. Oka, R. Arita and H. Aoki: Breakdown of a Mott insulator: A non-adiabatic tunneling mechanism, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 066406 (2003).

- [10] M. Kiguchi, R. Arita, G. Yoshikawa, Y. Tanida, M. Katayama, K. Saiki, A. Koma and H. Aoki: Metal-induced gap states at well defined alkali-halide/metal interfaces, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 196803 (2003).
- [11] R. Arita, Y. Tanida, K. Kuroki and H. Aoki: Electronic properties of metal induced gap states at insulator/metal interfaces: dependence on the alkali halide and the possibility of excitonic mechanism of superconductivity, *Phys. Rev. B* **69**, 115424 (2004).
- [12] R. Arita, Y. Tanida, S. Entani, M. Kiguchi, K. Saiki and H. Aoki: Polar surface engineering in ultrathin MgO(111)/Ag(111): Possibility of a metal-insulator transition and magnetism, *Phys. Rev. B*, in the press.
- [13] M. Koshino and H. Aoki: Integer quantum Hall effect in isotropic 3D crystals, *Phys. Rev. B* **67**, 195336 (2003).
- [14] Mikito Koshino and Hideo Aoki: Integer quantum Hall effect and Hofstadter's butterfly spectra in three-dimensional metals in external periodic modulations, *Phys. Rev. B* **69**, 081303(R) (2004).
- (Reviews)
- [15] Hideo Aoki: Superconductivity from the repulsive electron interaction — from 1D to 3D, in Tobias Brandes et al.(ed.): *The Anderson Transition and its Ramifications — Localisation, Quantum Interference, and Interactions* (Springer Verlag, 2003), p. 219.
- [16] Hideo Aoki: Superconductivity in frustrated systems, a Viewpoint article in *J. Phys.: Condensed Matter* **16**, p.V1.
- (国際会議録)
- [17] K. Kimura, K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki: Superconductivity in the Hubbard model on the Shastry-Sutherland lattice, *J. Low Temp. Phys.* **134**, 805 (2004).
- [18] R. Arita, Y. Suwa, K. Kuroki and H. Aoki: Possible flat-band ferromagnetism in an organic polymer, *Proc. Int. Conf. on Molecule-based Magnets*, Valencia, Oct. 2003 [*Polyhedron* **22**, 1883 (2003)].
- [19] Hideo Aoki: Interaction and dimensionality in the quantum Hall physics in D. Weiss and R. Haug (editors), *Proc. Int. Workshop on quantum Hall effect — past, present and future*, Stuttgart, July 2003 [*Physica E* **20**, 149 (2003)].
- [20] M. Koshino and H. Aoki: Integer quantum Hall effect in isotropic 3D systems, *Proc. 15th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems*, Nara, July 2003 [to be published in *Physica E*].
- [21] Hideo Aoki: Design of electron correlation effects in interfaces and nanostructures, *Proc. 7th Int. Conf. on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures*, Nara, Nov. 2003 (to be published as a special issue of *Applied Surf. Sci.*).
- [22] H. Aoki, M. Koshino, D. Takeda, H. Morise and K. Kuroki: Electronic structure of periodic curved surfaces — continuous surface versus graphitic sponge, *Proc. 15th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems*, Nara, July 2003 [to be published in *Physica E*].
- (編著書)
- [23] 青木秀夫:「高温超伝導の機構はどこまで解明されたか」、日本物理学会(編):「ボース・アインシュタイン凝縮から高温超伝導へ」、(日本評論社、2003)第5章。
- (国内雑誌)
- [24] 青木秀夫:物性物理におけるトポロジ、数理科学 2004年2月号、p.22。
- [25] 木口学、齊木幸一朗、有田亮太郎、青木秀夫:金属誘起ギャップ状態 — 金属/絶縁体界面で何がこるか、固体物理 **39**, 13 (2004)。
- < 学術発表 >
- (国際会議)
- 一般講演 (国際会議録掲載以外)
- [26] K. Kuroki, Y. Tanaka, T. Kimura and R. Arita: Quantum Monte Carlo study of spin-triplet pairing in the Hubbard model (The 3rd Int. Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides and the 1st Asia-Pacific Workshop on Strongly Correlated Electron Systems, Sendai, 2003.11.5-8).
- [27] S. Onari, R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: Competition between CDW and SDW fluctuations in the extended Hubbard model (Int. Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides, Sendai, 2003.11.5-8).
- [28] S. Onari, R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: Phase diagram of the two-dimensional extended Hubbard model (APS March Meeting, 22-26 March 2004, Montreal, Canada).
- [29] S. Okada, R. Arita, S. Oshiyama and H. Aoki: Electronic structure of chain of fullerene shuttles (APS March Meeting, 22-26 March 2004, Montreal, Canada).
- [30] R. Arita, T. Miyake, T. Kotani, M. van Schilfegarde, T. Oka, K. Kuroki, Y. Nozue and H. Aoki: Electronic properties of alkali-metal loaded zeolites — a “supercrystal” picture (APS March Meeting, 22-26 March 2004, Montreal, Canada).

- [31] T. Oka, R. Arita and H. Aoki: Breakdown of Mott insulators in strong electric fields — Many-body Landau-Zener mechanism and the schwinger formula (APS March Meeting, 22-26 March 2004, Montreal, Canada).
- [32] T. Oka, R. Arita and H. Aoki: Breakdown of a Mott insulator: Nonlinear transport in strongly correlated electron systems (Int. Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides, Sendai, 2003.11.5-8).
- [33] T. Oka: Nonlinear transport properties of the one-dimensional Hubbard model and Landau-Zener tunneling (Workshop on Quantum transport in Mesoscopic Scale and Low Dimensions, ISSP, 2003.8.13-21).
- [34] P.A. Maksym, Y. Nishi, S. Tarucha and H. Aoki: Addition spectrum of few-electron dots — electron molecule, MDD and FQH states (15th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, Nara, July 2003).
- 招待講演**
- [35] Hideo Aoki: Interaction and dimensionality in the quantum Hall physics (Int. Workshop on quantum Hall effect — past, present and future, Stuttgart, 2-5 July 2003).
- [36] Hideo Aoki: Design of electron correlation effects in interfaces and nanostructures (7th Int. Conf. on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures, Nara, 17-19 Nov. 2003).
- [37] H. Aoki: Design of electron correlation in nanostructures (Int. Symposium on Creation of Novel Nanostructures, Osaka, 20-22 Jan. 2004).
- (Colloquia)
- [38] H. Aoki: Breakdown of a Mott insulator — nonadiabatic tunnelling in a non-equilibrium many-body system (Semiconducto Physics seminar, Cavendish Lab., 18 Aug. 2003).
- (国内会議)
- 一般講演**
- [39] 黒木和彦、田仲由喜夫、有田亮太郎: $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ におけるポケット状フェルミ面と van Hove 特異点に起因する f 波超伝導 (日本物理学会、九州大学、2004.3.27-30)。
- [40] 黒木和彦、田仲由喜夫、木村敬、有田亮太郎: κ -(BEDT-TTF) 2X における $dx^2 - y^2$ 波・ dxy 波超伝導の競合 — アニオンの違いによる効果 (日本物理学会、岡山大学、2003.9.20-23)。
- [41] 大成誠一郎、有田亮太郎、黒木和彦、青木秀夫: 拡張ハバード模型における電荷揺らぎとスピン揺らぎの共存 (日本物理学会、岡山大学、2003.9.20-23)。
- [42] 酒井 志朗、有田 亮太郎、青木 秀夫: 軌道縮退 Hubbard model の動的平均場理論による研究 (日本物理学会、九州大学、2004.3.27-30)。
- [43] 手塚真樹、有田亮太郎、青木秀夫: フォノンと結合した相関電子系の密度行列繰り込み群による相関 (日本物理学会、九州大学、2004.3.27-30)。
- [44] 諏訪雄二、有田亮太郎、黒木和彦、青木秀夫: 第一原理計算による強磁性 5 員環有機ポリマーの物質設計 (日本物理学会、岡山大学、2003.9.20-23)。
- [45] 岡隆史、有田亮太郎、青木秀夫: 非平衡強相関電子系のスペクトル関数と非線形光学応答 (日本物理学会、岡山大学、2003.9.20-23)。
- [46] 有田亮太郎、谷田義明、黒木和彦、青木秀夫: アルカリハライド/金属界面における金属誘起ギャップ状態の第一原理計算 (日本物理学会、岡山大学、2003.9.20-23)。
- 招待講演**
- [47] 有田亮太郎: 理論物質設計 (物性理論の新潮流若手研究会、物性研、2004.2.19-20)。
- (セミナー・研究会)
- [48] 黒木和彦、田仲由喜夫、有田亮太郎: Na_xCoO_2 におけるトリプレット f 波超伝導の可能性—ポケット状フェルミ面と van Hove 特異点の効果 (物性研短期研究会「フラストレーションが創る新しい物性」, 2003.12.1-12.3)。
- [49] 有田亮太郎、黒木和彦、青木秀夫: 三角格子上の斥力 Hubbard 模型における triplet 超伝導の可能性 (物性研短期研究会「フラストレーションが創る新しい物性」, 2003.12.1-12.3)。
- [50] S. Sakai, R. Arita and H. Aoki: Superconductivity in the multi-orbital Hubbard model with the DMFT+QMC method (物性理論の新潮流若手研究会、物性研、2004.2.19-20)。
- [51] M. Tezuka, R. Arita and H. Aoki: Correlated electron systems coupled to phonons — A DMRG study for the Holstein-Hubbard model (物性理論の新潮流若手研究会、物性研、2004.2.19-20)。
- [52] 有田亮太郎: 非磁性元素からの強磁性 (理研セミナー、理化学研究所、2003.5.6)。
- [53] 岡隆史: 一次元強相関電子系の非線形輸送 (「量子力学とカオス: 基礎的問題からナノサイエンスまで」研究会、京大基研、2003.11.12-14)。
- [54] 岡隆史: 一次元 Mott 絶縁体の Zener 破壊 (「確率モデルの統計力学」研究会、京大基研、2003.12.15-17)。
- (学位論文)
- [55] 酒井志朗: Theoretical study of electron correlation in multi-orbital systems (修士論文、2004年1月)。
- [56] 手塚真樹: Theoretical study of correlated electron systems coupled to phonons (修士論文、2004年1月)。

3.4 小形研究室

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

3.4.1 高温超伝導の理論

グッツウィラー近似による解析

高温超伝導などの問題で重要になる強相関の効果を実験的にどのように取り入れればよいかという問題は未解決のものである。Gutzwiller 近似はその1つの方法であり、強相関の効果を t - J モデル中の変数 t と J の「くりこみ」として取り入れている。しかし超伝導と反強磁性の共存などを考慮する際には、従来の近似方法を拡張しなければならないことが分かった。この方法によると、反強磁性がある場合、変数 t と J の強相関によるくりこみが大きく変更を受けるとということがわかる。[1] この新しい手法を用いて、高温超伝導体における磁束まわりの電子状態を議論した。その結果、磁束中心付近で d 波超伝導が壊される代わりに、反強磁性が生じるという可能性を示した。さらに磁束中心付近で、正方格子上を staggered に電流が流れるという状態が出現し、これが局所状態密度に大きな効果を与えることが明らかになった。[3, 21, 23, 33, 62]

高温超伝導体の擬ギャップ現象

高温超伝導体における異常金属状態は、擬ギャップ（または、スピンギャップ）に起因するものであると考えられている。この現象について、フェルミ液体論から出発し、強い超伝導揺らぎを考慮するという観点から調べた。その結果ハバードモデルという単純なモデルによって、微視的に擬ギャップ現象を説明することができることが示された。その際に用いた計算法は超伝導揺らぎを1ループの範囲で正確に評価するものであったが、より高次項の効果は明らかではなかった。この問題を明らかにするために、 ∞ -ループ項まで評価できる近似法を開発した。その結果、以前の結果が定性的のみならず定量的にも妥当な結果であることがわかった。[11, 22, 28, 39] また、高温超伝導を含む強相関電子系における超伝導のメカニズムと擬ギャップ現象に関するレビューを執筆した。[14]

強相関電子系の低温比熱、低温エントロピーとスピン電荷分離

典型的な強相関電子系のモデルである t - J モデルについて、高温展開の手法により有限温度とくに低温領域での比熱、エントロピーを調べた。自由エネルギーの高温展開では、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、さらに新しい外挿法を組合せることによって低温領域での自由エネルギーを精度よく評価することができた。その結果、絶対零度での相分離の可能性が強いことを示した。また得られた低温比熱やエントロピーのドーピング依存性や温度依存性は実験とのよい一致を示す。さらに、エントロピーが急速に増加する2つの特徴的な温度領域があることが見出され、これは t - J モデルにおけるスピン・電荷分離の結果であるという議論を展開した。[24]

高温超伝導のエネルギー解析

高温超伝導のメカニズムに対してエネルギー利得の観点から解析を行った。1つの方法として、電子相関を考慮した波動関数を用い、変分法によって基底状態のエネルギーを評価することを行った。超伝導を持つ状態と持たない状態（正常状態）のエネルギーを比較することにより、エネルギー利得の微視的なメカニズムを調べることができる。その結果、強相関の領域では、運動エネルギーが利得することによって超伝導が発生するという、通常のBCS理論とは逆の結論が得られた。一方弱相関の領域では、通常のBCS理論に戻ることを示された。[13, 41, 56] もう1つの方法として、FLEX近似により超伝導転移温度以下でのエネルギー利得の微視的なメカニズムを調べ、同様の結論を得た。これは超伝導ギャップが非常に大きい高温超伝導体特有の現象であり、超伝導ギャップが準粒子の繰り込みパラメーターを変化させることに起因する。また、この結果が実験的に観測されている光学総和則の破れをよく説明することも示された。

3.4.2 ルテニウム酸化物におけるスピン三重項超伝導

超伝導の微視的理論

ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 は、高温超伝導体と非常に似た構造をしているが、現在までにスピン三重項超伝導であることが確立している。我々はスピン三重項超伝導特有の内部自由度の縮退に注目し、それがどのようにして解けるのかを調べた。具体的には、3バンドモデルにスピン軌道相互作用を加えたモデルを用いてペアリング相互作用をミクロに計算し、基底状態における内部自由度を決定した。その結果、一般にスピン-軌道相互作用とフント結合が内部自由度の縮退を解き、この系では、時間反転対称

性が自発的に破れたカイラル状態が基底状態となることが分かった。[2, 19] 次に、この系で長く問題となっていたラインノードの存在について研究を行った。これまで一般的には時間反転対称性の破れとラインノードの存在は共存しないとされてきた。しかし軌道の自由度を積極的に考慮することで、この問題が解決されるということを示した。この理解に基づいて、比熱、NMR、超流動密度の温度依存性について具体的な解析を行なった結果、実験結果とコンシステントであることも分かった。[32, 38, 57]

渦糸状態での電子状態

異方的超伝導体では、面内に平行な磁場をかけた場合に、各種物理量の磁場の角度方向依存性から超伝導のギャップ構造が決定できると考えられている。ところが、ルテニウム酸化物に対する実験では、熱伝導度による結果と比熱による結果とが矛盾する結論を示していた。この問題に対し、空間的に非一様な超伝導体を扱う標準的な理論である Bogoliubov-de Gennes 方程式と準古典方程式に基づく方法を併用し、全ての励起状態を取り込む微視的な解析を行って状態密度の磁場方向依存性を調べた。その結果、磁場方向依存性はエネルギー領域によって微妙に変化することが明らかになった。この結果に基づき、ルテニウム酸化物の実験で見られた矛盾に説明を与えることができることを示した。比熱の実験結果から、*a*軸および*b*軸方向の超伝導ギャップにノード的な構造があることを導いた。[15, 25, 46, 53, 58]

3.4.3 コバルト酸化物における異方的超伝導

昨年発見された $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ において、電子相関による超伝導の可能性を探るためにいくつかの理論的解析を行った。

三角格子における超伝導状態

コバルト酸化物においては、完全な三角格子上の電子系が超伝導を発現していると考えられる。これは正方格子である高温超伝導体とは異なっており、フラストレーションによる新しい超伝導の可能性が秘められている。このため、正方格子から三角格子へ連続変形できるようなモデルを用いて、そこで実現する超伝導状態を平均場近似によって調べた。その結果、正方格子上で安定化する $d_{x^2-y^2}$ -波対称性を持つ超伝導状態がしばらく安定であるが、三角格子に近いパラメータ領域では $d_{x^2-y^2}$ に加えて id_{xy} という対称性を持つ秩序変数が出現し、結果として時間反転対称性を破った状態が実現することがわかった。とくに三角格子のパラメータでは、超伝導秩序変数の位相が 120 度構造を持つという非常に対称性の高い状態に自然に移行する。[6, 27, 34, 37] さらに、こ

の超伝導の可能性について、熱力学量の高温展開を用いて超伝導相関を計算するという手法を開発して調べた。低温に行くにしたがって、*d*-波またはパラメータによって *f*-波超伝導の相関が発達することが明らかになった。[24, 40, 54]

電荷揺らぎによる超伝導状態

また、コバルト酸化物においては、電荷揺らぎが重要な役割を果たしているという可能性も議論されている。実際に、三角格子の形状に都合のよい特定の電子密度では、電荷整列状態がエネルギー的に安定化すると予想される。このため、最近接クーロン相互作用を考慮した拡張ハバードモデルを用いて、RPA 近似により超伝導の可能性を調べた。その結果、あるパラメータ領域では、電荷秩序相近傍で *f* 波対称性を持つスピン 3 重項超伝導状態が最も安定化することがわかった。電子間の有効相互作用を調べると、スピン揺らぎ・電荷揺らぎが協力的に働く場合には、スピン 1 重項よりスピン 3 重項の方が安定化することが明らかになった。この超伝導状態は、電子が最近接斥力を避けて、次近接の位置でクーパー対を組んでいると解釈することができる。[10, 27, 34, 59]

軌道縮退を考慮した超伝導状態

また、コバルト酸化物の系が多軌道系であることを積極的に考慮し、軌道縮退ハバードモデルに対して FLEX 近似計算および摂動計算による解析を行った。[17, 47] その結果得られた相図において、*d*-波、*p*-波に加えて *f*-波の可能性があることが示された。特に *f*-波超伝導はこれまでに発見されたことのない新奇な状態であり、これがかなり広い領域で安定であることは興味深い。この結果には軌道縮退が本質的に重要であり、これまでの理論の多くが軌道の自由度を無視していたことに比して本質的に新しい発展を含むことが分かった。

3.4.4 有機導体に関する理論

電荷秩序状態とスピンパイエルス状態の共存

擬 1 次元有機導体である $(\text{TMTTF})_2\text{PF}_6$ および $(\text{TMTTF})_2\text{AsF}_6$ において、ウィグナー結晶型 (2 分子周期) の電荷秩序と、4 分子周期のスピンパイエルス格子ゆがみの共存基底状態が実験的に示唆されている。しかし、これらの系のモデルハミルトニアンに対する数値計算では、これとは異なるスピンパイエルス状態が主張されていた。この実験との矛盾を解決するために、モデルハミルトニアンをボゾン化の方法により解析的に調べ、上記二つのスピンパイエルス状態に対し物理的解釈を与え、両者がともに存在し、パラメータによって競合することを示した。さらに、精密な数値的手法である密度行列繰り込み群 (DMRG) の方法を用いて、実際に強相関領域

では両方の状態が競合していることを示した。このように、実験で見出されているような電荷秩序とスピンパイエルスとの共存という状態が、一般に安定化しうることを初めて理論的に明らかにした。[5, 30]

拡張ハバードモデルにおける超伝導

低次元有機導体は、バンド構造や電子間相互作用の強さによって、反強磁性・電荷秩序・CDW・超伝導などの様々な性質を示す。電荷秩序状態に関しては、最近接斥力相互作用を考慮した拡張ハバードモデルを用いて、平均場近似や数値的手法の研究がなされている。我々は正方格子上での拡張ハバードモデルを考え、CDW 相近傍での超伝導を議論した。その際、RPA 近似を用いてスピンと電荷の揺らぎを媒介とする電子間の有効相互作用を計算し、エリアッシュベルグ方程式を解くことにより超伝導不安定性をしらべた。その結果、温度と最近接斥力相互作用の相図中で、CDW 相近傍では d_{xy} 波の対称性をもつ超伝導が生じることがわかった。[12]

θ -型有機導体

θ -型有機導体は、分子が異方的三角格子を組んだ $3/4$ フィリングの系であり、多くの物質において電荷秩序が見出されている。その一つである θ -(DIETS) $_2$ [Au(CN) $_4$] は、常圧下において $T = 226\text{K}$ で金属-絶縁体転移を示すが、圧力によってこの相転移を抑制すると、絶縁相に隣接した超伝導が生じる。この場合、スピン揺らぎだけでなく、電荷揺らぎも超伝導に寄与すると考えられる。そこで、我々は擬二次元有機導体のモデルとして異方的三角格子上での最近接斥力相互作用の効果について調べた。具体的には、最近接斥力の値を三角格子上で等方的に取り、バンドは異方性をもつという状況を考えた。その結果、CDW 相近傍では、スピナー重項に加えてスピン三重項 f 波の超伝導が有利になることを見出した。CDW 相近傍では、大きな電荷揺らぎのために電子間の有効相互作用が、ある特徴的な波数において引力的になる。 f 波超伝導は、この引力を利用して安定化したと考えることができる。[16, 45, 51, 55]

3.4.5 フラストレーションのある系での電子状態

三角格子、カゴメ格子上の強相関電子系

フラストレーションを持つ系は、近年 LiV_2O_4 における重い電子的振舞いなどによって注目を集めている。このことを念頭に、三角格子およびカゴメ格子上の t - J モデルについてエントロピーやスピン相関関数を調べた。その結果、正孔を絶縁体に導入したときには RVB 的な振舞いをする事を見出した。一方、電子を導入した場合には広いパラメータ領域

にわたって強磁性が出現する。さらにこの場合は、強磁性相関と反強磁性相関との競合が生じ、重い電子的振舞いをする領域も存在することが明らかになった。さらに変分法・および厳密対角化の手法も組み合わせることによって、非常に広い電子密度領域において強磁性が出現することを見出した。この強磁性状態は、 $1/2$ 充填近傍のいわゆる「長岡の強磁性」から、低電子密度領域の「金森理論」による強磁性、あるいは平坦バンドによる強磁性までが連続につながっていることを示している。この系は強相関とフラストレーションを同時に扱わなければならないため、これまで信頼できる計算がほとんどなかったが、本研究によって初めてフラストレーションによる様々な可能性が明らかになった。[7, 20, 24, 52]

スピンアイス磁性体に秘められた 1 次元イジング鎖

$\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ という物質は、パイロクロアという 3 次元のフラストレーションを持つ格子上に、サイトごとに異なる容易化軸を持つイジングスピンの乗っている物質である。この物質に $[110]$ 方向の磁場をかけると、パイロクロア格子の中に秘められた 1 次元イジング鎖が現れることが実験的に示されている。しかし、実験で得られた比熱のデータは、単純な 1 次元イジングモデルの比熱と大きく異なることが問題となっていた。この問題に対し、スピン間の長距離の双極子-双極子相互作用を含んだモデルを考え、そのモデルを厳密に解くことによって比熱を求めた。実験結果との比較は良好であるが、比熱の完全な理解のためには、まだ鎖間相互作用など考慮しなければならない要素が残されていると思われる。[9, 36]

3.4.6 1 次元モデルに関する理論

1 次元電子系でのキャリアの性質

一般に 1 次元電子系は、朝永・ラッティンジャー液体状態になっていると考えられている。この状態では、電子はそれ自体として存在することができず、電荷の自由度とスピンの自由度との 2 つに分離して存在している。電荷の自由度は相互作用の効果によって、通常バンド理論のような振舞いをするとは限らない。このことを明らかにするために、境界のある 1 次元ハバードモデルや t - J モデルを厳密解と厳密対角化の手法を用いて調べ、キャリアの性質を議論した。電子密度が $1/2$ 充填付近で、相互作用の強い領域では、キャリアはホールとして振る舞い、他の領域では電子として振る舞うことが明らかになった。これはスピン電荷分離という現象の、1 つの自明でない帰結であると解釈できる。[4]

梯子型スピン系における隠れた秩序変数

梯子型スピン系に隠れた秩序が存在することが知られているが、これを具体的に双対変換を組み合わせ

ることによって明らかに見える形にした。2種類の隠れた秩序変数がそれぞれ order parameter, disorder parameter に対応することが示された。さらに、得られたハミルトニアンについて、隠れた秩序を平均場として扱うことにより、梯子型スピン系のスピンギャップなどが再現し得るかどうかが調べた。とくに梯子間の交換相互作用が強い領域では、平均場近似が有効であることが分かった。これらの状態と、不純物近傍での隠れた秩序の振舞いについて議論した。[44]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] M. Ogata and A. Himeida: J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 374-391 (2003). "Superconductivity and Antiferromagnetism in an Extended Gutzwiller Approximation for t - J Model: Effect of Double-Occupancy Exclusion"
 - [2] Y. Yanase and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 673-687 (2003). "Microscopic Identification of the D-vector in Triplet Superconductor Sr_2RuO_4 "
 - [3] H. Tsuchiura, M. Ogata, Y. Tanaka and S. Kashiwaya: Phys. Rev. B **68**, 012509-1-012509-4 (2003). "Electronic states around a vortex core in high- T_c superconductors based on the t - J model"
 - [4] H. Tsuchiura, M. Ogata, Y. Tanaka and S. Kashiwaya: preprint. "Nature of carriers in one-dimensional correlated electron systems"
 - [5] M. Kuwabara, H. Seo, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 225-228 (2003). "Co-Existence of Charge Order and Spin-Peierls Lattice Distortion in One-Dimensional Organic Conductors"
 - [6] M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 1839-1842 (2003). "Superconducting States in Frustrating t - J Model: A Model Connecting High- T_c Cuprates, Organic Conductors and Na_xCoO_2 "
 - [7] T. Koretsune and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 2437-2440 (2003). "Ferromagnetism on the Frustrating Lattices"
 - [8] M. Mochizuki and M. Imada: Phys. Rev. Lett. **91**, 167203-1-167203-4 (2003). "Orbital-spin structure and lattice coupling in RTiO_3 where $R=\text{La, Pr, Nd, and Sm}$ "
 - [9] Z. Hiroi, K. Matsuhira and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 3045-3048 (2003). "Ferromagnetic Ising Spin Chains Emerging from the Spin-Ice under Magnetic Field"
 - [10] Y. Tanaka, Y. Yanase and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 319-322 (2004). "Superconductivity in $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ due to Charge Fluctuation"
 - [11] Y. Yanase: J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 1000-1017 (2004). "Pseudogap and Superconducting Fluctuation in High- T_c Cuprates: Theory beyond 1-loop Approximation"
 - [12] A. Kobayashi, Y. Tanaka, M. Ogata and Y. Suzumura: J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 1115-1118 (2004). "Charge-Fluctuation-Induced Superconducting State in Two-Dimensional Quarter-Filled Electron Systems"
 - [13] H. Yokoyama, Y. Tanaka, M. Ogata and H. Tsuchiura: J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 1119-1122 (2004). "Crossover of Superconducting Properties and Kinetic-Energy Gain in Two-Dimensional Hubbard Model"
 - [14] Y. Yanase, T. Jujo, T. Nomura, H. Ikeda, T. Hotta and K. Yamada: Phys. Rep. **387**, 1-149 (2003). "Theory of Superconductivity in Strongly Correlated Electron Systems"
 - [15] M. Udagawa, Y. Yanase and M. Ogata: submitted to Phys. Rev. B. "Quasiparticle density of states in layered superconductors under a magnetic field parallel to the ab-plane: Determination of gap structure of Sr_2RuO_4 "
 - [16] Y. Tanaka, Y. Yanase and M. Ogata: submitted to J. Phys. Soc. Jpn.. "Superconductivity due to Charge Fluctuation in θ -type Organic Conductors"
 - [17] Y. J. Uemura, P. L. Russo, A. T. Savici, C. R. Wiebe, G. J. MacDougall, G. M. Luke, M. Mochizuki, Y. Yanase, M. Ogata, M. L. Foo, and R. J. Cava: "Unconventional superconductivity in $\text{Na}_{0.35}\text{CoO}_2 \cdot 1.3\text{D}_2\text{O}$ and proximity to a magnetically ordered phase"
- (会議抄録)
- [18] H. Seo and M. Ogata: Proceedings of ISCOM2001 (Rusutsu Hokkaido, November 2001). Synth. Metals **133-134**, 299-300 (2003). "Theories on 1/4-filled one-dimensional systems — Effects of frustration and electron-lattice coupling —"
 - [19] Y. Yanase and M. Ogata: Proceedings of 23rd International Conference on Low Temperature Physics (Hiroshima, August 21-28, 2002). Physica C **388-389**, 511-512 (2003). "Microscopic Determination of the D-vector in Sr_2RuO_4 "
 - [20] T. Koretsune and M. Ogata: Proceedings of 23rd International Conference on Low Temperature Physics (Hiroshima, August 21-28, 2002). Physica C **388-389**, 88-89 (2003). "Effect of a geometrical frustration in the doped Mott Insulator"
 - [21] T. Kuribayashi, H. Tsuchiura, Y. Tanaka, J. Inoue, M. Ogata, and S. Kashiwaya Proceedings of 23rd International Conference on Low Temperature Physics (Hiroshima, August 21-28, 2002). Physica C **392-396**, 419-423 (2003). "Quasiparticle states around vortex cores in the t - J model"
 - [22] Y. Yanase: Proceedings of New3SC-4 San Diego Int. J. Mod. B **17**, 3594-3597 (2003). "Pseudogap Induced by the SC Fluctuation: Higher Order Correction beyond the T-matrix Approximation"
- (国内雑誌)

- [23] 土浦宏紀、小形正男、田仲由喜夫、柏谷聡：日本物理学会誌 58, 254-257 (2003). “銅酸化物超伝導体における不純物束縛状態”
(学位論文)
- [24] 是常 隆：“Effects of Geometrical Frustration in Strongly Correlated Systems” (東京大学大学院理学系研究科・博士論文)
- [25] 宇田川将文：“混合状態における異方的超伝導ギャップ構造の準粒子スペクトルへの効果について” (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)
(著書)
- [26] 福山秀敏、小形正男：『物理数学 I』(培風館 2003 年).
< 学術講演 >
(国際会議)
一般講演
- [27] The 3rd International Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides and the 1st Asia-Pacific Workshop on “Strongly Correlated Electron Systems” (Sendai, November 5-8, 2003). M. Ogata: “RVB states in frustrating strongly correlated electron systems”
- [28] The 3rd International Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides and The 1st Asia-Pacific Workshop on “Strongly Correlated Electron Systems” (Sendai, November 5-8, 2003). Y. Yanase: “Pseudogap and Superconducting Fluctuation in High- T_c Cuprates: Theory beyond the 1-loop Approximation”
- [29] The 3rd International Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides and The 1st Asia-Pacific Workshop on “Strongly Correlated Electron Systems” (Sendai, November 5-8, 2003). M. Mochizuki and M. Imada: “Orbital-spin structures in the perovskite titanates”
- [30] The Fifth International Symposium on Crystalline Organic Metals Superconductors and Ferromagnets (ISCOM 2003), (Port-Bourgenay, France, September 21-26, 2003). H. Seo, M. Ogata and M. Kuwabara: “Quantum Effects on Charge Order”
- [31] CERC/ERATO-SSS Workshop “Phase Control of Correlated Electron systems” (Maui, Hawaii, October 1-4, 2003). M. Mochizuki and M. Imada: “Orbital-spin structures in the perovskite titanates”
- [32] Workshop on “Unconventional superconductivity and novel magnetism in f-electron systems” (Advanced Science Research Center Japan Atomic Energy Research Institute, February 2004). Y. Yanase and M. Ogata: “Multi-orbital analysis on the unconventional superconductivity in d -electron systems”
- [33] M. Ogata: 7th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (Rio de Janeiro, Brazil, May 25-30, 2003). “RVB states and vortex core in high- T_c superconductivity”
- [34] M. Ogata: CERC/ERATO-SSS Workshop “Phase Control of Correlated Electron systems” (Maui, Hawaii, October 1-4, 2003). “RVB states and other instabilities in frustrating strongly correlated electron systems”
- [35] M. Ogata: ISS2003, 16th International Symposium on Superconductivity (Tsukuba, October 27-29, 2003) “Summary talk in Physics and Chemistry”
- [36] M. Ogata, M. Udagawa, Z. Hiroi and K. Matsuhira: French-Japanese bilateral seminar on “Frustrated Magnetism and Slow Dynamics” (Kyoto, January 7-10, 2004). “Unique properties of Spin-Ice Systems under Magnetic Fields”
(国内会議)
一般講演
- [37] 小形正男：日本物理学会、岡山大学 2003, 9.20-9.23 (分科会) シンポジウム 『新規二次元三角格子化合物 $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ の超伝導』 22aTR7 “ t - J 模型の平均場理論”
- [38] 柳瀬陽一、小形正男：日本物理学会、岡山大学 2003, 9.20-9.23 (分科会) “ Sr_2RuO_4 におけるラインノード的ふるまいについて：マイクロ理論からの考察”
- [39] 柳瀬 陽一：日本物理学会、岡山大学 2003, 9.20-9.23 (分科会) “超伝導ゆらぎによる擬ギャップ：高次補正の効果”
- [40] 是常 隆、小形正男：日本物理学会、岡山大学 2003, 9.20-9.23 (分科会) 21aTM9 “三角格子 t - J 模型における超伝導相関”
- [41] 横山寿敏、田仲由喜夫、小形正男：日本物理学会、岡山大学 2003, 9.20-9.23 (分科会) “2 次元ハバード模型での運動エネルギー低下による d 波超伝導”
- [42] 小形正男：日本物理学会、九州大学 2004, 3.27-3.30 (年会) 28pXA3 “新しい手法によるハバードモデルの絶縁体状態”
- [43] 是常 隆、小形正男：日本物理学会、九州大学 2004, 3.27-3.30 (年会) 28aPS77 “強相関電子系におけるフラストレーションの効果”
- [44] 安樂臨太郎、小形正男：日本物理学会、九州大学 2004, 3.27-3.30 (年会) 28aXL6 “2 本足スピン梯子における非局所的ユニタリ変換を用いた分子場法”
- [45] 田中康寛、柳瀬陽一、小形正男：日本物理学会、九州大学 2004, 3.27-3.30 (年会) 27pWL16 “ θ -型有機超伝導体における電荷秩序と超伝導の理論”
- [46] 宇田川将文、柳瀬陽一、小形正男：日本物理学会、九州大学 2004, 3.27-3.30 (年会) 29pXA5 “混合状態における異方的超伝導体の低エネルギー励起状態の磁場方向依存性について”

招待講演

- [47] 望月維人、小形正男：日本物理学会、九州大学 2004, 3.27-3.30 (年会) 29pXA12 “ $\text{Na}_x\text{CoO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ の超伝導：多軌道ハバード模型の FLEX 近似による解析”
- [48] 堀田知佐、小形正男、福山秀敏：日本物理学会、九州大学 2004, 3.27-3.30 (年会) 27aXR7 “1/4-filling 拡張近藤格子模型の基底状態”
- [49] 横山寿敏、田仲由喜夫、小形正男：日本物理学会、九州大学 2004, 3.27-3.30 (年会) 28aXA7 “2 次元ハバードモデルにおける t' の効果”
- [50] 小形正男：高橋特定領域キックオフミーティング (学習院大学) 2003, 7.28-7.29 “分子性導体の特異な電荷ダイナミクスと超伝導”
- [51] 小形正男、柳瀬陽一、田中康寛：高橋特定領域理論班研究会 (東京大学山上会館) 2003, 10.21-10.22 “分子性導体の特異な電荷ダイナミクスと超伝導”
- [52] 小形正男、是常 隆：物性研究所短期研究会「フラストレーションが創る新しい物性」(東京大学物性研究所) 2003, 12 “三角格子上での強相関電子系”
- [53] 宇田川 将文、柳瀬 陽一、小形 正男：磁束線物理国内会議 (物質・材料研究機構) 2003, 12.5. “磁場下の異方的超伝導体における準粒子状態の微視的な解析”
- [54] 小形正男、是常 隆、田中康寛：物性研究所短期研究会「量子凝縮系研究の新展開」(東京大学物性研究所) 2004, 1.7-1.9 “フラストレーションのあるフェルミオン系での超伝導”
- [55] 小形正男、田中康寛、柳瀬陽一：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 1 回シンポジウム (東京工業大学) 2004, 1 “CDW and Superconductivity in Frustrating Systems”
- [56] 小形正男、横山寿敏、田仲由喜夫、土浦宏紀：科研費特定領域研究 (A) 「遷移金属酸化物における新しい量子現象」成果報告会 (東京大学武田先端知ビル) 2004, 1.19-1.21 “Superconductivity in correlated Electron Systems”
- [57] 柳瀬 陽一、小形 正男：科研費特定領域研究 (A) 「遷移金属酸化物における新しい量子現象」成果報告会 (東京大学武田先端知ビル) 2004, 1.19-1.21 “Non-accidental scenario for the vertical line node in Sr_2RuO_4 ”
- [58] 宇田川 将文、柳瀬 陽一、小形 正男：科研費特定領域研究 (A) 「遷移金属酸化物における新しい量子現象」成果報告会 (東京大学武田先端知ビル) 2004, 1.19-1.21 “Influence of superconducting gap structure on the field-angle variation of low-energy excitation spectrum in the vortex state”
- [59] 小形正男：NAREGI ナノサイエンス実証研究 第 2 回公開シンポジウム 2004, 2.23-2.24 (岡崎国立共同研究機構 岡崎コンファレンスセンター) “強相関電子系での数値計算”
- [61] 望月維人：日本物理学会、九州大学 2004, 3.27-3.30 (年会) シンポジウム「 t_{2g} 電子系の軌道ダイナミクスと絶縁体-金属転移」29pXE3 “Ti 酸化物系の軌道状態”

(セミナー)

- [62] 小形正男：東北大学工学部セミナー “RVB states and vortex core in high- T_c superconductivity”
- [63] 小形正男：東京大学物性セミナー 2003, 11.25 “フラストレーション系での物理”
- [64] 吉田克旦：Chalmers University of Technology 2004, 3.9 “Effect of spin active interface in superconductor-finite half metal junction”

招待講演

- [60] 柳瀬陽一：日本物理学会、九州大学 2004, 3.27-3.30 (年会) シンポジウム「高温超伝導体の現状—ホールドーブ系と電子ドーブ系の比較—」27pXE7 “ハバードモデルにおける超伝導揺らぎと擬ギャップ”

3.5 常行研究室

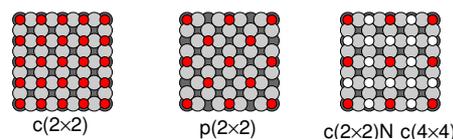
分子動力学法や密度汎関数法に基づく第一原理電子状態計算などの計算物理学的手法を用いて、できる限り具体的な物質の物性をミクロな観点から探ることにより、物性理論研究の新たな展開を目指している。とくに実物実験が困難な超高圧下の物性、あるいは新しいデバイスや触媒反応の研究にもつながる表面・界面物性を、理論的に予測・予言することが、我々の主たる研究テーマである。またそのための新しい手法開発にも力を注いでいる。

3.5.1 窒素原子が吸着した Cu(001) 表面の自己組織化

ナノメートルスケールの微細構造素子を実現するための方法の一つは、微細部品である原子分子を用意してそれを組み上げる、いわばボトムアップ式の方法である。STM などを用いて原子分子を操作する手法は、このボトムアップ式のもっともわかりやすい例であろう。しかし実際にデバイスとして役に立つシステムを組み上げようと思うと、そのような単原子・分子操作はあまりにも効率が悪い。このボトムアップ式方法の欠点を補うのが、ある反応条件下で原子分子が自発的に秩序を形成する性質、すなわち自己組織化を利用する方法である。

自己組織化が起きる原因は系によってさまざまであるが、本研究ではとくに、古典的な理解が可能な結晶の格子ひずみと、電子論的な起源をもった相互作用の競合に着目する。具体的には Cu(001) 表面に窒素を吸着させたときに現れるナノメートルスケールの秩序構造の生成メカニズムを、第一原理電子状態理論と弾性論の考察から明らかにし、その制御方法や、同じメカニズムを別の系に応用する可能性を探ろうというものである。この表面をテンプレートとして磁性金属である鉄やコバルトを成長させると、テンプレートの周期を反映した磁性金属元素ドットが生成されることがわかっている。現時点ではドットのサイズが小さすぎるため、磁性を発現するまでにはいたっていないが、自己組織化構造の周期の制御が可能になれば、超高密度磁気デバイス、たとえばメモリーや磁気センサーへの応用への道も開けるのではないかと期待される。

我々は密度汎関数理論に基づく第一原理電子状態計算を用いて、この N/Cu(001) 表面の自己組織化機構の解明に取り組んだ。まずプログラムの並列化を行うことによって、100 個以上の金属原子を含む大規模なモデル系の構造最適化と全エネルギー計算を実施した。その結果、吸着窒素原子間には有効引力相互作用があることを確かめ、さらに格子ひずみの様子がこれまで STM 等の実験から予想されたひずみと矛盾しないことを示した。またユニットセルの大きな帯状吸着構造のエネルギーから、島のサイズ決定に重要なひずみエネルギーのサイズ依存性が、古典的な弾性論モデルによって半定量的に説明できることを示した。そのほか、表面張力、表面スティッフネスの第一原理計算を行い、吸着によって表面の



		Surface Stress				
		clean	N	O	S	Br
clean	c(2x2)	0.9	-3.4			-0.4
	p(2x2)		0.6	0.7	0.4	0.7
c(2x2)N c(4x4)				-2.4	-2.5	-1.5

		Surface Stiffness (difference from clean surface)				
		clean	N	O	S	Br
clean	c(2x2)	0	0.7			0.2
	p(2x2)		0.3	0.2	0.2	0.1
c(2x2)N c(4x4)				0.7	0.6	0.5

図 3.5 a: 原子を吸着した Cu(001) 表面の表面張力と表面スティッフネスの計算値。吸着子の配置と原子種によって値が異なる。負の表面張力は膨張性であることを示す。

硬さが変化することを、初めて理論的に示した (図 3.5.1)。

実際の自己組織化構造は、5nm×5nm 程度の周期を持った大きな構造で、第一原理計算では扱えない。そこで第一原理計算で得られた結果をもとに N/Cu(001) 表面の簡単なキーティングモデルを作り、モンテカルロ計算によって自己組織化のシミュレーションを行った。その結果、格子ひずみによって吸着島のサイズに制限が加わることは確認されたが、島の周期性や均一性は不十分であり、実験結果を完全に説明するにはいたらなかった。これは今後の課題である。

3.5.2 シリコン (100) 表面の環式炭化水素

半導体の清浄表面には、金属やイオン結晶の表面よりも顕著な再構成構造が現れる。とくに規則的に並んだダングリングボンドは化学反応場としての表面の性質を支配し、 π 軌道や孤立電子対を持つ多原子分子はこの半導体表面と化学的な相互作用を示す。たとえば C=C 二重結合を持つ不飽和炭化水素分子にとって、Si(001) 清浄表面に並ぶダングリングボンドは強い化学結合を作る格好の反応相手であり、有機分子が規則的に配列吸着する例が複数みつかっている。この不飽和炭化水素/半導体系を舞台としてさらに有機化学的手法を用いた化学修飾を行うことによって、溶液中とは異なる対称性の下での化学が展開できる可能性がある。

近年、物性研究所の吉信グループにより Si(001) 上で不飽和炭化水素 ($C_5H_8, C_6H_8, C_6H_{10}$ など) が 2×1 構造を保ちながら規則的に吸着されることが見いだされ、上記のような有機化学における 2 次元の反応

場を目指した研究が進められている。我々は吉信グループと連携し、理論計算の立場から系の構造決定を行い、電子状態と反応性について検討してきた。今年度は我々が開発した力場反転法を用いて遷移状態探索と吸着・構造変化の活性化エネルギーの決定を行い、いくつかの分子吸着プロセスの概要を明らかにした。

3.5.3 シリコン酸化物中の原子拡散挙動

FETのゲート絶縁膜などに用いられるシリコン酸化膜の成長過程は、原子レベルで解明されるべき問題を残している。近年、素子の微細化に伴う酸化膜の極薄膜化が進み第一原理計算で扱えるサイズに近づくとともに、同位体置換法を用いた定量的な実験結果が相次いで報告されており、より詳細な議論が可能になってきた。我々は SiO_2 にSi, SiOなどの拡散種を導入し、高温での第一原理分子動力学計算を行って SiO_2 骨格の組み換えや拡散の様子を調べた。その結果、余剰のSiやSiOは格子間ではなく SiO_2 の骨格に取り込まれて存在し、3配位の酸素の出現を手がかりに、骨格組み換えを誘起しながら移動していくことを見出した。

また O_2 分子の拡散の場合には、従来から言われていたように O_2 分子が SiO_2 骨格の隙間を容易に移動できることが確かめられたが、同時に局所変形した SiO_2 骨格が一時的に O_2 分子を吸着あるいは吸収する場合のあることも確かめられた。

3.5.4 量子常誘電体 SrTiO_3 のドーピング効果

ペロフスカイト型で量子常誘電体として知られる SrTiO_3 にバンドギャップ以上の光を照射すると、低温で誘電率が2桁も上昇するという実験結果が、最近国内の複数のグループから報告されている。その機構としては、光キャリア(電子、正孔)による試料の一部の金属化と、光励起を種とした強誘電ゆらぎの増大という、2つの説があるが、実験的には明快な答えが得られていない。

我々は光励起状態の第一原理電子状態計算によって、電子、正孔、もしくはその両方のキャリアが加えられたときに SrTiO_3 の構造不安定性がどのように変わるかを調べてきた。今年度はさらに酸素欠陥の導入による電子状態変化について調べ、欠陥を含む系に電子をドーピングすることにバンドギャップ中に局在準位が生じることを見出した。これは過去のLMTO法による研究とは異なる結果であり、精密な電子状態計算の重要性を示している。このような欠陥とキャリアによって誘起された局在状態は双極子モーメントを生じるため、他のキャリアとの相互作用を通じて誘電率に影響を与える可能性がある。

3.5.5 新しい電子状態計算法の開発：トランスコリレイティッド法

密度汎関数法に基づく第一原理電子状態計算は、半導体や通常の金属で大きな成功を収めてきたが、遷移金属酸化物に代表されるいわゆる強相関電子系では絶縁体となるべき物質が計算上金属になる例が多く知られており、また固体の凝集エネルギーや固体表面への分子吸着エネルギーも不正確であることが指摘されている。このことから、真に予言力をもった新しい電子状態計算手法の開発が望まれている。

トランスコリレイティッド法は、電子相関を直接取り入れたジャストロー・スレーター型多体波動関数を変分関数に用いる波動関数法(密度汎関数法に対する用語)の一種であり、決定論的な方程式(SCF方程式)を解くことによってスレーター行列式を構成する1電子軌道を最適化することができる。また、変分モンテカルロ法と大きく違う点である。また、それ自身が多体問題の精密な解法として使えるだけでなく、より厳密に近い拡散量子モンテカルロ法の初期値を作る方法としても有望である。我々はこれまでにガウス基底関数を用いて簡単な原子・分子の計算を行った他、平面波が自明な解となる電子ガス(ジェリウムモデル)でテスト計算を実施し、その有効性を示してきたが、SCF方程式を解くために最低限必要な3体積分の評価が困難なことから、周期系への拡張に問題が残っていた。

今年度は周期系のプロット波動関数による定式化を行い、平面波基底関数を用いて高速フーリエ変換により3体積分が実行できることを示した。また周期系のためのプログラム開発に着手して擬ポテンシャル未対応のプロトタイプを作成し、局在ガウス基底を用いたHe原子や水素分子の計算結果の追試を行って正しく動作することを確認した。現在、汎用性の高い擬ポテンシャルを用いたプログラムを作成中である。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki, First principles study of inter-nitrogen interaction energy of Cu(100)-c(2x2)N surface, *International Journal of Quantum Chemistry* 91, 211-215 (2003).
- [2] N. Umezawa and S. Tsuneyuki, Transcorrelated self-consistent calculation for electronic systems with variational Monte Carlo method, *International Journal of Quantum Chemistry* 91, 184-190 (2003).
- [3] N. Umezawa and S. Tsuneyuki, Transcorrelated method for electronic systems coupled with variational Monte Carlo calculation, *Journal of Chemical Physics* 119, 10015-10031 (2003).
- [4] K. Uchida, S. Tsuneyuki and T. Schimizu, First-principles calculations of carrier-doping effects in SrTiO_3 , *Phys. Rev. B* 68, 174107 (2003).
- [5] N. Umezawa and S. Tsuneyuki, Ground-state correlation energy for the homogeneous electron gas

calculated by the transcorrelated method, Phys. Rev. B 69, 165102 (2004).

- [6] M. Maruyama, K. Kusakabe, S. Tsuneyuki, K. Akagi, Y. Yoshimoto and J. Yamauchi, Magnetic properties of nanographite with modified zigzag edges, J. Phys. Chem. Solids 65, 119-122 (2004).
- [7] Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki, First-principles study on the strain effect of the Cu(001)- $c(2 \times 2)N$ self-organized structure, Appl. Surf. Sci. to be published
- [8] K. Akagi, S. Tsuneyuki, Y. Yamashita, K. Hamaguchi and J. Yoshinobu, Structural and chemical property of unsaturated cyclic-hydrocarbon molecules regularly chemisorbed on Si(001) surface, Appl. Surf. Sci. to be published.

(学位論文)

- [9] (博士論文) K. Uchida, First-Principles Study of Carrier Doping Effects in SrTiO₃, the University of Tokyo (2004).
- [10] (修士論文) R. Sakuma, The Transcorrelated Method for First-Principles Study of Solids, the University of Tokyo (2004).

(著書)

- [11] 常行真司「物質の成り立ち」(岩波講座・物理の世界), 2004年.

(総説, 他)

- [12] 常行真司「高圧下の物質構造と計算機シミュレーション」, 日本物理学会誌 58, 669 (2003).
- [13] 常行真司, 土屋旬「四面体分子の大きな構造変化」, 高圧力の科学と技術 13, 232 (2003).
- [14] 常行真司「第6回日米先端科学シンポジウム」, 科学 74, 399 (2004).

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [15] S. Tsuneyuki, N. Umezawa and R. Sakuma: The Transcorrelated Method for Correlated Fermions, The 6th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (Tsukuba, Japan), 2003.11.10.

一般講演

- [16] S. Tsuneyuki: The Transcorrelated Method: A New Approach to Fermion Many-Body Problems (poster), 6th Annual Symposium on Japanese-American Frontiers of Science (JAFoS), Shonan Village, Kanagawa, Dec. 8-10, 2003.

- [17] M. Matsui and K. Nakamura: Phonon and Polarization of Crystal Chalcogen Compounds, The 6th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, EPOCAL TSUKUBA, Tsukuba International Congress Center Tsukuba, Nov. 10-12, 2003.

- [18] K. Akagi, S. Tsuneyuki, Y. Yamashita, K. Hamaguchi and J. Yoshinobu: Structural and chemical property of unsaturated cyclic-hydrocarbon molecules regularly chemisorbed on Si(001) surface, The 9th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces, Madrid, Spain, Sep. 15-19, 2003.

- [19] K. Akagi and S. Tsuneyuki: Structural Property and Growing Process of 1,4-cyclohexadiene/Si(001) Interface at 0.6ML Coverage, The 6th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, Tsukuba, Japan, Nov. 10-12, 2003.

- [20] K. Akagi: Reactivity of Condensed Water by a First-Principles Approach, 分子凝集体表面の化学・公開シンポジウム, Wako, Japan, Dec. 12-13, 2003.

- [21] Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki: First-principles study on the strain effect of the Cu(001)- $c(2 \times 2)N$ self-organized structure, 7th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures, Nara-ken New Public Hall, Nov. 18, 2003.

- [22] Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki: First-principles study on the adsorbate effect on the surface stresses of N/Cu(001) surfaces, Joint Meeting: International Conference on Molecular Simulation and Computational Science Workshop 2004, Tsukuba International Congress Center: EPOCHAL TSUKUBA, Jan. 15, 2004.

- [23] Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki: First-principles study on N/Cu(001) surfaces: the adsorbate effect on the surface stress and the surface stiffness, American Physical Society March Meeting 2004, Palais des Congres de Montreal, Mar. 24, 2004.

- [24] N. Umezawa and S. Tsuneyuki: Nonlocal density-functional description constructed from a correlated many-body wave function, American Physical Society March Meeting 2004, Palais des Congres de Montreal, Mar. 23, 2004.

- [25] Jun Tsuchiya, Taku Tsuchiya, and Shinji Tsuneyuki: First-principles study of hydrous minerals, δ -AlOOH and phase D (= G) under high pressure, American Geological Union Fall Meeting, Dec. 8-12, 2003.

(国内会議)

招待講演

- [26] 常行真司「第一原理による高圧物性シミュレーションの限界と可能性」, 第44回高圧討論会(慶応大学)シンポジウム「計算科学と高圧力」, 2003年11月22日.

- [27] 赤木 和人:「Si(001) 表面における不飽和炭化水素分子のダイナミクス - 第一原理計算からのアプローチ-」, 物性研短期研究会「表面分光の最前線とナノサイエンスへの展開」, 物性研究所, 2003 年 12 月 4 日-12 月 5 日.
- [28] K. Akagi: Study on dynamics of unsaturated hydrocarbon molecules on Si(001) surface, 「物性理論の新潮流 若手研究会」, 物性研究所, 2004 年 2 月 19 日-2 月 20 日.
- 一般講演
- [29] 常行真司:「トランスコリレイティッド法」, 計算機ナノマテリアルデザイン・量子シミュレーション手法の開発と応用ワークショップ, 2003 年 7 月 9 日-10 日.
- [30] 常行真司, 吉本芳英, 緒方裕介:「N/Cu(001) 表面の自己組織化」, NAREGI ナノサイエンス実証研究第 2 回公開シンポジウム, 2004 年 2 月 23 日-24 日.
- [31] 赤木和人, 常行真司, 影島博之, 植松真司:「シリコン酸化物中の余剰原子および欠陥の拡散挙動: 第一原理分子動力学計算からのアプローチ」, 日本物理学会 2003 年秋季大会, 岡山大学, 2003 年 9 月 23 日.
- [32] 影島博之, 秋山亨, 赤木和人, 植松真司, 白石賢二, 常行真司:「SiO₂/Si(100) 界面近傍における余剰 Si 点欠陥の安定性」, 日本物理学会 2003 年秋季大会, 岡山大学, 2003 年 9 月 21 日.
- [33] 加藤 浩之, 赤木 和人, 常行 真司, 川合 真紀:「表面吸着水分子に観られた凝集による反応促進効果」, 分子構造討論会 2004, 京都テルサ, 2003 年 9 月 25 日.
- [34] 赤木和人, 常行真司, 植松真司, 影島博之:「SiO₂ ネットワークと O₂ との相互作用の第一原理分子動力学法による研究」, 日本応用物理学会「極薄シリコン酸化膜の形成・評価・信頼性(第 9 回研究会)」, 熱川ハイツ, 2004 年 1 月 23 日.
- [35] 赤木和人, 常行真司:「Si(001) 表面における不飽和炭化水素分子のダイナミクス」, NAREGI ナノサイエンス実証研究第 2 回公開シンポジウム, 岡崎コンファレンスセンター, 2004 年 2 月 24 日.
- [36] 赤木和人:「第 1 原理計算によるシリコン表面の有機分子ダイナミクス」, 日本物理学会 2004 年春季大会シンポジウム講演, 九州大学, 2004 年 3 月 29 日.
- [37] 中村和磨, 松井正冬, 常行真司:「Anomalous effective charges of hypervalent chalcogen compound As₂Te₃: First-principles study」, 物性理論の新潮流 若手研究会, 東京大学物性研究所, 2004 年 2 月 19 日-20 日.
- [38] 中村和磨, 松井正冬, 常行真司:「超原子価カルコゲナイド As₂Te₃ に見られる巨大有効電荷の第一原理計算」, NAREGI ナノサイエンス実証研究第 2 回公開シンポジウム, 岡崎国立共同機構 岡崎コンファレンスセンター, 2004 年 2 月 23 日-24 日.
- [39] 中村和磨:「超原子価カルコゲナイド As₂Te₃ に見られる巨大有効電荷の第一原理計算」, NAREGI 冬の学校, 木島平温泉観光ホテル, 2004 年 3 月 7 日-9 日.
- [40] 内田和之, 常行真司:「SrTiO₃ のフォトキャリアの性質に関する第一原理計算」日本物理学会 2003 年秋の分科会, 岡山大学, 2003 年 9 月 22 日.
- [41] 内田和之, 常行真司:「SrTiO₃ における格子欠陥と光キャリアの相互作用に関する第一原理計算」日本物理学会第 59 回年次大会, 九州大学, 2004 年 3 月 30 日.
- [42] 佐久間怜, 常行真司, 梅澤直人:「トランスコリレイティッド法による固体の電子状態計算」, 日本物理学会第 59 回年次大会, 九州大学, 2004 年 3 月 29 日.
- [43] 吉本芳英, 常行真司:「第一原理計算による吸着子の Cu(001) 表面の表面張力への影響の研究」, 日本物理学会 2003 年秋の分科会, 岡山大学, 2003 年 9 月 20 日.
- [44] 吉本芳英, 常行真司, 緒方祐介:「N/Cu(001) 表面の歪みと自己組織化」, 平成 15 年度学術創成研究費全体会議, 琵琶湖ホテル, 2004 年 2 月 27 日.
- (セミナー)
- [45] 常行真司:「トランスコリレイティッド法による電子状態計算」, 広島大学総合科学部物質科学セミナー, 2003 年 9 月 25 日.
- [46] 常行真司:「電子状態計算手法トランスコリレイティッド法の基礎と展開」, 大阪大学基礎工学部セミナー, 2003 年 10 月 7 日.
- [47] 常行真司:「トランスコリレイティッド法 - 関連の強い電子系のための新しい第一原理計算手法開発の試み」, 京都大学大学院理学系物理学・宇宙物理学専攻談話会, 2003 年 11 月 6 日.
- [48] 常行真司:「物質構造と第一原理計算機シミュレーション」, 核融合研究所セミナー, 2004 年 2 月 17 日.
- [49] 中村和磨:「分子動力学シミュレーションに基づく構造不規則系の振動スペクトルに対する理論的研究」, 青木・常行研究室コロキウム, 東京大学理学部物理学教室, 2003 年 10 月 30 日.

4 物性実験

4.1 樽茶研究室

樽茶研究室では、極低温における低次元電子系の量子輸送、電子状態の研究を行っている。系の寸法が電子のドブロイ波長程度になると、電子の量子性に由来する干渉効果、相互作用などが、系全体の性質を左右するようになる。本研究室では、半導体を微細化することによって作られる、0次元系を対象として、人工原子、分子における多体問題、強磁場中での強相関現象、電子スピン、核スピンの関与する伝導現象、1次元朝永-ラッティンジャー液体の電子物性、量子ドットで構成される量子計算機の基礎物性の解明と制御、および表面敏感走査プローブを利用した状態密度の直接観察法の開発を行っている。

4.1.1 人工原子の電子相関の研究

強磁場中人工原子の魔法数状態

人工原子に強い磁場を印加すると、すべての電子が最低ランダウレベルを占有し、クーロン相互作用が系の状態を決定する強相関電子系となる。このような領域では魔法数と呼ばれる特定の角運動量を持つ電子状態が安定であることが理論的に示されており、魔法数は古典的電荷が結晶格子を組むことに対応すると予測されている。

我々はこれまでに引き続き、強磁場下の電子状態を調べたその結果、今回、電子数 $N = 5$ の電子状態について、魔法数状態と考えられる安定状態の間にやや不安定な基底状態が現れることが分かった。これは $N = 2 - 4$ で観測されなかったことから、多電子に特有な現象であると考えられる。特に $N = 5$ では「正五角形頂点」と「正方形頂点+中心」の2つの古典電荷配置が存在するため、現在、青木研究室および英国 Leicester 大学の P.A.Maksym 博士とその関連について議論している。

一方、強磁場領域の励起スペクトルの基底状態がゼーマン効果によって2つに分裂する様子を観測した。これにより g 因子は 0.30 程度と見積もられる。本来、 $N = 2$ 以上の励起スペクトルにおいては基底状態が多重ゼーマン分裂するはずであるが、観測された分裂が2つであることはスピン成分 S_z によってブロッケードが起こっているためと考えられる。

SU(4) 近藤効果

近藤効果はスピン相関に起因する典型的な多体効果で、通常、人工原子がスピン $S = 1/2$ の不対電子を含むときに現れる。これは、SU(2) 近藤効果と呼ばれ、2は角運動量とスピンを含めた縮重度 Nd を表す。即ち、同一の角運動量軌道に対して、 $S = 1/2$ と $-1/2$ が関与する。近藤温度は、一般に、 $-1/Nd$ について指数関数的に変化するので、縮重度が高くなると近藤温度は急激に上昇すると予測される。今回、人工原子の磁場中での電子状態を厳密に制御することにより、2つの角運動量軌道と2つの電子スピンの縮退が関与する SU(4) 近藤効果を初めて観測した。また、SU(4) 縮退は電子数 N が奇数のときに起こるが、その磁場の近傍には電子数が1だけ異なる $N - 1$ 、 $N + 1$ (いずれも奇数の電子数) のスピン 1重項 ($S = 0$) - 3重項 ($S = 0$) 縮退による近藤効果 (ST 近藤効果) が存在することを見出した。SU(4) と ST の近藤効果を比較し、ST の方がやや近藤温度が高いこと、縮退点からのズレに対して、SU(4) 近藤効果の減少は対称であるのに対して ST の場合には非対称になることを見出した。後者は、縮退点から離れると、一方は近藤効果の現れない1重項になるのに対して、他方は近藤効果の残る3重項になることに起因する。

4.1.2 人工分子の電子状態の研究

人工分子の分子相

これまで、2個の調和形人工原子が縦方向に結合した人工分子について、電子状態を詳しく調べることで、結合が強い場合には結合状態の電子占有が優先すること、また比較的結合の弱い人工分子では反結合状態の電子占有が見られること ("分子相")、また、トンネル結合に垂直な横磁場中では、反結合状態が顕著に安定化することを報告した。

今回、分子相状態をさらに詳しく調べることを目的として、超低温、強磁場中において、試料を回転する機構を作成した。これを用いることによって、人工分子に傾斜磁場を印加することができる。例えば、縦磁場印加の状態、結合を弱める横磁場成分を加えると、結合を実効的に弱めることができる。今回の実験では、横磁場成分を増加することにより、分子的な状態が、より安定化することを確認した。これにより、理論との対応でしかわからなかった分子状態を実験的に再確認することができた。また、回転機構を使うと、縦磁場、横磁場の成分を任意に変えられるので、両磁場の関数として様々に安定化する人工分子の "相図" を描くことができる。この方針に基づいて、現在、従来は実現できなかった状態遷移が確認されつつある。

人工分子の電子状態

人工分子の研究は、分子的な軌道結合の量子力学と相互作用の役割を解明し、またハバード模型と対比して相互作用の物理を理解するのに有用である。一方、応用的には、人工分子はドット中の電子スピンを単位とする量子情報処理の基本構成となり得る。我々は、とくに後者を念頭において、「横結合縦型 2 重ドット」と呼ばれる独自の人工分子を開発してきた。この場合、ドット間でのスピンの交換結合の操作の成否が鍵を握っている。交換結合は $4t^2/U$ ($2t$: トンネル結合、 U : ク-ロンエネルギー) で与えられるので、結局トンネル結合の制御が重要となる。トンネル結合は、各電子の軌道やスピン状態、あるいは、対称性を敏感に反映するが、その様子を実験的に識別した例はない。上記の人工分子は、この実験に対応しうるもので、電子数や結合度を含めて様々なパラメータを自在に調節することができる。実験では、各ドットの電子状態の軌道角運動量の大きさに合わせて、トンネル結合度が増大すること、ドット間非対称性の増大により電子局在がおこること、磁場によって交換結合が可変であること、などを確認した。これにより、分子の量子力学に相通ずる知見に加えて、交換結合制御のための指針を得ることができた。

自然形 InAs 結合ドットの電子状態

自然形成 InAs 量子ドットは、寸法が極めて小さいために電子がドット中に強く閉じ込められる。このため強い量子効果が期待される。今回、2 重結合ドットの結合が強い場合と弱い場合について調べた。

前年度までに縦型の単一電子トランジスタに 2 層 (ドット+ウェット層) の結合 2 重ドットを埋め込んだ試料を作成し、単電子トンネル分光の手法により、一組の結合ドットの電子状態を調べる技術を開発した。この技術を用いて、まず、弱結合ドットの電子状態を調べた。ソース-ドレイン電圧とゲート電圧を上手く調節することにより、片方のドットを他方のドットの電子状態のスペクトロメータとして利用した。これにより、電子数が零個から 7 個程度までの電子状態を測定することに成功した。測定された電子状態は、最初の 2 電子により 1s 軌道、次の 4 電子により 2p 軌道が占有されるという、典型的な殻構造を示すことが分かった。一方、強結合ドットの電子状態については、結合が強くなるにつれて電子状態は分子的な性格を持つことが期待される。その特徴として、結合軌道と反結合軌道の同時占有 (「分子相」) がある。今回の実験では、零個から 6 個までの各電子状態に対応するク-ロン振動ピークの磁場依存性を測定し、軌道とスピン状態を明瞭に識別した。その結果、電子数 1、2 では、結合軌道 1s 状態のスピン縮退状態、電子数 3、4 では反結合軌道 1s 状態のスピン縮退状態が順次占有されていることが分かった。これにより、InAs 結合ドットで、分子相が初めて確認された。

4.1.3 電子スピン-核スピン結合の研究

パウリ型スピンプロケード状態下の 2 重量子ドットにおける核スピン制御

パウリ型スピンプロケード状態にある 2 電子 2 重量子ドットで観測される 1pA 程度の微小な「リーク電流」はドット内のスピン散乱を調べるよいプローブとなる。我々はこのリーク電流に関してソース・ドレイン電圧、ゲート電圧、磁場等の依存性やこれらのパラメータを急変させた際の時間応答を詳細に研究し、ある適当な条件下においてリーク電流が、1) 時間的に振動する現象、および 2) 2 つの (準) 安定な定常値を持つ現象、をみいだした。両者ともに ^{71}Ga および ^{69}Ga 原子の核スピンに共鳴する rf 交流磁場を印加すると特性が大きく変化する。これは核スピン自由度がこれらの現象に深く関与していることを示唆している。今回我々は (2) の電流ステップに注目し、以下のような測定を行った。まずソース・ドレイン電圧 $V=6.4\text{mV}$ におけるリーク電流の磁場依存性において、磁場の上昇時に約 0.6T において電流値 $I_L=1.8\text{pA}$ から $I_H=2.2\text{pA}$ へのステップが観測されることを確認し、 I_H への遷移後一旦 $V=0\text{mV}$ にしてスピンプロケードを解除し、一定時間 T_{dwell} 待った後再び 6.4mV へもどす。このときの電流の時間変化は、 T_{dwell} が十分短いときには電流値はただちに I_H へ戻るが T_{dwell} が数分程度と長い場合には一度 I_L へと遷移し回復時間 T_R の後 I_H へと遷移する。 ^{69}Ga および ^{71}Ga の連続波 NMR 条件下で同様な測定を行うと十分短い T_{dwell} においても T_R が増大することが観測された。これらの結果は 2 つの (準) 安定状態がそれぞれ量子ドット内の核スピン分極 / 非分極状態に対応づけられることを示唆している。

2 ゲート縦型 2 重量子ドット素子の開発

縦型 2 重量子ドットにおいて核スピン効果の前提となるパウリスピンプロケードが観測されるためには 2 つのドットの静電ポテンシャル、ドットと電極の電位差がある適切な範囲になければならない。現在の素子ではこれらの制御パラメータは可変ではなく、素子のサイズやプロセス条件などに影響される。今後核スピン効果をより系統的に研究するためには上記制御パラメータが可変であるような素子を開発する必要がある。具体的には従来の素子に備わっているサイドゲート電極に加え、基盤ウェーハの結晶成長時に作りつけたバックゲート電極を持つ縦型 2 重ドットを開発し、2 つのドットの静電ポテンシャルを独立に制御することを目指している。現在のところ、バックゲートにより下部電極の電子濃度を通常値からほぼゼロまで変調できることを確認したものの、3 重障壁構造の各種パラメータ、上部・下部電極の初期電子濃度の最適化が不十分であり、ドット間のポテンシャル差の変調には至っていない。

4.1.4 量子細線 1 次元電子系の電子間相互作用の研究

結合量子細線における電気伝導

結合量子細線において現れる負のドラッグ効果（平行に近接して並べられた量子細線における電子-ホール間のドラッグ）の理論的な考察を進めた。負のドラッグ効果は一方の細線中の電子状態が粒子的に振舞うことによって生じるが、詳細なメカニズムは不明のままであった。今年度の研究では、もう一方の細線中の電子がウィグナー分子状態になる場合に負のドラッグ効果が現れることを明らかにした。粒子的な電子状態をもつ一方の細線（ドライブ細線）に電子を注入すると、他方の細線（ドラッグ細線）内のウィグナー分子が振動し、流体力学的な電子の運動によって分子中の電子が圧縮率の高い二次元リードにポンプされる。このようなポンピングの作用は、ドライブ細線に電子が注入される側のリードにおいてより強く働くため、二つの細線で電流の向きが逆になり、負のドラッグが観測されるのである。また、結合量子細線における細線間のトンネル電流に関する実験結果をより詳細に解析することにより、低電子密度の量子細線ではフェルミ速度がよい量子数ではなく、電子の“位置”がより重要な物理量になることを見出した。高電子密度である二つの細線間のトンネル電流測定においては、微分トンネルコンダクタンス dI/dV (V は細線間の電圧) が、エネルギーと運動量を共に保存するトンネル過程が生じるような V でピークをとる。それに対し、量子細線の電子密度が低い場合には上記のような性質は失われ、電子密度（ゲート電圧）だけに依存したトンネル構造が現れる。この領域では、局在化した電子としての性質が細線内の状態を支配している。

量子ドットを含む結合量子細線における電気伝導

結合量子細線において現れる負のドラッグ効果をより単純に実現させる系として、一方の量子細線（ドライブ細線）中に量子ドットを埋め込んだ構造を設計し、その電気伝導特性を調べた。実験では、クーロン振動の測定などから量子ドットの形成を確かめた後、クーロンドラッグの観測を行った。その結果、ドラッグ細線のコンダクタンスが第 1 プラトーの少し下になるように電子密度を調整したときに限り、ドライブ細線のクーロン振動に合わせて負のドラッグが観測された。観測された負のドラッグ効果は、結合量子細線における場合と同様にして理解ができる。負のドラッグが起こるとき、ドライブ細線において量子ドットに注入される電子は粒子としての性質を持っており、そのトンネルの前後においてはドラッグ細線中の電場が空間的に揺さぶられる。一方、ドラッグ細線中の電子は、ドライブ細線中の電子との強い相互作用により、量子ドットの近くにおいて周りよりも強いクーロン相互作用を持っており、その領域でのみウィグナー分子状態を形成している。従って、空間的な電場の振動により、この分子モードが

振動し、より相互作用の弱い外側の領域へと電子がポンプされる。このような電子のポンピングはドット内の電子が増える方向に対してより活発に起こる。その結果、ドラッグ細線中の電子の運動には整流作用が加わり、負のドラッグが生じるのである。

4.1.5 固体量子計算の基礎物理とハードウェアの研究

単一電子スピン操作の量子ドット試作と g 因子

我々は単電子スピン共鳴 (SESR) を用いた電子スピンの回転操作を行うことを目指している。個々の量子ドットの電子スピンのアクセスでき、単電子スピンの回転 (量子ビットに相当) を行える SESR 技術は従来の ESR とは全く異なる。この技術が実現されると、スピンドコヒーレンス時間の導出と、要因解明が可能になる。そのために高周波電流導入の線状電極を付けた縦型量子ドットの設計・試作を行い、基礎実験を行った。横磁場下のクーロンダイヤモンドにおいてゼーマン分裂を観測し、GaAs ドットの g 因子を見積もることに成功した。GaAs ドットの g 因子は $|g| = 0.23$ と見積もられ、GaAs バルクの g 因子 ($g = -0.44$) と $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (障壁) バルクの g 因子 ($g = 0.3$) の中間の値をとっている。これは波動関数の染み出しにより AlGaAs の影響を受けていると考えられる。さらに高周波電流 (マイクロ波) を障壁印加した結果、SESR 実現には至っていないが、高周波電圧の効果である光介在トンネル現象が観測された。これはドット近傍までマイクロ波が届いていることを示している。現在、高周波電圧とドットの静電結合を減らすデバイスの開発を進めている。

縦型横結合ドットにおける交換結合定数制御

電子スピン量子計算の実現には 2 電子スピンの量子もつれ状態が必要となる。量子もつれ状態とは、片方の電子のスピン状態を観測すれば、もう片方の電子のスピン状態が決まるような相関をもった状態を意味する。これを実験的に確認するため、前年度から縦型で横に直列結合した 2 重量子ドット構造を開発している。この構造では、各ドット内の電子状態やドット間のトンネル結合が制御可能である。今回、同試料のトンネル結合パラメータとして、電子状態のスタビリティダイアグラム (直列コンダクタンスの各ドットのプランジャーゲート電圧依存性) を測定し、これにより強結合および弱結合を識別することができた。これはセンターゲート電圧によりドット間の結合を変調させ交換結合定数を制御することが可能なことを示すものである。例えば今回の実験で見積もられた交換結合定数は約 $2 \mu\text{eV}$ であり、これを用いて SWAP 量子ゲート操作を行うには約 1ns のパルス時間が必要と予測される。

4.1.6 表面敏感走査プローブを用いた状態密度の空間分布測定法の開発

半導体ナノ構造の量子効果や電子相関を直接検証する方法として、電子状態密度の空間分布を高分解能で測定するためのSTM装置(0.3K、超高真空、12T)を建設している。今回、InAs中にGaAsのドットを埋め込んだ試料を用いて、そのへき開面の0.3K、超高真空中での測定を行なった。この場合、電子はGaAsドット周辺に局在することから、スーパーアトムと呼ばれる構造の電子状態の出現が期待される。トポグラフ測定からGaAsを含むと思われる層を同定したが、残念ながら、STM動作の安定性や再現性に問題があり、議論すべき状態密度の検出に至らなかった。また、InAs媒質中での測定では、探針の電圧で誘起されたドット中に束縛された電子状態が検出された。今回の実験で改善すべき点が認識できたので、その対策を検討して行く。

本研究の大部分はNTT物性科学基礎研究所、デルフト工科大、科学技術振興機構・樽茶プロジェクト、さきがけプロジェクトとの共同研究である。

<受賞>

なし

<報文>

(原著論文)

- [1] J.M. Elzerman, R. Hanson, JS. Greidanus, LHW. van Beveren, S. De Franceschi, L. MK. Vandersypen, S. Tarucha, LP. Kouwenhoven: Few-electron quantum dot circuit with integrated charge read out, *Phys Rev B* **67**; 161308 (2003).
- [2] F. Ancilotto, DG. Austing, M. Barranco, R. Mayol, K. Muraki, M. Pi, S. Sasaki, S. Tarucha: Vertical diatomic artificial molecule in the intermediate-coupling regime in a parallel and perpendicular magnetic field, *Phys Rev B* **67**; 205311 (2003).
- [3] T. Ota, T. Hatano, S. Tarucha, H.Z. Song, Y. Nakata, T. Miyazawa, T. Ohshima, N. Yokoyama: Transport properties of a single pair of coupled self-assembled InAs quantum dots, *Phys. E* **19** (1-2) 210-214 (2003).
- [4] K. Ono, D.G. Austing, Y. Tokura, S. Tarucha: Spin selective tunneling and blockade in two-electron double quantum dot, *Phys. Stat.* **238**, 335 (2003).
- [5] M. Stopa, W.G. van der Wiel, S.De Franceschi, S. Tarucha, L.P. Kouwenhoven: Magnetically induced chessboard pattern in the conductance of a Kondo quantum dot, *Phys. Rev. Lett.* **91**; 046601 (2003).
- [6] T. Fujisawa, D.G. Austing, Y. Hirayama, S. Tarucha: Electrical pump and probe measurements of a quantum dot in the coulomb blockade regime, *J.J. Appl Phys* **42**: (7B) 4804-4808 (2003).
- [7] T. Fujisawa, D.G. Austing, Y. Tokura, Y. Hirayama, S. Tarucha: Electrical pulse measurement, inelastic relaxation, and non-equilibrium transport in a quantum dot, *J. Phys.: Condens. Matter* **15** R1395- R1428 (2003).
- [8] T. Kodera, W.G. van der Wiel, K. Ono, S. Sasaki, T. Fujisawa and S. Tarucha: High-frequency manipulation of few-electron double quantum dots - toward spin qubits -, *Physica E* **22**, 518-521 (2004).
- [9] M. Rontani, S. Amaha, K. Muraki, F. Manghi, E. Molinari, S. Tarucha, D.G. Austing: Molecular phases in coupled quantum dots, *Phys. Rev. B* **69**, 85327 (2004).
- [10] R. Ravishankar, P. Matagne, J.P. Leburton, R.M. Martin, S. Tarucha: Three-dimensional self-consistent simulations of symmetric and asymmetric laterally coupled vertical quantum dots, *Phys. Rev. B* **69**, 035326 (2004).
- [11] T. Hatano, M. Stopa, T. Yamaguchi, T. Ota, K. Yamada, S. Tarucha: Delocalization energy probed by asymmetry of Coulomb diamond in double dot system, to appear in *Superlattices and Microstructures* (2004).
- [12] T. Sato, T. Yamaguchi, W. Izumida, S. Tarucha, H. Z. Song, T. Miyazawa, Y. Nakata, T. Ohshima, N. Yokoyama, Single-electron transport through an individual InAs SAQD embedded in a graded-dope semiconductor nano-pillar, to appear in *Physica E* (2004).
- [13] T. Ota, M. Stopa, M. Rontani, T. Hatano, K. Yamada, S. Tarucha, H.Z. Song, Y. Nakata, and T. Miyazawa: Molecular states observed in a single pair of strongly coupled self-assembled InAs quantum dots, to appear in *Superlattices and Microstructures* (2004).
- [14] K. Yamada, M. Stopa, T. Hatano, T. Ota, T. Yamaguchi, S. Tarucha: Variation of co-tunneling and Kondo effect by control of coupling strength between a vertical dot and a two-dimensional electron gas, to appear in *Superlattices and Microstructures* (2004).
- [15] S. Sasaki, S. Amaha, N. Asakawa, M. Eto, S. Tarucha: Enhanced Kondo effect via orbital degeneracy in a spin 1/2 artificial atom, to appear in *Phys. Rev. Lett.* (2004).
- [16] T. Ota, T. Hatano, K. Ono, S. Tarucha, H. Z. Song, Y. Nakata, T. Miyazawa, T. Ohshima, N. Yokoyama, Single electron spectroscopy in a single pair of weakly coupled self-assembled InAs quantum dots, to appear in *Physica E* (2004).
- [17] T. Hatano, M. Stopa, W. Izumida, T. Yamaguchi, T. Ota, S. Tarucha, Gate-voltage dependence of inter dot coupling and Aharonov-Bohm oscillation in laterally coupled vertical double dot, to appear in *Physica E* (2004).

- [18] M. Rontani, M. Manghi, E. Molinari, S. Amaha, K. Muraki, S. Tarucha, D.G. Austing: Quantum phase in diatomic semiconductor artificial molecules, to appear in Phys. Rev. B (2004).
- [19] K. Ono, S. Tarucha: Nuclear-spin-induced oscillatory current in spin-blockaded quantum dots, to appear in Phys. Rev. Lett.
- [20] T. Ota, K. Ono, M. Stopa, T. Hatano, S. Tarucha, H. Z. Song, Y. Nakata, T. Miyazawa, T. Ohshima, N. Yokoyama: Ingle-dot spectroscopy via elastic single-electron tunneling through a pair of coupled quantum dots to appear in Phys. Rev. Lett.
- [21] D.G. Austing, S. Tarucha, H. Tamura, K. Muraki, et al.: Integer filling factor phases and isospin in vertical diatomic artificial molecules, to appear in Phys. Rev. B.
- (会議抄録)
- [22] M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Hirayama, Y. Tokura, S. Tarucha: Negative drag in parallel quantum wires, Proceeding of 26th International Conference on the Physics of Semiconductors.
- [23] H. Yokoyama, T. Sato, K. Ono, Y. Hirayama, S. Tarucha: Tunable Quantum Dot Resonator Embedded in a Quantum Wire, proceeding for MSS11.
- (国内雑誌)
- [24] 樽茶清悟、大野圭司: 量子ドット中の電子スピンの相互作用と制御、固体物理、vol. 38, No. 11, 841 (2003).
- (修士論文)
- [25] 小寺哲夫: 少数電子系量子ドットの高周波変調
- [26] 清水督史: ポテンシャル変調を含む量子細線結合系の電気伝導
- [27] 山口晋平: 量子ドット構造における電子スピン-核スピン結合
- (学位論文)
- [28] 山本倫久: Interaction effects in semiconductor coupled quantum wires
- (著書)
- [29] S. Tarucha, K. Ono, T. Fujisawa, W.G. van der Wiel, L.P. Kouwenhoven: Electron Transport in Quantum Dots, Chapter 1, p1-p42, to Interactions, Spins and the Kondo Effect in Quantum-Dot Systems ed. by J.P. Bird, by Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-7459 X (2003).
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [30] W.G. van der Wiel, S. Tarucha: Electron and nuclear spin manipulation in quantum dots, DARPA QuIST meeting, Beverly Hills (USA) June. 22-26 (2003).
- [31] H. Yokoyama, T. Sato, K. Ono, Y. Hirayama, S. Tarucha: Tunable Quantum Dot Resonator Embedded in a Quantum Wire: Frontiers of Nanoscale Science and Technology (FNST), RCAST Univ. of Tokyo (Japan), Jul. 10-12 (2003)
- [32] M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Hirayama, Y. Tokura, S. Tarucha: Negative Drag in Parallel Quantum Wires, Japan/NSEC Workshop, Frontiers of Nanoscale Science and Technology, Poster presentation, Institute for Industrial Studies (IIS) of University of Tokyo, July 11, 2003.
- [33] S. Tarucha, K. Ono: Manipulation of Electron Spin and Nuclear Spin in Double Quantum Dot System, 15th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, Nara New Public Hall, Nara (Japan), July.14-18 (2003).
- [34] P.A. Maksym, Y. Nishi, S. Tarucha, H. Aoki: Addition spectrum of few-electron quantum dots: Electron molecule, MDD and FQH states, 15th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, Nara New Public Hall, Nara (Japan), July.14-18 (2003).
- [35] T. Ota, T. Hatano, T. Sato, S. Tarucha, H.Z. Song, T. Nakata, T. Miyazawa, T. Ohshima, N. Yokoyama: Transport properties of a single pair of coupled self-assembled InAs quantum dots, 15th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, Nara New Public Hall, Nara (Japan), July.14-18 (2003).
- [36] T. Kodera, W.G. van der Wilfred, S. Sasaki, S. Tarucha: Single-electron Spin Coupling in Double Vertical Quantum Dots, 15th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, Nara New Public Hall, Nara (Japan), July.14-18 (2003).
- [37] T. Inoshita, S. Tarucha: Electronic-Nuclear Dynamics in Double Quantum Dots in the Spin-Blockade Regime, 15th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, Nara New Public Hall, Nara (Japan), July.14-18 (2003).
- [38] T. Hatano, M. Stopa, W. Izumida, T. Yamaguchi, T. Ota, S. Tarucha: Gate-voltage dependence of inter dot coupling and Aharonov-Bohm oscillation in laterally coupled vertical double dot, 15th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, Nara New Public Hall, Nara (Japan), July.14-18 (2003).
- [39] W.G. van der Wiel, M. Stopa, S. De Franceschi, S. Tarucha, L.P. Kouwenhoven: Kondo chessboard pattern in the conduction of a quantum dot, 15th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, Nara New Public Hall, Nara (Japan), July.14-18 (2003).

- [40] S. Teraoka, A. Numata, S. Amaha, K. Ono, S. Tarucha: Electron Spin Resonance and Nuclear Spin Pumping in DEG Quantum Hall System, The 11th Int. Conf. on Modulated Semiconductor Structures, Nara, Japan, July 14 - 18, (2003).
- [41] H. Yokoyama, T. Sat, K. Ono, Y. Hirayama and S. Tarucha : Tunable Quantum Dot Resonator Embedded in a Quantum Wire : The 11th Int. Conf. on Modulated Semiconductor Structures(MSS11), Nara (Japan), Jul. 14-18 (2003)
- [42] T.Inoshita, S.Tarucha: Hyperfine interaction in double quantum dots: Nonlinear dynamics and current instability, 13th Int. Conf. on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors, Modena, Italy, July 28-August 1 (2003).
- [43] K. Ono, S. Tarucha: Spin and nuclear spin dependent transport in quantum dots, ISSP Int. Workshop2003, Int. Summer School for Young Researchers on "Quantum Transport in Mesoscopic Scale & Low Dimensions", Kashiwa (Japan) Aug. 13-21 (2003).
- [44] W.G. van der Wiel : Electron transport experiments in semiconductor quantum dots, ISSP Int. Workshop2003, Int. Summer School for Young Researchers on "Quantum Transport in Mesoscopic Scale & Low Dimensions",Kashiwa (Japan), Aug. 13-21 (2003).
- [45] M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Hirayama, Y. Tokura, S. Tarucha: Coulomb drag between parallel quantum wires, ISSP Int. Workshop2003, Int. Summer School for Young Researchers on "Quantum Transport in Mesoscopic Scale & Low Dimensions", Kashiwa (Japan) Aug. 13-21 (2003).
- [46] W.G. van der Wiel, T. Kodera, Y. Iwai, K. Ono, S. Sasaki,T. Maruyama, T. Sato, S. Tarucha : Microwave electron-spin manipulation in semiconductor quantum dots, ERATO mini workshop, Tokyo (Japan), Sept. 10 (2003).
- [47] D.G. Austing, R. J. A. Hill, A. Patane, P. C. Main, M. Henini, L. Eaves, S. Tarucha : Transport characteristics of InAs self-assembled dot ensembles in an AlGaAs tunneling barrier of gated sub-micron vertical mesas that conduct near zero bias, Annual APS March meeting 2004 (Motreal Mar. 22-26, 2004)
- 招待講演**
- [48] S. Tarucha:Dynamical Properties of Spin States in Quantum Dot Structures, Materials Research Society Spring Meeting2003, San Francisco l(USA),Apr. 21-25(2003).
- [49] S.Tarucha: Electron Spins and Nuclear Spins in Semiconductor Quantum Dots,Japan- US Workshop on "Frontiers of Nanoscale Science and Technology", RCAST, U-Tokyo (Japan), July.10-12(2003).
- [50] S. Tarucha:Manipulation of Electron Spin and Nuclear Spin in Double Quantum Dot System,The 15th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-15), Nara (Japan),July.14-18(2003).
- [51] S.Tarucha:Manipulation of Spin Effects in Quantum Dot Structures, CREST & QNN '03 Joint Int. Workshop, Awaji (Japan), July.21-23(2003).
- [52] S. Tarucha: Control of Electron Spin in Quantum Dots Current status and prospects of technologies, Spintech 2 Int. Conf. and School (Brugge, 2003.8.4-8)
- [53] S. Tarucha: Manipulation of Electron Spin and Nuclear Spin in Semiconductor Quantum Dots, 2nd Int. Workshop on Quantum Dots for Quantum Computing and classical Size Effect Circuits (Univ. of Notre Dame, 2003.8.7-9)
- [54] S.Tarucha: Fabrication, Transport Properties and Interaction Effects of Quantum Wires, ISSP Int. Workshop, Int. Summer School for Young Researchers on "Quantum Transport in Mesoscopic Scale & Low Dimensions",ISSP Kashiwa, Univ. Tokyo(Japan),Aug.13-21(2003).
- [55] K. Ono, S. Tarucha: Nuclear spin dependent transport in quantum dots, 2003 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM 2003), Tokyo (Japan), Aug. 15 (2003).
- [56] S. Tarucha: Manipulation of Electron Spin and Nuclear Spin in Double Quantum Dot System, "Heraeus-Seminar: Correlation, Coherence and Spin Effect in Simple and Complex Quantum Dot Systems" (Bad Honnef, 2003.10.23-25)
- [57] S. Tarucha: "Spin Manipulation and Spin Qubits with Quantum Dots" Photonics and Spintronics in Semiconductor Nanostructures towards Quantum Information Processing (Kyoto, 2003.11.2-4)
- [58] S. Tarucha: Electron Spins and Qubits with Semiconductor Quantum Dots, "Int. Conf. On Quantum Information 2003 -mathematical, physical engineering and industrial aspects- (ICQI03)" (Kyoto, 2003.11.5-7)
- [59] S. Tarucha: Spin Effects in Semiconductors Quantum Dots, Int. Symp. On Quantum Dots and Photonic Crystals 2003 (Komaba, 2003.11.17-18)
- [60] S. Tarucha: Control of Electron and Nuclear Spin Coupling in Double Quantum Dot, "6th JAPAN-SWEDEN JOINT QNANO WORKSHOP" (Sigtuna , 2003.12.15-16)
- [61] S. Tarucha: Electrical Control of Hyperfine Coupling in Quantum Dots : Coherence of Electron Spin and Nuclear Spin, "Solid State Quantum Information Processing Conf." (Amsterdam, 2003.12.15-18)
- [62] K. Ono: Nuclear Spin Manipulation in Quantum Dots, Condensed Matter Physics: Spins in Nanostructures: From Atoms and Quantum Dots to

- Magnets, Winter 2004 Workshops, Aspen (USA), Jan. 4-10 (2004).
- [63] S. Tarucha: Spin Qubits with Quantum Dots, Japan German Colloquium 2004 on Quantum Optics, organised by JSPS and MPG, (Wildbad Kreuth, 2004.2.9-12)
- [64] S.Tarucha: The Tunable Kondo effect in quantum dots, Second Quantum Transport Nano-Hana Int. Workshop, Chiba University, March. 24 (2004).
- (国内会議)
- 一般講演
- [65] 樽茶清悟:(A03 スピントロニクス量子操作)半導体量子ドットの電子スピンと核スピン制御、文部科学賞科学研究費補助金 特定領域研究「半導体ナノスピントロニクス」平成15年度研究会プログラム(東京大学弥生講堂、2003年6月10-11日)
- [66] 小寺哲夫, W.G.van der Wiel, 大野圭司, 佐々木智, 樽茶清悟: 数電子2重量子ドットの高周波操作、日本物理学会2003年秋季大会(岡山大学、2003年9月22日)
- [67] 天羽真一, D.G.Austing, 西義史, 佐々木智, 都倉康弘, 大野圭司, 樽茶清悟: 半導体人工分子の高スピン状態、日本物理学会2003年秋季大会(岡山大学、2003年9月22日)
- [68] 太田剛, 横山直樹: 一組の自己形成 InAs 強結合量子ドットの電子輸送特性、日本物理学会2003年秋季大会(岡山大学、2003年9月22日)
- [69] 羽田野剛司, Michael Stopa, 山口智弘, 太田剛, 山田和正, 樽茶清悟: 並列結合縦型ダブルドットの輸送特性、日本物理学会2003年秋季大会(岡山大学、2003年9月22日)
- [70] 山田和正, M.Stopa, 山口智弘, 羽田野剛司, 樽茶清悟: 2次元電子ガスと横に結合した縦型ドットの輸送特性 II、日本物理学会2003年秋季大会(岡山大学、2003年9月22日)
- [71] 井下猛, 樽茶清悟: 2重量子ドットにおける電子-核相互作用とトンネル電流不安定性 (II)、日本物理学会2003年秋季大会(岡山大学、2003年9月22日)
- [72] 大野圭司, 樽茶清悟: スピンロケード状態下の量子ドットにおける核スピン制御、日本物理学会2003年秋季大会(岡山大学、2003年9月22日)
- [73] 山口智弘, 大野圭司, 樽茶清悟, 上村崇史, 松本和彦: 電極上に熱 CVD 成長したカーボンナノチューブの低温伝導特性、日本物理学会2003年秋季大会(岡山大学、2003年9月23日)
- [74] K.Ono and S.Tarucha: Spin and nuclear spin dependent transport in quantum dots, CREST 終了シンポジウム (コクヨホール品川、2003年10月31日)
- [75] 山口晋平, 大野圭司, 樽茶清悟: 導体二重量子ドットにおける核スピンのコヒーレント制御、日本物理学会第59回年次大会(九州大学、2004年3月29日)
- [76] 山口智弘, 大野圭司, 樽茶清悟, 上村崇史, 松本和彦: CVD 法により成長したサスペンデッドカーボンナノチューブの低温伝導特性、日本物理学会第59回年次大会(九州大学、2004年3月29日)
- [77] 佐藤俊彦, 樽茶清悟, 宮澤俊之, 中田義昭, 臼杵達哉, 高津求, 横山直樹: 独自己形成 InAs 量子ドットのトンネルスペクトロスコピー、日本物理学会第59回年次大会(九州大学、2004年3月30日)
- [78] 小寺哲夫, 佐々木智, W.G. van der Wiel, 山田和正, 佐藤俊彦, 丸山達朗, 太田剛, 樽茶清悟: 縦型横結合直列ドットのスタビリティダイアグラムとスピン効果、日本物理学会第59回年次大会(九州大学、2004年3月30日)
- [79] 羽田野剛司, M. Stopa, 山口智弘, 太田剛, 山田和正, 樽茶清悟: 縦型並列ダブルドットのトンネル結合特性、日本物理学会第59回年次大会(九州大学、2004年3月30日)
- [80] 西義史, 山田和正, 大野圭司, 樽茶清悟: 半導体人工原子の励起スペクトルにおけるゼーマン効果、日本物理学会第59回年次大会(九州大学、2004年3月30日)
- 招待講演
- [81] 樽茶清悟: 量子コンピュータを作る、公開講演会「物理学とは何だろうか量子コンピュータ~量子物理学の新たな挑戦、日本物理学会名古屋支部(名古屋大学シンポジオンホール、2003年5月24日)
- [82] 樽茶清悟: 量子ドットのスピンと多体効果、物性研談話会(東大物性研、2003年4月14日)
- [83] 樽茶清悟: 「量子計算・量子情報処理」量子ドットの電子スピン・核スピン制御、「物質科学とシステムデザイン」量子スピントロニクス分科学及び有機・分子スピントロニクス分科学合同分科学、高等研特別研究・日本学術振興会研究開発専門協会(国際高等研究所、2003年6月20-21日)
- [84] 大野圭司, “量子ドット中の電子スピン・核スピン制御”, 文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「半導体ナノスピントロニクス」平成15年度成果報告会、(国際高等研究所、京都、2004.1.27-28)
- [85] 樽茶清悟, “半導体量子ドットの電子スピン・核スピン結合制御”, 東京工業大学21世紀COEプログラム「量子ナノ物理学」第1回公開シンポジウム(五反田ゆうぼうと 日本、2004.3.17-18)
- [86] 大野圭司: 量子ドットにおける電子スピン・核スピン制御、日本物理学会第59回年次大会(九州大学、2004年3月28日)
- (セミナー)
- [87] S. Tarucha: Spin Effects and Spin Qubits in Quantum Dot Systems, Colloquium at the Max-Planck-Institute for Solid-State Research, Max-Planck-Institute for Metal Research, and Physics Department of the University of Stuttgart (Stuttgart, 2003.10.21)

4.2 藤森研究室

藤森研究室では、光電子分光、放射光分光等の手法を用いて、強相関電子系の電子物性の研究を行っている。具体的には、遷移金属酸化物、磁性半導体などの複雑物質における金属-絶縁体転移、高温超伝導、巨大磁気抵抗、キャリア誘起磁性、スピン・電荷・軌道秩序などの現象の発現機構の解明をめざしている。実験室光源を用いた測定に加え、高エネルギー加速器研究機構フォトン・ファクトリー、スタンフォード放射光研究所、SPRING-8で放射光を用いた実験を行っている。

4.2.1 高温超伝導

希薄ドープ領域 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ のフェルミ・アークの物性

$\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の不足ドープ領域（ホール濃度 $x \sim 0.1$ ）の超伝導相から希薄ドープ領域（ $x \sim 0.03$ ）の非超伝導金属相にかけて、詳細な角度分解光電子分光をおこなった。運動量 $\mathbf{k} = (\pi, 0)$ 周辺に大きな擬ギャップが開くために、この方向でのフェルミ面はほぼ消失し、ブリルアン域の対角線方向でのみバンドがフェルミ準位を横切る“フェルミ・アーク”現象が観測された。フェルミ・アーク状態の熱力学的性質と伝導性を理解するために、フェルミ準位上での準粒子状態密度の見積もり、ドルーデ・モデルに基づく伝導度の評価を行った。伝導に関与する電子数はフェルミ面の体積よりはるかに小さく、ホールドープ量 x 程度であること、にもかかわらずフェルミ・アークを作るバンドはフェルミ液体的な準粒子として物性が理解できることを示した。

La系超伝導体とBi系超伝導体の電子構造の相違

ホール濃度 0.1 以下の希薄ドープ領域にある Bi 系銅酸化物の電子構造を、角度分解光電子分光により調べ、同じホール濃度をもつ $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ と比較した。Bi 系超伝導体は La 系超伝導体比べて母体絶縁体のバンド分散が大きいこと、運動量 $\mathbf{k} = (\pi, 0)$ 付近の“フラット・バンド”の位置が深いことを見出した。これらのことと、ドーピングによるケミカル・ポテンシャルのシフトが大きいこと、 $\mathbf{k} = (\pi, \pi)$ を中心としたフェルミ面が正方形に近いという Bi 系超伝導体の特徴も併せて、Bi 系超伝導体では 1 バンド・モデルにおける次 nearest Cu 間の移動積分 t' が大きいと結論した。 t' が大きさと超伝導臨界温度の相関が半経験的あるいは理論的に提唱されているので、 t' の大きさを決める要因を今後明らかにしていく。

希薄ドープ $\text{Bi}_2\text{La}_x\text{Sr}_{2-x}\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ におけるノード方向の準粒子

ブリルアン域の対角線方向（ d 波超伝導オーダー・パラメータのノード方向）には超伝導ギャップや擬ギャップが開かず、この方向のフェルミ面上の準粒子が CuO_2 面内の常伝導を担っている。したがって、希薄ドープ領域で金属性伝導が保たれるか局在的振る舞いを示すかは、ノード方向の準粒子の性質によって異なるはずである。我々は、Sr サイトを La で置換した Bi 系超伝導体の希薄ドープ試料のノード方向の準粒子を角度分解光電子分光で精密に調べ、ノード方向の準粒子の運動量幅とキャリアの局在・非局在に相関があることを見出した。さらに、局在を示すときには、ノード方向の準粒子にギャップが開くことも観測した。

希薄ドープ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ におけるフェルミ・アーク

ホール濃度数%の絶縁体から非超伝導金属領域にある Y 系銅酸化物の電子構造を角度積分光電子分光により調べた。Y 系超伝導体は、これまで表面準位のためにフェルミ面マッピングが困難であったが、最低ドープ量の試料で表面準位が消えること、比較的高いエネルギーの光を使うことで表面準位が消えることがわかった。その結果、La 系と同様なフェルミ・アークが観測された。しかし、La 系に見られた、フェルミ準位近傍の準粒子と下部はバード・バンドの名残からなる“2 成分電子構造”は酸素のバンドに隠れて観測されなかった。

過剰酸素によりホール・ドープされた $\text{La}_2\text{CuO}_{4+y}$ の電子構造

La→Sr 置換の代わりに LaO 層に過剰酸素を導入することによってホールをドープした $\text{La}_2\text{CuO}_{4+y}$ （ホール濃度 0.12）の電子状態を、高分解能光電子分光で測定した。フェルミ準位付近の状態密度の温度変化から擬ギャップの大きさを見積もり、以前に行われた $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ （ $x = 0.15$ ）の結果と比較したところ、擬ギャップは 50%ほど大きく見積もられた。角度分解光電子分光による $\mathbf{k} = (\pi, 0)$ 付近のフラット・バンドの位置にも、両者に同様の差が見られた。

4.2.2 強相関遷移金属酸化物

VO_2 単結晶および薄膜の金属-絶縁体転移

約 320 K で一次の金属-絶縁体を示す VO_2 の電子状態の温度変化を詳しく調べた。パルス・レーザー蒸着法で作製した薄膜試料を用いることによって、従

来にない詳細な温度変化の測定に成功した。絶縁相では、非コヒーレント・ピークが大きな温度変化を示し、強い電子-格子相互作用によるとして説明することができた。絶縁体 → 金属転移に伴い、非コヒーレント・ピークからコヒーレント・ピークにスペクトル強度の移動が見られた。金属相でも非コヒーレント構造は観測され、そのスペクトル形状から、自己エネルギーの運動量依存性が重要であることを見出した。

高圧下で超伝導を示す $\beta\text{-Na}_{0.33}\text{V}_2\text{O}_5$

1次元パイポラロン伝導系と考えられていた $\text{Na}_{0.33}\text{V}_2\text{O}_5$ において、最近、電荷整列による金属-絶縁体転移が見つかり、さらに高圧下で超伝導が発見された。この物質の電子状態を角度分解光電子分光により調べた。フェルミ準位を横切るバンドは大きな速度で分散し、フェルミ準位に近づくにしたがって強度が急速に減少することが見出された。これをポラロン効果によると解釈した。また、スペクトルの運動量空間の構造から、Naの導入により V_2O_5 ドープされた電子は結晶中のジグザグ鎖と梯子の両方に入っていることが示唆された。

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

パルス・レーザー蒸着法で作成した $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ の単結晶薄膜試料を *in situ* で放射光軟 X 線を用いた光電子分光を測定を行い、ホール・ドーピングおよび温度変化に伴う電子構造の変化を高精度で調べた。ホール・ドーピングにより、母体の反強磁性絶縁体 LaFeO_3 のバンドギャップ中新しい状態が現れ、成長していくのが見出された。また、すべてのドーピング領域で、状態密度がフェルミ準位でギャップあるいは擬ギャップをつくっていた。さらに角度分解光電子分光を行い、バンド構造を反強磁性母体 LaFeO_3 との類推で解釈できることがわかった。以上の結果とスペクトルの温度変化に基づき、 $x = 0.67$ で観測されている電荷・スピン整列が、 $x = 0.67$ に限らず広い組成領域で局所的に起こっていることを提唱した。

バンド幅制御系 $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_3$ におけるスペクトル強度の移動

典型的なバンド幅制御系 $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{VO}_3$ においてコヒーレント・ピークと非コヒーレント・ピークの間にスペクトル強度の移動がないという主張が、いわゆるバルク敏感光電子分光の実験に基づいてなされている。我々は、表面構造のよく制御されたパルス・レーザー蒸着作製のバンド幅制御系 $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_3$ の光電子分光を行い、表面成分の補正を行った後にコヒーレント・ピークと非コヒーレント構造の間のスペクトル強度を観測した。

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

LaSrMnO_4 に 50%ホールをドープした物質では、CE型と呼ばれる反強磁性秩序を伴う電荷整列が起こることが知られており、同時に起こる軌道秩序のモデルについてもコンセンサスが得られている。我々は、軟 X 線吸収の偏光依存性測定を行い、その結果から、従来とは異なる新しい軌道秩序モデルを提唱した。Hartree-Fock 近似のバンド計算も行い、ある格子変形のもとで実際に新しい軌道秩序が起こることを示した。

4.2.3 磁性半導体

室温強磁性体 $\text{ZnGeP}_2\text{:Mn}$ の形成過程

3元系半導体 CdGeP_2 に Mn を蒸着し熱拡散させた試料が室温で強磁性を示し、話題を呼んでいる。これに類似の、 ZnGeP_2 に Mn を蒸着した系の光電子分光をその場観察し、室温での強磁性も確認した。強磁性を示す物質が、他の磁性半導体と類似の $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{GeP}_2$ であることが示された。キャリアの起源としては、Mnの一部が P を置換することによると提唱した。

GaN に Mn をドープした系

室温での強磁性発現の報告がある $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{N}$ の電子状態を、MBEにより作製した常磁性試料について共鳴光電子分光、内殻光電子分光、内殻吸収分光測定により調べた。内殻吸収スペクトルの形状から、Mn は 2 価イオンとなり Ga を置換していることがわかった。しかし、置換により放出されたホールは補償され、試料は絶縁体に留まっていると考えられる。価電子帯の Mn 3d 部分状態密度と Mn 2p 内殻を MnN_4 クラスタ・モデルを用いて解析し、Mn の局在スピンと GaN 母体の電子のスピンが非常に強い交換相互作用で結合していることがわかった。したがって、ドープされたホールの補償を防ぐ方法が見出されれば、高いキュリー温度を持つ強磁性半導体が得られると考えられる。

ZnO をベースにした希薄磁性半導体 $\text{Zn}_{1-x}\text{T}_x\text{O}$

($T = \text{Co}, \text{V}$)

室温を超えるキュリー点を示す希薄磁性半導体として最近注目されている $\text{Zn}_{1-x}\text{T}_x\text{O}$ ($T = \text{Co}, \text{V}$) の電子状態を軟 X 線吸収分光、内殻吸収磁気円二色性および光電子分光を組み合わせて調べた。これらの物質は磁化が小さく、不純物相が強磁性を担っているという疑いがある。内殻吸収分光により試料全体の Co, V の価数とスピン状態を調べ、内殻吸収磁気円二色性で実際に強磁性を担っている Co, V 原子の価数とスピン状態を調べた結果、両者は一致し、

強磁性が不純物相によるものではないことが示された。Zn_{1-x}Co_xO については、クラスター・モデルによるスペクトルの解析により、電子構造パラメータを求めた。

4.2.4 ナノ物質・ナノ構造

DNA の光電子分光

Si 基板上に合成 DNA 分子をネットワークに分散させた試料の光電子スペクトルを測定し、DNA 分子の状態密度と半導体 - DNA 界面におけるバンドダイアグラムを得た。DNA 分子を厚く堆積させた試料との比較から、基板の寄与を差し引くことができた。このようにして求めた DNA 分子の光電子スペクトルは、第一原理計算による状態密度の計算値とよい一致を示した。Si 基板のフェルミ準位は、DNA のバンドギャップの中間に位置することがわかった。

酸化物 *p-n* 接合 NiO/ZnO の電荷空乏層の観察

p 型半導体である NiO の (111) 面と *n* 型半導体である ZnO の (0001) 面のエピタキシャル接合に形成される電荷空乏層内の電位分布を、イオン・スパッタによるエッチングと内殻光電子分光を組み合わせて測定した。空乏層の厚みは 10 nm のオーダーで、通常の光電子分光では観測不可能であるが、原子層単位でエッチングを行い表面の電位の変化を測定することにより、エッチング前に存在していた電位分布を検証した。

<受賞>

- [1] 和達大樹: 第 17 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム 学生会員ポスター発表賞 (2004 年 1 月)

<報文>

(原著論文)

- [2] D. D. Sarma, S. R. Krishnakumar, E. Weschke, C. Schüsler-Langeheine, C. Mazumdar, L. Kilian, G. Kaindl, K. Mamiya, S.-i. Fujimori, A. Fujimori and T. Miyadai: Metal-Insulator Cross-Over at the Surface of NiS₂, Phys. Rev. B **67** (2003) 155112-1-5.
- [3] N. Harima, A. Fujimori, T. Sugaya and I. Terasaki: Chemical Potential Shift in Bi₂Sr₂Ca_{1-x}R_xCu₂O_{8+y} (R = Pr, Er), Phys. Rev. B **67** (2003) 172501-1-4; cond-mat/0203154.
- [4] T. Koide, H. Miyauchi, T. Shidara, A. Fujimori, T. Katayama, S. Yuasa, and Y. Suzuki: Koide *et al.* Reply, Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 149704-1-4.
- [5] X. J. Zhou, T. Yoshida, A. Lanzara, P. V. Bogdanov, S. A. Kellar, K. M. Shen, W. L. Yang, F. Ronning, T. Sasagawa, T. Kakeshita, T. Noda, H. Eisaki, S. Uchida, C. T. Lin, F. Zhou, J. W. Xiong, W. X. Di, Z. X. Zhao, A. Fujimori, Z. Hussain and Z.-X. Shen: Universal Nodal Fermi Velocity, Nature **423** (2003) 397-398.
- [6] T. Yoshida, X. J. Zhou, T. Sasagawa, W. L. Yang, P. V. Bogdanov, A. Lanzara, Z. Hussain, T. Mizokawa, A. Fujimori, H. Eisaki, Z.-X. Shen, T. Kakeshita and S. Uchida: Nodal Metallic Behavior of Lightly-Doped La_{2-x}Sr_xCuO₄ with a Fermi Surface Forming an Arc, Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 027001-1-4; cond-mat/0206469.
- [7] J.-Y. Son, T. Mizokawa and A. Fujimori, K. Terao, H. Yamada, H. Wada and M. Shiga: Photoemission Study of the Laves-phase Compounds YMn₂ and Y_{0.97}Sc_{0.03}Mn₂, Solid State Commun. **127** (2003) 237-241.
- [8] Y. Ishida, D. D. Sarma, K. Okazaki, J. Okabayashi, J. I. Hwang, H. Ott, A. Fujimori, G. A. Medvedkin T. Ishibashi and K. Sato: *In Situ* Photoemission Study of the Room-Temperature Ferromagnet ZnGeP₂:Mn, Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 107202-1-4; cond-mat/0304109.
- [9] J.-Y. Son, K. Okazaki, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Kanomata and R. Note: Photoemission Study of the Itinerant Helimagnet Fe_xCo_{1-x}Si, Phys. Rev. B **68** (2003) 134447-1-4.
- [10] J. Okamoto, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Takeda, R. Kanno, F. Ishii and T. Oguchi: Photoemission Study of the Electronic Structure and the Metal-Semiconductor Transition in the Pyrochlore-Type Ti₂Ru₂O₇, Phys. Rev. B **69** (2004) 035115-1-6.
- [11] S. Nawai, K. Okazaki, T. Mizokawa, A. Fujimori, K. Hondou, Y. Fujiwara and K. Iio, M. Usuda, and N. Hamada: Electronic Structure of the Kagomé-Lattice Compound Rb₂Ni₃S₄, Phys. Rev. B **69** (2004) 045103-1-6.
- [12] D. J. Huang, W. B. Wu, G. Y. Guo, H.-J. Lin, T. Y. Hou, C. F. Chang, C. T. Chen, A. Fujimori, T. Kimura, H.B. Huang, A. Tanaka, and T. Jo: Orbital Ordering in La_{0.5}Sr_{1.5}MnO₄ Studied by Soft X-Ray Linear Dichroism, Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 087202-1-4; cond-mat/0312690.
- [13] K. M. Shen, T. Yoshida, D. H. Lu, F. Ronning, N. P. Armitage, W. S. Lee, X. J. Zhou, A. Damascelli, D. L. Feng, N. J. C. Ingle, H. Eisaki, Y. Kohsaka, H. Takagi, T. Kakeshita, S. Uchida, P.K. Mang, M. Greven, Y. Onose, Y. Taguchi, Y. Tokura, Seiki Komiya Yoichi Ando M. Azuma M. Takano A. Fujimori and Z.-X. Shen: Fully Gapped Single-Particle Excitations in Lightly Doped Cuprates, Phys. Rev. B **69** (2004) 054503-1-5; cond-mat/0312270
- [14] O. Rader, C. Pampuch, A. M. Shikin, W. Gudat, J. Okabayashi, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Hayashi, M. Tanaka, A. Tanaka and A. Kimura: Resonant Photoemission of Ga_{1-x}Mn_xAs at the Mn *L*-Edge, Phys. Rev. B **69** (2004) 075202-1-7.

- [15] J. Okabayashi, K. Ono, M. Mizuguchi, M. Oshima, T. Mizokawa, A. Fujimori, S. Sen Gupta, D. D. Sarma, M. Yuri, C. T. Chen, T. Fukumura and M. Kawasaki: X-Ray Absorption Spectroscopy of Transition-Metal-Doped Diluted Magnetic Semiconductors $Zn_{1-x}M_xO$, *J. Appl. Phys.* **95** (2004) 3573-3575.
- [16] K. Okazaki, A. Fujimori, T. Yamauchi and Y. Ueda: Electronic Structure of Quasi-One-Dimensional Superconductor $Na_{0.33}V_2O_5$, *Phys. Rev. B* **69** (2004) 140506-1-4; cond-mat/0308368.
- [17] K. Okazaki, H. Wadati, A. Fujimori, M. Onoda and Y. Muraoka: Photoemission Study of the Metal-Insulator Transition in $VO_2/TiO_2(001)$: Evidence for Strong Electron-Electron and Electron-Phonon Interaction, *Phys. Rev. B* **69** (2004) 165104-1-7; cond-mat/0312112.
- [18] J. Okabayashi, K. Tanaka, M. Hashimoto, A. Fujimori, K. Ono, M. Okusawa and T. Komatsubara: Ferromagnetic Transition in MnP Studied by High-Resolution Photoemission Spectroscopy, *Phys. Rev. B* **69** (2004) 132411-1-4
- [19] X. J. Zhou, T. Yoshida, D.-H. Lee, W. L. Yang, V. Brouet, F. Zhou, W. X. Ti, J.W. Xiong, Z.X. Zhao, T. Sasagawa, T. Kakeshita, H. Eisaki, S. Uchida, A. Fujimori, Z. Hussain and Z.-X. Shen: The Dichotomy between Nodal and Antinodal Quasiparticles in Underdoped $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ Superconductors, *Phys. Rev. Lett.*, in press; cond-mat/0403181.
- [20] A. Ino, T. Okane, S.-i. Fujimori, A. Fujimori, T. Mizokawa, Y. Yasui, T. Nishikawa, and M. Sato: Evolution of the Electronic Structure from Electron-Doped to Hole-Doped States in the Two-Dimensional Mott-Hubbard System $La_{1.17-x}Pb_xVS_{3.17}$, *Phys. Rev. B*, in press.
- (会議抄録)
- [21] S.-i. Fujimori, J. Okamoto, K. Mamiya, T. Okane, Y. Muramatsu, A. Fujimori, T. Narimura, K. Kobayashi, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, H. Harimad, D. Aoki, S. Ikeda, H. Shishido, Y. Tokiwa, Y. Haga, and Y. Onuki: Photoemission Study of $CeMIn_5$ ($M = Rh, Ir$): Nearly Localized Nature of f Electrons, *ibid*; *Physica B* **329-333**, 547 (2003).
- [22] T. Yoshida, X. J. Zhou, T. Sasagawa, W. L. Yang, P. V. Bogdanov, A. Lanzara, Z. Hussain, T. Mizokawa, A. Fujimori, H. Eisaki, Z.-X. Shen, T. Kakeshita, and S. Uchida: ARPES Study of Lightly-Doped $La_{2-x}Sr_xCuO_4$, *Proceedings of the 23rd International Conference on Low Temperature Physics*; *Physica C* **388-389** (2003) 303-304.
- [23] T. Okane, S.-i. Fujimori, K. Mamiya, J. Okamoto, Y. Muramatsu, A. Fujimori, Y. Nagamoto and T. Koyanagi: Photoemission Spectroscopy of the Filled-Skutterdite Compound $YbFe_4Sb_{12}$, in *Proceedings of 3rd International Symposium on Advanced Science Research (ASR-2002)*; *J. Phys. Cond. Mat.* **15** (2003) S2197-S2200.
- [24] K. Sato, G. A. Medvedkin, T. Ishibashi, S. Mitani, K. Takanashi, Y. Ishida, D. D. Sarma, J. Okabayashi, A. Fujimori, T. Kamatani and H. Akai: Novel Mn-Doped Chalcopyrites, *Proceedings of 13-th International Conference on Ternary and Mutinary Compounds (ICTMC13)*; *J. Phys. Chem. Solids* **64** (2003) 1461-1468.
- [25] T. Okane, J. Okamoto, K. Mamiya, S.-i. Fujimori, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Fujimori and A. Ochiai: X-Ray Magnetic Circular Dichroism at the $U N_{4,5}$ Edges of Uranium Monochalcogenides US, USe and UTe, *Proceedings of Polarised Neutrons and Synchrotron X-rays for Magnetsim*, *Physica B* **345** (2004) 221-224.
- [26] W. B. Wu, D. J. Huang, G. Y. Guo, H.-J. Lin, T. Y. Hou, C. F. Chang, C. T. Chen, A. Fujimori, T. Kimura, H. B. Huang, A. Tanaka and T. Jo: Orbital Polarization of $LaSrMnO_4$ Studied by Soft X-Ray Linear Dichroism, *Proceedings of 9-th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure (ICESS-9)*; *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.*, in press.
- [27] J. Okabayashi, M. Mizuguchi, K. Ono, M. Oshima, A. Fujimori, M. Yuri, C.T. Chen, and H. Akinaga: Density Dependence of Zinc-Blende MnAs Dots Studied by X-Ray Absorption Spectroscopy and X-Ray Magnetic Circular Dichroism, *Proceedings of International Conference on Magnetism (ICM)*; *J. Mag. Mag. Mater.*, in press.
- [28] T. Okane, S.-i. Fujimori, K. Mamiya, J. Okamoto, Y. Muramatsu, A. Fujimori, H. Suzuki, T. Matsumoto, T. Furubayashi, M. Isobe and S. Nagatad: High-Resolution Soft X-Ray Photoemission Spectroscopy of Spinel-Type Compound $CuIr_2S_4$, *ibid*, in press.
- [29] J. Okamoto, K. Mamiya, S.-i. Fujimori, T. Okane, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Fujimori, S. Ishiwata and M. Takano: Magnetic Circular X-ray Dichroism Study of Paramagnetic and Anti-Ferromagnetic States in $SrFeO_3$ Using a 10-T Superconducting Magnet, *Proceedings of 8-th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2003)*, AIP Conference Proceedings, in press.
- [30] T. Yoshida, X.J. Zhou, H. Yagi, D. H. Lu, K. Tanaka, A. Fujimori, Z. Hussain, Z.-X. Shen, T. Kakeshita, H. Eisaki, S. Uchida, K. Segawa, A.N. Lavrov and Y. Ando: Thermodynamic and Transport Properties of Underdoped Cuprates from ARPES Data, *Proceedings of International Symposium on Synchrotron Radiation Research for Spin and Electronic States in d and f Electron Systems (SRSES2003)*; *Physica B*, in press; cond-mat/0401565.

- [31] K. Tanaka, T. Yoshida, A. Fujimori, D. H. Lu, Z.-X. Shen, X.-J. Zhou, H. Eisaki, Z. Hussain, S. Uchida, Y. Aiurad, K. Onoe, T. Sugaya, T. Mizuno and I. Terasaki: Effects of Next-Nearest-Neighbor Hopping t' on the Electronic Structure of Cuprates, *ibid*; Physica B, in press.
- [32] Y. Ishida, J.I. Hwang, M. Kobayashi, A. Fujimori, H. Saeki, H. Tabata and T. Kawai: Photoemission Study of the Ferromagnetic Diluted Magnetic Semiconductor $Zn_{1-x}V_xO$, *ibid*; Physica B, in press.
- [33] A. Ino, M. Higashiguchi, K. Yamazaki, T. Yamasaki, T. Narimura, K. Kobayashi, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, T. Yoshida, A. Fujimori, T. Kakeshita, S. Uchida, S. Adachi, S. Tajima: ARPES Study of T^* -Cuprate Superconductor $SmLa_{0.85}Sr_{0.15}CuO_4$, *ibid*; Physica B, in press.
- [34] T. Okane, J. Okamoto, K. Mamiya, S.-i. Fujimori, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Fujimori, A. Ochiai, Y. Haga, E. Yamamoto and Y. Onuki: X-Ray Absorption Magnetic Circular Dichroism at the U $N_{4,5}$ Edges of Uranium Chalcogenides UX_c ($X_c = S, Se, Te$) and Ferromagnetic Superconductor UGe_2 , *ibid*; Physica B, in press.
- (綜説, 解説, その他)
- [35] 藤森淳: 第1回日本-韓国-台湾ワークショップ「強相関物質とナノ構造のスペクトロスコーピー」報告 - 日韓から日韓台へ, 日本物理学会誌 **59** (2004) 181-182.
- [36] T. Mizokawa, A. Fujimori, J. Okabayashi and O. Rader: Photoemission Spectroscopy of Diluted Mn in and on Solids, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.*, in press.
- (学位論文)
- [37] 和達大樹: *In situ* Photoemission Study of $La_{1-x}Sr_xFeO_3$ Epitaxial Thin Films (修士論文)
- [38] 黄鐘日: High-Energy Spectroscopic Study of the III-V Diluted Magnetic Semiconductor $Ga_{1-x}Mn_xN$ (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
- [39] A. Fujimori, Electronic Structure of Lightly-Doped Cuprates LSCO, BSCCO and YBCO, *NEDO Meeting on Self-Organized Electrons* (Shanghai, April 2003)
- [40] X. J. Zhou, T. Yoshida, A. Lanzara, P. V. Bogdanov, S. A. Kellar, K. M. Shen, W. L. Yang, F. Ronning, T. Sasagawa, T. Kakeshita, T. Noda, H. Eisaki, S. Uchida, C. T. Lin, F. Zhou, J. W. Xiong, W. X. Di, Z. X. Zhao, A. Fujimori, Z. Hussain and Z.-X. Shen: High Temperature Superconductors: Universal Nodal Fermi Velocity, *7th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors ($M^2S-HTSC-VII$)* (Rio de Janeiro, May 2003)
- [41] J. Okabayashi, M. Mizuguchi, K. Ono, M. Oshima, A. Fujimori, M. Yuri, C.T. Chen, and H. Akinaga: Density Dependence of Zinc-Blende MnAs Dots Studied by X-Ray Absorption Spectroscopy and X-Ray Magnetic Circular Dichroism, *International Conference on Magnetism 2003 (ICM 2003)* (Rome, August 2003)
- [42] T. Okane, S.-i. Fujimori, K. Mamiya, J. Okamoto, Y. Muramatsu, A. Fujimori, H. Suzuki, T. Matsumoto, T. Furubayashi, M. Isobe, and S. Nagata: X-Ray Absorption and Photoemission Studies of Spinel Compound $CuIr_2S_4$, *ibid*
- [43] D. J. Huang, W. B. Wu, G. Y. Guo, H.-J. Lin, T. Y. Hou, C. F. Chang, C. T. Chen, A. Fujimori, T. Kimura, H. B. Huang, A. Tanaka, and T. Jo: Nature of Orbital Ordering in $La_{0.5}Sr_{1.5}MnO_4$ Studied by Soft X-Ray Linear Dichroism, *International Workshop on Strongly Correlated Transition Metal Compounds* (Cologne, August 2003)
- [44] T. Okane, J. Okamoto, K. Mamiya, S.-i. Fujimori, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Fujimori and A. Ochiai: X-Ray Magnetic Circular Dichroism at the U $N_{4,5}$ Edges of Uranium Monochalcogenides US, USe and UTe, *Polarised Neutrons and Synchrotron X-rays for Magnetsim* (Vennice, August 2003)
- [45] J. Okamoto, K. Mamiya, S.-i. Fujimori, T. Okane, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Fujimori, S. Ishiwata and M. Takano: Magnetic Circular X-ray Dichroism Study of Paramagnetic and Anti-Ferromagnetic States in $SrFeO_3$ Using a 10-T Superconducting Magnet, *8-th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation* (San Francisco, August 2003)
- [46] J.I. Hwang, Y. Ishida, H. Yagi, H. Ott, A. Fujimori, H. Owa, T. Kondo and H. MuneKata: Photoemission Study of Diluted Magnetic Semiconductor $Ga_{1-x}Mn_xN$, *4th Korea-Japan Workshop on Strongly Correlated Systems and their Nanostructures* (Nagano, September 2003).
- [47] Y. Ishida, D.D. Sarma, K.Okazaki, J.I. Hwang, H. Ott, J. Okabayashi, A. Fujimori, G.A. Medvedkin, T. Ishibashi, K. Sato: *In situ* Photoemission Study of the Room Temperature Ferromagnet $ZnGeP_2:Mn$, *ibid*
- [48] D.J. Huang, W B. Wu, G.Y. Guo, H.-J. Lin, T. Y. Hou, C.F. Chang, C.T. Chen, A. Fujimori, T. Kimura, H.B. Huang, A. Tanaka, and T. Jo: Nature of Orbital Ordering in $La_{0.5}Sr_{1.5}MnO_4$ Studied by Soft X-Ray Linear Dichroism, *ibid*.

- [49] S.-i. Fujimori, J. Okamoto, K. Mamiya, T. Okane, Y. Muramatu, A. Fujimori, T. Narimura, K. Kobayashi, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, H. Yamagami, D. Aoki, Y. Tokiwa, S. Ikeda, H. Shishido, E. Yamamoto, T. Matsuda, Y. Haga, and Y. Onuki: High-Resolution Photoemission Study of $CeTIn_5$ ($T = Rh, Ir$) and $UTGa_5$ ($T = Fe, Pt$), *International Symposium on Synchrotron Radiation Research for Spin and Electronic States in d and f Electron Systems (SRSES2003)* (Hiroshima University, November 2003)
- [50] T. Okane, J. Okamoto, K. Mamiya S.-i. Fujimori, Y. Satoh, Y. Muramatsu, A. Fujimori, A. Ochiai, Y. Haga, E. Yamamoto and Y. Onuki: X-Ray Absorption Magnetic Circular Dichroism at the $U_{N_{4,5}}$ Edges of Uranium Compounds, *ibid*
- [51] Y. Ishida, J.I. Hwang, M. Kobayashi, K. Mamiya, J. Okamoto, A. Tanaka, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Fujimori, H. Saeki, H. Tabata and T. Kawai: High Energy Spectroscopy Study of the Ferromagnetic Diluted Magnetic Semiconductor $Zn_{1-x}V_xO_4$, *ibid*
- [52] K. Tanaka, T. Yoshida, A. Fujimori, D. H. Lu, Z.-X. Shen, X.-J. Zhou, H. Eisaki, Z. Hussain, S. Uchida, Y. Aiura, K. Ono, T. Sugaya, T. Mizuno, and I. Terasaki: Effects of Next-Nearest-Neighbor Hopping t' on the Electronic Structure of Cuprates, *ibid*
- [53] A. Ino, M. Higashiguchi, K. Yamazaki, T. Yamazaki, T. Narimura, K. Kobayashi, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, T. Yoshida, A. Fujimori, Z.-X. Shen, T. Takeshita, S. Uchida, S. Adachi and S. Tajima: ARPES Study of T^* Cuprate Superconductor $SmLa_{0.85}Sr_{0.15}CuO_4$, *ibid*
- 招待講演**
- [54] A. Fujimori, ARPES in Lightly Doped Cuprates: LSCO, BSCCO and YBCO, *7th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors ($M^2S-HTSC-VII$)* (Rio de Janeiro, May 2003)
- [55] G.A. Medvedkin, S.I. Goloshchapov, V.G. Vovodin, K. Sato, T. Ishibashi, S. Mitani, K. Takahashi, Y. Ishida, J. Okabayashi, A. Fujimori, D. D. Sarma, T. Kamatani, H. Akai: Novel Spintronic Materials Based on Ferromagnetic Semiconductor Chalcopyrites, *11th International Symposium on Nanostructures: Physics & Technology* (St. Petersburg, June 2003).
- [56] A. Fujimori: Material Dependence of the Electronic Structure of the CuO_2 Plane from Photoemission, *Electronic Structure of Condensed Matter II* (Ringberg, Germany, June 2003)
- [57] A. Fujimori: Spectroscopic Indication of Next-Nearest-Neighbor Hopping t' and its Correlation with T_c , *The 3rd International Workshop "Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides"* (Sendai, November 2003)
- [58] A. Fujimori: Thermodynamic and Transport Properties of Underdoped Cuprates from ARPES Data, *International Symposium on Synchrotron Radiation Research for Spin and Electronic States in d and f Electron Systems (SRSES2003)* (Hiroshima University, November 2003)
- [59] A. Fujimori, Manifestations of Electron-Phonon Interaction in the Photoemission Spectra of Transition-Metal Oxides, *Workshop: Electron-Phonon Interaction in High- T_c Superconductors Revisited* (CERC, Tsukuba, December 2003)
- [60] A. Fujimori: Photoemission and Magnetic Circular Dichroism Study of Epitaxially Grown Oxide Thin Films, *DST-JSPS Symposium on Techniques in Surface Sciences* (Saha Institute for Nuclear Physics, Calcutta, December 2003)
- [61] A. Fujimori: Photoemission and Magnetic Circular Dichroism Study of Diluted Magnetic Semiconductors, *Sweden-Japan Joint Symposium on "Accelerator Science and Accelerator Based Sciences"* (Tokyo University, January 2004)
- (国内会議)**
- 一般講演**
- [62] 藤森淳: 光電子分光による磁性半導体の物性研究, 科研費特定研究「半導体ナノスピントロニクス」平成15年度研究計画発表会(東京大学, 2003年6月)
- [63] J. I. Hwang, Y. Ishida, H. Ott, H. Yagi, T. Mizokawa, A. Fujimori, H. Owa, T. Kondo and H. Muneke: Resonant Photoemission Study of $Ga_{1-x}Mn_xN$, 第9回「半導体スピン工学の基礎と応用」研究会(東京大学, 2003年6月)
- [64] J. Okabayashi, M. Mizuguchi, K. Ono, M. Oshima, H. Kuramochi, H. Akinaga, H. Shimizu, M. Tanaka, A. Fujimori, M. Yuri and C. T. Chen: Electronic and Magnetic Properties of MnAs-Based Magnetic Nanostructures Studied by X-Ray Absorption Spectroscopy and X-Ray Magnetic Circular Dichroism, 同上
- [65] 小林大介, 組頭広志, 尾嶋正治, 中川直之, 大西剛, Mikk Lippmaa, 和達大樹, 藤森淳, 小野寛太, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: *in situ* 共鳴光電子分光による $La_{0.6}Sr_{0.4}FeO_3/La_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$ 超格子の界面評価, 応用物理学会(福岡大学, 2003年8月)
- [66] 和達大樹, 小林大介, 近松彰, 橋本龍司, 堀場弘司, 組頭広志, 溝川貴司, 藤森淳, 尾嶋正治, Mikk Lippmaa, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: $La_{1-x}Sr_xFeO_3$ 薄膜の *in situ* 光電子分光, 第41回茅コンファレンス「強相関電子酸化物の物性と応用」(八ヶ岳, 2003年8月)
- [67] 田中清尚, 吉田鉄平, 藤森淳, D. H. Lu, Z.-X. Shen, X.-J. Zhou, 永崎洋, Z. Hussain, 内田慎一, 相浦義弘, 小野寛太, 菅谷剛洋, 水野尊人, 藤井武則, 寺崎一郎: 高温超伝導体の電子状態における t' の効果, 同上

- [68] 八木創：希薄ドーブ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の角度分解光電子分光，同上
- [69] 岡本淳，藤森淳，高野幹夫：軟 X 線吸収磁気円二色性による $\text{SrFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ の研究，同上
- [70] 近松彰，和達大樹，小林大介，橋本龍司，組頭広志，尾嶋正治，藤森淳，大西剛，Mikk Lippmaa，小野寛太，川崎雅司，鯉沼秀臣： $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 薄膜の高分能 $\text{Mn}2p-3d$ 共鳴光電子分光：温度依存性，同上
- [71] 組頭広志，小林大介，橋本龍司，近松彰，尾嶋正治，中川直之，大西剛，Mikk Lippmaa，和達大樹，藤森淳，小野寛太，川崎雅司，鯉沼秀臣：共鳴光電子分光による $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{FeO}_3/\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 共界面の電子状態，同上
- [72] 小出常晴，関根武俊，真中浩貴，宮内洋司，設楽哲夫，戸叶洋之，藤森淳，木村剛，十倉好紀：層状 Mn ペロブスカイト酸化物の角度分解内殻磁気円二色性，同上
- [73] 和達大樹，岡崎浩三，新見康洋，藤森淳，田中慎一，田畑仁，川合知二，J. Pikus，J. P. Lewis：光電子分光法による DNA の電子状態の観測，物理学会秋の分科会（岡山大学，2003 年 9 月）
- [74] 田中清尚，吉田鉄平，八木創，藤森淳，Dongui Lu，Wei-Sheng Lee，Kyle Shen，Z.-X. Shen，Risidiana，藤井武則，寺崎一郎： La 置換希薄ドーブ $\text{Bi}2212$ の光電子分光，同上
- [75] 和達大樹，小林大介，近松彰，橋本龍司，滝沢優，組頭広志，藤森淳，尾嶋正治，Mikk Lippmaa，川崎雅司，鯉沼秀臣：*in situ* 光電子分光法による $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ 薄膜の金属絶縁体転移の観測，同上
- [76] 八木創，田中清尚，藤森淳，吉田鉄平，X.-J. Zhou，D.-H. Lu，Z.-X. Shen，A. N. Lavrov，瀬川耕司，安藤陽一：希薄ドーブ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の角度分解光電子分光 III，同上
- [77] 石田行章，黄鐘日，藤森淳，佐伯洋昌，田畑仁，川合知二：室温強磁性体 $\text{Zn}_{1-x}\text{V}_x\text{O}$ の光電子分光 II，同上
- [78] 黄鐘日，石田行章，八木創，H. Ott，溝川貴司，藤森淳，大輪宙，近藤剛，宗片比呂夫：III-V 族希薄磁性半導体 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{N}$ の光電子分光 II，同上
- [79] 近松彰，和達大樹，小林大介，橋本龍司，組頭広志，尾嶋正治，藤森淳，大西剛，Mikk Lippmaa，小野寛太，川崎雅司，鯉沼秀臣：Laser MBE 法で作製した $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 薄膜の *in-situ* 光電子分光：温度依存性，同上
- [80] 吉田鉄平，X.-J. Zhou，Z.-X. Shen，A. Lanzara，Z. Hussain，田中清尚，藤森淳，笹川崇男，永崎洋，掛下照久，内田慎一： $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ における準粒子構造の異方性，同上
- [81] 岡根哲夫，岡本淳，間宮一敏，藤森伸一，村松康司，藤森淳，落合明：ウランモノカルコゲナイドの軟 X 線吸収磁気円二色性測定，同上
- [82] 岡本淳，間宮一敏，藤森伸一，岡根哲夫，斎藤祐児，村松康司，藤森淳，M. Abbate，小出常晴，石渡晋太郎，川崎修嗣，高野幹夫： $\text{SrFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ の軟 x 線吸収磁気円二色性 II，同上
- [83] 藤森伸一，岡根哲夫，岡本淳，間宮一敏，村松康司，藤森淳，山上浩志，常盤欣文，池田修悟，松田達磨，芳賀芳範，山本悦嗣，大貫惇睦： UTGa_5 ($T = \text{Fe}$ ， Pt) の光電子分光，同上
- [84] 斎藤祐児，小林啓介，中野岳仁，脇田高德，藤森淳，山村泰久，辻利秀，小矢野幹夫，片山信一： Fe_xNbS_2 の角度分解光電子分光，同上
- [85] 岡林潤，豊田智史，尾嶋正治，小野寛太，藤森淳： $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ の *in situ* 光電子分光，同上
- [86] 村松康司，岡本淳，間宮一敏，藤森伸一，岡根哲夫，斎藤祐児，藤森淳：SPRING-8/原研ビームライン BL23SU における光電子分光・内殻吸収磁気円二色性分光ステーション，日本放射化学会年会・第 47 回放射化学討論会（大阪，2003 年 10 月）
- [87] 藤森淳：酸化物薄膜の内殻 MCD と光電子分光，物性研短期研究会「表面分光の最前線とナノサイエンスへの展開」（東大物性研，2003 年 12 月）
- [88] 和達大樹： $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ 薄膜の *in situ* 光電子分光，PF 研究会「ナノテクノロジーと高分解能電子分光」（高エネ研，2003 年 12 月）
- [89] 石田行章：室温強磁性体 $\text{ZnGeP}_2:\text{Mn}$ の *in situ* 光電子分光による研究，同上
- [90] 八木創：希薄ドーブ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の角度分解光電子分光，同上
- [91] 田中清尚：希薄ドーブ高温超伝導体 $\text{Bi}2212$ の光電子分光，同上
- [92] 近松彰，和達大樹，小林大介，橋本龍司，組頭広志，尾嶋正治，藤森淳，大西剛，Mikk Lippmaa，小野寛太，川崎雅司，鯉沼秀臣：Laser MBE 法で作製した $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 薄膜の *in situ* 共鳴光電子分光：温度依存性，同上
- [93] 橋本龍司，小林大介，近松彰，組頭広志，尾嶋正治，中川直之，大西剛，Mikk Lippmaa，和達大樹，藤森淳，小野寛太，川崎雅司，鯉沼秀臣： $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{FeO}_3/\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ヘテロ界面における電荷移動層の形成：*in situ* 共鳴光電子分光，同上
- [94] 和達大樹，岡崎浩三，溝川貴司，藤森淳，小林大介，堀場弘司，谷内敏之，組頭広志，尾嶋正治，Mikk Lippmaa，川崎雅司，鯉沼秀臣： $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ 薄膜の *in-situ* 光電子分光，第 17 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム（つくば，2004 年 1 月）
- [95] 和達大樹，小林大介，近松彰，橋本龍司，滝沢優，組頭広志，藤森淳，尾嶋正治，Mikk Lippmaa，川崎雅司，鯉沼秀臣：*in situ* 光電子分光法による $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ 薄膜の金属絶縁体転移の観測，同上
- [96] 近松彰，和達大樹，小林大介，橋本龍司，組頭広志，尾嶋正治，藤森淳，大西剛，Mikk Lippmaa，小野寛太，川崎雅司，鯉沼秀臣：Laser MBE 法で作製した $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 薄膜の *in-situ* 共鳴光電子分光：温度依存性，同上
- [97] 橋本龍司，小林大介，近松彰，組頭広志，尾嶋正治，中川直之，大西剛，Mikk Lippmaa，和達大樹，藤森淳，小野寛太，川崎雅司，鯉沼秀臣：*In-situ* 共鳴光電子分光による $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{FeO}_3/\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 界面の電子状態，同上

- [98] 八木創, 田中清尚, 藤森淳, 吉田鉄平, X.-J. Zhou, D.-H. Lu, Z.-X. Shen, A. N. Lavrov, 瀬川耕司, 安藤陽一: 希薄ドーブ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の角度分解光電子分光, 同上
- [99] 田中清尚, 吉田鉄平, 八木創, 藤森淳, D. Lu, W.-S. Lee, K. M. Shen, Z.-X. Shen, Risdiana, 藤井武則, 寺崎一郎: La 置換希薄ドーブ Bi2212 の光電子分光, 同上
- [100] 石田行章, 黄鐘日, 小林正起, 藤森淳, 岡本淳, 間宮一敏, 斎藤祐児, 村松康司, 田中新, 佐伯洋昌, 田畑仁, 川合知二: 室温強磁性体 $\text{Zn}_{1-x}\text{V}_x\text{O}$ の光電子分光と内殻磁気円二色性, 同上
- [101] 黄鐘日, 石田行章, 八木創, H. Ott, 溝川貴司, 藤森淳, 岡本淳, 斎藤祐児, 村松康司, 間宮一敏, 大輪宙, 近藤剛, 宗片比呂夫: III-V 族希薄磁性半導体 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{N}$ の光電子分光と内殻 MCD, 同上
- [102] 橋本信, 奥沢誠, 藤森淳, 脇本秀一, 山田和芳, 吉田鉄平, 永崎洋, 内田慎一, Z.-X. Shen: 過剰酸素によりホールをドーブした $\text{La}_2\text{CuO}_{4+y}$ の光電子分光, 同上
- [103] 小林正起, 石田行章, 黄鐘日, 藤森淳, 岡本淳, 間宮一敏, 斎藤祐児, 村松康司, 田中新, 佐伯洋昌, 田畑仁, 川合知二: II-IV 族希薄磁性半導体 $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ の光電子分光と内殻吸収磁気円二色性, 同上
- [104] 岡本淳, 間宮一敏, 藤森伸一, 岡根哲夫, 斎藤祐児, 村松康司, 藤森淳, 石渡晋太郎, 高野幹夫: 10 T 超伝導マグネットを用いた SrFeO_3 の常磁性・反強磁性状態の軟 X 線吸収磁気円二色性, 同上
- [105] 寺井恒太, 岡根哲夫, 藤森伸一, 岡本淳, 間宮一敏, 村松康司, 藤森淳: パルスレーザー堆積装置と組み合わせた *in situ* 光電子分光・MCD 測定システム, 同上
- [106] 藤森淳: Thermal and Transport Properties of Lightly Doped Cuprates based on the "Fermi Arc", 科研費特定領域「遷移金属酸化物における新しい量子現象」平成 15 年度成果報告会 (東大, 2004 年 1 月)
- [107] 藤森淳: 光電子分光による磁性半導体の物性研究, 科研費特定研究「半導体ナノスピントロニクス」平成 15 年度成果報告会 (国際高等研, 2004 年 1 月)
- [108] 和達大樹, 滝沢優, 近松彰, 小林大介, 橋本龍司, 組頭広志, 溝川貴司, 藤森淳, 尾嶋正治, Mikk Lippmaa, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ 薄膜の *in situ* 角度分解光電子分光, 日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学, 2004 年 3 月)
- [109] 滝沢優, 和達大樹, 近松彰, 豊田大介, 小林大介, 橋本龍司, 組頭広志, 藤森淳, 尾嶋正治, Mikk Lippmaa, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: SrRuO_3 薄膜の *in situ* 光電子分光, 同上
- [110] 江端一晃, 溝川貴司, 藤森淳: Hartree-Fock 計算による層状ペロブスカイト型酸化物 $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{1.5}\text{MnO}_4$ の軌道秩序の研究, 同上
- [111] 橋本信, 奥沢誠, 藤森淳, 脇本秀一, 山田和芳, 吉田鉄平, 永崎洋, 内田慎一, Z.-X. Shen: $\text{La}_2\text{CuO}_{4+y}$ における擬ギャップの温度変化, 同上
- [112] 小林正起, 石田行章, 黄鐘日, 藤森淳, 岡本淳, 間宮一敏, 斎藤祐児, 村松康司, 田中新, 佐伯洋昌, 田畑仁, 川合知二: II-IV 族希薄磁性半導体 $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ の光電子分光と内殻吸収磁気円二色性, 同上
- [113] 田中清尚, 吉田鉄平, 八木創, 藤森淳, D.-H. Lu, W.-S. Lee, K. M. Shen, Z.-X. Shen, Risdiana, 藤井武則, 寺崎一郎: La 置換希薄ドーブ Bi2212 の光電子分光 II, 同上
- [114] 八木創, 田中清尚, 藤森淳, 吉田鉄平, X.-J. Zhou, D.-H. Lu, Z.-X. Shen, A. N. Lavrov, 瀬川耕司, 安藤陽一: 希薄ドーブ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ のフェルミアークと擬ギャップ, 同上
- [115] 石田行章, 藤森淳, 太田裕道, 平野正浩, 細野秀雄: ZnO/NiO 界面における *p-n* 接合形成の光電子分光による観測, 同上
- [116] Tran Thanh Trung, 平田玄, 田久保耕, 溝川貴司, 藤森淳, 中辻知, 深澤英人, 前野悦輝: 光照射された $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ の光電子分光, 同上
- [117] 井野明洋, 東口光晴, 成村孝正, 島田賢也, 生天目博文, 谷口雅樹, 吉田鉄平, 藤森淳, Z.-X. Shen, 掛下照久, 内田慎一, 安達成司, 田島節子: T^* 型銅酸化物高温超伝導体 $\text{SmLa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の電子構造のドーピング依存性, 同上
- [118] 増田亮, 瀬戸誠, 松野丈夫, 藤森淳, 北尾真司, 小林康浩, 春木理恵, 張小威, 岸本俊二, 三井隆也, 川崎修嗣, 高野幹夫: 非干渉性核共鳴散乱スペクトルにおける磁気相転移に伴う弾性散乱強度の増大現象, 同上
- [119] 近松彰, 和達大樹, 滝沢優, 小林大介, 橋本龍司, 組頭広志, 尾嶋正治, 藤森淳, 大西剛, Mikk Lippmaa, 小野寛太, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: Laser-MBE 法で作製した $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 薄膜の *in situ* 角度分解光電子分光, 同上
- [120] 橋本龍司, 小林大介, 近松彰, 組頭広志, 尾嶋正治, 中川直之, 大西剛, Mikk Lippmaa, 和達大樹, 藤森淳, 小野寛太, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{FeO}_3/\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ヘテロ界面における電荷移動層の形成; *in situ* 共鳴光電子分光, 同上
- [121] 岡本淳, 藤森伸一, 岡根哲夫, 斎藤祐児, 村松康司, 間宮一敏, 藤森淳, 武田保雄, 高野幹夫: 強磁性転移を示す $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_3$ の磁気円二色性, 同上
- [122] 岡根哲夫, 岡本淳, 間宮一敏, 藤森伸一, 村松康司, 藤森淳, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 大貫惇陸: UGe_2 の $U_{N_{4,5}}$ 吸収端での X 線吸収磁気円二色性測定, 同上
- [123] 藤森伸一, 岡根哲夫, 岡本淳, 間宮一敏, 村松康司, 藤森淳, 山上浩志, 海老原孝雄: CeIn_3 とその関連物質の光電子分光, 同上
- [124] 豊田大介, 小林大介, 滝沢優, 橋本龍司, 近松彰, 組頭広志, 尾嶋正治, 大西剛, Mikk Lippmaa, 和達大樹, 藤森淳, 小野寛太, 川崎雅司, 鯉沼秀臣: *In situ* 放射光光電子分光による $\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{RuO}_3$ 薄膜の電子状態評価, 2004 年春季応用物理学関係連合講演会 (東京工科大学, 2004 年 3 月)

招待講演

- [125] 藤森淳, 岡本淳: ペロブスカイト型 Fe, Mn 酸化物の偏光 X 線吸収, 科研費基盤研究 (A) 「酸素 p ホール系 3 d 遷移金属酸化物の新規開発」研究会 (京大化研, 2003 年 7 月)

- [126] 石田行章：カルコパイライト型 II-IV-V₂ 族半導体をベースにした室温強磁性体の作製と光電子分光，ナノテク支援ワ - クシヨップ「希薄磁性半導体研究への放射光利用」(SPring-8, 2003 年 8 月)
- [127] 藤森淳：k 空間で電子状態を探る，第 41 回茅コンファレンス「強相関電子酸化物の物性と応用」(八ヶ岳, 2003 年 8 月)
- [128] 藤森淳：f 電子系の放射光光電子分光，ワークショップ「放射光を利用した物性科学の発展と展望」(原研放射光科学研究センター, 2004 年 3 月)
- [129] 藤森淳：真空紫外放射光を用いた ARPES と共鳴光電子分光，シンポジウム「光電子分光による物性研究のフロンティア：紫外線から硬 X 線まで励起光を変えて見えてくるもの」, 日本物理学会第 59 回年次大会(九州大学, 2004 年 3 月)

セミナー

- [130] 和達大樹：DNA の光電子分光(阪大産研, 2003 年 8 月)
- [131] 石田行章：Direct Observation of the Transition Region and its Formation in All-Oxide Thin Film *p-n* junction ZnO/NiO(神奈川科学アカデミー, 2004 年 2 月)

4.3 内田研究室

研究室およびその活動の概要。

4.3.1 2003年度の研究その1

研究1-1

高温超伝導 Cu 酸化物を代表とする低次元強相関電子系においては、電子の「分裂」や「自己組織化」による新しい秩序形成が起こり、それが高温超伝導のような目覚ましい現象を引き起こすと考えられるようになってきた。我々は、高温超伝導体を主体に、1, 2次元構造 Cu 酸化物を対象とし、電子のもつ電荷・スピンの自由度が織りなす現象と秩序形成の探求を行っている。Cu 酸化物のドーピング、構造制御、そして電子輸送現象、遠赤外分光という物性測定を両輪として研究を遂行し、電荷・スピン自由度のダイナミクスや集団励起モードと高温超伝導発現との関係を調べている。特に μ SR、中性子散乱、光電子分光、そして STM での国際共同研究を推進しており、世界的な研究ネットワークから数多くの epoch-making かつ新たな研究の流れを形成する成果を生産し続けている。最近の、代表的な研究テーマと成果は、

- 1) 1次元における電子のスピン・電荷分離の観測と非線型光学応答 (Phys. Rev. Lett. (1996)(1998)(2001)(2003))。
- 2) 正孔ドーピング可能な梯子型 Cu 酸化物における超伝導相を含む電子相図の全貌を明らかにした (Phys. Rev. Lett. (1997)(1998)(1999)(2003), Science (2002))。
- 3) 磁場と結晶構造制御による高温超伝導体のテラヘルツ光学スペクトル操作 (Phys. Rev. Lett. (2001), (2002)(2003))。
- 4) 高温超伝導秩序と競合するストライプ秩序を発見 (Nature (1995), Science (1999), Phys. Rev. Lett. (2000)(2001)(2002))。
- 5) 高温超伝導体のナノスケール不均一性と超伝導準粒子の量子力学干渉により生ずるナノスケール現象の観測 (Nature (2000)(2001)(2002)(2003), Science (2002))。

研究の最終目標は、高温超伝導機構の解明と室温超伝導の可能性を明らかにすることである。発見後 18 年経った現在でもメカニズムが未解明なのは、電子相関が支配的な系、特にナノメートルスケールの電子系、での電子の運動、秩序形成を決める「原理」/「法則」がわかっていないためであると考えられる。それを明らかにする為、高温超伝導と競合する秩序の同定、そして競合を制御するパラメータの追及を行う。これらは、室温超伝導実現への1つの道でもある。

4.3.2 1次元及び梯子型 Cu 酸化物の電子相と圧力誘起超伝導

高温超伝導は2次元 Cu 酸化物の CuO_2 面で起こる超伝導現象である。 CuO_2 面内では、Cu 原子が四方を酸素で囲まれ (CuO_2 ユニット)、その酸素を隣同士共有する形で (端共有) 2次元のネットワークを形成している。 CuO_2 ユニットの構造を基本とする構造をもつ物質は高温超伝導体だけではない。 CuO_2 ユニットが酸素を端共有して、一方向のみに連なっている1次元 Cu 酸化物、 Sr_2CuO_3 、が存在する。 Sr_2CuO_3 は化学的操作によるキャリア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わからない。しかし、正孔ドーピングされた1次元 Cu 酸化物は、偶然、高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ あるいは非超伝導体 $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 中に存在している。 $\text{Pr}123$ が超伝導体にならないことから、間接的ながら、ドーピングされた CuO 鎖の基底状態は超伝導ではないことがわかる。

様々な形態の結晶構造を示す Cu 酸化物の中でもユニークなのは梯子型構造である (図 4.3 a)。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た。

圧力誘起超伝導

この系の超伝導は3GPa以上の高圧下で実現する (T_c は最高 12K)。正孔ドーピング量や圧力変化に伴い、梯子上の正孔が整列したり (電荷秩序) クーパー対形成により超伝導になる。

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

それ以外の状況下では常に絶縁体となる。絶縁体の起源が梯子上の正孔あるいは正孔対の電荷整列 (CDW) であり、秩序形成に伴う集団励起モードが存在することを、ラマン散乱やマイクロ波超伝導の実験で明らかにした。

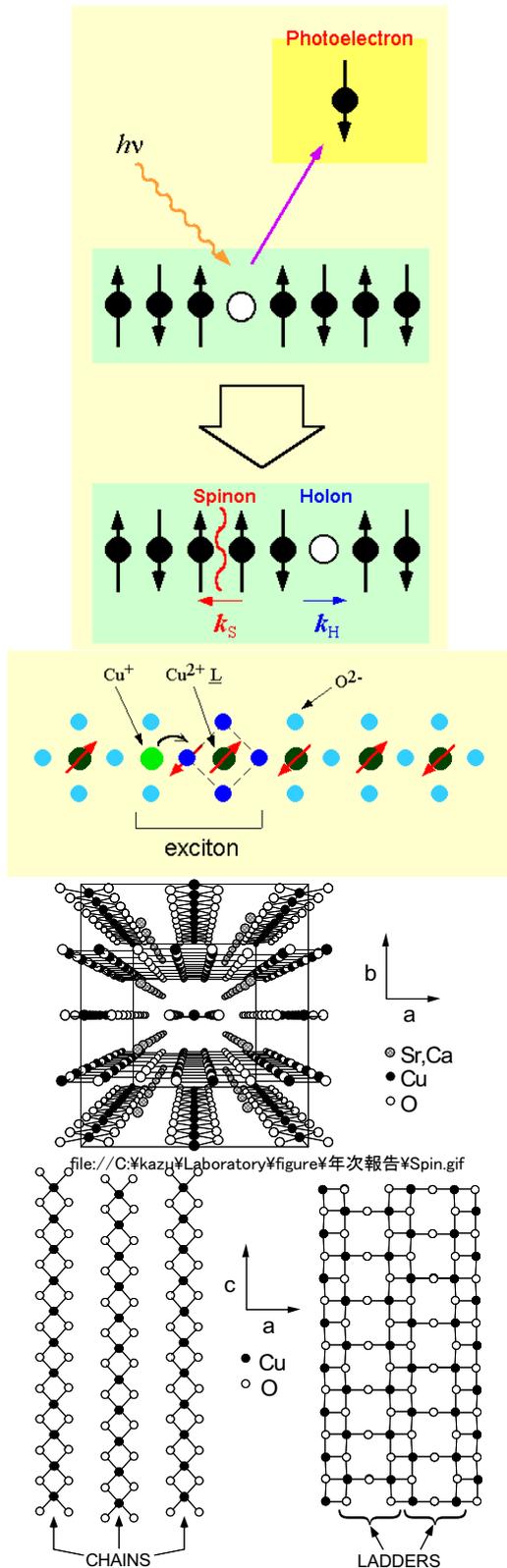


図 4.3 a: 1次元 Sr_2CuO_3 と梯子型 $\text{Sr}_{14-x}\text{Ca}_x\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ の結晶構造。

4.3.3 磁場と構造制御による高温超伝導体のテラヘルツ光学スペクトル操作

高温超伝導体は超伝導 CuO_2 面が多数積層したジョセフソン接合超格子となっている。それを特徴づけるのはジョセフソン・プラズマと呼ばれる、テラヘルツ周波数領域に固有振動をもつ集団励起モードである。ところが、このモードは光とは直接結合しない縦励起である。光と結合する光学型(横型)プラズマモードをつくるには、ジョセフソン結合の強さを空間変調させる必要がある。ジョセフソン結合の変調を(1)元素置換による構造制御、 T^* 型 $\text{SmLa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の単結晶作製(2) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 結晶の CuO_2 面に平行に磁場をかけることにより行い、光学型ジョセフソン・プラズマの生成に成功した(図 4.3 b)。

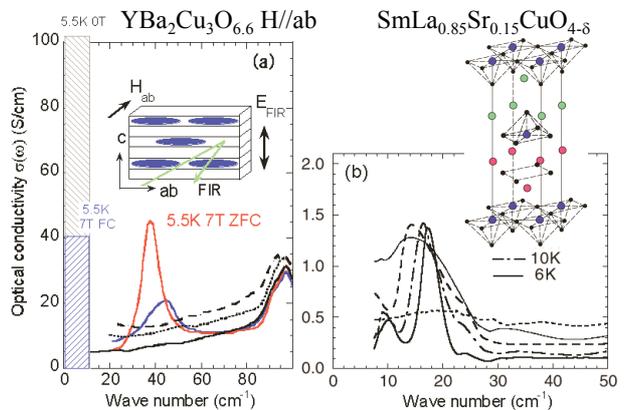


図 4.3 b: (a) 平行磁場中の YBCO 高温超伝導体と (b) T^* 型高温超伝導体の光学型ジョセフソンプラズマ。Tc 以下で光学伝導度 () に有限周波数のピークが現れる。

2004/05/11

4.3.4 高温超伝導体における超伝導 ストライプ秩序競合

最近、「強相関電子系」と分類される Mn, Ni や Cu の酸化物内で電子が「ストライプ秩序」と呼ばれる全く新しい秩序を形成していることが明らかになった。ここでいう強相関とはクーロン相互作用が極限的に強く、電子がモット (Mott) 転移で局在するような状況を意味している。高温超伝導は、そのような 2次元 Cu 酸化物に電荷キャリアを注入(ドーピング)することによって起こっている。注入された電荷キャリアは、それ自体で空間的に一様な電子気体/液体を形成しているのであるが、それらが偏析して 1次元的に配列してしまうという現象が発見されたのである。これがストライプ秩序と呼ばれるものである。このストライプに挟まれた領域は元の(ドーピングされていない)モット絶縁体状態であり、電子のもつスピンの表に現れて、反強磁性秩序が形成

されている。このようなストライプ秩序が形成されると超伝導秩序の方は抑制されてしまう。

図に示したストライプ秩序は、元の電子気体/液体の対称性を破っており、無限に長い「電子高分子」がつくる一種の電子固体とみなすことができる（CDWの強電子相関版でもある）。しかし、現実のCu酸化物で実現しているストライプは真直ぐではなく、曲がりくねったものになっていると考えられている。これは電子液晶というべき状態であり、高温超伝導を抑制するストライプ秩序状態は、この液晶のSmectic相と考える事ができる。より配向が乱れた状態はNematic相であり、高温超伝導はこのNematic電子液晶の物性であるという説も唱えられている。

Ndを部分置換した $\text{La}_{2-x-y}\text{Nd}_y\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ では、ストライプ秩序が静的に安定化し、超伝導秩序を抑制する。特に、 $x=0.12$ （ $\sim 1/8$ ）の正孔濃度するときストライプが最も安定になり、超伝導がほぼ消滅する。我々は、比較的小さな0.1GPa程度の圧力を $x=0.12$ の物質にかけることにより、ストライプ秩序が不安定になり、超伝導が復活することを示した（図4.3c右図）。超伝導秩序とストライプ秩序がエネルギー的に拮抗していることを意味している。

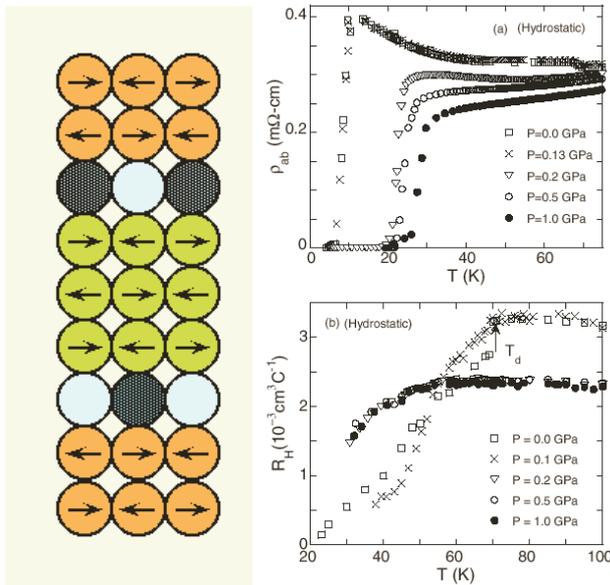


図 4.3 c: 高温超伝導体中のストライプ形成と圧力による超伝導性の復活。

4.3.5 高温超伝導体のナノスケール不均一性と量子現象

通常の超伝導体では、多数のクーパー対の波動関数が空間的に重なり合い、均一に分布する事により、その位相を揃えて超伝導状態が実現する。d波対称性をもつクーパー対が形成され、またクーパー対の

半径が極端に短く（ $\sim 2\text{nm}$ ）、その数も少ない高温超伝導体中でも、そのような均一な状態が実現しているものと考えられてきた。s波クーパー対は運動量空間での等方的な対形成を意味するが、d波の場合は運動量空間に異方性を生じさせる。図のフェルミ面上で第1ブリュアン帯の対角線方向の運動量をもつ電子（正孔）がつくるクーパー対は超伝導ギャップを持たず（ギャップノード）、一方、帯境界近くの電子（正孔）がつくるクーパー対は最大のギャップをもつのである（アンチノード）。

STM/STSは原子スケールでの電子状態を調べる有力なプローブである。コーネル大学 J. C. Seamus Davis グループと共同でBi系超伝導体に対してSTM観察を行ったところ、実空間においてもナノメートルのスケールで超伝導電子状態に不均一性が生じている事が明らかになってきた。Bi系高温超伝導体の表面で、超伝導ギャップの大きさが幅広い空間分布をもつことが判明した。ギャップの小さい領域ではクーパー対の位相が揃って超伝導秩序が形成されている。ところが、ギャップの大きな領域ではギャップは開いているものの超伝導秩序が形成されていないのである。このような超伝導、非超伝導領域が2-3nmのスケールでモザイク上に分布しているというのがSTM観測の高温超伝導体像である。

準粒子干渉によるナノスケール現象

STMで観測された不均一状態は、単純な相分離状態ではない。不均一性が際立つのは、超伝導ギャップの最大値の分布をみたときである。すなわちSTMのバイアス電圧（エネルギー）に従ってSTM探針から生成される準粒子のエネルギーと運動量に依存した不均一性になっている。バイアス電圧が小さいとき、生成されるのはギャップノード近くの準粒子であり、それを通して見た超伝導状態はほぼ均一である。ノード準粒子は超伝導、非超伝導領域を区別せず、結晶中を自由に動き回っていることがわかる。その結果、準粒子の波動関数は容易に量子力学干渉を起こし、その干渉縞が表面全体にわたって観測される。干渉縞のパターン、間隔はSTMバイアスにより劇的に変化するが、これはノード付近での準粒子の大きな分数とd波対称性超伝導ギャップに起因するものである。バイアス電圧を増加させてゆくと、干渉縞のパターンが変化するとともに、それが観測される領域がギャップマップ上の超伝導領域に限られてくる。これは、アンチノード準粒子が超伝導領域でのみコヒーレントになっていることを意味している。逆に、非超伝導領域では、アンチノード準粒子が存在しない（定義できない）ということで、運動量空間の「異方性」が実空間の「不均一性」と密接に関係していることを示している。

ミクロ相分離した高温超伝導状態

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

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

量子化磁束近傍の電子状態

磁場は高温超伝導体中に量子化磁束として侵入する。その磁束芯付近では超伝導秩序が抑制され、超伝導秩序と競合する「非超伝導相」が実現していると考えられている。STM 観察により、量子化磁束近傍にチェッカーボードのような電子密度の濃淡が観測された。(図 4.3 d 上図)。非超伝導領域にストライプのような電荷秩序が形成されていることを示唆している。

4.3.6 研究その 2

研究 2 - 2

研究 2 - 2 の記述

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Wang, S. Ono, Y. Onose, G. Gu, Y. Ando, Y. Tokura, S. Uchida, and N. P. Ong: Dependence of Upper Critical Field and Pairing Strength on Doping in Cuprates, *Science* **299**, 86-89 (2003).
- [2] K. McElroy, R. W. Simmonds, J. E. Hoffman, D. -H. Lee, J. Orenstein, H. Eisaki, S. Uchida, and J. C. Davis: Relating atomic-scale electronic phenomena to wave-like quasiparticle states in superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$, *Nature* **422**, 592-596 (2003).
- [3] A. J. Millis, S. Uchida, Y. Uemura: Proceedings of the High- T_c Superconductivity Workshop, Williamsburg, Virginia, June 7-8, 2002, *Solid State Commun.* **126**, 1 (2003).
- [4] S. Uchida: Critical Points in the Cuprate Phase Diagram, *Solid State Commun* **126**, 57-61, (2003).
- [5] N. Fujiwara, N. Mōri, Y. Uwatoko, T. Matsumoto, N. Motoyama, and S. Uchida: Superconductivity of the $\text{Sr}_2\text{Ca}_{12}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ Spin-Ladder System: Are the superconducting Pairing and Spin-Gap Formation of the Same Origin?, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 137001 (2003).
- [6] Y. Fudamoto, S. Tajima, B. Gorshunov, M. Dressel, T. Kakeshita, K. M. Kojima, and S. Uchida: In-Plane Optical Spectra of Optimally-Doped LSCO Single crystal, *J. Low Temp. Phys.* **131**, 761-765 (2003).
- [7] K. M. Kojima, S. Uchida, Y. Fudamoto, and S. Tajima: Observation of New Longitudinal and Transverse Josephson Plasma Models in the Parallel Magnetic Fields: Underdoped YBCO, *J. Low Temp. Phys.* **131**, 775-779, (2003).
- [8] A. Maeda, R. Inoue, and H. Kitano, N. Motoyama, H. Eisaki, and S. Uchida: Sliding conduction by the quasi-one dimensional charge-ordered state in $\text{Sr}_{14-x}\text{Ca}_x\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$, *Phys. Rev. B* **67**, 115115 (2003).
- [9] K. M. Kojima, S. Uchida, Y. Fudamoto, I. M. Gat, M. I. Larkin, Y. J. Uemura, and G. M. Luke: Superfluid Density and Volume Fraction of Static Magnetism in Stripe-Stabilized $\text{La}_{1.85-y}\text{Eu}_y\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$, *Physica B* **326**, 316-320 (2003).
- [10] S. Uchida, T. Kasuga, and K. M. Kojima: Charge transport in the stripe ordered state of cuprates, *Physica C* **388-389**, 205-206 (2003).
- [11] N. Fujiwara, N. Mori, Y. Uwatoko, T. Matsumoto, N. Motoyama, S. Uchida: Spin Fluctuation in $\text{Sr}_2\text{Ca}_{12}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ under High Pressure up to 3.0 GPa, *Physica C* **388-389**, 229-230 (2003).
- [12] T. Yoshida, X. J. Zhou, T. Sasagawa, W. L. Yang, P. V. Bogdanov, A. Lanzara, Z. Hussain, T. Mizokawa, A. Fujimori, H. Eisaki, Z. -X. Shen, T. Kakeshita, and S. Uchida: Metallic Behavior of Lightly Doped $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ with a Fermi Surface Forming an Arc, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 027001 (2003).
- [13] A. S. Moskvin, J. Malek, M. Knupfer, R. Neudert, J. Fink, R. Hayn, S. -L. Drechsler, N. Motoyama, H. Eisaki, and S. Uchida, Evidence for Two Types of Low-Energy Charge Transfer Excitations in Sr_2CuO_3 , *Phys. Rev. Lett.* **91**, 037001 (2003).
- [14] A. B. Kuzmenko, N. Tombros, H. J. A. Molegraaf, M. Grüninger, D. van der Marel, and S. Uchida: c-Axis Optical Sum Rule and a Possible New Collective Mode in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 037004 (2003).
- [15] X. J. Zhou, T. Yoshida, A. Lanzara, P. V. Bogdanov, S. A. Kellar, K. M. Shen, W. L. Yang, F. Ronning, T. Sasagawa, T. Kakeshita, T. Noda, H. Eisaki, S. Uchida, C. T. Lin, F. Zhou, J. W. Xiong, W. X. Ti, Z. X. Zhao, A. Fujimori, Z. Hussain, and Z. X. Shen: Universal nodal Fermi velocity, *Nature* **423**, 398 (2003).

- [16] A. Gozar, G. Blumberg, P. B. Littlewood, B. S. Dennis, N. Motoyama, H. Eisaki, and S. Uchida: Collective Density-Wave Excitations in Two-Leg $\text{Sr}_{14-x}\text{Ca}_x\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ Ladders, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 087401 (2003).
- [17] S. Tajima, S. Uchida, D. van der Marel, and D. N. Basov: Comment on "Phase Diagram of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ Probed in the Infrared: Imprints of charge Stripe Excitations, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 129701 (2003).
- [18] S. Wakimoto, R. J. Birgeneau, Y. Fujimaki, N. Ichikawa, T. Kasuga, Y. J. Kim, K. M. Kojima, S. H. Lee, H. Niko, J. M. Tranquada, S. Uchida, and M. V. Zimmermann: Effect on a magnetic field on the spin- and charge-density-wave order in $\text{La}_{1.45}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$, *Phys. Rev. B* **67**, 184419 (2003).
- (国内雑誌)
- [19] 内田慎一: 超伝導研究の歩み - 高温超伝導基礎研究の進展、未踏科学技術協会ニュース 100 号記念特集、(2004) 17-22.
- (学位論文)
- [20] 藤田和博: 局所的な結晶の乱れと高温超伝導 (修士論文)
- [21] 石角元志: 高温超伝導 Bi_{2212} の不均一性と光学応答 (修士論文)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [22] S. Uchida: Microscopic Inhomogeneity and Cuprate Phase Diagram - Optical Response and Superfluid Density (Berkeley, CA, USA, May 14, 2003).
- [23] S. Uchida: Inhomogeneity and Pair Breaking in High-Tc Cuprate Seen by c-Axis Optical Spectrum (International Conference on Magnetism (ICM2003), Rome, Italy, July 29, 2003).
- [24] S. Uchida: Granular Superconductivity Observed by STM/ STS on Bi_{2212} (International School of Solid State Physics, Erice, Italy, October 25, 2003).
- [25] S. Uchida: Effect of Inhomogeneity on the Optical Spectrum of High-Tc Cuprates (The 4th Korea-Japan Workshop, 長野, 日本, September 25, 2003).
- [26] S. Uchida: Two-gap energy scales in high-Tc superconductivity (International Workshop on Transition Metal Oxides, 仙台, 日本, November 25, 2003).
- [27] S. Uchida: Electron-Phonon Coupling in Cuprates (AIST Workshop, 筑波, 日本, December 18, 2003).
- [28] S. Uchida: Coexistence of two-gap energy scales seen by the c-axis optical sum-rule in high-Tc cuprate (March Meeting of American Physical Society, Montreal, Canada, March 22, 2004)
- (国内会議)
- 一般講演
- [29] 吉田鉄平, X.-J. Zhou, Z.-X. Shen, A. Lanzara, Z. Hussain, 田中清尚, 藤森淳, 笹川崇男, 永崎洋, 掛下照久, 内田慎一: $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ における準粒子構造の異方性, 日本物理学会第 58 回年次大会 (岡山大学, 2003 年 9 月)
- [30] 掛下照久, 小嶋健児, 内田慎一, 安達成司, 田島節子, B.Gorshunov, M.Dressel: T^* 型銅酸化物超伝導体の面内電荷応答 (III), 日本物理学会第 58 回年次大会 (岡山大学, 2003 年 9 月)
- [31] 小嶋健児, 内田慎一, 札本安識, 田島節子: 垂直磁場下における YBCO c-軸光学応答, 日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学, 2004 年 3 月)
- [32] 橋本信, 奥沢誠, 藤森淳, 脇本秀一, 山田和芳, 吉田鉄平, 永崎洋, 内田慎一, Z.-X. Shen: $\text{La}_2\text{CuO}_{4+y}$ における擬ギャップの温度変化, 日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学, 2004 年 3 月)
- [33] 石角元志, 小嶋健児, 内田慎一: Bi_{2212} の光学応答で見た超伝導凝集量, 日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学, 2004 年 3 月)
- [34] 藤巻洋介, 小嶋健児, 内田慎一: $S = 1/2$ スピン梯子系の赤外吸収とマグノン励起, 日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学, 2004 年 3 月)
- [35] 藤田和博, 小嶋健児, 内田慎一, 永崎洋: 希土類置換した Bi_{2201} の磁場中電気抵抗, 日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学, 2004 年 3 月)
- (国内会議)
- 招待講演
- [36] 内田慎一: 高温超伝導研究の現状と展望 (第 41 回茅コンファレンス, 八ヶ岳, 日本, August 20, 2003).
- [37] 内田慎一: Strongly Correlated Electrons (JST-PRESTO "Sakigake" Meeting, 東京, 日本, December 20, 2003)
- [38] S. Uchida: Cuprates Overview (Annual Meeting of Transition Metal Oxides, 東京, 日本, January 19, 2004)
- [39] 内田慎一: 高温超伝導体におけるストライプ秩序 (日本物理学会第 59 回年会, シンポジウム「クーロン系の構造形式: 電子から高分子まで」福岡, 日本, March 28, 2004)

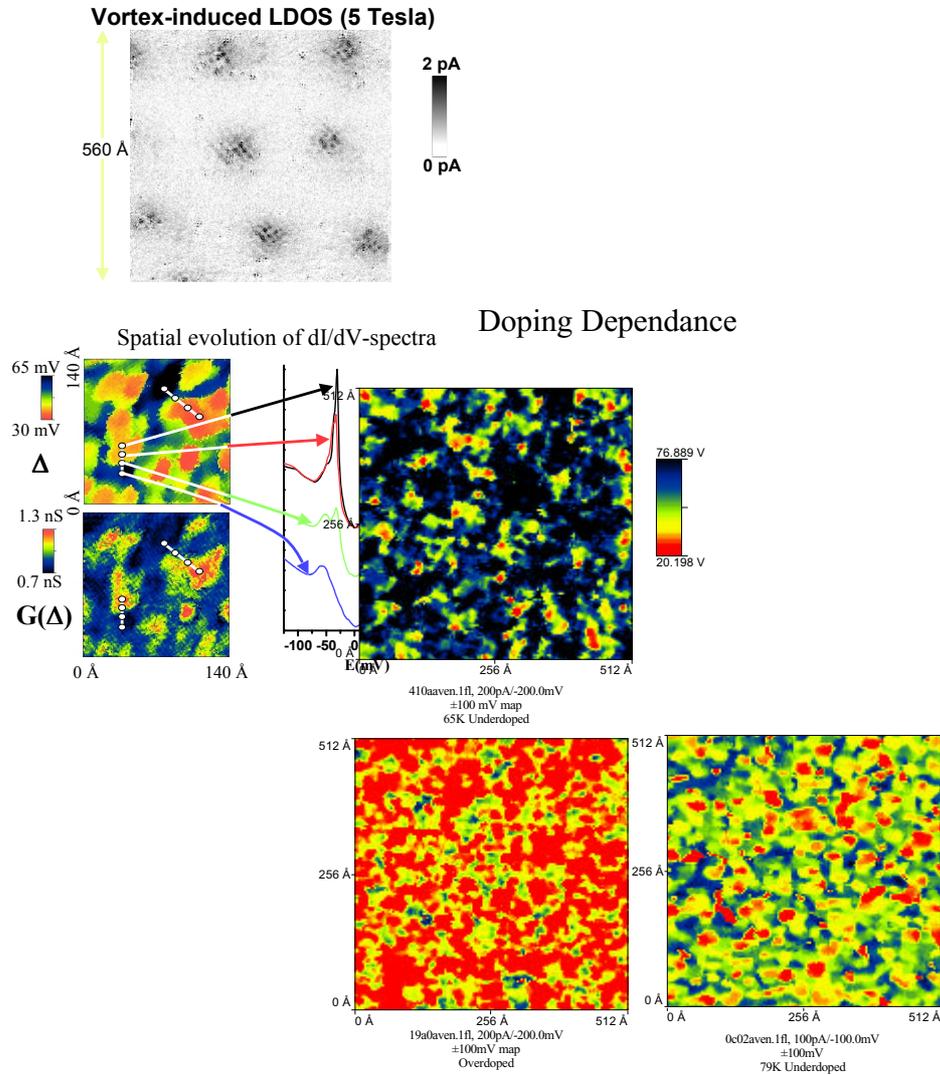


図 4.3 d: 高温超伝導体中のナノスケール不均一性。
 上図: CuO_2 面に垂直にかけた磁場で作られた磁束近傍に, チェッカーボード状の局所状態密度のパターンを観測した。下図: 正孔ドーピング量を減らすと、非超伝導ギャップ領域と超伝導領域の面積比が増大し、ミクロな相分離状態が顕著になる。

4.4 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として平原徹と吉本真也が、また博士課程1年生として山崎詩郎が、9月からはフランス政府特別研究員のMarie D'angeloと科学技術振興機構研究員 Alexander Konchenko が新しくメンバーに加わった。3月には、学振特別研究員のKwonjae Yooが韓国に帰国し、上野将司と小西満が修士課程を修了して巣立っていった。沖野泰之が修士課程を修了して博士課程に進学した。

当研究室では、表面物性、特に「表面輸送」をキーワードにして実験的研究を行っている。特に、シリコン単結晶表面上に形成される種々の表面超構造を利用し、それらに固有な表面電子バンドの電子輸送特性を明らかにし、バルク電子状態では見られない新しい現象を見出し、機能特性として利用することをめざしている。そのために、表面構造の制御・解析、表面電子状態、電子輸送特性、表面近傍での電子励起、原子層・分子層の成長構造、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。

4.4.1 表面電子輸送

単原子ステップの電気抵抗

一般に電子輸送は電子・格子相互作用と欠陥・不純物による散乱に支配され、表面などの低次元系ではそれらの影響が著しい。一方、欠陥・不純物散乱は電子の干渉効果により、局所状態密度(LDOS)の変調(電子定在波)を誘起する。このLDOSの振動はエネルギー分散や反射位相シフトなどの散乱現象に関わる情報を与える。散乱体の反射位相シフトはその透過率と直接関係しており、定在波の研究はその電気伝導度の導出にもつながる。本研究ではSi(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag表面を対象に、固体表面上に必ず存在する単原子ステップによって生じる電気抵抗を3つの独立した方法で実験的に測定した。まず表面ステップ近傍に誘起された定在波を走査トンネル分光(STS, dI/dV)で観測して電子の反射位相シフトを測定し、それをもとにデルタ関数ポテンシャル障壁モデルと2次元Landauerの公式を経てステップを横切る電気伝導度(抵抗値)を求めた。次に微斜面Siウェハー上に $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag表面構造を用意し、独立駆動型4探針STM(走査トンネル顕微鏡)を用いた回転正方4端子法で求めた表面伝導度の異方性から単原子ステップあたりの電気伝導度を測定した。最後にステップ数百個を纏めた(ステップ・バンチング)領域を含む $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag表面を作成し、その電気抵抗をマイクロ4端子法で直接測定し、単原子ステップ当りの電気伝導度を求めた。その結果、いずれの方法もほぼ同程度の値を与え、ステップを通過する電子の電気伝導度は約 $5 \times 10^3 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ であった。またその電子輸送は仕事関数程度のバリア障壁のトンネル伝導でモデルできることが分かった。

2次元金属系Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag表面の電気伝導度の温度依存性

Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag表面は2次元金属であり、その電気伝導は単原子層に閉じ込められた2次元電子系の電子輸送現象として大変興味深い。この表面の電気伝導の温度依存性を300K~150Kの範囲でマイクロ4端子法を用いて調べた。その結果、冷却に伴い表面第一層の電気伝導度は~200Kまでは増大するが、200K以下では急激に減少することが分かった。金属の場合、この温度範囲では電子・格子相互作用が支配的であり、そのため温度の低下と共に電気伝導度は増加するはずなのだが、200K以下では逆の結果が得られ、200K付近で金属絶縁体転移が起こっていることになる。光電子分光測定によれば室温でも120Kでも金属的な表面電子バンドが存在してバンド構造には変化が起こっていないため、低温相はバンド絶縁体ではないらしい。現在、この転移について解析を行っている。

擬一次元金属系Si(557)-Au表面の電気伝導

Si(557)-Au表面は、金原子鎖が周期的に一定方向に並び、フェルミ準位近傍に擬一次元的な表面電子バンドを2本持つことが知られているが、その解釈は、朝永ラッティンジャー液体に固有なホロン・スピノンバンド、あるいは単なる2本の金属バンド、あるいは金属バンドと半導体バンド、と様々に言われており、まだ確定していない。そこで、4探針STMによる正方4端子プローブ法を用いて、金属鎖に沿う方向(σ_{\parallel})と垂直な方向(σ_{\perp})の電気伝導度を測定した。次に、知られている表面電子バンドからボルツマン方程式を用いて計算した伝導度を測定した σ_{\parallel} と等しいとして平均自由行程を見積もると原子間隔より短くなり、ボルツマン描像が成り立たないことを示す結果となった。マイクロ4端子法を用いて伝導度の温度依存性を室温から150K付近まで測定すると、熱活性型の半導体的な振る舞いをするのがわかった。その原因として、STM像で不規則な分布の輝点として観察される余剰なSi原子が金属鎖上に吸着しているため、それが金属鎖を分断して金属的なバンド伝導を破壊し、ホッピング的な伝導をしていると考えられる。あるいは、余剰Si原子が電子をドープして部分的に半導体的な領域ができていると考えられる。この推測を確かめるため、余剰Si原子の密度をコントロールして、その影響を光電子分光や伝導度測定で調べていく予定である。

Si(111)-Au表面のガラス転移での電気伝導

Si(111)-Au表面上にはドメインウォール(DW)と呼ばれる本質的な位相欠陥が存在する。1.0ML程度の金を加熱蒸着した後、冷却速度によって高密度のDWがガラス状に配列した β - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相とクリスタル状に配列した 6×6 相を可逆的に作り分けることができる。本研究ではこの一原子層内で起こるガ

ラス - クリスタル転移における表面電気伝導度 (σ_{ss}) の変化を測定した。6×6相は $\beta\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相より高い σ_{ss} を持ち、その差は低温でより顕著になった。この差は DW の配列の乱れの度合いの違いに由来するものと考えられる。どちらの σ_{ss} も半導体的な温度依存性を示したが、それは光電子分光測定の結果と一致している。また、低温における σ_{ss} の温度変化の結果は単純な熱活性型のホッピングではなく、ES 則に従うバリアブルレンジホッピング (VRH) による伝導が起こっている可能性を示唆している。ES 則に従う VRH を引き起こすには一定以上の欠陥や無秩序性が条件となっているが、STM 像から十分その条件が満たされていることを確認した。一方、低密度の DW を持つ $\alpha\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相の σ_{ss} は $\sigma_{ss} \sim 250 \mu\text{S}/\text{Square}$ ときわめて高く伝導度を持ち、金属的な温度依存性を示し、光電子分光の結果と一致した。

Ag 探針と Si 表面との接触点での I V 特性

超高真空中で Ag 探針を Si 結晶表面に接触させると、Ag 原子が Si 表面上に輸送され、 3×3 -Ag 吸着表面構造のパッチを局所的に作るができる。このときの Ag 探針と Si 表面との間の電流電圧 (I V) 特性を測定した。 7×7 構造と 3×3 構造の場合で、I V 特性は同様な非線型性を示した。P 型と n 型 Si 基板ともに Si が p 型であるようなショットキー接触の I V 特性であった。これは、Si 表面近傍が表面構造に依らずに p 型であることを示している。また、逆方向バイアス (Si が負) の抵抗値は表面構造に依存し、順バイアス (Si が正) での抵抗値は 3×3 構造パッチサイズに依存しないが、逆バイアス方向では依存するようである。さらに定量的な測定と解析により、探針接触によって引き起こされる変化を明らかにできると考えている。

カーボンナノチューブ (CNT) の電気伝導測定

多層 CNT (MWCNT) の伝導は、バリステイク伝導か拡散伝導か、あるいは最外層で主に伝導するのか、など多数の論文で論争されている。われわれは、Ti パッド上に成長させた多層 CNT、および市販の多層 CNT を Ta パッド上に分散させた試料の電気抵抗を、4 探針 STM 装置を用いて 2 探針法で測定した。走査電子顕微鏡下で測定するので、2 つの電極パッド間を架橋した MWCNT を容易に探し出すことができ、多数の CNT サンプルを測定して系統的な解析を行った。その結果、CNT の電気抵抗は (長さ/断面積) に比例し、抵抗率は $2 \times 10^{-2} \Omega\text{cm}$ 程度であった。また、接触抵抗は CNT 自身の抵抗と比べ十分小さかった。以上からわれわれの CNT サンプルは拡散伝導であるといえる。また、電流電圧特性に特徴的な非線形性を見出した。伝導度はゼロバイアス電圧近傍で最小値をとり、電圧 (電流) とともに急激に増大した。3 V 程度のバイアス電圧では 1 本の MWCNT に 0.3 mA 以上の大電流を流せることもわかった。(大阪大学工学研究科尾浦研究

室との共同研究)

4.4.2 表面構造と相転移

Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面電子バンドの有効質量

この表面はフェルミ準位を横切る放物線的な電子バンド (S_1) を持つ二次元自由電子的で金属的な表面であり、光電子分光 (PES) でよく研究されてきた。しかし、その S_1 バンドの有効質量に関して、報告されている値は 3~4 倍程度にばらついている。その原因を突き止めるため高分解能角度分解光電子分光装置を用いて詳細な解析を行った。その結果、有効質量の値の不一致は光電子分光データの解析法の違いに起因していることがわかった。つまり、PES で得られるバンド分散のエネルギー・運動量平面上での 2 次元イメージを縦、あるいは横にスライスしてエネルギースペクトルあるいは運動量スペクトルを得る際にピーク位置がずれてしまう。そこで新たに光電子強度を重みとしてバンド分散の 2 次元イメージを直接放物線にフィットするという新しいデータ解析方法を考案した。それによって得られた有効質量は STS の定在波の解析から得られた値とよく一致しており ($m^* = 0.13m_e$)、この問題に決着をつけた。

フェルミ面のブリルアン領域選択則

上述の金属的な S_1 バンドにはもう一つ謎が残っていた。それは、 S_1 バンドが PES では第一表面ブリルアン領域では検出されないことである。従来、それは、第一ブリルアン領域においてのみ S_1 バンドがバルクバンドと重なり、両者の相互作用のため検出されないと言われてきた。しかしこの説明には矛盾があり完全ではなかった。われわれはこの現象を光電子分光構造因子の観点から考察した。光電子放出は光学遷移過程であるため、始状態と終状態の干渉効果によっては実際には状態があるにも関わらず光電子強度が弱いことがある。Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の表面最上層の Ag 原子の p 軌道のみを始状態とし、終状態を平面波として強束縛近似計算によって光電子強度のシミュレーションを行った結果、第一ブリルアン領域でのみ光電子強度が極端に小さくなるという結果が得られ、実験結果の再現に成功した。このようなシミュレーションを表面超構造に対して適用したのは初めてであり、バンドの構成軌道が分かっているのなら、同様な手法によって光電子強度を予測できるということを意味する。

Si(111) $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -Ag、-(Ag,Na) のフェルミ面マッピングと STM 観察

Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面に貴金属あるいはアルカリ金属を蒸着すると $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 表面超構造が形成さ

れるが、この表面について高分解能角度分解光電子分光法でフェルミ面マッピングを行った。追加蒸着された Ag 及び Na 原子からの電子のドーピングにより、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面のフェルミ円の半径が大きくなり、それらが $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 倍のブリルアン領域に従い複雑な形状に折り返されていることがわかった。その結果、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面ではキャリアが電子のみだったのに対し、 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 表面ではホールが多数キャリアになっていることが分かった。今後はホール測定などを行いこの事実を確かめる予定である。

また、 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Ag,Na) 表面の低温 STM 観察を行った結果、貴金属誘起 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 表面と酷似した像を得た。価電子バンド構造も貴金属の場合と Na 吸着の場合で極めて似ていることから、ほとんど同じ原子配列構造をとっていると考えられる。

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面上の Au の吸着

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面上に室温で Au を吸着して、低温 (65K) に冷却してから STM 観察を行った。Au の吸着量が 0.02 ML 程度では、表面上にプロペラ状のクラスタが散在した。吸着量が 0.14 ML 程度になると、このクラスタが凝集して $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 超構造が形成された。その単位胞はひとつのクラスタによって形成されていた。このクラスタ像の三回対称性と Au の蒸着量から、このクラスタは三個の Au 原子であるといえる。したがって、 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Ag+Au) 表面の Au の吸着量は $3/21=0.142$ ML と決定できた。同じ手順で Au4f と Si2p の内殻光電子スペクトルを測定した結果、Au 原子が下地の $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面に電子を与えていることが明らかになった。

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面上の Cs の吸着

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面上に室温で Cs を吸着させ、それを低温 (65K) に冷却して STM 観察を行った。低吸着量 (< 0.01 ML) のときには、上述の Au の場合と異なりクラスタは形成されず、表面上に明るく丸い輝点 (Cs の孤立単原子) がランダムに散在し、しかも、その輝点は高い頻度で表面上を動き回っていた。この状態は二次元気体であるといえる。Cs の吸着量が 0.09 ML になると、Cs 原子の移動頻度が極端に低下し、短距離秩序を持つ配列になった。これは二次元液体といえる。さらに Cs 原子の吸着量が 0.14 ML になると、Cs 原子は表面上全面に秩序正しく並んで、 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 表面超構造が形成された (二次元固体)。こうして初めて実空間での二次元気体・液体・固体相転移の原子直視観察に成功した。詳しい解析により、2次元融解・結晶化のメカニズムとして、コスタリッツ・サウレス理論に基づく2段階転移モデルではなく、Geometrical Defect Condensation Model に強い支持を与えた。さらに、低吸着量での Cs 原子の吸着サイトをもとに、 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Ag+Cs) 表面の原子配列構造のモデルを作った。このモデルは貴金属誘起 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 表面に対する従来のモデル

とは全く異なる。

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面上の K の吸着

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面上に室温で K を吸着させ、それを低温 (65K) に冷却して STM 観察を行った。基本的には上述の Cs 吸着の場合と同じように、吸着量の変化で二次元液体・固体相転移が見られた。K 原子の吸着サイトも Cs 原子とほぼ同じだった。しかし、吸着量が 0.14 ML を超えると $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 周期は壊されて、再び無秩序になり、さらに吸着量を増やすと $6 \times 6 \rightarrow \sqrt{21} \times \sqrt{21} \rightarrow 2\sqrt{3} \times 2\sqrt{3}$ という順番で新たな表面超構造が現れた。

Si(111)4 × 1-In 擬一次元金属表面の研究

Si(111)4 × 1-In 表面は金属的な一次元鎖が並ぶ擬一次元金属系として知られ、110 K 付近での $8 \times 2'$ 構造への相転移は低次元系固有の電荷密度波 (CDW) 転移と考えられている。この表面に対し、室温及び 100 K で角度分解光電子分光測定を行った結果、室温において金属的だった表面電子バンドが、100K では明確に fold back されてエネルギーギャップを形成する様子が観測され、CDW の描像が裏付けられた。次に、6 K における STM 観察を行った。その結果、占有状態像と非占有状態像の対応の仕方が 2 通り存在することが分かった。これは整合 CDW が格子によってピン留めされる現象、いわゆる「整合性ロッキング」によって解釈される。一方、このような整合度 2 の CDW 系に対しては、Su, Schrieffer, Heeger によって、高移動度ソリトンの存在が理論的に予言されているが、今回の 6 K における STM 観察では、一つの鎖の中で互いに逆位相の CDW の境界が時間と共に動き回る様子が観測され、このようなソリトンの存在を実空間原子分解能で証明することができた。

更に、この一次元金属鎖の不安定性を見るために、不純物として 0.1 ML のインジウムを室温で追加蒸着したところ、室温においても表面電子バンドの fold back する様子が角度分解光電子分光で観測され、また、In 4d 内殻準位は低温 $8 \times 2'$ 構造のものと類似した形に変化した。このことから不純物により室温においても CDW が形成されていると考えられる。更に、この表面を冷却すると、不純物を追加していない表面の $4 \times 1 \rightarrow 8 \times 2'$ 転移とは別の相転移が起こっていることを見出した。

Si(111)-7 × 7 清浄表面上の Na の吸着

他グループの STM 観察によると、Si(111)-7 × 7 清浄表面上に Na を微量吸着させると、従来信じられてきたダングリリングボンドへの直接吸着がおこなわれるのではなく、その周辺に Na クラスタが形成され、ダングリリングボンドへは吸着しないことが最近見出された。この系の高分解能光電子分光測定を行った結

果、Na 吸着にともない、Na 原子から供給された電子によってダングリングボンドの電子占有度があがること、コーナーホール周りのダングリングボンドが優先的に電子供給を受けることなどがわかり、STM 観察と矛盾しない結果となった。このような電子状態の変化はダングリングボンドへの直接吸着と誤解されやすい現象である。このように、顕微鏡および電子分光の分解能の向上のおかげで、もっとも単純なアルカリ金属原子の吸着現象でさえ、従来の定説に修正を加える必要が出てきている。

β -SiC(001) 表面の研究

SiC は、Si に比べバンドギャップが大きくバルク基板の伝導度が極めて低いため、表面状態伝導の測定には好都合である。Si-rich の Si(001)- 3×2 表面の電気伝導度をマイクロ 4 端子プローブ法で測定したが、室温直下で測定限界以上の電気抵抗を示し、測定不能になることがわかった。そのため、表面電気伝導度が高いと予想される Ag 吸着誘起 $c(4 \times 2)$ 表面やきわめて異方的な構造をもつ $n \times 2$ 構造表面の伝導度異方性の測定などを今後行う予定である。

Ag 探針の接触による表面エレクトロマイグレーションの観察

従来の半導体表面エレクトロマイグレーション (EM) の実験は、室温で特定の量の金属を蒸着後、基板加熱することで観察してきたが、今回は、探針を Si 表面に接触させて原子供給する方法を試みた。この方法では、ほとんど無限の原子供給が可能で、また、ミクロな領域のみに吸着表面構造を選択的に作ることもできる。銀探針を電解研磨法で作製し、それを通電加熱されたシリコン基板表面に接触させて EM 現象を走査電子顕微鏡内で「その場」観察した。表面構造の観察には μ プローブ-RHEED を用いた。化学的洗浄のみの Ag 探針では、表面 EM の再現性は得られなかったが、超高真空中で Ag 探針先端を溶解させ Ag 表面を清浄化すると EM 現象が見られた。つまり、Ag 探針の接触点から明るい領域 (3×3 -Ag 構造) が陰極側に広がった。低温では、熱拡散よりも、電場による駆動力 (EM) が優勢であるために線状に広がるが、高温では、熱拡散が支配的となり等方的に広がる。この方法により、表面上の所望の場所にミクロな領域で局所的に Ag 吸着表面構造のパッチを作ることができた。

Si 表面上でのナノドットの形成と電子状態の研究

Si 結晶表面の 2 原子層程度を酸化させ、その上に Ge を蒸着すると、5 nm 程度の径のナノドットが高密度に形成されることが知られている。その形成条件を最適化し、STM および電子回折によってナノドットの形成を確認した。その状態の光電子分光測定を行い、価電子バンドが劇的に変化することを

見出した。今後、ナノドットの径依存性やマイクロ 4 端子プローブによる伝導度測定などを行う予定である。

4.4.3 新しい装置の立ち上げ

グリーン関数 STM 装置の立ち上げ

当研究室ではこれまで室温で動作する独立駆動型 4 探針 STM 装置を開発し、結晶表面およびミクロな物体の伝導度測定に利用してきた。この経験を生かし、液体 He 温度までの低温で動作可能な 4 探針 STM 装置の開発を今年度より開始した。これは当研究室で従来開発されてきた独立駆動型室温 4 探針 STM と温度可変マイクロ 4 端子プローブ法を包含する測定手法となる。また、この装置により、複数の探針を組み合わせることにより、遅延グリーン関数の測定が可能となる。グリーン関数は輸送現象において本質的な役割を果たしているが、直接測定する手法が無かった。グリーン関数測定のためには、2 本以上の探針を電子のコヒーレント長以内まで近づけ、1 つの探針に与えられた電気信号を他の探針で検出する必要があり、10 pA レベルの高精度なトンネル電流検出機構・液体ヘリウム程度の低温・数十 nm まで近づけられる鋭い探針が要求される。今年度は、真空チャンバーの設営、SEM の設置、STM 制御回路 (フィードバック回路) の作成を行った。来年度は、探針作成技術の開発・STM 動作チェック・低温試験を行い、グリーン関数測定に必要な技術を完成させる。

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われた。記して感謝いたします。

- ・科研費 基盤研究 S 「グリーン関数 STM の開発とそれによるナノ電子輸送ダイナミクスの研究」(代表者 長谷川修司)
- ・科研費 若手研究 A 「半導体表面上ナノ構造のフェルミオロジー」(代表者 松田巖)
- ・奨学寄付金 (株) 日立製作所 「半導体特性計測マイクロプロービング技術の研究」(代表者 長谷川修司)
- ・科学技術振興事業団戦略的創造研究推進事業 「超高密度・超微細ナノドット形成とナノ物性評価技術」(代表者 市川昌和)

< 報文 >

(原著論文)

- [1] J. T. Sadowski, T. Nagao, M. Saito, A. Oreshkin, S. Yaginuma, S. Hasegawa, T. Ohno, and T. Sakurai: STM/STS Studies of the Structural Phase Transition in the Growth of Ultra-Thin Bi Films on Si(111), ACTA PHYSICA POLONICA A **104**, 381-387 (2003).
- [2] H. Okino, I. Matsuda, T. Tanikawa, and S. Hasegawa: Formation of Facet Structures by Au Adsorption on Vicinal Si(111) Surfaces, e-Journal

- of Surface Science and Nanotechnology **1**, 84-90 (2003).
- [3] S. V. Ryjkov, S. Hasegawa, V. G. Lifshits: Epitaxial Growth of Ag on Si(111)-4 × 1-In Surface Studied by RHEED, STM, and Electrical Resistance Measurements, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **1**, 72-79 (2003).
- [4] T. Tanikawa, I. Matsuda, R. Hobara, and S. Hasegawa: Variable-temperature micro-four-point probe method for surface electrical conductivity measurements in ultrahigh vacuum, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **1**, 50-56 (2003).
- [5] T. Tanikawa, K. Yoo, I. Matsuda, and S. Hasegawa: Non-Metallic Transport Property of the Si(111) 7×7 Surface, Physical Review B **68**, 113303 (2003).
- [6] T. Kanagawa, R. Hobara, I. Matsuda, T. Tanikawa, A. Natori, and S. Hasegawa: Anisotropy in conductance of a quasi-one-dimensional metallic surface state measured by square micro-four-point probe method, Physical Review Letters **91**, 036805 (2003).
- [7] T. M. Hansen, K. Stokbro, O. Hansen, T. Hasenkam, I. Shiraki, S. Hasegawa, P. Boggild: Resolution enhancement of scanning four-point probe measurement on 2D systems, Review of Scientific Instruments **74**, 3701-3708 (2003).
- [8] T. Sekiguchi, T. Nagao, and S. Hasegawa: Transformation dynamics in Ca-induced reconstructions on Si(111) surface, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **1**, 26-32 (2003).
- [9] I. Matsuda, H. Morikawa, C.-H. Liu, S. Ohuchi, S. Hasegawa, T. Okuda, T. Kinoshita, C. Ottaviani, A. Cricenti, M. D'angelo, P. Soukiassian, and G. LeLay: Electronic evidence of symmetry breakdown in surface structure, Physical Review B **68**, 085407 (2003).
- [10] T. Ikuno, M. Katayama, N. Yamauchi, W. Wongwiriyan, S. Honda, K. Oura, R. Hobara, and S. Hasegawa: Selective Growth of Straight Carbon Nanotubes by Low-Pressure Thermal Chemical Vapor Deposition, Japanese Journal of Applied Physics **43**, 860-863 (2004).
- [11] T. Hirahara, I. Matsuda, and S. Hasegawa: Photoemission Structure Factor Effect for Fermi Rings of the Si(111)√3 × √3-Ag Surface, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **2**, 141-145 (2004).
- [12] H. W. Yeom, J. W. Kim, K. Tono, I. Matsuda, and T. Ohta: Electronic Structure of the monolayer and double-layer Ge on Si(001), Physical Review B **67**, 085310 (2003).
- [13] I. Matsuda, M. Hengsberger, F. Baumberger, T. Greber, H. W. Yeom, and J. Osterwalder: Reinvestigation of the band structure of the Si(111)5 × 2-Au surface, Physical Review B **68**, 195319 (2003).
- [14] C. Liu, I. Matsuda, and S. Hasegawa: STM observation at initial stage of Cs adsorption on Si(111)-3× 3-Ag surface, Surface and Interface Analysis, in press (2004).
- [15] T. Tanikawa, I. Matsuda, T. Kanagawa, and S. Hasegawa: Surface-state electrical conductivity at a metal-insulator transition on silicon, Physical Review Letters, in press (2004).
- (総説)
- [16] S. Hasegawa, I. Shiraki, F. Tanabe, R. Hobara, T. Kanagawa, T. Tanikawa, I. Matsuda, C. L. Petersen, T. M. Hansen, P. Boggild, F. Grey: Electrical conduction through surface superstructures measured by microscopic four-point probes, Surface Review and Letters **10**, 963-980 (2003).
- [17] I. Matsuda, T. Tanikawa, S. Hasegawa, H. W. Yeom, K. Tono, and T. Ohta: Quantum-well states in ultra-thin metal films on semiconductor surfaces, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **2**, 169-177 (2004).
- (国内雑誌)
- [18] 上野将司、松田巖、劉燦華、原沢あゆみ、奥田太一、木下豊彦、長谷川修司：表面上の2次元吸着原子ガス相と内殻光電子分光, 表面科学 **24**, 556 (2003).
- [19] 守川春雲、松田巖、長谷川修司：シリコン表面上での電荷密度波の格子整合効果とソリトンダイナミクス, 表面科学、印刷中 (2004).
- (著書)
- [20] 日本表面科学会編、長谷川修司、他(分担執筆): ナノテクノロジーのための走査電子顕微鏡、(表面分析技術選書)(丸善, 2004)、第5.2節プローブ顕微鏡との複合化。
- [21] 長谷川修司(分担執筆): 表面科学の基礎と応用(日本表面科学会編集、NTS)、印刷中。
- (学位論文)
- [22] 上野将司: 銀原子が吸着したシリコン表面の状態と表面電気伝導(修士論文)。
- [23] 沖野泰之: 金原子が吸着した微傾斜シリコン表面の構造と電気伝導(修士論文)。
- [24] 小西満: ナトリウムと銀を共吸着させたシリコン表面の原子配列と電子状態(修士論文)。
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [25] I. Matsuda, M. Ueno, T. Hirahara, J. Sugawa, R. Hobara, and S. Hasegawa: Resistance of a single atomic step studied by STS and independently driven four-tip STM, nsitions, The 11th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (SPM11), 2003年12月13日 (Atagawa, Japan).

- [26] I. Matsuda, M. Ueno, T. Hirahara, J. Sugawa, R. Hobara, and S. Hasegawa: STM/STS studies of standing waves at atomic steps on the Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface, 7th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-7), 2003 年 11 月 19 日 (奈良).
- [27] M. Ueno, I. Matsuda, C. Liu, A. Harasawa, T. Okuda, T. Kinoshita, and S. Hasegawa: Morphology and core-level photoemission spectra of Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface, 7th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-7), 2003 年 11 月 18 日 (奈良).
- [28] H. Morikawa, T. Tanikawa, I. Matsuda, S. Hasegawa: Direct observation of low dimensional instability at Low Temperature, 7th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-7), 2003 年 11 月 18 日 (奈良).
- [29] C. Liu, I. Matsuda, S. Hasegawa: Phase Transitions Induced by Potassium Adsorption on Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag Surface, 7th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-7), 2003 年 11 月 18 日 (奈良).
- [30] T. Hirahara, I. Matsuda, M. Ueno, J. Sugawa, T. Kawaguchi, and S. Hasegawa: Fermi Surface Mapping of Ag overlayers on Si(111), 7th International Conference of Atomically Controlled Surfaces, Interfaces, and Nanostructures (ACSIN-7), 2003 年 11 月 16 日 (奈良).
- [31] S. Yoshimoto, R. Hobara, I. Matsuda, T. Ikuno, N. Yamauchi, W. Wongwiriyan, S. Honda, M. Katayama, K. Oura, and S. Hasegawa: I-V characteristic of carbon nanotubes measured by four-tip STM, 7th International Conference of Atomically Controlled Surfaces, Interfaces, and Nanostructures (ACSIN-7), 2003 年 11 月 16 日 (奈良).
- [32] R. Hobara, S. Yoshimoto, I. Matsuda, and S. Hasegawa: Development of Low-Temperature Multi-tip STM, 7th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-7), 2003 年 11 月 16 日 (奈良).
- [33] H. Okino, I. Matsuda, C. Liu, J. Okabayashi, S. Toyoda, K. Ono, M. Oshima, and S. Hasegawa: Core-level photoemission study of Si(557) surface, 7th International Conference of Atomically Controlled Surfaces, Interfaces, and Nanostructures (ACSIN-7), 2003 年 11 月 16 日 (奈良).
- [34] R. Hobara, Y. Shinya, I. Matsuda, and S. Hasegawa: Development of Low Temperature Multiprobe STM, 8th International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM 2003), 2003 年 10 月 8 日 (横浜).
- [35] H. Morikawa, T. Tanikawa, I. Matsuda, S. Hasegawa: Low Temperature Property of the Si(111)- 8×2 -In CDW Surface, The 9th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-9), 2003 年 9 月 16 日 (Madrid, Spain).
- [36] H. Morikawa, T. Tanikawa, I. Matsuda, and S. Hasegawa: Role of defects in surface phase transitions, The 22nd European Conference on Surface Science (ECOSS22), 2003 年 9 月 8 日 (Praha, Czech Republic).
- [37] C. Liu, I. Matsuda, S. Hasegawa: First atomic-scale observations of two-dimensional liquefaction and solidification in real space, 4th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices (ALC03), 2003 年 10 月 5 日 (Hawaii, USA).

招待講演

- [38] S. Hasegawa: STM Studies of Pb- and Sn-induced $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ structures on Si(111), (Panel Discussion) The 22nd European Conference on Surface Science (ECOSS22), 2003 年 9 月 9 日 (Praha, Czech Republic).
- [39] S. Hasegawa: Electronic transport at surface phase transitions, The 9th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-9), 2003 年 9 月 17 日 (Madrid, Spain).
- [40] S. Hasegawa: Surface Electronic Transport of Massive Arrays of Atomic Chains, International Workshop on Smart Interconnects (IWSI), 2003 年 11 月 7 日 (Atami, Japan)
- [41] S. Hasegawa: Surface electronic transport, 7th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-7), 2003 年 11 月 18 日 (Nara, Japan)
- [42] S. Hasegawa: Exotic behavior of metals on semiconductor surfaces, International Conference on Materials for Advanced Technologies and IUMRS International Conference in Asia, 2003 年 12 月 10 日 (Singapore).
- [43] S. Hasegawa: Electrical Conduction through Atomically Thin Sheets and Wires, Yokohama City University International Forum (YCUIF-20), 2004 年 1 月 25 日 (Yokohama, JapanUSA).
- [44] I. Matsuda, M. Ueno, T. Hirahara, J. Sugawa, R. Hobara, S. Hasegawa: Electrical Resistance at Atomic Steps on a Silicon Crystal Surface (Upgrade talk), The 31st Conference on the Physics and Chemistry of Semiconductor Interfaces, Kailua-Kona, Hawaii, 2004 年 1 月 19 日.

(国内会議)

一般講演

- [45] 沖野泰之、松田巖、劉燦華、岡林潤、豊田智史、小野寛太、尾嶋正治、長谷川修司: Si(557)-Au 表面の内殻光電子分光、「ナノテクノロジーと高分解光電子分光」PF 研究会、2003 年 12 月 20 日 (高エネルギー研究所、筑波).

- [46] 小西満、松田巖、守川春雲、奥田太一、木下豊彦、長谷川修司: Si(111)- $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ (Ag+Na) の表面電子構造、日本表面科学会第 23 回表面科学講演大会、2003 年 11 月 28 日 (早稲田大学、東京)。
- [47] 松田巖、上野将司、平原徹、栖川淳、保原麗、長谷川修司: STM/STS 測定による Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面ステップの研究、日本表面科学会第 23 回表面科学講演大会、2003 年 11 月 28 日 (早稲田大学、東京)。
- [48] 劉燦華、松田巖、長谷川修司: Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面上のカリウム吸着による相転移、日本表面科学会第 23 回表面科学講演大会、2003 年 11 月 26 日 (早稲田大学、東京)。
- [49] 平原徹、松田巖、上野将司、栖川淳、川口司、長谷川修司: Si(111) 表面上 Ag 吸着層のフェルミ面研究、日本表面科学会第 23 回表面科学講演大会、2003 年 11 月 28 日 (早稲田大学、東京)。
- [50] 長谷川修司、谷川雄洋、金川泰三、守川春雲、平原徹、上野将司、松田巖: 表面原子ステップでの電気抵抗、平成 15 年度東北大電気通信研究所プロジェクト研究会、ナノ成長場制御による構造と機能、2003 年 10 月 17 日 (作並温泉、宮城)。
- [51] 沖野泰之、松田巖、劉燦華、岡林潤、豊田智史、小野寛太、尾嶋正治、長谷川修司: Si(557)_{clean} 表面及び Si(557)-Au 表面の内殻光電子分光、日本物理学会 2003 年秋季大会、2003 年 9 月 20 日 (岡山大)。
- [52] 平原徹、松田巖、栖川淳、川口司、長谷川修司: Si(111) 表面上 Ag 吸着層のフェルミ面研究、日本物理学会 2003 年秋季大会、2003 年 9 月 20-23 日 (岡山大)。
- [53] 吉本真也、保原麗、生野孝、山内規裕、Winadda Wongwiriyapan、本多信一、片山光浩、尾浦憲治郎、松田巖、長谷川修司: 独立駆動型 4 探針 STM を用いた CNT 電気伝導測定、日本物理学会 2003 年秋季大会、2003 年 9 月 20 日 (岡山大)。
- [54] 守川春雲、谷川雄洋、松田巖、長谷川修司: Si(111)- 4×1 -In 系低温相転移の STM 観察、日本物理学会 2003 年秋季大会、2003 年 9 月 20-23 日 (岡山大)。
- [55] 松田巖、上野将司、平原徹、栖川淳、保原麗、長谷川修司: STM/STS 測定による Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面ステップの研究、日本物理学会 2003 年秋季大会、2003 年 9 月 20-23 日 (岡山大)。
- [56] 劉燦華、山崎詩郎、保原麗、松田巖、長谷川修司: 二次元気相・液相・固相相転移の原子直視、日本物理学会 2003 年秋季大会、2003 年 9 月 20-23 日 (岡山大)。
- [57] 劉燦華、松田巖、長谷川修司: 二次元気相・液相・固相相転移の原子レベルの観察、ポスト山田コンファレンス研究会「表面低次元ナノ構造機能物質の創製と物性」、2003 年 7 月 4 日 (東京大学)。
- [58] 沖野泰之、松田巖、劉燦華、岡林潤、豊田智史、小野寛太、尾嶋正治、長谷川修司: 微傾斜した Si(111) 表面の内殻光電子分光、ポスト山田コンファレンス研究会「表面低次元ナノ構造機能物質の創製と物性」、2003 年 7 月 4 日 (東京大学)。
- [59] 坂本克好、名取晃子、河野勝泰、長谷川修司: 銀探針を用いた薄膜形成とその IV 特性の測定、応用物学会第 51 回応用物理学関係連合講演会、2004 年 3 月 31 日 (東京工科大学、八王子)。
- [60] 平原徹、松田巖、長谷川修司: Si(111) 表面 Ag 吸着層のフェルミ面研究 II、日本物理学会第 59 回年次大会、2004 年 3 月 27 日 (九州大学、箱崎)。
- [61] 守川春雲、谷川雄洋、沖野泰之、松田巖、長谷川修司: In/Si(111)- $4 \times 1 \leftrightarrow 8 \times 2'$ 表面相転移に対する不純物の影響、日本物理学会第 59 回年次大会、2004 年 3 月 27 日 (九州大学、箱崎)。
- [62] 松田巖、上野将司、沖野泰之、長谷川修司: マイクロ 4 端子法による Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面電気伝導の温度依存性の研究、日本物理学会第 59 回年次大会、2004 年 3 月 27 日 (九州大学、箱崎)。
- [63] 沖野泰之、保原麗、守川春雲、松田巖、長谷川修司: Au/Si(557) 表面の電気伝導度の異方性 I、日本物理学会第 59 回年次大会、2004 年 3 月 27 日 (九州大学、箱崎)。
- [64] 小西満、松田巖、劉燦華、Marie D'angelo、長谷川修司: 21×21 reconstruction formed by Na adsorption on the Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface: an STM study、日本物理学会第 59 回年次大会、2004 年 3 月 27 日 (九州大学、箱崎)。

招待講演

- [65] 長谷川修司: Electrical Conduction across Atomic Steps on a Silicon Crystal Surface, IFCAM workshop on Nanoscience/Nanotechnology、2004 年 3 月 4 日 (東北大学金研)。
- [66] 松田巖: 半導体表面上金属超薄膜の量子井戸状態の研究 (奨励賞受賞記念講演) 日本表面科学会講演大会、2003 年 11 月 26 日 (早稲田大学)。

(セミナー)

- [67] 長谷川修司: 1 原子層、1 原子列の電気伝導をはかる、物理学教室物性セミナー、2003 年 4 月 21 日 (東京大学)。
- [68] 長谷川修司: 金属単原子層や金属原子鎖は低温で絶縁体になる、大阪大学大学院工学研究科 応用物理学専攻、2004 年 3 月 22 日 (大阪大学)。
- [69] 長谷川修司: 固体表面の電気伝導について、東北大学多元物質科学研究所、2004 年 1 月 15 日 (東北大学)。
- [70] 松田巖: 金属/Si 低次元系の表面構造、スペクトロスコピー、電気伝導、半導体表面化学セミナー、東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻、2004 年 1 月 26 日 (東京大学)。

(講義等)

- [71] 長谷川修司: 表面・ナノ構造と電気伝導、総合理学序説「構造と機能」、2003 年 10 月 6 日、横浜市立大学。
- [72] 長谷川修司: ナノテクのための電気伝導、物性若手夏の学校、2003 年 8 月 12-14 日、京都府立ゼミナールハウス。
- [73] 塚田捷、長谷川修司、小森文夫: 物性物理学特論 (表面物理学) (学部大学院共通講義) (分担担当) 2003 年度冬学期 (本郷)。
- [74] 長谷川修司、松田巖、劉燦華 (TA)、山崎詩郎 (TA): 物理学実験 I (3 年生) X 線回折、2003 年度夏学期 (本郷)。

4.5 福山研究室

福山研究室ではマイクロケルビン (μK) に至る広範な低温領域で発現する様々な量子多体現象や相転移現象、さらにそれらに対する空間次元の効果について、主に液体および固体ヘリウム (He)、低次元伝導体、異方的超伝導体などを対象に研究している。

4.5.1 超低温における量子流体/固体の研究

グラファイト結晶表面に物理吸着した単原子層 ^3He は、低温で核スピン $1/2$ の理想的な 2 次元フェルミ粒子系を形成する。吸着第 2 層は、 $T = 0$ で面密度を増加すると順に、フェルミ流体相、 $4/7$ 相と呼ばれる下層 (吸着第 1 層) に対する整合相、不整合固相へと量子相転移する。この系の特色の 1 つは、disorder を導入することなく粒子密度すなわち粒子相関を広範囲に変えることができる点である。この理想的なモデル物質の多彩な量子物性を $50 \mu\text{K}$ の超低温領域まで調べることにより、2 次元フェルミ粒子系における強相関効果を精力的に研究している。

これまでに我々は、 $4/7$ 相の磁気基底状態が、2 次元系では初めての例となるギャップレスのスピ液体であることを見出すなどの成果を挙げた。今年度は、 $4/7$ 相をモット局在相として捉え、これにホール (零点空格子点) ドープした新奇な量子相が実現することを発見した。これは量子液体/固体研究の分野で一つのブレイクスルーとなるであろう成果である。

2 次元 ^3He の熱容量測定

グラファイト表面に ^4He を 1 原子層プレコートした上に吸着した 2 次元 ^3He の熱容量を、低密度域から $4/7$ 相に至る広い範囲でこれまでにない細かな密度ステップで測定した。低密度域 ($0.20 < n < 0.83$, n は $4/7$ 相に対する相対粒子密度) で測定した熱容量は、充分低温で温度によく比例しており、相互作用が準粒子有効質量 m^* に線り込み可能な“正常フェルミ流体相”が実現していることが分かる (図 4.5 a (a))。この領域で m^* は密度の増加とともに ^3He 原子質量の 1 倍から 8 倍まで発散的に増大する傾向が見られ、Mott - Hubbard 型の量子相転移のシナリオを支持している。

ところが、 $4/7$ 相ごく近傍の高密度域 ($0.83 < n < 1.00$) では、磁気相関を示す交換相互作用程度の温度 ($T \approx 1 \text{ mK}$) と、それ以外に 30 mK 付近にそれぞれなだらかな山をもつ異常を示すことが分かった (図 4.5 b)。実際には低温側の山は 2 つで 0.3 mK 以下に 3 つ目の山があるので、triple peak 構造となっている (図中矢印)。この熱容量異常は、フェルミ流体相と $4/7$ 局在相が空間的にマクロに相分離した 2 相共存モデルでは説明できない。

これに対して $4/7$ 相を half filled の Mott 局在相

として捉え (図 4.5 a (c))、これより少し低密度の領域ではこれにホールが最大約 10 % ドープされた“新しい量子相” (図 4.5 a (b)) が実現していると考えたと説明ができることを我々は見出した。 30 mK の熱容量異常はホールが周囲のスピンをある状態に揃えながらホッピング運動するスピンポーラロン効果と考えられる。すなわち、“絶対零度でも流動性をもつ固体”が発見されたことになる。

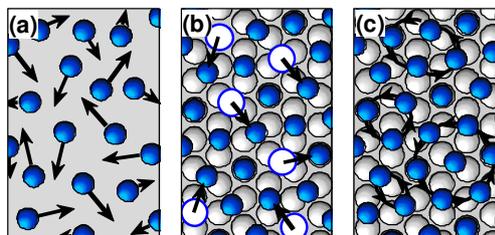


図 4.5 a: 2 次元 ^3He の概念図。(a) 正常フェルミ流体相 (低面密度領域)、(b) 新しい量子相 (臨界面密度領域)、(c) モット局在相 ($4/7$ 整合相)。矢印のついた閉経路は、種々の多体のリング交換を表す。薄い丸が 1 層目の ^4He 原子、濃い丸が 2 層目の ^3He 原子、白丸が 2 層目のホールを、それぞれ表す。

2 次元 ^3He の核磁気共鳴測定

前述の熱容量測定で見出された新しい量子相のミクロな情報を得るため、高感度の連続波/パルス波核磁気共鳴 (NMR) 測定のための測定系を設計・製作した。NMR では、磁気帯磁率の他、緩和時間や拡散係数などスピンの動的性質が観測できるため、熱容量とは相補的な知見が得られる。

図 4.5 c は試料セル部の断面図である。磁気シールド付超伝導マグネットは最大 0.2 T 、均一度 2×10^{-5} の静磁場を試料に印加することができる。グラファイト吸着基盤の表面積は 52 m^2 である。この装置で常磁性的な単原子層 ^3He 試料の核磁化を $T = 10 \text{ mK}$ で $S/N \sim 15$ の精度で測定できることを確認した。予備的な測定結果によると、新しい量子相では熱容量の二つの緩やかなピーク (1 mK と 30 mK) に対応して帯磁率の温度依存性にも 2 段階のプラトー構造が現れるようである。今後、スピンドイナミクスから見た新しい量子相の流動性の解明と未発見の超流動 (BCS) 転移の探索を行う予定である。

4.5.2 走査トンネル顕微鏡/分光法による低温量子物性の研究

昨年度の前半、4 年の開発期間を経て完成した超低温走査トンネル顕微鏡 (ULT-STM) の最終調整

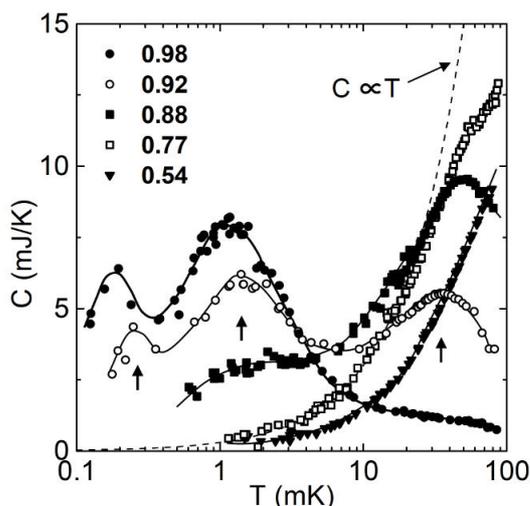


図 4.5 b: 2次元 ^3He の熱容量測定の結果。数値は $4/7$ 相の面密度 ($= 6.85 \text{ nm}^{-2}$) で規格化した ^3He 密度。矢印は $4/7$ 相近傍の臨界密度域で現れる triple peak 異常を示す温度。破線は $C \propto T$ の曲線を表す。

を終えた。これは超低温 ($T_{\min} = 20 \text{ mK}$)、高磁場 ($B_{\max} = 6 \text{ T}$)、超高真空 ($P \ll 10^{-8} \text{ Pa}$) の多重極限環境下で作動する世界でも最高性能の STM である。さらに、i) 試料を超高真空下で準備し、そのまま STM 観測室に搬送できる、ii) 短時間 (3 hr) のうちに探針 / 試料を交換して最低温度まで冷却できる、など汎用性や機動性も備えており、ほとんど全ての導電性物質に対して STM 実験が可能である。

グラファイトの磁場中ランダウ量子化の研究

完成した ULT-STM を使って、超低温・高磁場中におけるグラファイト表面の走査トンネル分光 (STS) 実験を行い、擬 2次元電子系のランダウ量子化の直接的な分光測定に成功した。グラファイトは層状構造をもつ半金属で、面内キャリアの有効質量は電子質量の $1/20$ 程度と小さく、キャリア密度も 10^{11} cm^{-2} と小さいので、比較的低磁場でランダウ量子化が観測できる物質である。

単結晶グラファイト試料に対する STS データには図 4.5 d に示すように、磁場中でランダウ準位形成による局所状態密度 (LDOS) の周期的ピーク構造が現れ、ピーク間のエネルギー差はほぼ磁場に比例する。図中実線は田上-塚田 (塚田研究室) による c 軸方向に半無限の厚さをもつグラファイト最表面の電子状態計算から求めた LDOS で、実験と定量的にも良く一致する。

一方、高配向性熱分解グラファイト (HOPG) と呼ばれる人工グラファイト試料では、図 4.5 e に示す

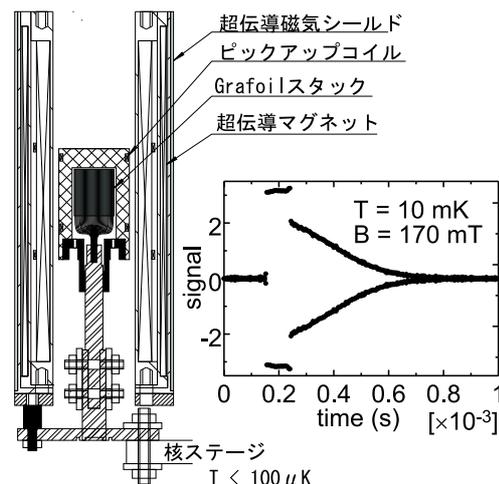


図 4.5 c: 2次元 ^3He の NMR 測定装置。挿入図は常磁性の単原子層 ^3He (1.2 層) 試料に対して得られたパルス NMR の自由誘導減衰 (FID) 信号。

ように、単結晶グラファイトとは定性的にかなり異なる LDOS ピーク構造が観測された。これを田上-塚田による c 軸方向に有限厚さをもつグラファイトの最表面の計算と比較すると、ちょうど厚さが 2次元グラファイトシート (グラフェン) 40 層程度の計算結果と良い一致を見る。これは HOPG が高い積層欠陥密度をもち、 c 軸方向の電気伝導度も単結晶グラファイトに比べて $\sim 1/100$ 程度であるという実験事実とも符合する。すなわち、HOPG では厚み方向の有限性のためにより 2次元的な電子状態ができており、ランダウ準位による LDOS ピークの振幅もより大きいと解釈される。

両試料ともフェルミエネルギー ($E_F: V = 0$) 直上に、エネルギー値がほとんど磁場変化しない LDOS ピークが観測されている。これはバンド間相互作用で強く結合した E_F を横切る縮退した 2本のバンドに由来するランダウ準位で、グラファイト結晶構造に特徴的なものである。自由電子系では見られない格子系特有のランダウ準位の存在が、このように本実験によって初めて明瞭に示された。

荷電粒子の磁場中サイクロトロン運動は中心座標について 2次元面内で縮退しているため、電子の波動関数は空間的に一様分布するはずである。しかし、不純物による並進対称性の破れがあるときはこの縮退が解けて、電子軌道はその周りに束縛されるであろう。図 4.5 f は、グラファイト表面上に存在する不純物分子 (原子?) 周辺における STM 像である。ランダウ準位に対応するバイアス電圧で走査したときは、不純物周りに中心で最大振幅をもつ円対称の電子状態が見られる (a 図)。一方、ランダウ準位の谷位置に対応したバイアス電圧のときは、不純物を中心としたドーナツ状の分布が観測された (b 図)。量子ホール状態の実現には、“ドリフト状態”と呼ばれる不純物による局在効果が本質的な役割を担っている

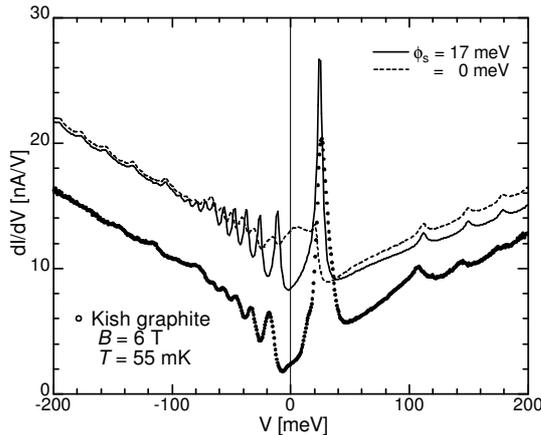


図 4.5 d: 単結晶グラファイト表面のトンネル分光測定の結果 (黒丸: $T=55$ mK, $B=6$ T)。実線は表面ポテンシャル ($\phi_s = +17$ meV) を考慮した場合の、点線は考慮しない場合の理論計算結果。

る。この測定はその素過程を原子レベルで観測できることを示している。

グラファイトの端 (エッジ) 状態の研究

近年、カーボンナノチューブやフラレンといったナノスケールの炭素の同素体が基礎研究と応用研究の両面で注目を集めている。これらの母物質とも言えるグラファイトの微結晶 (ナノグラファイト) も端を多数もつことによる新奇な機能性をもつことが分かってきた。グラファイト端の構造には、トポロジカルに zigzag 型と armchair 型の 2 種類が存在する (図 4.5 g)。

図 4.5 h (a) は、グラファイト表面の zigzag 端をもつステップエッジ近傍の STM 像である。端から 3 - 4 nm にわたって ($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$) $R30^\circ$ の超格子構造 (図中菱形) とハニカム状の超格子構造 (図中六角形) が観測された。同様の超格子構造は armchair 端付近でも観測された。田上-塚田による non-orthogonal tight-binding model を用いたシミュレーション結果 (図 4.5 h(b)) と比較すると、観測された超格子構造は完全な zigzag (armchair) 端にごく一部 armchair (zigzag) 端が混在した結果であることが分かった。

図 4.5 i は zigzag 端近傍での STS 測定の結果である。Zigzag 端を含む上層では -20 mV 付近に LDOS のピーク構造が観測され、ピーク高は端に近づくほど大きくなり、端を越えた途端に消滅する。一方、armchair 端ではこのようなピーク構造は観測されなかった。これは、理論的に予測されていた、zigzag 端にだけ存在する “端 (エッジ) 状態” と呼ばれる π 電子の局在状態を初めて実験的に捉えたものである。

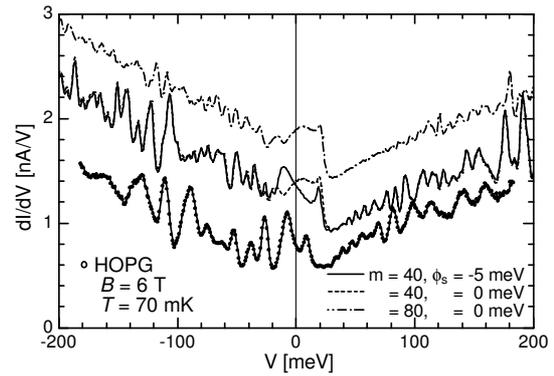


図 4.5 e: HOPG 表面のトンネル分光測定の結果 ($T=70$ mK, $B=6$ T)。実線はグラファイトの厚さを 40 層とし、表面ポテンシャル ($\phi_s = -5$ meV) を考慮したときの計算結果。点線、一点鎖線は、それぞれグラファイトの厚さを (40 層、80 層) とし、表面ポテンシャルを 0 とした場合の計算結果。実効的な厚さを薄くするほど、ランダウ準位による LDOS ピーク構造がシャープになる。

4.5.3 低次元導体における量子輸送現象

前述のように、ランダウ準位のトンネル分光測定の結果は人工グラファイト結晶 (HOPG) では単結晶に比べてより 2 次元性の高い電子状態が実現していることを示している。そこで、HOPG 試料の面内対角抵抗とホール抵抗を 0.5 K $< T < 300$ K, $0 < B < 9$ T の範囲で測定してみた。その結果、図 4.5 j に示すように量子ホール効果に類似したホール抵抗のプラトー構造 (図中矢印) が観測された。 $3.5 < B < 5.5$ T のプラトーが $\nu = 2$ に対応するとして、試料の形状を考慮してグラフェン 1 枚のホール抵抗値に換算してみると 36.5 k Ω となり、期待される量子化値 ($= \frac{h}{e^2\nu} = 12.9$ k Ω) とオーダーは一致する。同様の結果が他の研究者によっても報告されているが、単結晶試料のホール抵抗にはプラトーは観測されない。ここでは HOPG の 2 次元性の強さが重要な役割を果たしているに違いない。恐らく、理論で予測されている通り、2 次元グラフェンでは完全な整数量子ホール状態が実現するであろう。

また、数 K 以下の極低温域になると HOPG の面内対角抵抗が最低温度 0.5 K まで温度の対数に比例して増加する異常も観測された。比例定数は磁場の増加とともに大きくなり、その傾向は測定した最大磁場 9 T まで続く。この他、 $B \approx 0.1$ T で金属絶縁体転移的な磁気抵抗変化が観測されるなど、人工グラファイト結晶の低温量子輸送現象には不明な点が多い。そこで、これらの測定を 1 mK, 15 T のさらなる超低温・高磁場下に拡張する実験を準備している。

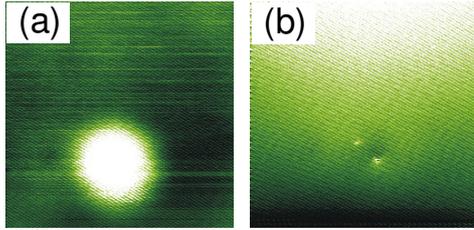


図 4.5 f: 不純物分子 (原子?) 周辺における HOPG 表面の STM 像 ($T = 55$ mK, $B = 6$ T, 70×70 nm²) (a) $V = +20$ mV で走査したとき (ランダウ準位による LDOS のピーク直上), (b) $V = +32$ mV で走査したとき (ランダウ準位による LDOS の隣接する二つのピークの間)。

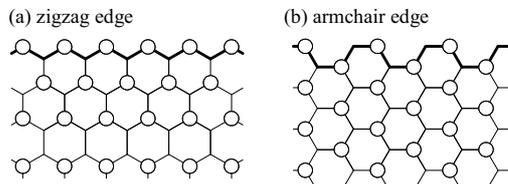


図 4.5 g: グラファイトにおける 2 種類の端 (a) zigzag 端、(b) armchair 端。

4.5.4 超低温実験技術の開発

小型低電力の超伝導永久モードスイッチの開発

クライオスタット内の断熱真空中に設置した超伝導マグネットの永久モード動作を ON (超伝導) / OFF (常伝導) するための小型で低電力の永久モードスイッチを開発した。製作したスイッチの永久モード時の直流抵抗は、既知のインダクタンスをもつマグネットの磁場減衰率を測定することにより $10^{-15}\Omega$ 以下と見積もられる。1 mW 以下の低パワーで動作することや、ON / OFF 切替の反応時間も 30 sec 以下と短いなど、優秀な性能を得ることができた。現在、この型の永久モードスイッチ 2 台が核断熱消磁冷凍機内に組み込まれ、順調に作動している。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Niimi, S. Murakawa, Y. Matsumoto, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: Characterization of ZYX Exfoliated Graphite for Studies of Monolayer ³He below 1 mK, Rev. Sci. Instrum. **74**, 4448-4452 (2003).
- [2] D. Tsuji, Y. Matsumoto, S. Murakawa, H. Akisato, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: Large Mass Enhancement in ³He Monolayer Fluids Adsorbed

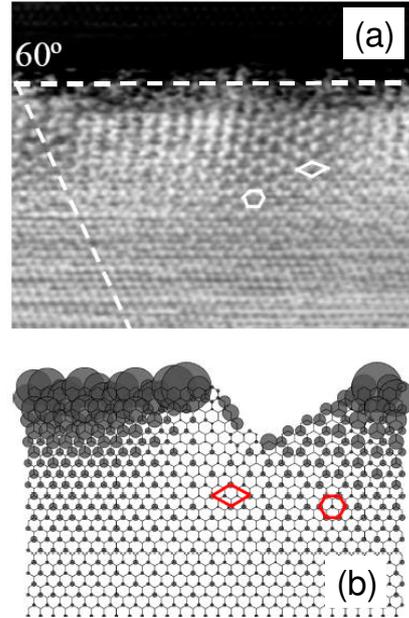


図 4.5 h: (a) 室温、大気中における zigzag 端近傍の STM 像 (10×8.2 nm²)。($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)R30° と八二カム状の超格子構造が見られる。(b) zigzag 端に armchair 端が少量混入した場合の状態密度の計算結果。各格子点の円の大きさが状態密度の大きさに比例している。

on Graphite Preplated with ⁴He, J. Low Temp. Phys. **134**, 31-36 (2004).

- [3] Y. Matsumoto, S. Murakawa, D. Tsuji, C. Bäuerle, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: Preliminary Heat-Capacity Measurements of 2D Solid ³He Adsorbed on Graphite Preplated with ⁴He, J. Low Temp. Phys. **134**, 61-66 (2004).
- [4] S. Murakawa, H. Akisato, Y. Matsumoto, D. Tsuji, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: NMR Measurements of 2D ³He Adsorbed on ZYX Exfoliated Graphite, J. Low Temp. Phys. **134**, 109-114 (2004).
- [5] J. Taniguchi, A. Yamaguchi, H. Ishimoto, H. Ikegami, N. Wada: Observation of the Fermi Fluid in ³He-⁴He Mixture Films Formed in One-Dimensional 28 Å Pores, J. Low Temp. Phys. **134**, 595-600 (2004).

(学位論文)

- [6] 谷口淳子: Quantum Fluid Phases of Helium confined in One-Dimensional Pores a Few Nanometers in Diameter (和訳: 直径数ナノメートル以下の 1 次元細孔中ヘリウム量子流体) (博士論文)
- [7] 松井朋裕: 超低温走査トンネル顕微鏡の開発とグラファイトの磁場中電子状態の研究 (博士論文)

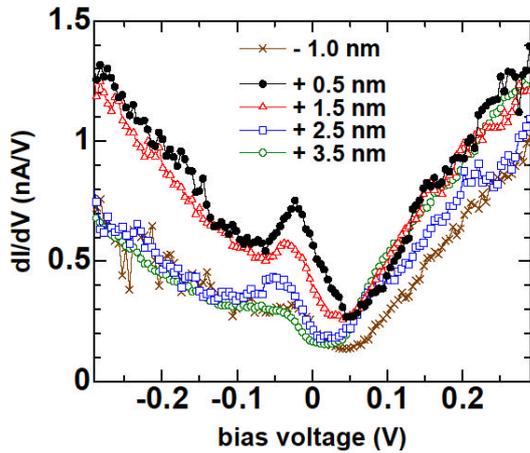


図 4.5 i: Zigzag 端付近の STS 測定の結果 ($T = 77$ K, 超高真空中)。数値は端からの距離を表す。

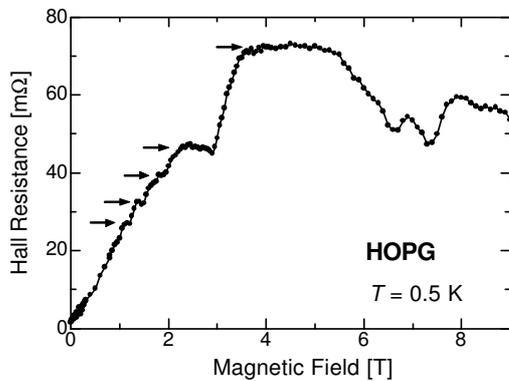


図 4.5 j: HOPG のホール抵抗の磁場変化 ($T = 0.5$ K)。矢印はホール抵抗のプラトーを示す。

- [8] 松本洋介: 熱容量測定による 2 次元ヘリウム 3 の強相関効果の研究 (博士論文)
- [9] 高橋祐丞: グラファイトの磁気抵抗測定 (修士論文)
- [10] 辻 太輔: 2 次元ヘリウム 3 の低温比熱 (修士論文)
- [11] 新見康洋: ZYX exfoliated graphite の物性評価 (修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [12] D. Tsuji, Y. Matsumoto, S. Murakawa, H. Akisato, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: Large Mass Enhancement in ^3He Monolayer Fluids Adsorbed on Graphite Preplated with ^4He , International Symposium on Quantum Fluids and Solids: QFS2003 (Albuquerque, New Mexico, USA, Aug. 3-8, 2003).

- [13] Y. Matsumoto, S. Murakawa, D. Tsuji, C. Bäuerle, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: Preliminary Heat-Capacity Measurements of 2D Solid ^3He Adsorbed on Graphite Preplated with ^4He , International Symposium on Quantum Fluids and Solids: QFS2003 (Albuquerque, New Mexico, USA, Aug. 3-8, 2003).
- [14] S. Murakawa, H. Akisato, Y. Matsumoto, D. Tsuji, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: NMR Measurements of 2D ^3He Adsorbed on ZYX Exfoliated Graphite, International Symposium on Quantum Fluids and Solids: QFS2003 (Albuquerque, New Mexico, USA, Aug. 3-8, 2003).
- [15] J. Taniguchi, A. Yamaguchi, H. Ishimoto, H. Ikegami, N. Wada: Observation of the Fermi Fluid in ^3He - ^4He Mixture Films Formed in One-Dimensional 28 Å Pores, International Symposium on Quantum Fluids and Solids: QFS2003 (Albuquerque, New Mexico, USA, Aug. 3-8, 2003).
- [16] T. Matsui, H. Kambara, K. Tagami, M. Tsukada, and Hiroshi Fukuyama: STS Observations of the Landau Levels in Graphite Surface, 1st International Symposium on Active Nano-Characterization and Technology: ANCT2003 (Tsukuba, Japan, Nov. 12-14, 2003).
- [17] Y. Niimi, T. Matsui, H. Kambara, K. Tagami, M. Tsukada, and Hiroshi Fukuyama: STM/STS Studies of Graphite Edges, The 9th International Symposium on Advanced Physical Fields "Characterization of Artificial Nanostructures and Nanomaterials" (Tsukuba, Japan, Mar. 1-4, 2004).

招待講演

- [18] Hiroshi Fukuyama, H. Kambara, and T. Matsui: Development of a New Millikelvin Scanning Tunneling Microscope, The 11th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (Atagawa, Japan, Dec. 11-13, 2003).

(国内会議)

一般講演

- [19] 松本洋介、村川 智、辻 太輔、秋里英寿、神原 浩、福山 寛: グラファイト上に吸着した 2 次元固体ヘリウム 3 の磁場中比熱 III、日本物理学会 2003 年秋季大会 (岡山大学、2003 年 9 月)
- [20] 村川 智、松本洋介、辻 太輔、秋里英寿、神原 浩、福山 寛: グラファイト上 2 次元固体 ^3He の NMR 測定、日本物理学会 2003 年秋季大会 (岡山大学、2003 年 9 月)
- [21] 辻 太輔、松本洋介、村川 智、秋里英寿、神原 浩、福山 寛: グラファイト上に吸着した 2 次元ヘリウム 3 流体相の低温比熱、日本物理学会 2003 年秋季大会 (岡山大学、2003 年 9 月)
- [22] 松井朋裕、神原 浩、田上勝規、塚田 捷、福山 寛: 走査トンネル分光法によるグラファイト表面のランダウ準位の観測、日本物理学会 2003 年秋季大会 (岡山大学、2003 年 9 月)

- [23] 谷口淳子、和田信雄、池上弘樹、山口 明、石本英彦: 直径 28 Å の 1 次元細孔中 ^3He フェルミ流体の比熱、日本物理学会 2003 年秋季大会 (岡山大学、2003 年 9 月)
- [24] 戸田 亮、浅野良太、平野大祐、山田智也、松下雄樹、谷口淳子、檜枝光憲、松下 琢、和田信雄: 3 次元メゾ多孔体 HMM-2 中の吸着ヘリウムの層形成、日本物理学会 2003 年秋季大会 (岡山大学、2003 年 9 月)
- [25] 松本洋介、辻 太輔、村川 智、秋里英寿、神原浩、福山 寛: 熱容量測定による 2 次元ヘリウム 3 の強相関効果の研究、東京大学物性研究所短期研究会「量子凝縮系研究の新展開」(東京大学、2004 年 1 月)
- [26] 松井朋裕、神原 浩、新見康洋、田上勝規、塚田捷、福山 寛: 超低温走査トンネル顕微鏡の開発とグラファイト表面のランダウ準位の観測、東京大学物性研究所短期研究会「量子凝縮系研究の新展開」(東京大学、2004 年 1 月)
- [27] 松本洋介、辻 太輔、村川 智、秋里英寿、神原浩、福山 寛: 熱容量測定による 2 次元ヘリウム 3 の強相関効果の研究、日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学、2004 年 3 月)
- [28] 辻 太輔、松本洋介、村川 智、秋里英寿、神原浩、福山 寛: 2 次元ヘリウム 3 の強相関効果に対する吸着ポテンシャルの影響、日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学、2004 年 3 月)
- [29] 村川 智、秋里英寿、松本洋介、辻 太輔、神原浩、福山 寛: 単原子層流体 ^3He の NMR 測定、日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学、2004 年 3 月)
- [30] 松井朋裕、神原 浩、新見康洋、田上勝規、塚田捷、福山 寛: 超低温走査トンネル分光法によるグラファイト表面のランダウ準位観測、日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学、2004 年 3 月)
- [31] 谷口淳子、和田信雄、池上弘樹、山口 明、石本英彦: 直径 28 Å の 1 次元細孔中 ^3He フェルミ流体の比熱 II、日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学、2004 年 3 月)
- [32] 松下 琢、谷口淳子、戸田 亮、松下雄樹、檜枝光憲、和田信雄: ナノ細孔中の吸着ポテンシャルと吸着ヘリウムの次元性、日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学、2004 年 3 月)
- [33] 戸田 亮、山田智也、後藤田朋孝、谷口淳子、檜枝光憲、松下 琢、和田信雄: 3 次元メゾ多孔体 HMM-2 中 ^4He の低温状態、日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学、2004 年 3 月)
- [34] 松下雄樹、戸田 亮、谷口淳子、檜枝光憲、松下 琢、和田信雄: 直径 2.2 nm の 1 次元細孔中に吸着した ^4He の比熱、日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学、2004 年 3 月)
- [36] 福山 寛: 3 角格子上の強相関フェルミオン系 — 2 次元の低温物性、東京大学物性研究所短期研究会「フラストレーションが創る新しい物性」(東京大学、2003 年 12 月)
- [37] 福山 寛: 単原子層ヘリウム 3 の強相関効果、東京大学物性研究所短期研究会「量子凝縮系研究の新展開」(東京大学、2004 年 1 月)
- [38] 神原 浩、松井朋裕、新見康洋、福山 寛: 超低温走査トンネル顕微鏡の開発と低温物性研究への応用、東京大学物性研究所短期研究会「量子凝縮系研究の新展開」(東京大学、2004 年 1 月)

(セミナー)

- [39] 福山 寛: 2 次元のフェルミ流体と固体 — 単原子層ヘリウム 3 の磁性と超流動、物理学教室物性セミナー (東京大学、2003 年 6 月)
- [40] 福山 寛: 2 次元ヘリウム 3 の磁性と超流動、物理学教室談話会 (名古屋大学、2003 年 7 月)
- [41] 福山研究室: 多重極限環境下で作動する走査トンネル顕微鏡の開発、理学系研究科 理学-先端産業懇談会 (東京大学、2003 年 7 月)
- [42] T. Matsui: Development of an Ultra-low Temperature Scanning Tunneling Microscope and Studies of the Electronic States of Graphite in Magnetic Fields (University of Hamburg, Hamburg, Germany, Mar. 1, 2004).
- [43] T. Matsui: Development of an Ultra-low Temperature Scanning Tunneling Microscope and Studies of the Electronic States of Graphite in Magnetic Fields (CRTBT-CNRS, Grenoble, France, Mar. 9, 2004).

(集中講義)

- [44] 福山 寛: ヘリウムの量子凝縮相と超低温開拓、名古屋大学大学院理学研究科 DC 向け特別講義 (名古屋大学、2003 年 7 月)

招待講演

- [35] 福山 寛: 2 次元 ^3He の磁性とフェルミ流体効果、日本物理学会 2003 年秋季大会 領域 6 シンポジウム (岡山大学、2003 年 9 月)

4.6 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。若い力が、個性を発揮して、それぞれのテーマに取り組んでいる。

4.6.1 強相関 2 次元電子系

半導体 2 次元系の研究は量子ホール効果などの強磁場中の研究を中心に発展してきたが、近年、シリコンの電子系や GaAs の正孔系などのような電子（正孔）間の相互作用が強い系でのゼロ磁場、あるいはスピンのみに作用する面内磁場下での振る舞いが注目されている。これらの系では、電子（正孔）濃度などをパラメータとして、金属・絶縁体転移が観測される。また、1999 年の岡本らの研究（PRL 82, 3875）をきっかけに、スピン帯磁率増強因子の電子間相互作用パラメータ r_s に対する依存性を調べるための理想的な系としても盛んに研究が行われている。

シリコンヘテロ接合界面電子系での金属相

面内磁場による完全スピン偏極が強相関 2 次元系における金属相の消失を引き起こすことが、これまで Si-MOS 電子系や GaAs 正孔系などで報告されており、スピン自由度が 2 次元金属相出現の必要条件と考えられてきた。本年度、我々は試料中の不規則ポテンシャルが非常に小さいシリコンヘテロ接合界面電子系試料においては、完全スピン偏極状態においても金属相が生き残ることを報告した。また、強相関状態においてもスピン磁化が面内磁場に対して直線的に増大することと、スピン磁化率が不規則ポテンシャルにほとんど依存しないことを示した。また、2 次元電子の内部自由度と不規則ポテンシャルの強さをパラメータとして、金属相出現条件を示す相図を提唱した。

絶縁体相におけるスピン状態

絶縁体相の研究は測定が困難なこともあり金属相ほど盛んに行われていないが、高温超伝導体に対するモット絶縁体の関係と同様に、金属相の電子状態を理解する上で量子融解手前の絶縁体相の電子状態を理解することは重要であると考えている。また、金属相でのスピン帯磁率が金属・絶縁体転移点に向かって発散するとの報告もあり、絶縁体相での磁気状態の研究が期待されている。絶縁体相での電子状態は、強い量子効果を含んだ Wigner 固体状態が有力な候補であるが、その場合、隣接電子間の交換相互作用に Aharonov-Bohm 効果による劇的な変化を加えることができると予想される。本年度は、まず、 ^3He - ^4He 希釈冷凍機内の試料回転機構に大きな改良を施し、回転時の発熱を最小限にして、かつ 0.1 K 以下の極低温から数 K までの範囲を数分のオーダーで速やかに変化させて任意の温度で安定させること

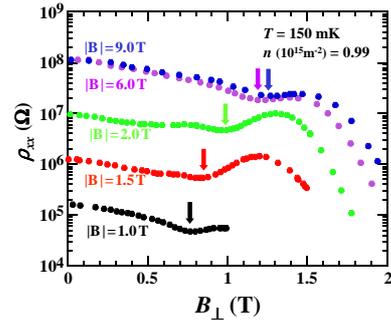


図 4.6 a: Si-MOS 絶縁体相における測定例

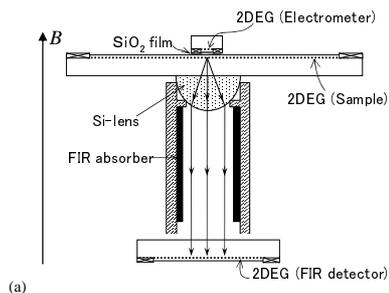
のできるシステムを自作した。この装置を用いることにより、温度、トータル磁場、垂直磁場、キャリア濃度などのパラメータを変化させた膨大なデータを比較的短時間で取得することが可能となった。次に、活性化伝導領域における Si-MOSFET の電気抵抗が垂直磁場に対して振動し、この振動がトータル磁場（ゼーマンエネルギー）に支配されていることを観測した（図 4.6 a）。

4.6.2 THz 顕微鏡・走査型電位計の開発と半導体 2 次元系の量子物性研究

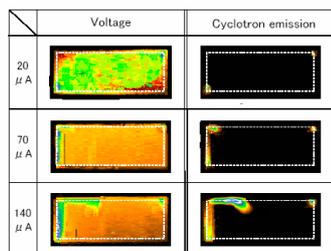
昨年度より開発を行ってきた 2 種類の走査型プローブ - THz 顕微鏡・走査型電位計がほぼ完成し、今年度はさらに、これら 2 つのハイブリッド型という新奇な顕微鏡の構築にも成功した。開発された顕微鏡は、世界的に見ても類のないユニークなものであり、物質中の電子の空間・時間両軸に沿った振舞を探求する上で、極めて強力なツールになると期待される（量子ホール素子を用いた走査型電位計は、Applied Physics Letters 誌 2004 年 2 月 16 日号の表紙を飾った）。以下に、これらの技術を、実際に半導体ヘテロ構造中 2 次元電子系試料に適用することによって得られた成果について報告する。

ランダウ準位内 / 間散乱の画像観測

半導体に磁場を印加すると、ランダウ量子化により電子の性質は劇的に変化する。この系で発生する縦電圧には、キャリアの非弾性的な準位内 / 間散乱という 2 つの寄与が存在する。これら 2 つが各々実際の伝導体内でどのように分布しているのかは、興味深い研究対象であるものの、技術的な困難さからこれまでに明らかにされてこなかった。そこで、本研究で開発した THz 顕微鏡・走査型電位計のハイブリッド型を適用することで、各々の画像観測に初めて成功した（図 4.6 b）。その結果、(1) 準位内散乱の局所性、準位間散乱の非局所性という対照的な振舞、(2) 準位間散乱の巨視的な非局所性に起因するサイズ効果、が明らかにされた。



(a)



(b)

図 4.6 b: (a) THz 光顕微鏡・走査型電位計ハイブリッド系の概念図 (b) 電圧分布 (左) と発光分布 (右)

ナノ探針付き FET 型量子ホール素子を用いた走査型電位計の最適化

前年度において、ナノ探針付き FET 型の量子ホール素子を用いた新しい電位計法を開発した (図 4.6 c)。今年度は、この電位計の感度や空間分解能の最適化を試みた。電位計となるホール素子のサイズやナノ探針の形状を工夫することで、以前より高感度・高分解能な測定が可能となった。

走査型電位計を応用した非平衡雑音の空間分解測定

雑音は、半導体 2 次元系中の電子の振舞を探求する上で重要な情報となるにもかかわらず、これまで詳細な研究が行われてこなかった。そこで、走査型電位計から読み出される電位の雑音を検出し、かつその空間分布を測定する新しいシステムを立ち上げた。測定の結果、端状態とバルク状態間の非平衡伝導の緩和に伴って出現する巨大な雑音の空間分解検出に成功した (図 4.6 d)。

光パルス励起による非平衡キャリアのダイナミクスの研究

光パルス励起法による非平衡キャリアの緩和過程の観測は、キャリアの散乱が何に起因するのかを時

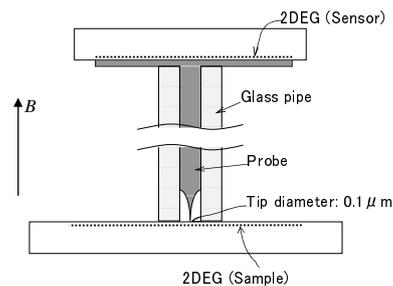
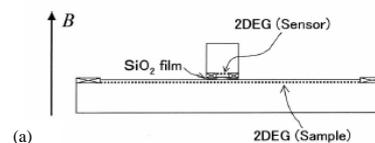
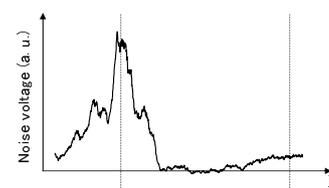


図 4.6 c: ナノ探針付き FET 型量子ホール素子を用いた走査型電位計の概念図



(a)



(b)

図 4.6 d: (a) 雑音分布測定の実験方法の概念図 (b) 雑音分布の測定結果。左右の点線は試料の両端を表している。

間発展の点から直接的に探る有力な手段である。現在、量子ホール系を対象として、緩和時間や励起パルス幅の違いに対する光応答の変化に関する測定を行っている。

4.6.3 整数量子ホール系における Ettingshausen 効果の観測

量子ホール抵抗を抵抗標準として用いる上で、大電流によるブレイクダウンの機構の解明は重要課題であるが、そのためには試料中でのエネルギーの流れを把握する必要がある。また、試料中のエネルギー散逸の空間分布を知ることは、量子ホール素子を遠赤外光の発光体や検出体として用いる場合にも重要である。また、強磁場中の電子の運動はホール角がほぼ 90 度に近い特異な状況にあるため、流体力学的にも新しい物理が期待される。量子ホール系において電流と垂直方向に温度差が生じる現象、すなわち Ettingshausen 効果が北大の明楽により予測されてい

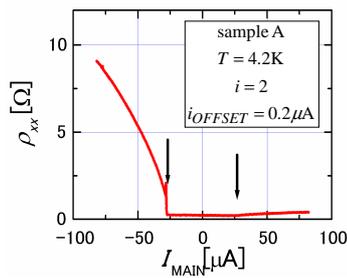


図 4.6 e: メインチャンネルの電流に対するミニチュアホールバーの抵抗 (電子温度計) の変化。Ettingshausen 効果による電流の向きに対する大きな非対称性が観測された。矢印はメインチャンネルでのブレークダウン電流を示す。

た。本年度、我々は、電子温度計としてチャンネル両端に極微なホールバーを取り付けた試料を用いることで、Ettingshausen 効果に対応した電子温度変化を観測した (図 4.6 e)。

4.6.4 InAs 表面反転層における電気伝導

InAs においては電子の有効質量が非常に小さいことから、多サブバンド状態の 2 次元系を比較的容易に形成することができ、プラズモン機構による超伝導が期待される。超伝導の出現のためには高い電子密度が必要であるが、我々はいくつかのアプローチで表面における高電子密度状態の実現を目指している。

絶縁膜をスパッター蒸着した界面の電子状態

SiO₂ をスパッター蒸着した界面の低温・強磁場中の電気伝導を調べた。界面に平行な磁場に対して Shubnikov-de Haas 振動が観測された。この結果は、スパッター蒸着の衝撃により導入された格子欠陥によって 3 次元的な性格をもつ電子系が生成されたことを示唆する。垂直磁場依存性のデータと組み合わせた解析により、この 3 次元的な電子の厚みが 0.3 μm 程度であることがわかったが、150 までの熱処理によって 3 次元的な電子はその分布を広げながら消滅した。さらに、この一連のプロセス (スパッター蒸着と熱処理) によって表面 2 次元層の電子濃度が、大きく増加することがわかった。

金属を真空蒸着した劈開表面の電気伝導

ヘリウム温度で結晶を劈開後、金属原子をその場蒸着することによって、劈開面に電子をドーピングし、面内の電気伝導を測定する手法を確立した。予備実験

において、0.1 層程度の銀蒸着によって劈開面の電気伝導が劇的に減少することを観測した。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] M. Ooya and T. Okamoto: Anomalous metallic phase and magnetism in a high-mobility and strongly correlated 2D electron system, *Physica E* **18**, 272-273 (2003).
- [2] Y. Kawano and S. Komiyama: Spatial distribution of non-equilibrium electrons in quantum Hall devices: Imaging via cyclotron emission, *Physical Review B* **68**, 085328-1-085328-5 (2003) (Subsequently selected to appear in *Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology* **8** (11), (2003)).
- [3] Y. Kawano and T. Okamoto: Scanning electrometer using the capacitive coupling in quantum Hall effect devices, *Applied Physics Letters* **84**, 1111-1113 (2004).
- [4] T. Okamoto, M. Ooya, K. Hosoya and S. Kawaji: Spin polarization and metallic behavior in a silicon two-dimensional electron system, *Physical Review B* **69**, 041202-1-041202-4 (Rapid Communication), (2004) (Subsequently selected to appear in *Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology* **9** (4), (2004)).

(学位論文)

- [5] 小森陽介: 「二次元電子系における Ettingshausen 効果の観測」(修士論文)
- [6] 粥川直人: 「InAs へき開面の二次元伝導」(修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [7] Y. Kawano and T. Okamoto: Local electrometer using magnetoresistance oscillation of a two-dimensional electron gas, *The 15th international conference on High Magnetic Fields*, Oxford, UK, August 5 - 9, 2002.
- [8] Y. Kawano and T. Okamoto, Scanning electrometer using gate effect for a quantum Hall device by a charged nano-probe, *15th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems*, 14-18 July 2003, Nara.
- [9] Y. Tsuji and T. Okamoto, Subband Structure and Magneto-Conductivity of InAs-MIS Inversion Layers, *15th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems*, 14-18 July 2003, Nara.

(国内会議)

一般講演

-
- [10] 河野行雄、岡本徹：ナノプローブによるゲート効果を用いた量子ホール系における電位分布計測、日本物理学会 2003 年秋季大会、(岡山大学、2003 年 9 月)
 - [11] 河野行雄、岡本徹：量子ホール系におけるランダウ準位間/内散乱の画像観測、日本物理学会第 59 回年次大会、(九州大学、2004 年 3 月)
 - [12] 辻幸秀、粥川直人、岡本徹：スパッタリングにより励起された InAs 表面近傍の電子系に対する磁気抵抗測定、日本物理学会第 59 回年次大会、(九州大学、2004 年 3 月)
 - [13] 小森陽介、河野行雄、岡本徹：整数量子ホール系における Ettingshausen 効果の観測、日本物理学会第 59 回年次大会、(九州大学、2004 年 3 月)
 - [14] 大屋 満明、當山 清彦、岡本徹：Si-MOS 2 次元電子系における活性化型伝導領域での磁気抵抗振動とスピンの偏極、日本物理学会第 59 回年次大会、(九州大学、2004 年 3 月)

5 一般物理理論

5.1 宇宙理論研究室 (佐藤・須藤)

宇宙物理学は取り扱う対象が極めて多岐に渡っているのみならず、その方法論も多様であり非常に学際的な体系をなしている。実際、素粒子物理学、原子核物理学、プラズマ物理学、流体力学、一般相対性理論、などの基礎物理学を駆使して宇宙の諸階層の現象の本質的な理解にせまろうという点では、応用物理学的な色彩の濃い学問分野である。当教室の宇宙理論研究室では、佐藤教授、須藤助教授、樽家助手、および二十数名の大学院学生、研究員が様々な宇宙物理の問題に取り組んでいる。研究室の活動は、「初期宇宙・相対論」、「観測的宇宙論」、「超新星・高密度天体」の3つの中心テーマを軸として行なわれており、研究室全体でのセミナーに加えて、それぞれのテーマごとのグループでのセミナーや論文紹介等、より研究に密着した活動も定期的に行なわれている。

我々の住むこの宇宙は今から150億年の昔、熱い火の玉として生まれた。膨張にともなう温度の降下によってハドロン、原子核、原子が形成され、さらにガスがかたまり銀河や星などの天体が形成され豊かな構造を持つ現在の宇宙が創られた。これが物理学に基づいて描きだされてきた現在の宇宙進化像である。しかし宇宙の進化には多くの謎が残されている。またさらに近年の技術革新の粋を用いた宇宙論的観測の爆発的進歩によって新たな謎も生じている。宇宙論のもっとも根源的謎はこの3次元の空間と1次元の時間を持った宇宙がい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、最近の超絶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として、大規模数値シミュレーションを用いた銀河・銀河団の形成とその空間分布、銀河団のX線光度関数とその進化、重力レンズ現象と高赤方偏移天体、赤方偏移空間での銀河分布2体相関関数、銀河のハッブル系列の起源、宇宙論的光円錐効果などがあげられる。更に最近では、太陽系外惑星探査の研究も開始しつつある。

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

5.1.1 初期宇宙・相対論

近年、素粒子物理学の進展により、我々が高次元時空中の四次元膜（ブレーンワールド）に存在する可能性が盛んに議論されている。相対論・宇宙論の立場から、ブレーン上の重力理論を解析し、ブレーンワールドの検証可能性を調べている。

バルクスカラー場によるインフレーションモデル

高次元バルクに存在するスカラー場によって引き起こされるインフレーションモデルを構築し、生成される初期密度揺らぎ、重力波の解析を行った。ブレーンに拘束されているインフラトンによって引き起こされるインフレーションでは、インフレーションのエネルギースケールが高い場合、重力波の振幅と密度揺らぎの振幅の比が、4次元理論に比べて著しく抑制されることが知られている。しかし、このモデルでは、生成される重力波の振幅が密度揺らぎ

の振幅に対して抑制されないことを示した。またこのモデルでは5次元の宇宙論的摂動の解が解析的に求まることを示した [150]

ブレーンワールドにおける背景重力波

統一理論の候補として考えられている M 理論や超弦理論といった理論は、我々の住む宇宙が10次元や11次元という高い次元を持った時空であることを示唆している。これを検証するには、0.1mm以下という極めて小さいスケールの重力の振る舞いを調べる必要があり、地上の実験では非常に困難とされている。一方で、インフレーション中に生成された背景重力波は、宇宙そのものが0.1mm以下だったころの情報も保ったまま我々のところにやってくると考えられており、余剰次元空間に対する唯一の直接的なプローブとなる。本研究では、ランドールとサンドラムによる5次元ブレーン宇宙モデルを使い、そこでの背景重力波の伝搬方程式を数値的に解くことで、その振る舞いを調べた。その結果、我々の住むブレーン上において、高次元宇宙特有の宇宙膨張則による効果よりも、Kaluza-Klein モードとして余剰次元方向へ逃げていく効果の方が勝ることが確認された。これによって、余剰次元空間のスケールが0.1mmであるとき、0.2mHz以上の背景重力波のスペクトルに大きな変更が加えられることが示唆される。 [56, 86, 101, 164, 171, 216]

ブレーンワールドにおける宇宙背景輻射

ランドールとサンドラムによる5次元ブレーン宇宙モデルにおける宇宙背景輻射を調べた。ブレーンワールドモデルでは重力だけがバルクを伝搬できるため、ブレーン上の重力場の振舞いは標準的な四次元一般相対論とは異なり、ブレーン上でのアインシュタイン方程式にバルクの重力波の寄与を表す補正項が加わる。この項は、一様等方宇宙を考える際には、光子のような通常の輻射と同様に宇宙膨張に寄与する暗黒輻射と呼ばれる成分を持つ。この暗黒輻射は宇宙背景輻射に大きな影響を与えうる。しかしその効果を定量的に評価するためには、バルクの重力場に起因する非等方ストレスを評価しなければならない。本研究では低エネルギー展開を用いて、バルクの重力場を近似的に解くことで、ブレーン上に励起される非等方ストレスを評価し、暗黒輻射が宇宙背景輻射に与える影響を定量的に評価した。この結果をWMAPによる宇宙背景輻射の観測と比較し、バルクに存在するブラックホールの質量に制限をつけた [5, 72, 115, 234, 235]。

ブレーンワールドにおけるバルクの重力場と暗黒輻射

バルクの重力場によって励起される暗黒輻射は宇宙論的摂動を考える際に重要な役割を果たす。暗黒輻射はバルクに存在するブラックホールによっても

たらされることが知られている。しかし暗黒輻射の摂動とバルクの重力場の摂動の関係は明確になっていなかった。そこで、我々は宇宙論的摂動が解析的に解ける唯一のブレーンワールドモデルにおいて、両者の関係を調べた。結果として、暗黒輻射の摂動はバルク摂動の規格化不可能モードに対応し、長波長極限でバルク中の微小な質量を持つブラックホールと関連していることを明らかにした。さらに、このモードによるブレーン上での非等方ストレスを決定し、宇宙背景放射の非等方性観測への影響について議論した。 [51, 135, 169]

D ブレーン上の重力理論

ブレーンワールドの考えはストリング理論におけるDブレーンの発見に基づいている。そこでDブレーンを記述する有効理論であるtypeIIB超重力理論に基づいて、Dブレーン上の重力理論を調べた。その結果、ブレーンの自己重力を考慮すると、ブレーン上に局在するゲージ場は重力場のソースとして寄与しないことが分かった。この結果はブレーン上の宇宙定数に依存しており、もしブレーン上に宇宙定数が存在すると、ゲージ場は重力場のソースになり得ることを示した。これはDブレーン上の物質と宇宙定数の関係に興味深い示唆を与える。この結果に対する理解を得るためにDブレーン上の重力を記述する有効作用を導いた。その結果、BPS条件を課し、ブレーン上の宇宙定数を0と仮定すると、ブレーンの張力と電荷の作用がちょうど打ち消しあい、ブレーン上に局在するゲージ場が重力場のソースとして寄与しないことが分かった [6, 7, 8]。

D ブレーン宇宙論

Dブレーンの基本的な性質として、Born-Infeld action や RR field による相互作用などがある。そこでBorn-Infeld action 内のゲージ場の宇宙論的影響を近似することなく調べる方法を開発した [42]。またDブレーンが2枚あるシステムにおける、これらの性質の宇宙論的影響を自己重力が無視できるような極限で解析した [42]。その結果、ブレーン上のゲージ場によってブレーンの軌道は変わらないが、ブレーン内の宇宙論的發展は大きく変化し、特にゲージ場が非常に強いときにはインフレーションが自発的に起こることがわかった。

インフレーションするブレインの安定性

反ド・ジッター時空に反転対称性をもったインフレーションするブレインを2枚埋め込むと、ブレイン間の距離は摂動に対して、不安定なことが知られている。本研究ではバルクにスカラー場を入れることでこの不安定性を安定化できるかを考察した。その結果負の張力をもつブレインにインフラトンがある場合、安定なモデルを作れることを示した [73]。

高次元膜宇宙における PBH の蒸発

Randall と Sundrum のタイプ 2 膜宇宙モデルに基づき、宇宙初期に形成される始原的ブラックホール (PBH) が質量降着によって成長することに伴う質量分布スペクトルの時間変化の可能性、および、それらから Hawking 輻射を介して放出される粒子スペクトルの特徴について調べた [55, 85, 100, 136, 137, 163, 170, 215, 228]。まず、宇宙に一様等方的に存在していると考えられる PBH からは、起源がほとんど謎とされている宇宙背景 X 線、 γ 線の一成分を担い得る光子が放出されていることに着目する。観測されている背景光子のスペクトルとの比較から、五次元的な極初期宇宙における PBH の成長がそれほど強くないとき、PBH の残存量は四次元宇宙での上限をはるかに上回り得ることを示した。また、もし実際にそうであるならば、およそ 10 fm 以上の大きさの余次元が存在せねばならないことも分かる [55, 85, 100, 136, 163, 215, 228]。一方、銀河系に分布するダークマターとしての PBH からは、宇宙に極めて少量しか存在しない反陽子が放出されている可能性がある。銀河系を伝搬して地球に到来する反陽子は BESS など年々観測が重ねられており、十一年太陽周期のトレースが進むにつれ、ブラックホール蒸発などエキゾチックな起源を持つ成分の定量的同定の精度が向上している。この結果を用い、PBH の量が多い場合には、やはり 10 fm 程度より大きな余次元がなければならないことを示した [100, 137, 170, 228]。

非一様宇宙での Affleck-Dine Baryogenesis

最近の観測結果から通常考えられているより初期の段階から天体の形成や再イオン化が起こっていたことが分かって来た。これをうけて、baryogenesis の相転移の際に局所的に baryon 密度の高い領域が生成された可能性について研究を行った。[173]

5.1.2 観測的宇宙論

N 体自己重力系の準平衡状態の研究

適当な初期条件から出発した N 体自己重力系は、孤立系の場合、自由落下時間で力学的に安定な状態に落ち着き (ピリアル平衡)、その後、2 体緩和により、じわじわと構造が進化していく。こうした準平衡状態の力学構造とその性質を理解するため、我々は、系統的な恒星衝突系の N 体シミュレーションを行った。その結果、じわじわ進化する緩和過程において、系の遷移状態が、恒星ポリトロープと呼ばれる 1-パラメーター系列の分布関数で統一的に記述できることがわかった。さらに、初期条件をいろいろ変えて、系の状態が、恒星ポリトロープ分布に近づく過程を調べたところ、比較的熱平衡状態に近いエネルギー領域で、恒星ポリトロープ分布へ漸近する様子が見られた。こうした数値結果は、自己重力系の熱力学的性質を反映するものであり、一般の長距離

系に対する緩和過程を理解する上で、重要な示唆を与えうる。[2, 68, 111, 154, 165, 199, 200, 201, 232]

銀河団の非重力的加熱

銀河団から放射されている X 線はダークマターハロー中に閉じ込められている高温ガスに由来すると考えられている。我々は、ダークマターハローは Navarro et al. (1996) で示されたようなユニバーサルな密度分布を持つこと、および、高温ガスは等温で、ダークマターハローによる重力と静水圧平衡にあるという仮定の下で、高温ガスからの X 線光度をダークマターハローの質量の関数として求めた。そして、銀河団の X 線光度・温度関係、および、X 線温度関数のそれぞれについて、観測結果を再現するような質量・温度関係を求めた。その結果、銀河団内の高温ガスは、断熱圧縮などのダークマターハロー形成に由来する重力的な加熱のみでなく、星形成などに由来する非重力的な加熱の影響が重要であると示唆を得た。

この結果を基に、我々は、非重力的加熱源となる天体の正体を探った。加熱天体の候補として超新星爆発と電波銀河のジェットの両者を同時に考慮した理論モデルを構築し、観測結果を説明するために必要な加熱効率を求めた。その結果、二通りの可能性が考えられることが分かった。一つは、「標準」的な量の超新星爆発からの加熱に加えて、「標準」的な量の電波銀河のジェットによる加熱を行なうものであり、もう一つは、「標準」値の数倍の量の超新星爆発からのみの加熱を行なうものである。後者に関しては、加熱の強さが高赤方偏移到偏っている場合でも観測結果が再現できることを示した。[20, 21, 96]

暗黒物質ハローの特異速度場

暗黒物質ハローの速度分散をモデル化するには、大域的な密度を表す密度パラメータ Ω_0 よりも、そのハローの位置での局所的な密度パラメータを用いたほうが確であることを具体的に示した。[25]

DIOS を用いたダークバリオンの探索

我々の宇宙で現在までに観測できるバリオンの質量密度は、ビッグバン元素合成理論や宇宙背景放射の観測が予言する値のおよそ 20-30% ほどしかない。残りの未だに観測されていないバリオン (暗黒バリオン) の大部分は、銀河団の周縁部や大規模構造のフィラメント部分に存在する温度が 10^5 K から 10^7 K の Warm-Hot Intergalactic Medium (WHIM) と呼ばれるガスであると考えられている。WHIM 自身が出す放射は極めて小さいため遠方のクエーサーのスペクトル中に吸収線として観測される以外には観測方法がなかったが、我々は宇宙論的流体シミュレーションを用いてこれらを酸素の輝線を用いて直接観測する可能性について研究を行った。その結果、数年後

に実現される数 eV のエネルギー分解能を持つ X 線分光器と 4 回反射の X 線望遠鏡を用いれば、温度が 10^6 K から 10^7 K の間にある WHIM については直接観測可能であることを示した。また、この結果に基づいて WHIM 専用の X 線観測衛星計画 Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor (DIOS) が東京都立大学、宇宙航空研究開発機構を中心とするグループで提案している。[12, 66, 67, 146, 148, 110, 179, 194, 74, 116, 180]

ミンコフスキー汎関数を用いた SDSS 銀河分布のトポロジー解析

SDSS や 2dF を代表とする大規模な銀河サーベイにより、フィラメンタリー状に広がる銀河分布の 3 次元的な大構造が全天の 4 分の 1 にわたって観測されつつある。そこで今回、ミンコフスキー汎関数と呼ばれる幾何的指標を使って、伝統的な統計手法である 2 点相関関数では記述し得ない大構造のトポロジーの詳細な定量的解析を行った。N 体シミュレーションによる理論予言との比較の結果、観測された宇宙大構造のトポロジーは、標準的な宇宙構造形成モデルである、宇宙項入りの冷たい暗黒物質モデルによって、矛盾なく説明できることがわかった。[29]

崩壊する暗黒物質と銀河団数密度の進化

銀河団数密度の観測から、過去に重い銀河団が予想以上あったことが分かっている。この観測を良く説明モデルとして、我々は崩壊する暗黒物質を考えた。崩壊する暗黒物質宇宙における銀河団数密度を解析的に計算し、観測と比較したところ、宇宙年齢程度の寿命で観測をよりよく説明できることが分かった [31, 208]。また、Sunyaev-Zel'dovich 効果による宇宙背景放射の揺らぎをこの模型の下で計算した [167]。

3 軸不等楕円体ハローに基づく重力レンズモデル

これまで解析的な重力レンズ確率の計算は基本的に球対称を仮定して行われてきた。しかしながら、N 体計算で得られるダークハローは球対称とは程遠く、しかも強い重力レンズ現象は非球対称性に敏感なため、球対称を仮定した計算は正確でない可能性がある。我々は 3 軸不等楕円体ハローモデルを用いて、初めて非球対称性を系統的に取り込んだ解析計算を行い、非球対称性が重力レンズ確率を一桁程度増やすことを指摘した。また、観測との詳細な比較の結果、冷たい暗黒物質モデルに基づく理論予言と観測が良く一致することを示した [32, 123, 175]。

高赤方偏移銀河の空間分布とハローモデル

高赤方偏移銀河、そしてそれらの空間分布は銀河進化や構造進化を調べる上で非常に重要であり、直接的である。現在、狭域帯フィルタを用いた望遠鏡の観測により多くの高赤方偏移銀河が見付かっている。そこでそれらの 2 点相関関数から、ハローモデルと呼ばれる現象論的モデルを用いて、これらの銀河がどのような質量の暗黒物質ハローにいくつあるのがもっとももらしいかを調べた。その結果、ライマン・ブレイク銀河と呼ばれる種族に関しては従来と無矛盾な結果が得られるのに対して、ライマン α 輝線銀河と呼ばれるものに関しては、小スケールと大スケールの双方を同時に満足するような尤もらしいモデルを得ることが出来なかった。このことはライマン α 輝線銀河の形成過程が普通の銀河とは異なることを示唆しているのかも知れない [26]。

SDSS のデータを用いた重力レンズクエーサーの探索

今や重力レンズクエーサーは単なる一般相対性理論の観測的な証拠にとどまらず、宇宙を探る有用な道具の 1 つとして使われている。現在までにおよそ 1 万個のクエーサーを用いた大規模な重力レンズクエーサーの探索が幾つか行われてきたが、現在進行中の日米独の共同プロジェクトであるスローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) では最終的にその 10 倍となるおよそ 10 万個のクエーサーのデータが得られる予定であり、我々はそれを用いて空前の規模の重力レンズクエーサー探索を行っている [97]。これまでに得られている 4 万個のクエーサーを解析し、幾つかの候補天体を追加観測した結果、これまで 13 個の新しい重力レンズクエーサーを発見することに成功した [22, 23, 33, 151, 181, 203, 240]。今後、まだ追加観測されていない候補天体の観測や新しいデータの解析を行っていく予定である。

最大離角のクエーサー重力レンズ多重像の発見

現在標準的に用いられている冷たい暗黒物質モデルは、銀河団スケールの暗黒物質の集中により、これまでに知られている最大のおよそ 7 秒角をはるかに超える大きな分離角をもつ重力レンズクエーサーが存在しうるとを予言していたが、これまで発見されていなかった。我々は SDSS のデータを用いた探索、およびすばる望遠鏡、Keck 望遠鏡を用いた追加観測により、世界初の銀河団による大分離角 (14.62 秒角) の重力レンズクエーサー SDSS J1004+4112 を発見することに成功した [24, 34, 124, 125, 152, 207, 183, 166, 239, 241]。今回の発見で判明した大分離角重力レンズ確率が現在標準的に用いられている冷たい暗黒物質モデルによる理論予言と良く一致したため、そのような暗黒物質モデルを強く支持する結果となっている。

重力レンズ銀河の内部構造と外的剪断

重力レンズクエーサー系の重力レンズ銀河の質量分布のモデル化で複数像間の明るさの比が多くの系において再現できないことから、銀河内の substructure の存在が指摘されてきた。我々は通常無視される銀河の内部構造と外的剪断 (external shear) の高次項を取り入れて再解析を行った結果、いくつかの系で複数像間の明るさの比を再現し、従って substructure がそれほど必要ないことを示した [35]。

非線形重力系の位相相関の統計指標

ボイドやフィラメンタリー状の複雑な構造をなす銀河分布は、ガウス統計では記述しきれない統計的性質を持つ。分布が非ガウスであることは、フーリエ空間でモードの位相が互いに相関をもつことに相当するが、フーリエ位相の値自体に位相相関の情報がどのように含まれているかは、明らかでなかった。最近になってようやく、名古屋大学の松原助教授により、位相値の和の分布関数の非一様性に位相の相関情報が含まれることが発見された。そこで今回、宇宙大構造の N 体シミュレーションを使い、非線形重力進化による位相相関のふるまいの時間発展、スケール依存性、宇宙モデル依存性を詳細に調べた。また、位相和分布の非一様性は、通常のゆらぎの非線形性だけでなく、サンプルの体積に依存する性質を持つ (サンプル体積が大きくなるほど、位相和分布は一様になる) ことがわかった。[30]

スニャーエフゼルドビッチ効果の観測

スニャーエフ・ゼルドビッチ (SZ) 効果とは、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) は銀河団を通過するとき、銀河団中の高温プラズマにより逆コンプトン散乱を受け、スペクトル変形が起こる現象である。SZ 効果から、銀河団や宇宙論に関する重要な帰結を引き出すことが出来るが、SZ 効果の信号は微弱であるため、今までの観測は SZ 効果自体の有無を確認するに留まっていた。しかし近年のミリ波観測技術の進歩により、銀河団を撮像観測出来る段階になり、電波は光学・X 線に続く、銀河団を見る第三の目として確立した。それに合わせて我々は、観測の最前線を切り開くとともに最新の観測と比較しうる理論モデルを提案した。[28, 76, 120]

SDSS 銀河の 2 点相関関数

銀河分布は銀河の種々の性質と関連がある。そのことは 2 点相関関数にも如実に現れており、例えば楕円銀河は渦巻銀河に比べて、明るい銀河は暗い銀河に比べて、相関関数が大きいことが知られている。これらの関連は銀河の形成時期との関係と考えればよいと定性的に理解され、さらに定量的議論がなされつつある。この状況のもと、我々は SDSS の銀河

サンプルを用いて、さらに詳しく銀河性質と 2 点相関関数の関係を調べた。その結果、銀河形態依存性は明るくなるほど弱くなったり、楕円銀河に関しては光度依存性が不明瞭だったりすることを見出した。これらの発見は、銀河形成時期にのみ原因を求める従来の理解では定性的にすら不十分であることを示しており、新たな銀河、構造進化のシナリオ構築のヒントを与えてくれていると考えられる [98, 182, 204]。

SDSS 銀河の 3 点相関関数

大規模構造を作る最大の要因-重力-は、非線形性、非局所性を大きな特徴とする。これらの性質により、たとえ初期密度ゆらぎがガウシアンランダム統計に従うとしても、時間が経つにつれて非ガウス性が顕著になってくる。つまり非ガウス性には重力による構造進化の本質的信息が含まれているのであって、それを検出するには本質的に 3 点以上の統計量が必要となるのである。そこで SDSS 銀河カタログを用いて 3 点相関解析を行った。これまでの 3 点相関解析から、3 点相関関数が 2 点相関関数の自乗の定数倍になっているのではないかという仮説が提唱されていたが、SDSS のデータにおいてもこれが成り立っていることを確認し、さらにこの比が銀河の形態や絶対光度にあまり依存しないことを新たに見出した。このことによりバイアスの非線形性が重要であることが明らかになった [27, 98, 119, 204, 238]。

楕円体モデルに基づく宇宙論的確率密度分布関数

大規模構造の統計的性質を考える上で、最も基本的な量に、1 点確率分布関数 (Probability Distribution Function, PDF) がある。昨年度我々は、密度ゆらぎの PDF を予言するために、密度ゆらぎの進化を多変数の力学的自由度で記述する局所近似モデルを構築した。

今年度は、局所近似モデルの具体例として、球対称モデルと楕円体モデルを用い、初期スペクトルが CDM の場合とべき的な場合について、N 体シミュレーションと比較した。その結果、初期スペクトルが CDM 的な場合、球対称、楕円体モデル共に、ゆらぎ非線形な場合でも、非常に良く N 体シミュレーションを近似できるのに対し、初期スペクトルが非 CDM 的な場合は、モデル依存性が強く、より精密なモデルが必要であることがわかった。また、球対称モデルでは扱えなかった、赤方偏移空間でのゆらぎの分散に現れる Kaiser 効果を、楕円体モデルは導くことができ、赤方偏移空間では非球対称性が重要だということを示した。[50, 83, 178]

SDSS クエーサー 2 点相関関数

クエーサーは非常に明るく、銀河と比較して非常に遠方であっても発見する事ができる。そのためクエーサーをプローブとすれば銀河では不可能であっ

た $100 h^{-1}$ Mpc を超えるスケールの宇宙の大規模構造の有無を調べる事ができる。標準的な Λ CDM モデルによるとダークマターの 2 点相関関数は $100 h^{-1}$ Mpc 強のスケールで一度負になる事が予想されている。我々は SDSS クエーサーカタログを用いて 2 点相関関数を解析した。その結果確かに $100 h^{-1}$ Mpc を超えるスケールで負になっている事が見いだされた。

さらに我々はクエーサー 2 点相関関数の赤方偏移・光度依存性を調べ、その結果クエーサーの 2 点相関関数には強い赤方偏移・光度依存性は見られない、という結論を得た。今後さらに SDSS の観測が進めば、クエーサーの形成や進化といった問題を扱う事が可能である。[186]

太陽系外惑星 HD209458b の大気モデルへの観測的制限

本研究では、すばる望遠鏡 HDS(High Dispersion Spectrograph) による系外惑星系 HD209458 の分光観測を行い、そのスペクトルを解析した。その結果、水素の $H\alpha$ 線において、主星からの光が惑星大気によって吸収される量は 0.1% 未満であることを明らかにした。これに対し、ハッブル宇宙望遠鏡の観測結果では、 $Ly\alpha$ 線において 15% もの追加吸収が報告されており、これらの結果から系外惑星 HD209458b の大気モデルに制限を加えることができた。[222, 193, 107, 185]

5.1.3 天体核・素粒子物理

ガンマ線バースト天体に於ける爆発的要素合成

謎の天体といわれるガンマ線バーストは、近年の観測によりブラックホール形成を伴う超新星爆発に付随して引き起こされる現象と推測されだしている。しかも fireball を形成するためにその爆発はジェットのなくてはならないとの指摘もされている。そこで我々は上記のシナリオにもとづきながら爆発的要素合成の計算を行ない、通常の超新星爆発とガンマ線バーストを生ずる超新星爆発に於いて、爆発的要素合成に違いがあるのかを定量的に評価した。結果として、要素合成の生成物質の化学組成はガンマ線バーストを引き起こす中心天体の爆発のタイムスケールに非常に敏感であることが明らかとなり、通常の超新星爆発とは生成物に大きな違いが出ると結論された。特に ^{56}Ni などの放射性不安定原子核の量が爆発のタイムスケールに敏感なことから、逆にガンマ線バーストの持続時間と超新星の光度には相関があるであろうとの理論的予言も与えられた。[3]

若い中性子星からの高エネルギーニュートリノ

中性子星は超高エネルギー宇宙線を含めた、高エネルギー粒子のソースとして期待されているが、これら活動的な若い中性子星は、当然超新星残骸に周囲を囲

まれている。Kennel and Coroniti (1984) によれば超新星残骸に囲まれた中性子星が相対論的なバルク速度を持つパルサー風を放出している場合、超新星残骸とパルサー風が圧力平衡を実現するため、またバルク速度が等しくなるという要請から中性子星と超新星残骸の間に衝撃波が生じることが結論され、パルサー風の relativistic な運動は熱的な、random な運動に転化されるであろうと結論付けられている。今回、パルサー風に陽子が含まれている場合、衝撃波による散逸によって random 運動している陽子同士が衝突すれば多量のパイオンを生成し、結果として多量のニュートリノ及びガンマ線を放出するのではないかと考え、フラックスの評価を行なった。結果として、ミリ秒程度で回転している寿命 100 年以内の中性子星から生じるニュートリノは IceCube などの次世代ニュートリノ検出器で検出可能であり、ガンマ線は CANGAROO や HESS などのチェレンコフ望遠鏡や GLAST のようなガンマ線衛星によって検出可能であると評価された。[4, 70, 71, 112, 113, 114, 155, 202, 224, 225, 226, 233]

ガンマ線バースト背景ニュートリノ

ガンマ線バーストは、fire ball モデルを仮定すれば観測される多くの現象をうまく説明することが知られているが、その爆発エネルギーがどの程度であるかということについては未だにオーダーの不定性がある。特に、fire ball のエネルギーについては光学的な観測から推定が出来るとしても、fire ball とする部分以外の爆発エネルギー、例えば baryon にどの程度のエネルギーが分配されているのかということについては観測的な手掛かりがなく、それが候補天体ならびに爆発メカニズムをあいまいなままにしている一因となっている。今回、ガンマ線バーストに付随して放出されるニュートリノに着目し、それが現在の宇宙をどの程度満たしているのかということを観測することによって、ガンマ線バーストの平均的な爆発エネルギーが推定出来ることを示し、Super-Kamiokande などでの観測可能性について議論を行った。[69]

「パスタ相」の動的側面の研究

中性子星は様々な天体現象のサイトとして極めて重要な天体であるが、それと同時に、内部は地上の実験室よりも遥かに高密度かつ中性子過剰な状況にあるため、地球上の物質とは全く異なった相を示す可能性がある。特に興味深いことに、標準核密度以下の高密度天体内部物質においては、非常にエキゾチックな構造を持った核（パスタ相）の存在が静的かつ巨視的なモデル等から予言されている。この予言は 80 年代に提出されたものであるが、果たしてパスタ相が動的なプロセスによって発現するが否かは、未だ解明されていなかった。この様な状況の中で、我々は、量子分子動力学法 (QMD) という核の形状を仮定しない動的かつ核子レベルの微視的なモデルを用いてパスタ相の再現に成功し、上記の問題

に対する明確な解答を与えた。さらに我々は、中性子過剰な場合を含めて標準核密度以下での温度ゼロにおける相図を得ると同時に、用いたモデルハミルトニアンを詳細に検討し、その妥当性を確認した。最近では、圧縮、減圧による pasta 相間の転移の直接観察に成功するなど、動的な枠組みを生かした興味深い成果を挙げている。[17, 118, 236, 237]

有限温度における「pasta 相」

重力崩壊型超新星は、そのメカニズムの理解が積年の課題となっており、重元素生成のサイトや様々な天体現象のサイトとして極めて重要な天体であるが、重力崩壊型超新星の理解において、爆発のダイナミクスに直接影響する内部コアの物質（超新星物質）の研究を逸することはできない。我々は、量子分子動力学法（QMD）による研究のターゲットを有限温度の領域にも向けることで、超新星物質を視野に入れた核物質の構造の更なる理解を目指した。殊に、核の表面の揺らぎや核子の蒸発といった有限温度効果の取り込みは、核の形状を仮定せず、かつ粒子的描像に立った微視的な枠組みである QMD の得意とするところであり、これによって、密度 温度平面全体にわたる相図の構築が初めて可能となった。得られた相図によると、pasta 相は約 3MeV まで明確な形状を保っており、同時に有限温度の効果によって各相の領域が低密度側にシフトすることが分かった。[19, 75, 117, 156, 236, 237]

「pasta 相」における電子遮蔽効果

pasta 相についての研究の多くが、相対論的縮退電子ガスを一様な背景として扱っており、また、電子密度分布を考慮したものでも、電子遮蔽効果そのものが相図にどのような影響を及ぼすかを議論したものはなかった。このような状況を受けて本研究では、電子遮蔽効果を取り入れた場合とそうでない場合の結果を比較し、遮蔽効果が標準核密度近傍の相図に及ぼす影響を議論した。その結果、電子遮蔽の効果は中性子星物質、超新星物質いずれの場合でも小さく、我々が QMD の研究によって得た結果の大筋は電子遮蔽の効果によって変更を受けないことが分かった。また、完全遮蔽の極限から予想される傾向とは逆に、pasta 相の領域は広がることを示した。[18, 236, 237]

超新星コアに於ける非球対称なニュートリノ放射

重力崩壊型超新星爆発のダイナミクスを明らかにするため、回転を考慮にいれた超新星爆発の数値計算を行った。その結果、neutrino sphere が遠心力の効果で偏平になり、従って、neutinosphere の温度は回転軸方向に近づくにつれて高くなり、極方向の物質を良く温めることが分かった。これらの結果は、爆発がジェット状になることを示唆している。我々の予言したジェ

ット状爆発は観測とも整合性が良い。今後の課題は、現状の単純化された neutrino 輸送を多次元にして、更に詳しく回転の爆発に及ぼす効果に就いて調べることである。[38, 36, 126, 127, 211, 176, 246, 245, 244, 243]

重力崩壊型超新星からの重力波

回転を伴う重力崩壊型超新星爆発は、重力波の放出源として注目されている。我々は、数値計算を行ないこの重力波の波形の特徴について解析した。ここでは、以前の研究ではなおざりにされがちだった入力物理の精密化を行ない、より現実的な計算を実行した。その結果、最大の重力波の振幅が先行研究より一桁程度上ることがわかり、観測の可能性が高まることが分かった。さらに、二番目に振幅の大きな重力波の特徴から、従来の観測からは知り得ない超新星コアの回転の様子に対して有力な情報が得られる事を指摘した。翻って、これは重力波から従来不定性の非常に大きい回転星の進化モデルに強い制限を与えられることを意味し、今、まさに発展の著しい重力波天文学で調べるべき具体的な課題を提示した。[39, 37, 126, 127, 211, 209, 176, 157, 245, 244, 243]

γ 線バーストの中心天体としての重力崩壊型超新星爆発

最近の観測から、 γ 線バーストの中心天体として大質量星の重力崩壊が最有力視されている。しかし、従来の研究については準備的なものであると言わざるをえない。なぜなら過去の研究が示した、“高速回転、強磁場を伴う親星が中心天体として必要であること”は、エネルギー収支を合わせるためのデモンストレーション的なもので、実際にどのような環境で線バーストが生成されているかについて明らかになっていないからである。一方我々は、長年の超新星の研究をすぐさまこの問題に適応して、強磁場、高速回転を持つ鉄のコアの重力収縮を数値計算で追った。その結果、爆発前の鉄のコアが弱回転、強磁場であるほどジェット状の爆発を作るのに最適であることを示した。この一度目のジェット状爆発で開けられた回転軸付近の空洞は過去の研究では全て手で想定していたもので、我々はその起源を明らかにした。[210, 246, 245]

超新星背景ニュートリノ

過去の全ての超新星爆発から放出されたニュートリノは、diffuse なバックグラウンドを形成していると考えられている。この超新星背景ニュートリノ（Supernova Relic Neutrinos; 以下 SRN）の検出可能性を、現実的なニュートリノ振動モデル、超新星モデルを適用して考察した。更に過去の超新星の形成率としては、HST などの観測に基づいたモデルを用い、検出のバックグラウンドとなるイベントについても充分な考察を行なった。また、最近 Super-Kamiokande

グループが、SRN のフラックスに対して非常に厳しい上限値を発表した。我々はそれにともない、より精密な計算を inverted mass hierarchy も含んださまざまなニュートリノ振動モデルに適用し、それぞれのモデルに対するフラックスの上限値の再評価を行った [44, 78, 82, 130, 153]。

超新星爆発は、短寿命の大質量星の死に伴う現象であるため、SRN は銀河進化および星形成史の良いプローブとして用いることが期待できる。さらにニュートリノは途中の星間空間中にある塵からの吸収を受けないという特徴がある。現在星形成率研究の主流となっている、可視・紫外領域の観測はこの塵による吸収の見積もりが、大きな不定性を与えることが知られているため、SRN はこれらの観測と相補的な役割を果たすことができると考えられる。そこでわれわれは、将来観測からどの程度まで星形成率の情報を引き出せるかという議論をモンテカルロシミュレーションを用いて行った。この結果、Super-Kamiokande くらいの大さの検出器で 5 年程度観測を行えば、30% 程度の精度で星形成率のモデル化が可能であることを示した。現在計画中の Hyper-Kamiokande や UNO といったさらに大型の検出器を用いれば、より精度の良い情報が得られることが期待できる [49, 184, 227]。

ニュートリノ-Majoron 相互作用に対する観測からの制限

ニュートリノが Majoron などの未知の素粒子と相互作用をする場合、伝搬中に重いニュートリノが軽いニュートリノと質量を持たない（あるいは非常に軽い）粒子（Majoron など）に崩壊を起こす可能性が考えられる。現在のところ得られている崩壊寿命に対する最も強い制限は、太陽ニュートリノ観測によるもので、 $\tau/m > 10^{-4}$ s/eV 程度である。これに対して我々は、これらの素粒子モデルを SRN に応用して研究を行った。その理由は、宇宙論的な距離にある超新星からの重ね合わせである SRN の場合、太陽と比較してかなり距離を稼ぐことができ、崩壊寿命に対しても強い制限が期待できると考えたためである。現在のところは、超新星モデルの不定性が大きいので、精密な議論はできないものの、この方法では原理的に、 $\tau/m > 10^{10}$ s/eV 程度の下限値を得られることを示した。この値は、太陽ニュートリノ観測によるものに比べて十数桁大きいということは特筆すべきことである [47, 82, 130, 213]。

超新星ニュートリノ振動とニュートリノの磁気モーメント

ニュートリノが有限の磁気モーメントを持った場合に、磁場との相互作用で起こる Resonant Spin-Flavor (RSF) Conversion の調査を 3 世代超新星ニュートリノの場合について初めて行なった。RSF 効果は従来良く調べられてきた通常の物質振動 (MSW 効果) とは異なり、ニュートリノと反ニュートリノの遷移を引き起こすという特徴がある。我々は、3 世代

6 要素を持つ Schrödinger 方程式を数値的に解くことにより、ニュートリノの遷移確率を求め、Super-Kamiokande や SNO での期待されるスペクトルを求めた。その結果、もしニュートリノが現在観測で得られている上限値に近いくらいの大きな磁気モーメントを持ち、なおかつ超新星中の磁場が十分に大きな場合には、統計的に有意な信号が得られることを定量的に示した [79, 128, 161, 177]。

さらにわれわれは、RSF 効果が超新星の親星モデルに非常に敏感であるという点に着目し、Woosley, Heger & Weaver (2002) によって計算されたいくつかのモデルを用い、依存性の調査・議論を行なった [45, 161]。また、現在のところ良くわかっていない、ニュートリノの質量階層性への依存性に関する包括的な研究も行った。この計算の結果、とくに興味深い現象として、inverted mass hierarchy の場合、非常に鋭いピーク (中性子化バースト) が時間プロファイルに見られる可能性があることを指摘した [48, 80, 81, 129, 131, 132, 168, 227]。

強磁場中でのニュートリノ-核子散乱と pulsar kick

現在の宇宙物理学の問題のひとつとして、パルサーが大きな固有速度を持っているということがあげられる。これは超新星爆発が非対称に起きるためであるという考え方が有力であるが、その詳しいメカニズムはいまだに謎につつまれている。われわれは、ニュートリノが爆発エネルギーのほとんど全てを担っているという事実から、強い磁場を持った、超新星コアでのニュートリノ-核子散乱に着目して研究を行った。従来の研究では、電子ニュートリノが非対称ニュートリノ放射に主に寄与するとされ、それ以外のフレーバーはあまり考慮されていなかった。しかしわれわれは、1 次の補正項まで考慮に入れた結果、非電子ニュートリノによる寄与は、場合によっては電子ニュートリノから来る寄与と同じくらいになる可能性があるということを示した [46]。

超高エネルギー宇宙線の伝搬

超高エネルギー宇宙線の起源を探る上で、その到来方向分布が重要な手がかりとなり得る。我々は、銀河間空間での宇宙線伝搬の Monte Carlo 計算による数値データをもとに、超高エネルギー宇宙線の到来方向を計算し観測との比較を行うことで、ソースの個数密度は 10^{-6} Mpc $^{-3}$ 程度であるとの制限を得た。[84, 133, 214, 252] この AGASA 観測を説明できるソース分布において、Auger 計画などの将来観測で予想される宇宙線到来方向の予言を行ない、データ数の向上により宇宙線のソースを同定できる可能性を示した。[52, 162]

また、比較的低エネルギー ($\sim 10^{19}$ eV) の宇宙線到来方向を計算する際には、銀河磁場の影響が重要となってくる。そこで、我々は銀河磁場による変更を考慮した宇宙線到来方向の新たな計算法を提案した。[53, 134] これにより、過去の他者の研究より短い計

算時間で到来方向を計算できるようになった。さらに、宇宙線組成として重元素を想定し、粒子の曲がり方が非常に大きい場合での銀河内宇宙線伝搬についての数値計算も行なった。[54] 正則な銀河磁場の効果で、宇宙線のソースが局所銀河群にのみ局在しているような場合でも、観測の等方的な到来方向が説明できることを示し、宇宙線重元素の新たな可能性を見出した。

強磁場で高速回転する星の重力崩壊

我々はガンマ線バーストやマグネターを説明する手がかりとして強磁場で高速回転している星の重力崩壊に注目している。磁場の強さと回転の強さに関して幅広い初期状態から数値シミュレーションによって進化を追った。その結果変化にとんだ爆発の様子が見てとれ、これらの変化を特徴づけるのはプラズマ β と呼ばれる量や爆発のエネルギーであることがわかった。MRI や場の包み込みによる磁場の増幅が微分回転の結果として得られたが挙動は複雑である。これらの効果のタイムスケールを比較した。[172, 217]

5.1.4 その他

長滝重博助手が 2004 年 3 月 16 日付けで、京都大学基礎物理学研究所助教授として転出した。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Kazunori Kohri, Kei Iida, Katsuhiko Sato: Upper limit on the mass of RX J1856.5–3754 as a possible quark star; *Prog. Theor. Phys.* **109** (2003) 765–780
- [2] Masa-aki Sakagami, and Atsushi Taruya: Self-gravitating Stellar System and Non-extensive Thermostatistics; *Continuum Mechanics and Thermodynamics* **16** (2004) 279-292 (cond-mat/0310082).
- [3] Shigehiro Nagataki, Akira Mizuta, Shoichi Yamada, Hideaki Takabe and Katsuhiko Sato: Explosive Nucleosynthesis Associated with Formation of Jet-induced GRBs in Massive Stars; *Astrophysical Journal*, **596** (2003) 401.
- [4] Shigehiro Nagataki: High-Energy Neutrinos Produced by Interactions of Relativistic Protons in Shocked Pulsar Winds; *Astrophysical Journal*, **600** (2004) 883.
- [5] K. Koyama Cosmic microwave radiation anisotropies in brane worlds; *Physical Review Letter* **91**, 221301,2003.
- [6] T. Shiromizu, K. Koyama, T. Torii and S. Onda; Can we live on a D-brane? – Effective theory on a self-gravitating D-brane –; *Physical Review* **D68**, 063506, 2003.
- [7] T. Shiromizu, K. Koyama and T. Torii; Cosmological constant and gravitational theory on D-brane; *Physical Review D*, **D68**, 103513, 2003.
- [8] S. Onda, T. Shiromizu, K. Koyama and S. Hayakawa; Low energy effective action on a self-gravitating D-brane; *Physical Review D*, in press
- [9] K. Koyama and K. Takahashi; Primordial fluctuations in bulk inflaton model; *Physical Review D* **67** (2003) 103503
- [10] K. Koyama and K. Takahashi; Exactly solvable model for cosmological perturbations in dilatonic brane worlds; *Physical Review D* **68** (2003) 103512
- [11] Jounghun Lee and Yasushi Suto: Reconstructing Three-dimensional Structure of Underlying Triaxial Dark Halos From X-ray and Sunyaev–Zel’dovich Effect Observations of Galaxy Clusters; *The Astrophysical Journal* **601** (2004) 599–609(astro-ph/0306217)
- [12] Kohji Yoshikawa, Noriko Y. Yamasaki, Yasushi Suto, Takaya Ohashi, Kazuhisa Mitsuda, Yuzuru Tawara, and Akihiro Furuzawa: Detectability of the Warm/Hot Intergalactic Medium Through Emission Lines of OVII and OVIII; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **55** (2003) 879–890 (astro-ph/0303281)
- [13] Chen, D.N., Jing, Y.P., Yoshikawa, K.: Angular Momentum Distribution of Hot Gas and Implications for Disk Galaxy Formation; *The Astrophysical Journal* **597** (2003) 35–47
- [14] Tsutomu, T. Takeuchi, Kohji Yoshikawa, Takako, T. Ishii: The Luminosity Function of IRAS Point Source Catalog Redshift Survey Galaxies; *The Astrophysical Journal* **587** (2003) L89
- [15] Suwa, Tamon; Habe, Asao; Yoshikawa, Kohji; Okamoto, Takashi: Cluster Morphology as a Test of Different Cosmological Models; *The Astrophysical Journal*, **588** (2003), 7–17
- [16] Yoshikawa, Kohji; Jing, Y. P.; Börner, Gerhard: Spatial and Dynamical Biases in Velocity Statistics of Galaxies; *The Astrophysical Journal*, **590** (2003), 654-663
- [17] Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka and Toshikazu Ebisuzaki: Structure of cold nuclear matter at subnuclear densities by Quantum Molecular Dynamics, *Phys. Rev. C* **68**, 035806 (2003).
- [18] Gentaro Watanabe and Kei Iida: Electron screening in the liquid-gas mixed phases of nuclear matter, *Phys. Rev. C* **68**, 045801 (2003).
- [19] Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka and Toshikazu Ebisuzaki: Phases of hot nuclear matter at subnuclear densities, accepted for publication in *Phys. Rev. C*.

- [20] Mamoru Shimizu, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, and Yasushi Suto: Mass-Temperature Relation of Galaxy Clusters: Implications from the Observed Luminosity-Temperature Relation and X-ray Temperature Function; *The Astrophysical Journal* **590** (2003) 197–206 (astro-ph/0212284)
- [21] Mamoru Shimizu, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, and Yasushi Suto: Monte-Carlo Modeling of Non-Gravitational Heating Processes in Galaxy Clusters; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **56** (2004) 1–16 (astro-ph/0310858)
- [22] Naohisa Inada, Robert H. Becker, Scott Burles, Francisco J. Castander, Daniel Eisenstein, Patrick B. Hall, David E. Johnston, Bartosz Pindor, Gordon T. Richards, Paul L. Schechter, Maki Sekiguchi, Richard L. White, J. Brinkmann, Joshua A. Frieman, S. J. Kleinman, Jurek Krzesinski, Daniel C. Long, Eric H. Neilsen, Jr., Peter R. Newman, Atsuko Nitta, Donald P. Schneider, S. Snedden, Donald G. York: SDSS J092455.87+021924.9: An Interesting Gravitationally Lensed Quasar from the Sloan Digital Sky Survey; *The Astronomical Journal* **126** (2003) 666–674 (astro-ph/0304377)
- [23] Bart Pindor, Daniel J. Eisenstein, Naohisa Inada, Michael D. Gregg, Robert H. Becker, Jon Brinkmann, Scott Burles, Joshua A. Frieman, David E. Johnston, Gordon T. Richards, Donald P. Schneider, Ryan Scranton, Maki Sekiguchi, Edwin L. Turner, Donald G. York: SDSS J115517.35+634622.0: A Newly Discovered Gravitationally Lensed Quasar; *The Astronomical Journal* **127** (2004) 1318–1324 (astro-ph/0312176)
- [24] Naohisa Inada, Masamune Oguri, Bartosz Pindor, Joseph F. Hennawi, Kuenley Chiu, Wei Zheng, Shin-Ichi Ichikawa, Michael D. Gregg, Robert H. Becker, Yasushi Suto, Michael A. Strauss, Edwin L. Turner, James Annis, Francisco J. Castander, Daniel J. Eisenstein, Joshua A. Frieman, Masataka Fukugita, James E. Gunn, David E. Johnston, Charles R. Keeton, Stephen M. Kent, Robert C. Nichol, Gordon T. Richards, Hans-Walter Rix, Erin Scott Sheldon, Neta A. Bahcall, J. Brinkmann, Željko Ivezić, Don Q. Lamb, Timothy A. McKay, Donald P. Schneider, and Donald G. York: A gravitationally lensed quasar with quadruple images separated by 14.62 arcseconds; *Nature* **426** (2003) 810–812 (astro-ph/0312427)
- [25] Takashi Hamana, Issha Kayo, Naoki Yoshida, Yasushi Suto, and Y.P. Jing: Modeling peculiar velocities of dark matter halos; *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* **343** (2003) 1312–1318 (astro-ph/0305187)
- [26] Takashi Hamana, Masami Ouchi, Kazuhiro Shimasaku, Issha Kayo and Yasushi Suto: Properties of host haloes of Lyman-break galaxies and Lyman-alpha Emitters from their number densities and angular clustering; *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* **347** (2004) 813–823 (astro-ph/0307207)
- [27] Issha Kayo, Yasushi Suto, Robert C. Nichol, Jun Pan, István Szapudi, Andy Connolly, Jeff Gardner, Bhuvnesh Jain, Gauri Kulkarni, Takahiko Matsubara, Ravi Sheth, Alex Szalay, and Jon Brinkmann: Three-point correlation functions of SDSS galaxies in redshift space: morphology, color and luminosity dependence; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **56** (2004) June 25 issue, in press (astro-ph/0403638)
- [28] Tetsu Kitayama, Eiichiro Komatsu, Naomi Ota, Takeshi Kuwabara, Yasushi Suto, Kohji Yoshikawa, Makoto Hattori, and Hiroshi Matsuo: Exploring cluster physics with high-resolution Sunyaev-Zel'dovich effect images and X-ray data: A case of the most X-ray luminous galaxy cluster RX J1347-1145; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **56** (2004) 17–28 (astro-ph/0311574)
- [29] Chiaki Hikage, Jens Schmalzing, Thomas Buchert, Yasushi Suto, Issha Kayo, Atsushi Taruya, Michael S. Vogeley, Fiona Hoyle, J. Richard Gott III, and J. Brinkmann (for the SDSS collaboration): Minkowski Functionals of SDSS galaxies I: Analysis of Excursion Sets; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **55** (2003) 911–931 (astro-ph/0304455)
- [30] Chiaki Hikage, Takahiko Matsubara and Yasushi Suto: The Distribution function of the Phase sum as a Signature of Phase Correlations Induced by Nonlinear Gravitational Clustering; *The Astrophysical Journal* **600** (2004) 553–563 (astro-ph/0308472)
- [31] Masamune Oguri, Keitaro Takahashi, Hiroshi Ohno and Kei Kotake: Decaying Cold Dark Matter and the Evolution of the Cluster Abundance; *The Astrophysical Journal* **597** (2003) 645–649 (astro-ph/0306020)
- [32] Masamune Oguri, Jounghun Lee and Yasushi Suto: Arc Statistics in Triaxial Dark Matter Halos: Testing the Collisionless Cold Dark Matter Paradigm; *The Astrophysical Journal* **599** (2003) 7–23 (astro-ph/0306102)
- [33] Masamune Oguri, Naohisa Inada, Francisco J. Castander, Michael D. Gregg, Robert H. Becker, Shin-Ichi Ichikawa, Bartosz Pindor, Jonathan Brinkmann, Daniel J. Eisenstein, Joshua A. Frieman, Patrick B. Hall, David E. Johnston, Gordon T. Richards, Paul L. Schechter, Donald P. Schneider and Alexander S. Szalay: SDSS J1335+0118: A New Two-Image Gravitational Lens; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **56** (2004) 399–405 (astro-ph/0311169)
- [34] Masamune Oguri, Naohisa Inada, Charles R. Keeton, Bartosz Pindor, Joseph F. Hennawi, Michael D. Gregg, Robert H. Becker, Kuenley Chiu, Wei

- Zheng, Shin-Ichi Ichikawa, Yasushi Suto, Edwin L. Turner, James Annis, Neta A. Bahcall, Jonathan Brinkmann, Francisco J. Castander, Daniel J. Eisenstein, Joshua A. Frieman, Tomotsugu Goto, James E. Gunn, David E. Johnston, Stephen M. Kent, Robert C. Nichol, Gordon T. Richards, Hans-Walter Rix, Donald P. Schneider, Erin Scott Sheldon, and Alexander S. Szalay: Observations and Theoretical Implications of the Large Separation Lensed Quasar SDSS J1004+4112; *The Astrophysical Journal* **605** (2004) 78–97(astro-ph/0312429)
- [35] Yozo Kawano, Masamune Oguri, Takahiko Matsumura and Satoru Ikeuchi: Galaxy Structures and External Perturbations in Gravitational Lenses; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **56** (2004) 253–260 (astro-ph/0404013)
- [36] Kei Kotake, Shoichi Yamada, and Katsuhiko Sato; Anisotropic Neutrino Radiation in Rotational Core Collapse, *Astrophys. J.*, 595, 304, (2003)
- [37] Kei Kotake, Shoichi Yamada, and Katsuhiko Sato; Gravitational Radiation from Axisymmetric Rotational Core Collapse *Phys. Rev. D*, 68, 044023, (2003)
- [38] Kei Kotake, Hidetomo Sawai, Shoichi Yamada, and Katsuhiko Sato; Magnetorotational Effects on Anisotropic Neutrino Emission and Convection in Core Collapse Supernovae, *Astrophys. J.* in press
- [39] Kei Kotake, Shoichi Yamada, Katsuhiko Sato, Kohsuke Sumiyoshi, Hiroyuki Ono, and Hideyuki Suzuki; Gravitational Radiation from Rotational Core Collapse: Effects of Magnetic Fields and Realistic Equation of States, *Phys. Rev. D.* in press
- [40] K. Takahashi, K. Sato, H. E. Dalhed and J. R. Wilson, “Shock propagation and neutrino oscillation in supernova” *Astroparticle physics* 20 (2003) 189
- [41] K. Takahashi, K. Sato, A. Burrows and T. A. Thompson, “Supernova Neutrinos, Neutrino Oscillations, and the Mass of the Progenitor Star” *Physical Review D* 68 (2003) 113009
- [42] T. Uesugi, T. Shiromizu, T. Torii and K. Takahashi, “D-braneworld cosmology II: Higher order corrections” *Physical Review D* 69 (2004) 043511
- [43] K. Takahashi and K. Ichikawa, “Cosmology and two-body problem of D-branes” to be published in *Physical Review D*
- [44] Shin’ichiro Ando and Katsuhiko Sato: “Supernova relic neutrinos and observational implications for neutrino oscillation”; *Phys. Lett. B* **559** (2003) 113
- [45] Shin’ichiro Ando and Katsuhiko Sato: “Resonant spin-flavor conversion of supernova neutrinos: Dependence on presupernova models and future prospects”; *Phys. Rev. D* **68** (2003) 023003
- [46] Shin’ichiro Ando: “Asymmetric neutrino emission due to neutrino-nucleon scatterings in supernova magnetic fields”; *Phys. Rev. D* **68** (2003) 063002
- [47] Shin’ichiro Ando: “Decaying neutrinos and implications from the supernova relic neutrino observation”; *Phys. Lett. B* **570** (2003) 11
- [48] Shin’ichiro Ando and Katsuhiko Sato: “A comprehensive study of neutrino spin-flavour conversion in supernovae and the neutrino mass hierarchy”; *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **10** (2003) 001
- [49] Shin’ichiro Ando: “Cosmic Star Formation History and the Future Observation of Supernova Relic Neutrinos”; *Astrophys. J.* **607** (2004) in press [astro-ph/0401531]
- [50] Yasuhiro Ohta, Issha Kayo, and Atsushi Taruya: Cosmological Density Distribution Function from the Ellipsoidal Collapse Model in Real Space; *The Astrophysical Journal* (2004), in press (astro-ph/0402618).
- [51] H. Yoshiguchi and K. Koyama; Bulk gravitational field and dark radiation on the brane in dilatonic brane world; *Physical Review D*, in press
- [52] H. Yoshiguchi, S. Nagataki, K. Sato: Arrival Distribution of UHECRs: Prospects for the Future, *ApJ*, 592, 311, (2003)
- [53] H. Yoshiguchi, S. Nagataki, K. Sato: A New Method for Calculating Arrival Distribution of Ultra-High Energy Cosmic Rays above 10^{19} eV with Modifications by the Galactic Magnetic Field, *ApJ*, 596, 1044, (2003)
- [54] H. Yoshiguchi, S. Nagataki, K. Sato: Numerical Study on the Propagation of Ultra-High Energy Cosmic Rays in the Galactic Magnetic Field, to be published in *ApJ*
- [55] Yuuiti Sendouda, Shigehiro Nagataki, and Katsuhiko Sato: “Constraints on the mass spectrum of primordial black holes and braneworld parameters from the high-energy diffuse photon background,” *Phys. Rev. D* **68** (2003) 103510.
- [56] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama, and Atsushi Taruya: Evolution of gravitational waves from inflationary brane-world: numerical study of high-energy effects; *Physics Letters B* **578** (2004) 269–275 (hep-th/0308072).

(会議抄録)

- [57] Katsuhiko Sato, Keitaro Takahashi and Shin’ichiro Ando: Neutrino Burst from Supernovae and Neutrino Oscillation; *Proceedings of the Very High Energy Astronomy, Kashiwa, March, 2003*, Universal Academy Press ed M. Sasaki
- [58] K. Sato, K. Takahashi and S. Ando: The Neutrino Burst from Supernovae and Implication for Neutrino Oscillation parameters; “Quarks, Astrophysics and Space Physics” ed. by T. Hatsuda, M. Mori and K. Sato, *Prog. Theor. Phys. Suppl. No.* 151 (2003) 32–43

- [59] Katsuhiko Sato, Shin'ichiro Ando, Kei Kotake and Keitaro Takahashi: Neutrino burst and gravitational wave from supernova explosions; Proceedings of the International Conference on Gravitation and Astrophysics, Seoul Sept. 2003
- [60] Katsuhiko Sato, Shin'ichiro Ando, Kei Kotake and Keitaro Takahashi: Supernova Explosion and Neutrino Burst from Supernovae; Proceedings of the International Symposium in Astro-Hadron Physics, Seoul, November 2003, World Scientific, ed by Deog Ki Hong
- [61] Katsuhiko Sato, Keitaro Takahashi, Shin'ichiro Ando and Kei Kotake: Neutrino Burst from Supernovae and Implication for Neutrino Oscillation; Proceedings of The 6th RESCEU International Symposium: Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology (4-7 November, 2003), ed K. Sato and S. Nagataki, Universal Academy Press 2004
- [62] Yasushi Suto: Density profiles and clustering of dark halos and clusters of galaxies; Proceedings of "Matter and Energy in Clusters of Galaxies", eds. S. Bowyer and C.-Y. Hwang (ASP, San Francisco) 379-393 (astro-ph/0207202)
- [63] Takashi Hamana, Naoki Yoshida, & Yasushi Suto: Are cosmological N-body simulations reliable on scales below the mean separation length of particles ?; Proceedings of IAU symposium 208 "Astrophysical Supercomputing using particle simulations"; eds. J.Makino and P. Hut (ASP, San Francisco)399-400
- [64] Naoki Yoshida, Takashi Hamana, Yasushi Suto & August E. Evrard: Clustering of dark halos on the lightcone; Proceedings of IAU symposium 208 "Astrophysical Supercomputing using particle simulations"; eds. J.Makino and P. Hut (ASP, San Francisco)467-468
- [65] Yasushi Suto: Simulations of Large-Scale Structure in the New Millennium; Proceedings of IAU symposium 216 "Maps of Cosmos"; eds. Matthew Colless and Lister Staveley-Smith (ASP, San Francisco) in press (astro-ph/0311575)
- [66] Yasushi Suto, Kohji Yoshikawa, Noriko Y.Yamasaki, Kazuhisa Mitsuda, Ryuichi Fujimoto, Tae Furusho, Takaya Ohashi, Manabu Ishida, Shin Sasaki, Yoshitaka Ishisaki, Yuzuru Tawara, and Akihiro Furuzawa: Searching for cosmic missing baryons with DIOS - Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor -; Journal of the Korean Physical Society (Proceedings of the VI International Conference on Gravitation and Astrophysics of Asian-Pacific Countries) in press (astro-ph/0402389)
- [67] T. Ohashi, M. Ishida, S. Sasaki, Y. Ishisaki, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, R. Fujimoto, T. Furusho, H. Kunieda, Y. Tawara, A. Furuzawa, Y. Suto, and K. Yoshikawa: Future Japanese missions for the study of warm-hot intergalactic medium; Proceedings of "Modelling the Intergalactic and Intracluster Media", in press (astro-ph/0402546)
- [68] Atsushi Taruya: Quasi-equilibrium state of stellar self-gravitating system away from thermal equilibrium; Proceedings of the 6th RESCEU symposium "Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology", eds. K. Sato and S. Nagataki, pp. 503-504.
- [69] Shigehiro Nagataki, Kazunori Kohri, Shin'ichiro Ando, Katsuhiko Sato: Gamma-ray Burst Neutrino Background and Star Formation History in the Universe; Nuclear Physics **A718** (2003) 437c
- [70] Shigehiro Nagataki: High Energy CRs from Young Neutron Star and Their Interactions with the Ambient Matter; Proceedings of the 28th International Cosmic Ray Conference eds. T. Kajita, Y. Asaoka, A. Kawachi, Y. Matsubara, M. Sasaki, (Universal Academy Press, Tsukuba, 2003) p.703
- [71] Shigehiro Nagataki: High-Energy Neutrinos Produced by Interactions of Relativistic Protons in Shocked Pulsar Winds; Proceedings of the 6th RESCEU International Symposium on 'Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology' eds. K. Sato and S. Nagataki (Universal Academy Press, Tokyo, 2004) p.331
- [72] K. Koyama; Cosmic microwave radiation anisotropies in brane worlds; The 6th RESCEU International Symposium, Tokyo (November 2003).
- [73] K. Koyama Inflation in brane models with radion stabilization; JGRG, Osaka (December 2003)
- [74] Kohji Yoshikawa, Noriko Y. Yamasaki, Yasushi Suto, Takaya Ohashi, Kazuhisa Mitsuda, Yuzuru Tawara, and Akihiro Furuzawa: Detectability of the Warm/Hot Intergalactic Medium Through Emission Lines of OVII and OVIII; Proceedings of "Modelling the Intergalactic and Intracluster Media", in press
- [75] Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka and Toshikazu Ebisuzaki: Nuclear pasta structure in hot neutron stars, to appear in "Young Neutron Stars and Their Environments" (IAU Symposium 218, ASP Conference Proceedings), eds F. Camilo and B. M. Gaensler.
- [76] 桑原 健, 他 SZ チーム: "45m 鏡 S40M 受信機を用いた銀河団のスニャーエフ・ゼルドビッチ効果の観測" 野辺山宇宙電波観測所ユーザーズミーティング (2003 年 8 月 1 日)
- [77] Masamune Oguri and Yozo Kawano: "Accurate Determination of the Hubble Constant from Supernova Lensing" Proceedings of the 12th Workshop of General Relativity and Gravitation, eds. M. Shibata, et al., p.340 (2003)
- [78] Shin'ichiro Ando, Katsuhiko Sato and Tomonori Totani: "Detectability of the Supernova Relic Neu-

- trinos”; Proceedings of the 16th International Conference on Particles and Nuclei (PANIC '02), eds. H. Toki, K. Imai and T. Kishimoto, Nucl. Phys. A **721** (2003) 541c–544c
- [79] Shin'ichiro Ando and Katsuhiko Sato: “Resonant Spin-Flavor Conversion of Supernova Neutrinos”; Proceedings of the 28th International Cosmic Ray Conference (ICRC '03), eds. T. Kajita, Y. Asaoka, A. Kawachi, Y. Matsubara and M. Sasaki, Universal Academy Press, 2003, pp. 1451–1454
- [80] Shin'ichiro Ando and Katsuhiko Sato: “Supernova Neutrino Oscillations and the Neutrino Magnetic Moment”; Proceedings of International Workshop on Astroparticle and High Energy Physics (AHEP-2003), ed. by M. Hirsch, M. Maltoni, S. Pastor and J.W.F. Valle, published as a contribution to JHEP Proceedings: PRHEP-AHEP2003 (001)
- [81] Shin'ichiro Ando and Katsuhiko Sato: “Supernova Neutrino Oscillations and the Neutrino Magnetic Moment”; Proceedings of the 6th RESCEU International Symposium on “Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology,” eds. K. Sato and S. Nagataki, Universal Academy Press, pp. 95–98
- [82] Shin'ichiro Ando and Katsuhiko Sato: “Supernova Relic Neutrinos and Implications for the Neutrino Properties”; Proceedings of the 6th RESCEU International Symposium on “Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology,” eds. K. Sato and S. Nagataki, Universal Academy Press, pp. 355–356
- [83] Yasuhiro Ohta: The cosmological density distribution function from the local collapse model; Proceedings of the 6th RESCEU symposium “Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology”, eds. K. Sato and S. Nagataki, pp. 467–468.
- [84] 吉口 寛之, 長滝 重博, 椿 信也, 佐藤 勝彦: 超高エネルギー宇宙線到来方向分布と起源への示唆, 研究会「高エネルギー宇宙物理学の理論的研究」高原編集 (2003), p.104
- [85] Yuuiti Sendouda, Shigehiro Nagataki, and Katsuhiko Sato: “Constraints on the mass spectrum of primordial black holes and braneworld parameters from the high-energy diffuse photon background,” Proceedings of the 6th RESCEU International Symposium “Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology,” eds. K. Sato and S. Nagataki, Universal Academy Press, pp. 481–482
- [86] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama, and Atsushi Taruya: Evolution of gravitational wave background from inflationary brane-world; Proceedings of the 6th RESCEU symposium “Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology”, eds. K. Sato and S. Nagataki, pp. 389–390.
- (国内雑誌)
- [87] 佐藤勝彦: “アインシュタイン人生最大の不覚” 数理科学 10月号 (2003) 52–59
- [88] 佐藤勝彦: “理論天文学、特に重力崩壊型超新星研究におけるシミュレーションの役割と今後” 日本天文学会誌 11月号 (2003) 613–615
- [89] 佐藤勝彦: “宇宙の誕生と宇宙の未来” アキュム (京都コンピュータ学院) 2003年12号、64–69
- [90] 佐藤勝彦: “宇宙に残された96%の謎 — 瀬名秀明の時空の旅— (対談)” 日経サイエンス 2004年4月号
- [91] 佐藤勝彦: “新たな物理学の扉を開く” 日経サイエンス 2004年5月号
- [92] 須藤 靖: 進化する宇宙論、日本の科学者 **38**(2003)10月号 pp.4–9.
- [93] 須藤 靖: 銀河・銀河団形成シミュレーション、日本天文学会 会誌 天文月報 **96**(2003)11月号 pp.601–607.
- [94] 須藤 靖: WMAPの成果、パリティ **19**(2004)1月号, pp.46–48.
- [95] 須藤 靖・川邊 良平・北村 良実: 見えてきた宇宙の新しい姿: 137億年の時間を旅する、日経サイエンス (2004)2月号, pp.69–83.
- (学位論文)
- [96] Mamoru Shimizu: Non-Gravitational Heating of Galaxy Clusters in a Hierarchical Universe (博士論文)
- [97] Naohisa Inada: Discoveries of Gravitationally Lensed Quasars from the Sloan Digital Sky Survey (博士論文)
- [98] Issha Kayo: “One, Two, Three – measuring evolved large scale structure of the Universe” (博士論文)
- [99] Chiaki Hikage: “Higher-order Statistics as a probe of Non-Gaussianity in Large Scale Structure” (博士論文)
- [100] 仙洞田雄一: “Primordial black holes as an imprint of the brane Universe” (修士論文).
- [101] 平松 尚志: 宇宙論的起源の背景重力波による余剰次元の探求 (修士論文)
- (著書)
- [102] 佐藤勝彦: “宇宙を見る新しい目” (日本物理学会編) 日本評論社 (2003), 第9章、超新星ニュートリノで見る宇宙を分担執筆。
- [103] 佐藤勝彦: “宇宙96%の謎” 実業の日本社、2003年11月
- [104] 佐藤勝彦: “宇宙はすべてを教えてくれる (共著)” PHP研究所、2003年11月
- [105] 佐藤勝彦: 天文の事典 (磯部、岡村、佐藤、辻、吉沢、渡辺編) 朝倉書店 (2003年) I. 宇宙の誕生、概説、および I-1 ビッグバン宇宙と元素合成 (郡と共著) を分担執筆。
- [106] 須藤 靖: 磯部・岡村・佐藤・辻・吉沢・渡辺 (編) “天文の事典” 朝倉書店 (2003年7月刊行、I-3章 宇宙の構造進化 執筆)。

- [107] 須藤 靖：日本物理学会（須藤 靖・梶田隆章・上羽 牧夫：編）“宇宙を見る新しい目”日本評論社（2004年4月刊行、第10章 究極の宇宙論 太陽系外惑星探査 執筆）
- < 学術講演 >
- （国際会議）
- 一般講演
- [108] Yasushi Suto: Confronting the CDM paradigm with observations, seminar at Ludwig-Maximilians-University (2003年8月6日)
- [109] Yasushi Suto: Looking into CDM predictions: from large- to small-scale structures, Workshop at Institute of Cosmic Ray Research, University of Tokyo (2003年10月2-4日)
- [110] Yasushi Suto: Searching for missing cosmic baryons via Oxygen emission lines, cosmology seminar at Institute of Astronomy, University of Cambridge (2003年8月13日)
- [111] Atsushi Taruya: Numerical study on long-term evolution of stellar self-gravitating system away from the thermal equilibrium, The 2nd Sardinian International Conference on News and Expectations in Thermostatistics, Villasimius, Italy, September, 2003.
- [112] Shigehiro Nagataki: High-Energy Neutrinos Produced by Interactions of Relativistic Protons in Shocked Pulsar Winds; International Workshop on Ultra High Energy Neutrino Telescope, Chiba (2003年7月29-30日)
- [113] Shigehiro Nagataki: High Energy CRs from Young Neutron Star and Their Interactions with the Ambient Matter; The 28th International Cosmic Ray Conference, Tsukuba (2003年7月31日-8月7日)
- [114] Shigehiro Nagataki: High-Energy Neutrinos Produced by Interactions of Relativistic Protons in Shocked Pulsar Winds; The 6th RESCEU International Symposium on ‘Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology’, Tokyo (2003年11月4-7日)
- [115] K. Koyama; Cosmic microwave background radiation anisotropies in brane worlds; COSMO-03 International Workshop on Particle Physics and the Early Universe, August 2003.
- [116] Kohji Yoshikawa: Detectability of the Warm-Hot Intergalactic Medium through Emission Lines of OVII and OVIII, INAF Workshop on “Modelling the Intergalactic and Intracluster Media” (2003年10月1日-4日)
- [117] Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka and Toshikazu Ebisuzaki: Nuclear pasta structure in hot neutron stars, the Twenty-fifth General assembly of the International Astronomical Union (IAUXXV), (Sydney, July 2003).
- [118] Gentaro Watanabe, Toshiki Maruyama: Structural Transitions of Nuclear “Pasta”, the 8th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics, (Nara, November 2003).
- [119] Issha Kayo: “3pt correlation function of the SDSS galaxies”, SDSS collaboration meeting in spring 2004 (New Mexico State University, March 2004)
- [120] Takeshi Kuwabara: Mapping observation of Sunyaev-Zel’dovich effects using Nobeyama 45-m telescope, The 6th RESCEU International Symposium, The University of Tokyo (2003, November)
- [121] Chiaki Hikage, Takahiko Matsubara, & Yasushi Suto: “The Distribution Function of the Phase Sum as a Signature of Phase Correlations Induced by Nonlinear Gravitational Clustering” The 6th RESCEU International Symposium, The University of Tokyo (4-7 November 2003)
- [122] Masamune Oguri: “A Problem in the Hubble Constant from Gravitational Lensing”, The IAU Symposium 216 “Maps of the Cosmos” Sydney (2003年7月)
- [123] Masamune Oguri: “Arc Statistics in Galaxy Clusters” The IAU General Assembly Joint Discussion 10 “Evolution in Galaxy Clusters: A Multiwavelength Approach”, Sydney (2003年7月)
- [124] Masamune Oguri: “Gravitational Lens Statistics as a Probe of Halo Profiles” The IAU Symposium 220 “Dark Matter in Galaxies”, Sydney (2003年7月)
- [125] Masamune Oguri and the SDSS collaboration: “Discovery of a Gravitationally Lensed Quasar System with 14.6 Arcsec Splitting” The 6th RESCEU symposium “Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology”, Tokyo (2003年11月)
- [126] K. Kotake, N. Ohnishi, S. Yamada, and K. Sato; Effects of Rotation in Core Collapse Supernovae, the 6th RESCEU International Symposium on “Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology”, The University of Tokyo, (Nov 2003)
- [127] Kei Kotake, Shoichi Yamada, Katsuhiko Sato: Effects of Rotation Core Collapse Supernovae, Twelfth Workshop on “Nuclear Astrophysics” Max-Planck-Institut fuer Astrophysik, Garching, Germany, (March 2004)
- [128] Shin’ichiro Ando and Katsuhiko Sato: “Resonant Spin-Flavor Conversion of Supernova Neutrinos”; The 28th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2003) August, 2003, Tsukuba
- [129] Shin’ichiro Ando and Katsuhiko Sato: “Supernova Neutrino Oscillation and the Neutrino Magnetic Moment”; International Workshop on Astroparticle and High Energy Physics (AHEP-2003), October 2003, Valencia
- [130] Shin’ichiro Ando and Katsuhiko Sato: “Supernova Relic Neutrinos and Implications for Neutrino

- Properties”; The 6th RESCEU International Symposium: Frontiers in Astroparticle Physics and Cosmology, November 2003, Tokyo
- [131] Shin’ichiro Ando and Katsuhiko Sato: “Supernova Neutrino Oscillation and the Neutrino Magnetic Moment”; The 6th RESCEU International Symposium: Frontiers in Astroparticle Physics and Cosmology, November 2003, Tokyo
- [132] Shin’ichiro Ando and Katsuhiko Sato: “Supernova Neutrino Oscillation with/without Neutrino Magnetic Moment”; The 5th Workshop on “Neutrino Oscillations and their Origin” (NOON2004), February 2004, Tokyo
- [133] H. Yoshiguchi, S. Nagataki, S. Tsubaki and K. Sato: Small Scale Clustering in the Isotropic Arrival Distribution of Ultra-High Energy Cosmic Rays; The 28th International Cosmic Ray Conference, Tsukuba (August 2003)
- [134] H. Yoshiguchi, S. Nagataki and K. Sato: A New Method for Calculating Arrival Distribution of Ultra-High Energy Cosmic Rays above 10^{19} eV with Modifications by the Galactic Magnetic Field; The 6th RESCEU International Symposium, Tokyo (November 2003)
- [135] H. Yoshiguchi and K. Koyama: Bulk geometry and gravity on the brane in a bulk inflaton model; JGRG, Osaka (December 2003)
- [136] Yuuiti Sendouda, Shigehiro Nagataki, and Katsuhiko Sato: “Constraints on the mass spectrum of primordial black holes and braneworld parameters from the high-energy diffuse photon background,” The 6th RESCEU International Symposium (U. Tokyo, Japan, November, 2003).
- [137] Yuuiti Sendouda, Kazunori Kohri, Shigehiro Nagataki, and Katsuhiko Sato: “Cosmic-ray antiprotons from primordial black holes in the braneworld,” The 13th Workshop on General Relativity and Gravitation (Osaka City U., Japan, December, 2003).
- 招待講演**
- [138] Katsuhiko Sato: Supernova Explosion and Neutrino Burst; The first Yamada symposium on Neutrinos and Dark Matter in Nuclear Physics, Nara, June, 2003
- [139] Katsuhiko Sato: Neutrino burst and gravitational wave from supernova explosions; International Conference on Gravitation and Astrophysics, Seoul, Sept. 2003
- [140] Katsuhiko Sato: Supernova Explosion and Neutrino Burst from Supernovae; International Symposium in Astro-Hadron Physics, Seoul, November 2003
- [141] Katsuhiko. Sato: Neutrino Burst from Supernovae and Implication for Neutrino Oscillation; 8th international conference on clustering aspects of nuclear structure and dynamics, Nara, Nov. 2003
- [142] Katsuhiko. Sato: Neutrino Burst from Supernovae and Implication for Neutrino Oscillation; The 6th RESCEU International Symposium: Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology, 4–7 November, 2003
- [143] Katsuhiko Sato: Neutrino Burst from Supernova Explosion; Sweden-Japan Joint Symposium on “Accelerator Science and Accelerator Based Sciences” Tokyo, January, 2004.
- [144] Katsuhiko Sato: Supernova Explosion and Neutrino Burst; 12th Workshop on Nuclear Astrophysics, Ringberg Castle, March, 2004
- [145] Katsuhiko Sato: Supernova Explosion and Neutrino Burst; COE Workshop “Prospects on Fundamental Physics in the 21st Century” Tokyo, February, 2004
- [146] Yasushi Suto: Searching for cosmic missing baryons via Oxygen emission lines, Japan-US seminar on Cosmology with the Sunayev-Zel’dovich effect, 清里清泉寮セミナーハウス (2003年6月15–20日)
- [147] Yasushi Suto: Simulations of large-scale structure in the new millennium, The International Astronomical Union Symposium 216, Maps of the Cosmos, Sydney (2003年7月13–19日)
- [148] Yasushi Suto: Searching for cosmic missing baryons with DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor, The 6th International conference of Asian-Pacific; Gravitation and Astrophysics, Seoul (2003年10月6–9日)
- [149] Yasushi Suto: Weighing the universe: baryon, dark matter and dark energy, 21st century COE program of Tohoku University International symposium on bridging particle-matter hierarchy, Sendai (2004年3月5–7日)
- [150] K. Koyama; Exactly solvable model for cosmological perturbations in dilatonic brane worlds; DAMTP Workshop on “Cosmological Perturbations on the Brane”, University of Cambridge, UK, July 2003.
- [151] Naohisa Inada and Masamune Oguri: “The Sloan Digital Sky Survey Strongly Lensed Quasar Survey” SDSS Collaboration Meeting, Chicago (2003年10月)
- [152] Masamune Oguri and Naohisa Inada: “First Large Separation Lensed Quasar from the SDSS” SDSS collaboration Meeting, Chicago (2003年10月)
- [153] Shin’ichiro Ando and Katsuhiko Sato: “Supernova Relic Neutrinos and Observational Implications for Neutrino Oscillation”; Fourth International Conference on Physics Beyond the Standard Model (BEYOND THE DESERT ’03) June, 2003, Castle Ringberg (Germany)

(国内会議)

一般講演

- ・日本物理学会 2003 年秋季大会 (宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット, 2003 年 9 月)
- [154] 樽家 篤史, 阪上 雅昭: 自己重力系の長時間進化と非加法的熱・統計力学
- [155] 長滝重博: パルサー風中の相対論的陽子の衝突と高エネルギーニュートリノ
- [156] 渡辺 元太郎, 佐藤 勝彦, 泰岡 顕治, 戎崎 俊一: 量子分子動力学法による有限温度下の核物質の研究: 超新星物質の構造
- [157] 固武 慶, 山田章一, 佐藤勝彦; Gravitational radiation from the collapse of rotating stellar cores
- [158] 高橋慶太郎, 大栗真宗, 固武慶, 大野博司: “ガンマ線バーストで暗黒エネルギーを探る”
- [159] 高橋慶太郎, 小山和哉: “Primordial fluctuations in bulk inflaton model II”
- [160] 高橋慶太郎, 佐藤勝彦, A. Burrows, T. A. Thompson: “超新星ニュートリノのシグナルと親星の質量”
- [161] 安藤真一郎, 佐藤勝彦: “Resonant Spin-Flavor Conversion of Supernova Neutrinos: Dependence on Presupernova Models”
- [162] 吉口 寛之, 長滝 重博, 佐藤 勝彦: 超高エネルギー宇宙線到来方向の予言
- [163] 仙洞田雄一, 長滝重博, 佐藤勝彦: “Constraints on the mass spectrum of primordial black holes and braneworld parameters from the high-energy diffuse photon background”
- [164] 平松尚志, 小山和哉, 樽家 篤史: Numerical study of gravitational wave background in the braneworld scenario
- ・日本物理学会第 59 回年次大会 (2004 年 3 月, 九州大学)
- [165] 樽家 篤史, 阪上 雅昭: Gravothermal catastrophe and quasi-attractive properties in self-gravitating system
- [166] 大栗真宗, 他 SDSS collaboration: “大分離角重力レンズクエーサー探索”
- [167] 高橋慶太郎, 大栗真宗, 市来 淨與 “Sunyaev-Zel’dovich effect with decaying dark matter”
- [168] 安藤真一郎, 佐藤勝彦: “超新星ニュートリノ振動, ニュートリノの磁気モーメントと質量階層性”
- [169] 吉口 寛之, 小山 和哉: パルクインフラトンモデルにおけるパルクの幾何とブレーン上の重力の関係
- [170] 仙洞田雄一, 郡和範, 長滝重博, 佐藤勝彦: “ブレーン宇宙における PBH からの sub-GeV 領域宇宙線反陽子”
- [171] 平松尚志, 小山和哉, 樽家 篤史: Evolution of gravitational waves from inflationary brane-world
- [172] 滝脇知也, 固武慶, 長滝重博, 佐藤勝彦: 高速自転星の重力崩壊と Collapsar の形成
- [173] 松浦俊司, 長滝重博, 佐藤勝彦, A.D.Dolgov: “アフレックダイナバリオン数生成と非一様宇宙での重元素合成”
- ・日本天文学会 2003 年秋季年会 (愛媛大学, 2003 年 9 月)
- [174] 日影 千秋, 松原 隆彦, 須藤 靖: “位相情報を用いた宇宙の構造解析 II: 大規模構造の N 体シミュレーション”
- [175] 大栗真宗, Jounghun Lee, 須藤靖: “三軸不等楕円体モデルを用いた重力レンズアーク統計”
- [176] 固武 慶, 大西直文, 山田章一, 佐藤勝彦; Effects of Rotation on Neutrino Heating in Collapse-Driven Supernovae 日本天文学会秋期年会 (愛媛大学 2003 年 9 月)
- [177] 安藤真一郎, 佐藤勝彦: “超新星ニュートリノ振動とニュートリノの磁気モーメント”
- [178] 太田泰弘, 加用一者, 樽家篤史: 密度ゆらぎ確率分布関数の解析的なモデル
- ・日本天文学会 2004 年春季年会 (名古屋大学, 2004 年 3 月)
- [179] 須藤 靖: “DIOS で探る宇宙の大構造とダークバリオン”
- [180] 吉川 耕司: “近傍宇宙におけるダークバリオン分布とその観測可能性”
- [181] 稲田直久, 他 SDSS collaboration: “The SDSS Gravitationally Lensed Quasar Survey I. Lensing by Galaxy”
- [182] 加用一者, 須藤靖, 福来正孝, 中村理, 山内千里 “SDSS 銀河 2 点相関関数-形態/光度依存性とバイアスの進化”
- [183] 大栗真宗, 他 SDSS collaboration: “The SDSS Gravitationally Lensed Quasar Survey II. Lensing by Cluster”
- [184] 安藤真一郎: “銀河進化・星形成史と超新星ニュートリノ”
- [185] 成田 憲保: “すばる /HDS による系外惑星 HD209458b の精密分光観測”
- [186] 矢幡 和浩, 加用一者, 須藤 靖, D. Vanden Berk, A. Connolly ”SDSS クエーサー 2 点相関関数の赤方偏移・光度依存性”
- ・その他
- [187] 佐藤勝彦: “超新星ニュートリノで見る宇宙” 日本物理学会科学セミナー, 東京大学弥生講堂・一条ホール 2003 年 8 月 23 日
- [188] 佐藤勝彦: “宇宙の誕生と宇宙の未来” 京都コンピュータ学院講演会, 2003 年 10 月 25 日
- [189] 佐藤勝彦: “宇宙の誕生” 杉並区科学館講演会, 2003 年 11 月 1 日
- [190] 佐藤勝彦: “宇宙の誕生と未来” 大学と科学「ビッグバン宇宙の誕生と未来」, 2004 年 1 月 31 日

- [191] 佐藤勝彦: “宇宙の誕生、宇宙の未来” 千葉郷土博物館講演会、2004年2月7日
- [192] 須藤 靖: “夜空のむこう” 春日部共栄高校 講演会 (2003年5月21日)
- [193] 須藤 靖: “究極の宇宙論: 太陽系外惑星探査” 日本物理学会 2003年度科学セミナー (2003年8月23日)
- [194] 須藤 靖: “軟 X 線帯での酸素輝線を用いたダークバリオン探索計画” RESCEU 研究会@鴨川 (2003年8月31日)
- [195] 須藤 靖: “星空の向こう側: WMAP と 21 世紀の観測的宇宙論” 葛飾区郷土と天文の博物館: 第 8 回かつしか天文セミナー (2003年10月11日)
- [196] 須藤 靖: “宇宙のダークサイド: 暗黒物質と暗黒エネルギー” 東京大学宇宙線研究所 一般講演会 (2003年11月1日)
- [197] 須藤 靖: “宇宙の古文書をひもとく ~ 宇宙マイクロ波背景放射温度地図 ~” サイエンスフィックライブサイエンス「見えてきた宇宙の新しい姿」(2003年11月15日)
- [198] 須藤 靖: “夜空のむこう 銀河宇宙から宇宙背景輻射へ”, 第 18 回「大学と科学」公開シンポジウムビッグバン 宇宙の誕生と未来 (2004年1月31日)
- [199] Atsushi Taruya, and Masa-aki Sakagami: Gravitational catastrophe and quasi-equilibrium structure in N-body systems, 第 13 回 「一般相対論と重力」研究会 (大阪市立大学, 2003年12月1-4日)
- [200] 樽家 篤史: Gravitational catastrophe and quasi-equilibrium structure in N-body systems, 国立天文台データ解析センター ユーザーズミーティング (国立天文台, 2003年12月3-4日)
- [201] 樽家 篤史: Antonov problem and quasi-equilibrium state in N-body systems, 箱根天体物理学 N 体力学研究会 (箱根, 2004年3月1-3日)
- [202] 長滝重博: High-Energy Neutrinos Produced by Interactions of relativistic Protons in Shocked Pulsar Wind; 第 3 回高エネルギー宇宙研究会 (大阪大学豊中キャンパス, 2003年11月26-28日)
- [203] 稲田直久: “The Sloan Digital Sky Survey Gravitational Lens Survey” RESCEU 研究会 (鴨川, 2003年9月)
- [204] 加用一者: “SDSS 銀河相関解析による銀河進化へのヒント” RESCEU 研究会 (鴨川, 2003年8月)
- [205] 日影 千秋, 松原 隆彦, 須藤 靖: “Phase Correlations in Nonlinear Gravitational Clustering” RESCEU 研究会@鴨川 (2003年9月1日)
- [206] 日影 千秋: “位相情報による宇宙大規模構造の非ガウスの統計性質の解析” 理論天文学懇談会シンポジウム@京都大学基礎物理学研究所 (2004年1月6日)
- [207] 大栗真宗: “Large image separation lens search in the SDSS” RESCEU 研究会 (鴨川, 2003年9月)
- [208] 大栗真宗, 高橋 慶太郎, 固武 慶, 市来 浄與, 大野博司: “Decaying Cold Dark Matter and the High Redshift Cluster Abundance” The 13th Workshop of General Relativity and Gravitation (大阪市大, 2003年12月)
- [209] 固武 慶, 山田章一, 佐藤勝彦; Gravitational Radiation from the Collapse of Massive Stars, 研究会「一般相対論と重力」(大阪市立大学, 2003年10月)
- [210] 固武 慶, 滝脇知也, 長滝重博, 佐藤勝彦; Gravitational Collapse of Massive stars as the Birthplace of GRBs, 研究会「ガンマ線バースト天文学の新たな地平」(理化学研究所 2003年12月)
- [211] 固武 慶; 重力崩壊型超新星爆発の起源, 京都大学基礎物理学研究所研究会, 国立天文台研究会 第 16 回理論天文学懇談会シンポジウム (京大基礎物理学研究所 2004年1月)
- [212] 高橋慶太郎, 市川和秀: “Cosmology and two-body problem of D-branes”; JGRG 2003, 2003年12月4日
- [213] 安藤真一郎: “Decay of Supernova Relic Neutrinos”; RESCEU 研究会, 2003年9月, 鴨川
- [214] 吉口 寛之, 長滝 重博, 椿 信也, 佐藤 勝彦: “超高エネルギー宇宙線到来方向と起源への示唆”, 研究会「高エネルギー宇宙物理学の理論的研究」(大阪大学, 2003年11月)
- [215] 仙洞田雄一, 長滝重博, 佐藤勝彦: “背景 X・ガンマ線による PBH と Braneworld への制限,” RESCEU 研究会 “宇宙における時空・物質・構造の進化” (鴨川, 2003年9月).
- [216] Takashi Hiramatsu, Kazuya Koyama, and Atsushi Taruya: Evolution of gravitational waves from inflationary brane-world, 第 13 回 「一般相対論と重力」研究会 (大阪市立大学, 2003年12月1-4日)
- [217] 滝脇知也, 固武慶, 長滝重博, 佐藤勝彦: Rotational Core-Collapse of Massive Star, 「ガンマ線バースト天文学の新たな地平」, 理化学研究所
- 招待講演
- [218] 佐藤勝彦: “21 世紀宇宙論の方向” 日本物理学会 2003 年秋季大会 (シンポジウム [WMAP と宇宙論])
- [219] 佐藤勝彦: “超新星ニュートリノとニュートリノ振動” 日本物理学会 2003 年秋季大会 (シンポジウム [ニュートリノ天文学])
- [220] 佐藤勝彦: “宇宙の誕生、宇宙の未来” (物理学会公開講演会、宮崎大学)
- [221] 須藤 靖: “宇宙の階層: 大きな構造から小さな構造へ” 京都大学基礎物理学研究所短期研究会 (2003年10月16日)
- [222] 須藤 靖: “太陽系外惑星探査: 現状と展望” 日本物理学会春季年会 宇宙線分科会シンポジウム 宇宙と生命 (2004年3月28日)
- [223] 樽家 篤史: “WMAP と宇宙論”, 京都大学基礎物理学研究所研究会「素粒子物理学の進展」(京大基礎, 2003年7月22-25日)
- [224] 長滝重博: Astronomical Jets and High energy cosmic rays; 研究会「高エネルギーニュートリノ・宇宙線・ γ 線研究会 —Ashra 計画を巡って—」(宇宙線研究所, 2003年7月24日)

- [225] 長滝重博: High-Energy Neutrinos Produced by Interactions of Relativistic Protons in Shocked Pulsar Winds; 研究会「CANGAROO 望遠鏡によるガンマ線天文学の新展開」(京都大学研究所, 2003年12月11-12日)
- [226] 長滝重博: 超高エネルギー宇宙ニュートリノ; 研究会「極限エネルギーガンマ線と宇宙線による宇宙像」(甲南大学, 2004年2月19-20日)
- [227] 安藤真一郎: “Future Detection of Supernova Neutrinos and Its Implications for Astroparticle Physics”; 研究会「高エネルギー宇宙の総合的理解」, 2004年3月, 宇宙線研究所
- [228] 仙洞田雄一: “始原的ブラックホールの蒸発に見る膜宇宙の痕跡,” 宇宙線研究所 Workshop “高エネルギー宇宙の総合的理解” (宇宙線研究所, 2004年3月).
- (セミナー)
- [229] 佐藤勝彦: Explosion mechanism of Supernovae and Neutrino Burst from Supernovae; Institute of Astrophysics, Paris, March, 2004
- [230] 須藤 靖: “WMAP と 21 世紀の宇宙論”, 中央大学理工学部素粒子論研究室セミナー (2003年4月15日)
- [231] 須藤 靖: “宇宙構造形成と冷たいダークマター”, 東京大学宇宙線研究所 談話会 (2003年7月8日)
- [232] 樽家 篤史: “自己重力系の準平衡状態と非加法的熱・統計力学”, 国立天文台天体物理セミナー (2003年11月10日)
- [233] Shigehiro Nagataki: High-Energy Neutrinos Produced by Interactions of Relativistic Protons in Shocked Pulsar Winds; (RIKEN, 2004年1月22日)
- [234] K. Koyama; Brane world CMB anisotropies; The University of Portsmouth, Institute of Cosmology and Gravitation, August 2003.
- [235] 小山和哉; Cosmological tests of brane world models; 東京工業大学、宇宙論グループコロキウム (2003年3月16日)
- [236] 渡辺 元太郎: 高密度天体における nuclear “pasta” とその性質: 高密度天体内部物質が織り成す物質相の世界、上智大学 伊藤研究室セミナー (2003年4月)
- [237] Gentaro Watanabe: Nuclear “pasta” in dense stars and its properties: the world of the exotic phases in dense stellar matter, Astrophysics seminar, NORDITA (December, 2003)
- [238] Issha Kayo: “3PCF of the SDSS Galaxies”, University of Pittsburgh, March 2004
- [239] 大栗真宗: “CDM モデルと大分離角重力レンズクエーサー” 早稲田大学宇宙物理研究室 セミナー (2003年10月)
- [240] 大栗真宗: “SDSS 重力レンズクエーサー探索” 国立天文台理論天文学研究系 宇宙論セミナー (2003年10月)
- [241] 大栗真宗: “大分離角重力レンズクエーサーの発見” 国立天文台野辺山宇宙電波観測所 談話会 (2004年2月)
- [242] 固武 慶 ; 回転を伴う超新星爆発のダイナミクス、立教大学理論物理コロキウム (2003年6月)
- [243] 固武 慶 ; 自転を伴う超新星爆発、早稲田大 前田研究室コロキウム (2003年10月)
- [244] 固武 慶 ; 超新星爆発における多次元の効果 (自転、磁場)、東大駒場 GR セミナー (2003年10月)
- [245] 固武 慶 ; 回転、磁場の重力崩壊型超新星爆発に及ぼす効果、上智大学宇宙物理セミナー (2003年11月)
- [246] 固武 慶 : 超新星爆発のメカニズムの理解へ向けて— 回転、磁場の果たす役割、京都大学天体核研究室、天体核コロキウム, (2004年2月)
- [247] 高橋 慶太郎: “Supernova, Neutrino Oscillation and Neutrino Astrophysics” 早稲田大学 2003年5月9日
- [248] 高橋 慶太郎: “Probing dark energy with gamma-ray bursts” 東工大 2003年5月21日
- [249] 高橋 慶太郎: “Probing dark energy with gamma-ray bursts” 大阪大 2003年10月22日
- [250] 安藤 真一郎: “超新星背景ニュートリノとニュートリノ振動”; 東京工業大学 細谷・白水研究室セミナー, 2003年4月
- [251] 安藤 真一郎: “Resonant Spin-Flavor Conversion of Supernova Neutrinos”; 東京都立大学 素粒子理論研究室セミナー, 2003年5月
- [252] 吉口 寛之: 超高エネルギー宇宙線到来方向と起源への示唆, 理化学研究所, 計算宇宙物理研究室セミナー (2003年10月16日)

5.2 村尾研究室

2001年10月に村尾が着任して発足した本研究室では、物理学の中でも最も新しい分野の一つである量子情報の理論的研究を行っている。量子情報とは、0と1からなる2進数の「ビット」を基本単位とするような古典力学的な状態で表される従来の情報（古典的情報）に対して、0と1のみならず0と1の任意の重ね合わせ状態を取ることができるような量子力学的な状態で表される情報を指し、量子2準位系の状態で記述される「量子ビット (qubit)」を基本単位とする。量子情報を用いると古典情報とはクラスの違う情報処理が可能となるため、古典情報処理の限界を超えるブレークスルーの候補として注目を集めている。この分野の研究は主に1990年代に入って発達したもので、これまでに多量子ビットの重ね合わせ状態を利用した量子コンピューティング（因数分解アルゴリズム・データベースサーチアルゴリズム）、未知量子ビット状態の測定における不確定性を利用した量子暗号、2量子ビットの重ね合わせ状態に現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等の量子情報処理システムが提案されている。量子情報処理自体は新しい概念であるが、この新しい概念の基に様々な既存分野における研究が結びつくことで、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研究分野として拡大しつつ理論・実験の両面から発展を続けている。

我々は、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、また量子力学の性質を応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、有限準位（離散変数）系および無限準位（連続変数）系における多粒子間エンタングルメント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「分離不能な状態」（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 $(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)/\sqrt{2}$) に現れる非局所的相関である。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。このようにアインシュタインをも悩ませたエンタングルメントであるが、量子情報の観点から見ると古典的情報処理にはない量子情報処理独自のリソース（資源）として非常に重要であり、量子情報処理が古典情報処理より優位である鍵であると考えられている。

今年度は、2004年2月に英国より Damian Markham 博士が助手に着任し、修士課程の大学院生である尾張正樹・海老澤竜両氏と共に有限準位系および無限準位系におけるエンタングルメントと量子情報処理に関する研究を進めた。

5.2.1 有限準位系におけるエンタングルメントと量子情報処理

過去10年間（特にここ5年間）集中して行われた研究の成果によって、2準位系2者間のエンタングルメントの性質はかなり明らかになってきた。エンタングルメント解析にはエンタングルメントのシュミット係数が広く用いられているが、その対称性から2者間エンタングルメントを利用した量子情報処理プロトコルでは、2者間で非対称な効果を取り入れるのは難しいと考えられてきた。我々は、量子情報のための暗号系である次世代量子暗号への応用を目指して、2者間エンタングルメントを用いた非対称量子情報プロトコルの可能性を探り、次のような研究成果を挙げた。

2者間の非対称量子情報分配

多量子ビットエンタングルメントを用いて2量子ビットに符号化した量子情報が、局所的演算と古典的通信のみで量子情報の抽出が可能であるための必要十分条件を、作用素代数的な方法を用いて求めた。この条件を用いて、どちらか一方には局所的操作と古典的通信のみで量子情報を抽出することができるが他方には抽出できない、というような量子情報の二者間での非対称な共有方法を見出すことに成功した。この研究は、和達研究室の緒方芳子氏との共同研究である。

量子情報のための量子鍵

量子鍵配布に代表される従来の量子暗号のプロトコルは、量子状態を用いることで古典的な暗号鍵を配布することにより、古典情報の安全な通信を可能とするものであった。一方、量子情報科学技術が進めば、量子情報そのものの安全な通信のために「量子情報のための暗号」が必要となる。そこで、量子暗号の新しい方向性として、エンタングルメントを量子情報のための暗号鍵として用いる「量子鍵」の概念を提唱した。そして、2者間非量子情報分配の研究出られた成果を用いて、二者のうち一方が持つ量子情報は、他方への量子情報復元のための鍵（量子鍵）としかかなり得ない、というような量子情報の「不公平」分配を提案した。

5.2.2 無限準位系におけるエンタングルメントと量子情報処理

スピン系等の有限準位系に対して、ボゾン系等の無限準位系を用いた量子情報処理を考えることもできる。特に、ボゾンである光子の連続変数状態では、共役変数のスクイズド状態から作られる無限準位系のエンタングルメントを用いた量子テレポーションの実験にも既に成功しており、実験操作性の良さ

から量子情報通信の鍵となる系である。無限準位系はある意味で有限準位系の一般化とも考えることができ、量子情報の基盤理論の構築には、無限準位系をもふくめたエンタングルメントの考察が必要不可欠となる。しかしながら、無限準位系におけるエンタングルメントの性質を解析する場合には無限大の取り扱いについて困難な問題が生じるため未解明な点が多く、無限次元系を用いた量子情報処理のポテンシャルの全貌が未だ明らかになっていない。そこで我々は、無限準位系を用いた新たな量子情報処理システムを提案することを目指して、次のような研究を進めた。

LOCC の下での変換可能性の定式化

エンタングルメントの性質解析のためには、LOCC(局所変換と古典的通信)の下での変換可能性を調べる必要がある。有限準位系に関しては、量子状態が一つ与えられた場合での変換可能性について、確率1での変換可能性に関する Nilesen の Majorization 定理および、確率的な変換可能性に関する Vidal の定理が知られており、2者間エンタングルメントを解析するための基本となっている。そこで我々は、数学的に厳密な取り扱いを行うことで、変換可能性に関する上記の2つの基本定理を連続変数系に拡張することに成功した。この研究は、York 大学の Sam Braunstein 教授および国立情報学研究所の根本香絵助教授との共同研究の成果である。

無限準位系に特有なエンタングルメントの性質の発見

従来、エネルギーが有限で有限情報のやりとりしか含まないような物理的に可能な条件下においては、無限準位系においても有限準位系のエンタングルメントと性質には大きな違いがないと考えられてきた。我々は、有限・無限の次元性の違いによる量子物理の基盤的なエンタングルメント構造(全順序・半順序構造の違い)に相違が生じることを示した。更に、無限準位系においては、物理的に可能な状況下においても相互に変換不可能な状態が無限に存在することを示した。この予想外の性質は、数学的性質の違いによる量子物理の基盤的な構造の違いを示し、量子情報処理への応用も期待されている。この研究成果は、国立情報学研究所の松本啓史助教授との共同研究の成果である。

ビームスプリッターと混合状態のエンタングルメント生成

ビームスプリッターは、量子光学の実験において最も基本的な装置であると共に、理論的には、無限準位系においてガウス型の演算を行う最も基本的な量子情報演算要素である。非古典的な光をビームスプリッターに入力すると、出力された光の間にエンタングルメントが生成される。我々は、雑音を受け

混合状態にある完全混合状態の離散多準位系を更に大きな空間に埋め込むことによって、ビームスプリッターを用いてエンタングルメント生成が可能であることを示した。そして、様々な次元の空間に符号化した量子情報を用いた量子情報処理の可能性を示した。この研究は、英国インペリアルカレッジの Vlatko Vedral 博士との共同研究の成果である。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] D. Markham, M. Muraio, V. Vedral, Entanglement Generation from Thermal Spin States via Unitary Beam Splitters, quant-ph/0307147.
- [2] Owari Masaki, Keiji Matsumoto and Mio Muraio, Existence of incomparable pure bipartite states in infinite dimensional systems, quant-ph/0312091.
- [3] Masaki Owari, Keiji Matsumoto, Mio Muraio, SLOCC incomparable states infinite dimensional space, submitted to International Journal of Quantum information.

(会議抄録)

- [4] Mio Muraio and Vlatko Vedral, Encoding and decoding quantum information via entanglement, to be published in the proceeding of The Sixth International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC 02), Rinton Press (2003)

(国内雑誌)

- [5] 村尾美緒, エンタングルメントを利用した量子情報処理, 別冊・数理科学 量子情報科学とその展開, サイエンス社(2003年)

(学位論文)

- [6] 尾張正樹, Entanglement convertibility in infinite space (修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [7] Mio Muraio, Ryu Ebisawa, Masaki Owari and Vlatko Vedral, Extraction of distributed quantum information via LOCC, 4th European QIPC Workshop, 英国 オックスフォード (2003年7月14日).
- [8] Masaki Owari, Mio Muraio, Samuel L. Braunstein and Kae Nemoto, LOCC entanglement convertibility in infinite dimensional systems, 4th European QIPC Workshop, 英国 オックスフォード (2003年7月14日).
- [9] Masaki Owari, Mio Muraio, Samuel L. Braunstein and Kae Nemoto, "Extension of Schmidt rank", "ERATO conference on Quantum Information Science 2003, 京都 (2003年9月4日).

- [10] Masaki Owari, Keiji Matsumoto and Mio Murao, SLOCC incomparable pure bi-partite states in infinite dimensional systems, 2nd Asia Pacific Workshop on Quantum Information Science, シンガポール, (2003年12月16日).
- [11] Yoshiko Ogata, Ryu Ebisawa and Mio Murao, LOCC extraction of distributed quantum information, Seventh Workshop on Quantum Information Processing, カナダ ウォータールー (2004年1月15日-19日).
- [12] Masaki Owari, Keiji Matsumoto and Mio Murao, SLOCC incomparable pure states in infinite dimensional systems, 2004 Gordon Research Conference on Quantum Information Science, 米国 ベンチュラ (2004年2月23日).
- [13] Yoshiko Ogata and Mio murao, " Unfair " distribution of quantum information between two parties, 2004 Gordon Research Conference on Quantum Information Science, 米国 ベンチュラ (2004年2月23日).
- [14] Mio Murao, Ryu Ebisawa and Yoshiko Ogata, Qunautm Key for Quantum Information, International Symposium on Quantum Information Communications and Related Quantum Nanodevices, 東京 (2004年3月11日-12日).

(国内会議)

一般講演

- [15] 尾張正樹, 村尾美緒, サミュエル・エル・ブラウンシュタイン, 根本香絵, 無限次元空間における Schmidt ランクの拡張, 日本物理学会 2003 年秋季大会, 岡山, 2003 年 9 月 22 日
- [16] 村尾美緒, Entanglement and quantum " one way " -like functions, 日本物理学会 2003 年秋季大会, 岡山, 2003 年 9 月 22 日
- [17] 尾張正樹, 村尾美緒, サミュエル・エル・ブラウンシュタイン, 根本香絵, 無限次元空間における Schmidt ランクの拡張, 第 9 回量子情報技術研究会, 厚木, 12 月 12 日

招待講演

- [18] Mio Murao, Asymmetric quantum information sharing between two parties, UT-NII QIS Workshop, 東京 (2004年3月26日).

(集中講義・セミナー)

- [19] Masaki Owari, Mio Murao, Samuel L. Braunstein, Kae Nemoto, LOCC entanglement convertibility in infinite dimensional systems, WEH-summer school Fundamental of Quantum information, 独国ヴイッテンベルグ, 2003 年 7 月 23 日

6 一般物理実験

6.1 小林 研究室

本研究室では、レーザーを用いた非線型光学、量子光学、量子エレクトロニクスを中心に、光物性物理学、分子物理学、光生物物理学から量子光学・量子情報にわたる幅広い研究を行っている。研究は大きく二つの柱(超短パルス、量子光学・量子情報)に分かれ、特に前者、は世界最短可視光パルスレーザーを用いてフェムト秒(1フェムト秒は 10^{-15} 秒)、ピコ秒(1ピコ秒は 10^{-12} 秒)、ナノ秒(1ナノ秒は 10^{-9} 秒)からマイクロ秒・ミリ秒に至る時間の流れに沿って凝縮系における非線型光学効果や動的物性の研究を行っている。研究対象としては、擬一次元系である共役高分子や分子会合体、混合原子価金属錯体を取り上げている。特にこれらの物質中の素励起(ワニア励起子、フレンケル励起子、電荷移動励起子、ソリトン、ポーラロン、バイポーラロン等)による超高速非線型光学過程を解明している。また、量子情報の基礎となる量子光学の基本的問題(光子相関や量子テレポーテーション、量子エンタングル状態等)に関する研究も行っている。

6.1.1 超短光パルス発生(非線型光パラメトリック増幅: NOPA)

本研究室では、7年前から超短光パルス発生法としてはユニークな、非共直線配置の光パラメトリック増幅(NOPA)による極限的光短パルス発生法を開発してきた。1999年度には世界記録である4.7 fsのパルスの発生に成功し、2001年度には装置の改良により、さらに短い3.9 fsパルスの発生に成功した。NOPAにより得られた超短パルス光は、他の光源、たとえば1997年ごろから行われている中空ファイバーを用いたパルス発生法に比べ、スペクトルが極めて平滑で分光に応用しやすいという利点を持っている。中空ファイバー法では自己位相変調によってスペクトルに強い振動構造が現れるが、NOPAにおいてはこの振動構造がパラメトリック増幅過程において平均化され、ほぼ様なスペクトル強度をもつ出力光が得られる。これは4 fs以下の超短パルス光源として理想的な特性である。さらにこの数年は、超短パルス列中の光パルスの位相を一定値にロックすること(絶対位相ロック)が世界的な課題となっているが、NOPA装置からの出力パルスは、この位相を自発的にロックさせることが可能である。

本研究室では現在、絶対位相をロックした世界最

短可視光パルス光源の開発を行っている。それと同時に、この超短パルスを光源とした実時間分光法を確立し、様々な物質に対して先端的測定と新しい現象の発見的な研究を精力的に行っている。

同期励起独立ダブルパス可視光非共直線光パラメトリック増幅器(NOPA)

可視光パラメトリック増幅器を、400nmシーディングの白色光アンプによる、同期励起・独立ダブルパス配置構成に拡張した。これにより帯域幅の拡大と、絶対位相(厳密には搬送波包絡波位相: CEP)のロックを両立することが可能となる。この装置を用いて、可視光領域での世界最短パルス発生を目指している。

超短パルス発生のための非線型光伝播の数値シミュレーション

超広帯域・超短パルス光発生のため、可視NOPAにおける物質分散と光学非線型間の相互作用を、スプリットステップFFT伝播法によって研究した。このNOPA系における、パラメトリック増幅のシード光である白色光の役割についての知見を得た。

新規非線型光学結晶による超短光パルス発生

近年、新規のホウ化物非線型光学結晶CLBO($\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$)、KABO($\text{K}_2\text{Al}_2\text{B}_2\text{O}_7$)、LB4($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$)などの結晶成長が可能になった。これらの結晶は、紫外領域での利用が可能であり超広帯域光発生には非常に魅力的な素材である。これらの光学結晶を前述のtype-I NOPAに利用し、可視から近赤外領域に及ぶ超広帯域光発生の可能性を始めて示した。

絶対位相の自己安定化

NOPA装置から発生するアイドラ光の絶対位相は、自己安定化させることができる。光学結晶ファイバーを用い、1オクターブを超える超広帯域化した白色光とその第2高調波とのスペクトル干渉から、絶対位相の自己安定化を実験的に確かめた。

次にレーザーパルスの超短パルス化及び精密なキャラクター化を行った。測定対象のレーザーパルスのスペクトルが、ほぼ1オクターブの広帯域にわたるものであるため、通常用いられる自己参照周波数分解光ゲート法(self-referencing frequency-resolved optical gating)では、光パルスのプロファイリングが全波長領域で行えない。そこで測定対象のレーザーパルスが、角度分散を原理的に持っていることを利用し、和周波発生相互参照周波数分解光ゲート法により、精密なキャラクター化を行った。更に、可変形鏡を用いた位相分散補償により、フーリエ変換限界にほぼ匹敵する準単サイクル近赤外パルスの発生に成功した。

このように開発された絶対位相をロックした超短パルス光源を用い、物質の超高速光応答の絶対位相依存性を実験的に実証することが、我々の目的である。理論的検討から、ある周波数(ω)の光と、その2倍の周波数(2ω)を持つ光との、コヒーレント干渉制御測定には、絶対位相依存性が現れることが期待される。位相揺らぎを評価するための予備的な干渉実験によると、上記のNOPA光源には数分程度の時間スケールの絶対位相ドリフトが存在し、これがこれまで絶対位相依存性の測定に障害となっていた。そ

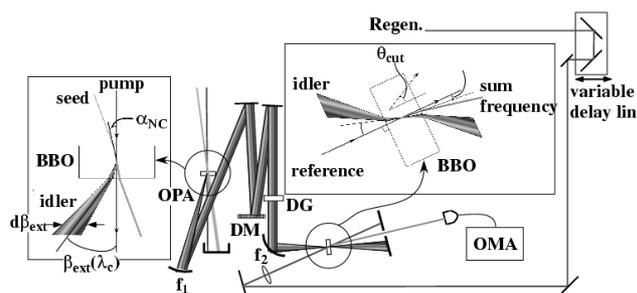


図 6.1 a: 絶対位相ロック装置配置図

ここで、得られた干渉信号をフィードバックし、絶対位相の能動的ロックを行うよう装置改良を行った。その結果、現在 1 時間以上にわたって絶対位相を一定に制御し続けることに成功した。この装置を用い、超高速光応答の絶対位相依存性についての実験研究をおこなっている。

6.1.2 超短パルス分光

ポリジアセチレンのフェムト秒実時間分光

1 次元 共役高分子の一種であるポリジアセチレン誘導体 (PDA-3BCMU (青相)) を 5 fs 超短光パルスによるポンプ・プローブ法によって研究した。PDA-3BCMU (青相) は電子格子相互作用が強く、蛍光の量子効率が 10^{-5} 以下と小さいため、60 fs 程度で光学遷移禁制な 2^1A_g 状態に緩和すると考えられている。本年度の研究で、Multi-channel Lock-in Amplifier を用いた、高エネルギー分解能 (10 meV)、多波長 (128 ch) 同時測定により、励起直後の構造緩和 ($1^1B_uFE \rightarrow 2^1A_g$) による Stokes シフトを、実時間で直接とらえることに成功した。また、格子振動による電子吸収スペクトルの形状変化を、振動周期とらえることができた。さらに、プローブ波長ごとの振動解析の結果、基底状態・励起状態の振動をそれぞれ区別でき、この結果励起状態でも一重結合・二重結合だけでなくそれらと共に三重結合が存在することがわかった。

擬イソシアニン J 会合体 (PIC J-aggregate) のサブ 5 フェムト秒時間分解分光

高濃度条件下で分子会合体の一種である J 会合体を形成することで知られる、擬イソシアニン色素に対して超高速時間分解分光を行った。試料形態は数十ミクロン以下の薄膜であり、100 程度に熱した精製水に PIC と、PVA と呼ばれるポリマーをマトリックスとして溶かし、カバーガラス上に垂らしてスピノコーティング法によって乾燥させ作成した。光源は NOPA により 500-750nm まで広帯域に増幅したサブ 5 フェムト秒パルスを用いており、ピーク波長 575nm の J バンドを含む、共鳴励起をとっている。また、検出系としては、128 チャンネルのマルチロックインアンプを用いており、SN のよい、極めて効率的な検出を行った。実験結果として、電子-格子

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

分子振動ダイナミクスのタイミング制御

超短パルスレーザーは、計測以外に原子分子固体の電子状態、分子振動、化学的状態の制御に利用することが出来る。例えば、電子分布をほぼ完全に励起状態もっていきことや、特定の化学結合の振動モードを高い振動励起状態に上げること、選択的な分子の解離、選択的格子振動励起などが、レーザーパルスによって実現可能である。このような制御は固体のダイナミクスの操作、化学反応制御、量子計算に応用が可能である。我々の研究室では、パルスタイミング法と呼ばれる方法を用い、位相制御量子干渉を実現した。この方法では、二つのフーリエ限界超短パルスのタイミングを正確に合わせることで、系の制御を行う。この方法を用いて、複数の分子内振動モード間の相対位相を制御することが目的である。モード間の相対位相を制御することにより、分子内振動のエネルギーの再分配に及ぼす、位相の影響を評価することが可能になる。実験は、リニアアンプにより、増幅されたチタンサファイア発振器からの 20 フェムト秒パルスを用いて行った。これを 3 分割し、一つを励起パルス、一つを制御パルス、残りをプローブパルスとして用いている。励起パルスと制御パルスをフェムト秒の精度で正確に制御することにより、分子振動振幅の位相依存性 (タイミング依存性) を測定した。

ナフトロシアニンのポンプ・プローブ分光

シリコンナフトロシアニンと銅ナフトロシアニン薄膜の超高速応答を、スペクトル分散させたポンプ・プローブ法により測定した。フトロシアニン誘導体は、ポルフィリン大員環を持つ生体系由来物質との比較上興味深い物質群であり、有機光検出物質として工業的応用上も重要な物質群である。これが本研究推進のモチベーションとなっている。測定結果は現在解析中であるが、現在のところ、フトロシアニン大員環の電子励起と孤立した分子振動モード或いは凝集モード間のカップリングの強さについての情報を与えている。更なる実験研究について今後計画中である。

分子振動を用いた超短パルスのキャラクタリゼーション

光パルスの圧縮や、ポンプ・プローブ分光、コヒーレント制御等幅広い分野で、超広帯域超短パルスの位相情報の正確な測定が、非常に重要である。実験装置の複雑さや測定の信頼度の異なる様々な位相計測技術が提案されてきている。分光学的応用を考え

た場合、広い帯域幅に渡って、高精度でかつ単純な位相計測方法が望ましい。我々の研究室では、典型的なポンプ・プローブ測定配置において、非共鳴励起されたコヒーレントな分子振動を使った群遅延分散の直接測定方法を提案し、この実証実験を行った。

蛍光タンパク質 GFP の光物理学的性質

生命科学分野で広範に用いられている Green Fluorescent Protein(GFP) の Neutral form(発色団のフェノール環のプロトンが未解離な状態)の光励起直後のダイナミクスについて知見を得る為に、中心波長約 400nm のフェムト秒パルスレーザーを用い、測定試料として GFP 変異体の 1 種である Cycle3(桑島研究室より提供して頂いた)に対してポンプ・プローブ分光実験を行った。この結果、電子遷移にカップルして約 23cm^{-1} という低周波数分子振動が励振されている事が明らかとなった。

フタロシアニンの実時間振動分光

超短光パルス (6 fs) を用い、錫フタロシアニンの実時間振動分光をおこない、励起される振動モードとその振幅スペクトルから、キャリア生成メカニズムの初期過程についての情報が得られた。電荷移動励起 (CT) 領域では、インパルスプラマン散乱により、格子の電子的基底状態振動が励起されることが観測された。一方局在励起領域では、フタロシアニン分子のマクロサイクルの変形振動(電子的基底状態振動)が励起されるのみで、格子の振動はほとんど観測されなかった。この実験結果は、CT 励起状態が分子をまたがった電荷共鳴状態をつくり、分子間の振動つまり格子振動を励起するのに対し、局在励起が 1 分子内の励起であるため、分子間振動は引き起こさないことを明示している。これまでのフタロシアニンの光キャリア生成の実験では、局在励起領域を光励起した場合に電荷が発生するモデルとして、1) S_0 から S_1 への遷移が、CT 励起状態をつくりこれが外部電場によって光誘起キャリアになるモデル、2) S_1 励起が直接光キャリアに解離するモデル、の二つが提示されてきた。これまでの電場変調分光の実験では、局在励起領域にも強い電場変調成分が観測され、これは分子の局在 S_1 励起と CT 励起状態のハイブリダイゼーションによると説明されてきた。ここから、後者の光キャリアの直接生成モデルが支持され、熱活性化エネルギーの実験でも後者が支持されてきた。しかし今回の振動分光の結果は、これらの解釈とは一致していない。振動分光による実験結果は、CT バンドにおいては光キャリア生成につながる電荷共鳴状態が明瞭に観測され、直接キャリアが生成されることを示唆しているが、局在励起領域ではこのような成分はまったく観測される、光キャリア生成は直接ではなく 2 段階で行われているモデルが妥当であることを示唆している。

超短パルス光による PEPI のキャリア生成機構

PEPI は、 $[\text{PBI}_6]^{4-}$ 2 次元ネットワーク構造をもつ無機有機層状半導体の中で、光劣化耐性に優れ低温および室温で EL 発光を示す物質である。この物質は X 線蛍光も示し、X 線検出器として利用する提案もなされている。この物質の光キャリア生成メカニズムを研究する目的で、400 nm、40 fs の超短パルス光を用い、ポンプ・プローブ法によりバンドギャップ

付近の超高速分光を行った。光励起によりヨウ素 - 鉛の無機層部分に光キャリアが生成されるが、それに伴いヨウ素鉛間の格子振動である 30cm^{-1} の振動が誘起され、これが 1.5 ps 程度の時間で急速に緩和していくことが判った。この格子振動は、500 nm 付近にある最低励起子の共鳴領域でも観測されているが、このときの寿命は 4 ps よりはるかに長くなることがこれまでに報告されている。この振動減衰の差は、バンドごとの電子-格子相互作用の差を反映したものである。

分子振動の位相の高感度観測とそのシミュレーション

20 fs 超短光パルスを用いたポンプ・プローブ分光実験により、シアニン色素 1,1',3,3',3',3'-ヘキサメチル-4,4',5,5'-ジベンゾ-2,2'-インドトリカルボシアニンの超高速ダイナミクスに関する研究を行った。経路長変調法を用い、高感度での分子振動検出を可能にした。- 観測したシグナルをフーリエ分解して 7 つのモードに分け、特異値分解により各々のモードにおける振動の位相を決定した。振動モードによって、位相のプローブ波長依存性が変化することが分かった。変位した調和振動子モデルを用いた有効線形応答関数法によりポンププローブシグナルのシミュレーションを行い、この位相変化の原因を解明した。モード周波数とパルス幅との相対的な関係によって波束の生成様式が異なり、これにより位相のプローブ周波数依存性が変化することを示した。

6.1.3 マルチチャンネルロックインアンプによるポリマー膜・水溶液中の分子会合体の電場変調分光

ポリマー中にドーブしたポルフィリン J 会合体について、マルチチャンネルロックインアンプを用いて電場変調分光を、東京理科大学との共同研究として行った。TPPS (tetraphenylporphyrin sulfonic acid) J 会合体について、単量体と会合体の分極率変化を比較し、コヒーレントな励起子を作る会合数が 60-70 であると評価した。これは過去に主に水溶液中の J 会合体で別の手法で評価されたコヒーレントな会合数とくらべて数倍大きい。また、従来電場変調分光は固体や有機溶媒などの絶縁体媒質中でしか行うことができなかったが、透明電極界面のナノスケール厚の電気二重層を利用した、水溶液の電場変調分光法を開発した。この方法により水の 1 次の電気光学定数を評価し、TPPS-J 会合体について水溶液中でも電場による吸収スペクトルのシフトを観測することに成功した。これにより水溶液中でもコヒーレントな会合数を評価することが可能になった。

6.1.4 量子光学・量子通信

光のもつ量子的な性質を利用した、興味深い実験が近年盛んに行われ、そのいずれもが、古典光学では実現不可能な、物理学の原理に根ざした興味深い実験である。これらは、量子通信・量子計算などの

分野に応用可能であり、例えば非線型結晶による自発的パラメトリック下方変換 (SPDC: Spontaneous Parametric Down-Conversion) により発生させた光子対を用いた実験は、非常に多数報告されている。この SPDC の過程で生じる光子対は、さまざまなパラメータに対して絡み合い状態を作るため、多様なパラメータを用いた実験が可能である。また最近、二光子の絡み合いだけでなく、さらに複雑な量子絡み合い状態を利用しようという提案もなされている。量子絡み合い光子対を用いた分光測定

本研究では、光子対の周波数空間での絡み合いを利用する実験を行った。周波数の絡み合った光子対を用い、吸収分光を行うことを目的としている。周波数の絡み合いをよくするため、励起光源として狭帯域の連続波レーザーを用いている。十分に広いスペクトル領域での吸収測定を行うためには、光子対のスペクトルが広いスペクトル幅を持っていることが要求される。一方、スペクトル領域を広げることで各波長当たりの光子数は減少し、測定に支障を及ぼす可能性もある。そこで広帯域、狭帯域の二条件で周波数絡み合い光子対を発生させ、分光測定を行った。実験では、発生した SPDC 光子対とともに SPDC 光子対に変換されなかった励起光も同軸方向に伝播し測定ノイズとなる。SPDC 光子対のみの測定を行うため、発生する光子対が広いスペクトル幅を持ちつつ、励起光を確実に除去できるように設計した光学系を用いた。狭帯域周波数絡み合い光子対、広帯域周波数絡み合い光子対のそれぞれを用いて、 Nd^{3+} ドープガラスの吸収分光測定を行った。どちらを用いた測定においても、古典的分光法により測定された試料の吸収スペクトルと定性的にも定量的にも一致する結果が得られた。広帯域の光子対により測定された吸収スペクトルでは、試料の吸収ピークの形状を反映した吸収スペクトルが測定されている。これらは、周波数絡み合い光子対を用いた分光測定が可能であることが実証された、世界で初めての例である。光ファイバを用いた光子数揺らぎの周波数量子相関

光ファイバのような三次の非線型媒質中を光パルスが通過するとき、自己位相変調及び群速度分散による変調効果によってパルス内の周波数モード間に相関が生じる。このことから、光ファイバ通過後のパルスを回折格子で周波数毎に分解してスペクトルの一部をフィルタで切ることにより、パルスの光子数量子揺らぎを小さくすることができる。この相関を詳細に見るために我々は、空間位相変調器 (SLM) を用いてこれらの相関パターンを詳しく調べた。これらの相関は、ファイバへの入射パワーや分散値などに大きく依存するために、バックプロパゲーション法 (量子効果を小さい摂動部分とする近似を行い、非線型の古典伝播方程式を予め解いておく。これらの古典解が線形化されたハイゼンベルグ方程式を構成する。そして、そのハイゼンベルグ方程式の随伴方程式が保存するという関係を用いて微分方程式を解く方法) によって光子数揺らぎの量子相関を計算する方法) を用いて数値計算を行い実験と比較した。また、通常のシングルモードファイバよりも更に高非線型性が期待されるフォトニッククリスタルファイバを用いた量子相関を調べる

光パラメトリック発振器を光源とした量子干渉の測定

量子物理学の中で量子干渉現象は最も興味深い現象の一つである。この量子干渉を示す二光子相関状態を生成するためには、通常自然放出パラメトリック下方変換を用いる。我々の研究室では新たに、光パラメトリック発振器 (OPO) を用いた二光子相関状態の生成に成功した。OPO 装置から発生する光子対は共振器の作用により、狭バンド幅で時間相関が長いという性質を持ち、多モードの光子対の重ね合わせになる。このマルチモードの共役光子対の時間相関関数は、多数のピークをもつ振動的な構造をもつことがわかった。今年度は、OPO 装置からのモードロックした 2 光子対間の干渉を、非対称干渉計において、初めて観測することに成功した。OPO から出力された二光子対を光路差のある Mach-Zehnder 干渉計に入射させ、それによる二光子干渉を観測する実験を行った。干渉計の光路差は OPO 共振器の周回時間の半分になっている。干渉計の短い光路と長い光路を一光子づつが通過した場合は、識別可能であるため干渉は生じない。一方、二光子が同じ光路を通る場合には、どちらの光路を通ったか識別が不可能であるため干渉を生ずる。このため、二光子の検出される時間差が、干渉計の光路差分ずれるごとに、干渉するピークと干渉しないピークが現れる。

四光子相関

二つの非線型光学結晶配置による、四光子量子絡み合い状態の直接生成を提案した。この四光子絡み合い状態は、一般化ベル不等式の破れを導く。局所的隠された変数理論によれば、 $S_L^{(4)} \leq 1$ の不等式が成立するが、量子論によれば、 $S_Q^{(4)} = 8/3\sqrt{2}$ となる。この状態を用いた応用の一つが、量子秘密分散共有であるが、このような高強度の四光子絡み合い状態は、他の量子情報分野でも応用可能である。現在このスキームの実証実験を行っている。

SPDC を用いた量子鍵配布実験

タイプ I の自然放出パラメトリック下方変換 (SPDC) によって発生する、直交した偏光状態を持つシグナル・アイドラー光子対を偏光ビームスプリッターにより分離し、アイドラー光子の計数を取ることでシグナルが一光子状態とみなせる (ゲート単一光子源)。そのシグナル光子に直線偏光 (水平 1、鉛直 0) および、円偏光 (左回り 1、右回り 0) のいずれかの偏光状態を電気光学変調器を用いて付加する。送信者と受信者で秘密鍵 (0、1 のビット列からなる) の共有を行うには、あらかじめ選んでおいた 01 からなるランダムな数列のそれぞれの要素に直線偏光と円偏光のどちらを用いてビット情報を与えるかを送信者が決定し、また受信者もビットを保持するそれぞれの光子をどの偏光基底で検出するかランダムに選ぶ必要がある。送信者受信者の基底偏光が一致したときのみそれぞれのビットは確率 1 で一致する。この方式の安全性は、盗聴者が基底に関する情報を持っていない限り確率 1 で正しい検出ができないところにあるが、それを保証するには信頼性の高い単一光子源が必要となる。我々の用いる SPDC 光子対の片方をゲートとする単一光子源は、その光子数分布において他の単一光子源にくらべ複数光子状態の確率が増加してしまうと考えられるが、ゲート側で光子数識

別ができれば複数光子の場合には鍵として採用しなければよいため安全性の確保ができる。この光子数識別器は、我々が保有している単一光子検出器と市販のファイバーを用いて構成できる。またもう一つのゲートの利点としてノイズの軽減効果があると考えられる。同時計数を取ることによるこれらの利点により、単一光子源としての相対的な信頼性の低さをカバーして安全性の高い量子鍵配布システムを構築することができる。

<受賞>

- [1] 小林 孝嘉, 平成 14 年度日本分光学会賞学術賞, 「極限的超短パルス光の発生とそれを用いた遷移状態分光法の確立」

<報文>

(原著論文)

- [2] T. Kobayashi. Structure and nonlinear properties of porphyrin J-aggregates. *Nonlin. Opt.*, Vol. 22, pp. 301–304, 1999.
- [3] H. Hashimoto, T. Nakashima, K. Hattori, T. Yamada, T. Mizoguchi, Y. Koyama, and T. Kobayashi. Structures and nonlinear optical properties of polar carotenoid analogues. *Pure Appl. Chem.*, Vol. 71, pp. 2225–2236, 1999.
- [4] A. Sugita, T. Saito, T. Kobayashi, and M. Yamashita. Ultrafast lattice relaxation dynamics of exciton in a quasi-1-D metal-halogen complexes. *Int. J. Mod. Phys. B*, Vol. 15, No. 28, pp. 3965–3969, 2001.
- [5] T. Kobayashi, T. Saito, and H. Ohtani. Real-time spectroscopy of transition states in bacteriorhodopsin during retinal isomerization. *Nature*, Vol. 414, pp. 531–534, 2001.
- [6] T. Fuji, H. J. Ong, and T. Kobayashi. Real-time observation of vibrational coherence persisting after internal conversion and vibrational relaxation in cyanine dye molecules. *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 380, pp. 135–140, 2003.
- [7] P. Kumbhakar and T. Kobayashi. Ultra-broadband phase-matching in two recently grown nonlinear optical crystals for generation of tunable ultrafast laser radiation by type - noncollinear optical parametric amplification. *J. Appl. Phys.*, Vol 94, pp. 1329–1338, 2003.
- [8] H. Goto, Y. Yanagihara, H. Wang, T. Horikiri, and T. Kobayashi. Observation of an oscillatory correlation function of multimode two-photon pairs. *Phys. Rev. A*, Vol. 68, 015803, 2003.
- [9] X. Fang and T. Kobayashi. Evolution of a super-broadened spectrum in a filament generated by an ultrashort intense laser pulse in fused silica. *Appl. Phys. B*, Vol. 77, pp. 167–170, 2003.
- [10] T. Taneichi and T. Kobayashi. Enhanced entanglement of two atoms confined in a multi-mode optical cavity. *Chem. Phys. Lett*, Vol. 378, pp. 576–581, 2003.
- [11] P. Kumbhakar, S. Adachi, Z.-G. Hu, M. Yoshimura, Y. Mori, T. Sasaki, and T. Kobayashi. Generation of tunable near-UV laser radiation by type-I second-harmonic generation in a new crystal $K_2Al_2B_2O_7$ (CABO). *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol 42, pp. L1255–L1258, 2003.
- [12] P. Kumbhakar and T. Kobayashi. Nonlinear optical properties of $Li_2B_4O_7$ (LB4) crystal for the generation of tunable ultra-fast laser radiation by optical parametric amplification. *Appl. Phys. B*, Vol. 78, pp. 165–170, 2004.
- [13] H. Goto, H. Wang, T. Horikiri, Y. Yanagihara, and T. Kobayashi. Two-photon interference of multimode two-photon pairs with an unbalanced interferometer. *Phys. Rev. A*, Vol 69, 035801, 2004.
- [14] M. I. Stockman, D. J. Bergman, and T. Kobayashi. Coherent control of nanoscale localization of ultrafast optical excitation in nanosystems. *Phys. Rev. B*, Vol. 69, 054202, 2004.
- [15] Y. Li and T. Kobayashi. Four-photon W state using two-crystal geometry parametric down-conversion. *Phys. Rev. A*, Vol. 69, 020302, 2004.
- [16] X. Fang and T. Kobayashi. Self-stabilization of carrier-envelope phase of an OPA verified by with a photonic crystal fiber. *Opt. Lett.*, in press, 2004.
- [17] M. Hirasawa, Y. Sakazaki, H. Hane, and T. Kobayashi. Direct observation of vibration dynamics in tin phthalocyanine. *Chem. Phys. Lett.*, in press, 2004.
- [18] P. Kumbhakar, T. Kobayashi, and G. C. Bhar. Sellmeier dispersion for phase-matched terahertz generation in $ZnGeP_2$. *Appl. Opt.*, Vol 43, p. 16, 2004.

(会議抄録)

- [19] T. Ide, H. F. Hofmann, T. Kobayashi, and A. Furusawa. Continuous variable teleportation of single photon states. *Proceedings of ISQM-Tokyo '01 (7th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology)*, pp. 65–67, 2002.
- [20] H. F. Hofmann, T. Ide, T. Kobayashi, and A. Furusawa. Information extraction and quantum state distortions in continuous variable teleportation. *Proceedings of ISQM-Tokyo '01 (7th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology)*, pp. 61–64, 2002.
- [21] T. Kobayashi. Sub-5-fs spectroscopy of several molecular systems. *The 10th International Conference on Time-resolved Vibrational Spectroscopy*, 2001.
- [22] A. Baltuška, T. Fuji, A. Yabushita, and T. Kobayashi. A NOPA with an adaptive pulse tailoring over a 120-THz bandwidth. *Abstracts of The 8th International Workshop on Femtosecond Technology(FST2001)*, pp. 63–66, 2001.

- [23] T. Fuji and T. Kobayashi. Investigation of molecular vibrational dynamics using femtosecond chirped pulses *Abstracts of The 8th International Workshop on Femtosecond Technology(FST2001)*, p. 117, 2001.
- [24] T. Kobayashi, T. Fuji, N. Ishii, and H. Goto. First observation of Auger-process induced anharmonic oscillation in molecular systems under high-density excitation. *International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids*, p. 110, 2001.
- [25] T. Kobayashi, H. Kano, and T. Saito. Dynamic intensity borrowing induced by coherent molecular vibration observed by sub-5-fs spectroscopy. *International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids*, p. 76, 2001.
- [26] A. Baltuška, T. Fuji, A. Yabushita, and T. Kobayashi. Ultrashort pulse characterization by interferometric spectral cross-convolution. *Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, ThJ2-1, 2001.
- [27] A. Baltuška, T. Fuji, T. Ishigure, Y. Koike, and T. Kobayashi. A prism compressor with an ultrabroad bandwidth of negative dispersion *Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, WJ2-2, 2001.
- [28] T. Kobayashi. Pulse characterization and data analysis in ultrafast spectroscopy. *Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, ThG3-1, 2001.
- [29] T. Kobayashi. Measurement of ultrafast material dynamics using sub-5-fs pulses. *Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, TuF1-1, 2001.
- [30] T. Kobayashi. Sub 5 femtosecond pulse technology and its application ultrafast material dynamics. *AP-RASC '01(Asia-Pacific Radio Science Conference)*, p. 116, 2001.
- [31] T. Saito and T. Kobayashi. Real time spectroscopy of excited states in azobenzene. *Proceedings of ICPOP'01(International Conference on Photo-Responsive Organics and Polymers 2001) in Optical Materials*, Vol. 21, 1-3, pp. 302–305, 2003.
- [32] T. Kobayashi. Sub-5-fs nonlinear optical processes in polydiacetylene films. *Proceedings of ICPOP'01(International Conference on Photo-Responsive Organics and Polymers 2001)in Optical Materials*, Vol. 21, 1-3, pp. 11–18, 2003.
- [33] T. Kobayashi. Vibrational dynamics in polyenes studied by sub-5-fs real-time spectroscopy. *Carotenoid Science*, Vol. 4, Jan., pp. 23–25, 2001.
- [34] T. Kobayashi and A. Baltuška. Sub-4-fs visible pulse generation. *Technical Digest of 4th Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering(OIE'01)*, pp. 33–34, 2001.
- [35] T. Kobayashi. Sub-5-fs spectroscopy of several molecular systems. *Conference program of XII Conference of Ultrafast Processes in Spectroscopy*, p. 7, 2001.
- [36] T. Kobayashi. Sub-5-fs spectroscopy of several molecular systems. *Book of abstracts of 5th Femtochemistry Conference*, pp. L45–46, 2001.
- [37] T. Kobayashi, T. Fuji, N. Ishii, and H. Goto. First observation of Auger-process induced anharmonic oscillation in molecular systems under high density excitation. *Technical Digest of QELS 2001(Quantum Electronics and Laser Science Conference)*, pp. 114–115, 2001.
- [38] H. Kano, T. Saito, and T. Kobayashi. Dynamic intensity borrowing induced by coherent molecular vibration observed by sub-5-fs spectroscopy *Technical Digest of QELS 2001(Quantum Electronics and Laser Science Conference)*, pp. 179–180, 2001.
- [39] T. Kobayashi. Sub-5fs real-time spectroscopy of excitonic systems. *Int. J. Mod. Phys. B(EXCON 2000 Yamada Conference)*, Vol. 15, Nos. 28, 29 & 30, pp. 3623–3627, 2001.
- [40] H. Kano, T. Saito, A. Ueki, and T. Kobayashi. First observation of dynamic intensity borrowing induced by coherent molecular vibrations in J-aggregates revealed by sub-5-fs spectroscopy. *Int. J. Mod. Phys. B(EXCON 2000 Yamada Conference)*, Vol. 15, Nos. 28, 29 & 30, pp. 3817–3820, 2001.
- [41] A. Sugita, T. Saito, and T. Kobayashi. Ultrafast lattice relaxation dynamics of exciton in a quasi-1-d metal-halogen complex. *Int. J. Mod. Phys. B(EXCON 2000 Yamada Conference)*, Vol. 15, Nos. 28, 29 & 31, pp. 3965–3968, 2001.
- [42] T. Yamamoto, M. Abe, T. Yamada, T. Kobayashi, and H. Hashimoto. Spectroscopic properties of selectively deuterium-substituted retinal homologues. *Excitonic Processes in Condensed Matter*, pp. 433–436, 2001.
- [43] T. Nakashima, T. Yamada, T. Kobayashi, and H. Hashimoto. Structures and optical properties of hydrazones derived from biological polyenes. *Excitonic Processes in Condensed Matter*, pp. 325–328, 2001.
- [44] H. Hashimoto, K. Hattori, T. Yamada, and T. Kobayashi. Electro-absorption spectroscopy and semi-empirical molecular orbital calculations of polar retinoid analogues. *Excitonic Processes in Condensed Matter*, pp. 205–208, 2001.
- [45] J. Janszky, J. Asboth, A. Gabris, A. Vukics, M. Koniorczyk, and T. Kobayashi. Two-mode Schrödinger cats: entanglement and teleportation. *Book of Abstracts of Wigner Centennial Conference*, p. 24, 2002.
- [46] T. Ide, T. Kobayashi, and H. F. Hofmann. Gain tuning and fidelity in continuous variable quantum teleportation. *Book of Abstracts of Wigner Centennial Conference*, p. 109, 2002.
- [47] A. Vukics, J. Janszky, and T. Kobayashi. Nonideal teleportation in coherent-state basis. *Book of Ab-*

- stracts of Wigner Centennial Conference*, p. 208, 2002.
- [48] T. Kobayashi and A. Baltuška. Visible pulse compression to 4 fs by optical parametric amplification and programmable dispersion control. *Abstracts of the 9th International Workshop on Femtosecond Technology(FST2002)*, p. 17, 2002.
- [49] T. Kobayashi, T. Saito, and S. Adachi. Sub-5-fs real-time spectroscopy of several molecular systems *Proceedings of the 2002 International Conference on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter(ICL'02)*, Vol. 102–103, pp. 722–726, 2002.
- [50] T. Kobayashi. Sub-4-fs visible pulse generation by optical parametric amplification. *Technical Digest of The 3rd Asian Pacific Laser Symposium (APLS 2002)*, p. 11, 2002.
- [51] T. Kobayashi. Dynamics of coherence in organic molecular systems studied by sub-5-fs spectroscopy *Program and Abstracts of The 14th Symposium of the Materials Research Society of Japan*, p. 23, 2002.
- [52] T. Kobayashi. Sub-5-fs spectroscopy of conjugated polymers *Final Program & Abstracts Book of OP2003-Optical Probes*, p. 77, 2003.
- [53] T. Kobayashi. Dynamics of coherence in organic molecular systems studied by sub-5-fs spectroscopy. *Program and Abstracts of The 14th Symposium of the Materials Research Society of Japan*, p. 23, 2002.
- [54] T. Kobayashi. Sub-5-fs nonlinear spectroscopy of organic systems *Abstracts of ICFPAM(7th International conference on frontiers of polymers and advanced materials)*, pp. 26–27, 2003.
- [55] T. Kobayashi. Sub-5-fs pulse generation from a noncollinear optical parametric amplifier and its application to ultrafast dynamics in polymers. *Femtochemistry and Femtobiology (Proceedings of VIth international conference on Femtochemistry: Paris, France, Jul. 6-10, 2003)*, Elsevier, pp. 483–489, 2004.
- [56] T. Kobayashi. Sub-5-fs spectroscopy of several molecular systems. *Book of Abstracts of 12th International Laser Physics Workshop(LPHYS.003)*, p. 281, 2003.
- [57] T. Kobayashi. Sub-5-fs spectroscopy of several organic systems. *Proceedings of Organic Photonic Materials and Devices*, 4991, pp. 495–499, 2003.
- [58] T. Kobayashi. Sub-5-fs nonlinear spectroscopy of organic nanosystems. *Presentations Abstracts of Japan-France Conference on Molecular Photonics and Biophotonics at Micro and nano-scale(JFC2003)*, p. 3, 2003.
- [59] T. Kobayashi. Ultrashort pulse generation and carrier-envelope phase auto-stabilization with OPA. *Proceedings of Korea Conference on Innovative Science and Technology(KCIST-2003):Femto Science and Technology-Future Implications*, p. 30, 2003.
- [60] T. Kobayashi. Real-time observation of molecular vibration with sub-5-fs pulses. *Proceedings of TRVS2003(XI International Conference on Time Resolved Vibrational Spectroscopy)*, p. 60, 2003.
- [61] T. Kobayashi. Sub-5-fs spectroscopy of several molecular systems. *Proceedings of the "XII UPS Conference"(Florence, Oct.28-Nov. 1,2001) in "Recent advances in ultrafast spectroscopy"*, pp. 239–242, 2003.
- [62] T. Kobayashi. Ultrashort visible pulse generation by NOPA. *Proceedings of CLEO/Pacific Rim 2003(the 5th Pacific Rim Conference of Lasers and Electro-Optics)*, p. 133, 2003.
- [63] T. Kobayashi. Generation and carrier-envelope phase control of visible and NIR ultrashort pulses. *Proceedings of The 9th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy:Quantum Correlation and Coherence*, pp. 127–132, 2003.
- [64] T. Kobayashi. Sub-5fs spectroscopy. *Abstracts of "Emerging Ultrafast Spectroscopies: From Chemistry to Biophysics"at the 227th ACS National Meeting(Anaheim, CA, USA)*, p. 37, 2004.
- [65] 小林孝嘉. 超短発光パルス発生とその分光への応用. *物性研だより*, Vol. 41, No. 5, pp. 11–12, 2001.
- [66] 湯浅吉晴, 井久田光弘, 斎藤敬, 小林孝嘉, 木村龍実, 松田宏雄. ポリジアセチレンのフェムト秒時間分光. *物性研だより*, Vol. 44, No. 1, pp. 72–75, 2004.
- (総説)
- [67] T. Kobayashi. Excitons in J-aggregates with hierarchical structure. *Supramolecular Science*, Elsevier, Vol. 5, pp. 343–347, 1998.
- [68] T. Kobayashi. Tunable visible and near-infrared pulse generation in a 5fs regime. *Appl. Phys.*, Vol. 70, pp. 239–246, 2000.
- [69] T. Kobayashi, A. Shirakawa, and T. Fuji. Real-time spectroscopy of molecular vibration using sub-5-fs pulses. *A. D. Bandrauk, Y. Fujimura and R. J. Gordon, Laser control and manipulation of molecules(ACS symposium series 821)*, American Chemical Society, pp. 171–187, 2002.
- [70] T. Kobayashi. Sub-5-fs spectroscopy of polymers. *Synth. Met.*, Vol. 139, pp. 715–717, 2003.
- [71] T. Kobayashi. Ultrafast dynamics in porphyrin J-aggregates and polydiacetylene studied by sub-5fs spectroscopy. *Electronic and Optical Properties of Conjugated Molecular Systems in Condensed Phases 2003*, edited by S. Hotta, pp. 485–512, 2003.

- [72] T. Kobayashi. Chapter 6: Real-time spectroscopy of molecular vibration with sub-5-fs pulses. *Femtosecond Laser Spectroscopy*, edited by P. Hanford, Kluwer, 2004.
- [73] T. Kobayashi and H. Kano, Wave-packet dynamics of herzberg-teller-type in porphyrin J-aggregates studied by sub-5-fs spectroscopy, NLO, QO(Proceeding of NATO workshop, Bucharest June 2003), Old City Publishing, in press, 2004
- [74] 小林孝嘉. フェムト秒分光法の展開と高分子励起状態への応用. 日本化学会(編), 季刊 化学総説超高速化学ダイナミクス, Vol. 44, pp. 30–40, 2000.
- [75] 小林孝嘉. 超高速化学ダイナミクス フェムト・ピコ秒領域の化学日本化学会(編), 季刊 化学総説, Vol. 44, 2000.
- [76] 藤貴夫, 小林孝嘉. 第1章 超短光パルスの発生・計測・制御 1 超短光パルスの発生の基礎. 超高速光エレクトロニクス技術ハンドブック, サイベック株式会社 REALIZE 部門, pp. 3–8, 2003.
- [77] 小林孝嘉. 第1章 超短光パルスの発生・計測・制御 2 極限的超短パルス可視光発生とパルス特性評価. 超高速光エレクトロニクス技術ハンドブック, サイベック株式会社 REALIZE 部門, pp. 9–21, 2003.
- [78] 小林孝嘉. 第6章 超高速分光技術. 超高速光エレクトロニクス技術ハンドブック, サイベック株式会社 REALIZE 部門, pp. 281–344, 2003.
- [79] 小林孝嘉. 第8章 超高速エレクトロニクスのための線形, 非線形光学材料 1 概説. 超高速光エレクトロニクス技術ハンドブック, サイベック株式会社 REALIZE 部門, pp. 411–435, 2003.
- [80] 小林孝嘉. フェムト秒パルスレーザーを用いた超高速分光. 電子情報通信学会誌小特集号, (社) 電子情報通信学会, Vol. 86, No. 8, pp. 625–631, 2003.
- [81] 小林孝嘉. 極限的超短パルス光の発生とそれを用いた遷移状態分光法の確立(平成14年度日本分光学会学術賞受賞者講演・要旨). 東京大学山上会館, 平成15年度春季講演会各研究部会シンポジウム(シンポジウム主題:環境問題と分光計測)(社) 日本分光学会, May14–15, 2003.
- [82] 小林孝嘉. 私の発言. *O plus E*, 株式会社新技術コミュニケーションズ, Vol. 25, No. 12, pp. 1322–1327.
- [83] 小林孝嘉. パラメトリック波長変換によるパルス圧縮. レーザー学会, レーザーハンドブック(第2版), オーム社, 2004.
- (学位論文)
- [84] 藪下 篤史. 広帯域パラメトリック光子対の発生とその微弱光分光等への応用実験 (Generation of broadband photon pairs and its application to absorption spectroscopy and quantum key distribution). (博士論文), 2004.
- [85] 佐々木 秀貴. 光ファイバと周波数フィルタを用いた光子数スクイーズド状態の発生. (修士論文), 2004.
- [86] 堀切 智之. パラメトリック下方変換を用いた非古典光の生成と応用. (修士論文), 2004.
- [87] 三上 秀治パラメトリック下方変換による絡み合い状態の生成. (修士論文), 2004.
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [88] M. I. Stockman, D. J. Bergman, and T. Kobayashi. Coherent control of nanoscale localization of ultrafast optical excitation in nanostructures. *CLEO/QELS 2003*, Baltimore, USA, Jun. 1–6, 2003.
- [89] T. Kobayashi. Sub-5-fs spectroscopy of several condensed-phase materials. *Femtochemistry VI*, Paris, France, Jul. 6–10, 2003.
- [90] T. Kobayashi. Sub-5-fs spectroscopy of several molecular systems. *12th International Laser Physics Workshop(LPHYS.003)*, Hamburg, Germany, Aug. 25–29, 2003.
- [91] T. Kobayashi. Carrier envelope phase stabilization by OPA. *Quantum Correlation and Coherence*, Yatsugatake, Japan, Sep. 17–19, 2003.
- [92] T. Kobayashi, H. Goto, H. Wang, T. Horikiri, and Y. Yanagihara. Energy-time correlated photon from an OPO. *Quantum Correlation and Coherence*, Yatsugatake, Japan, Sep. 17–19, 2003.
- [93] T. Kobayashi. Sub-5-fs nonlinear spectroscopy of organic nanosystems. *Japan-France Conference on Molecular Photonics and Biophotonics at Micro and nano-scale(JFC2003)*, Awaji, Japan, Oct. 26–29, 2003.
- [94] T. Kobayashi and X. Fang. Self-stabilization of carrier-envelope phase of an OPA verified by with a photonic crystal fiber. *CLEO/Pacific Rim 2003(the 5th Pacific Rim Conference of Lasers and Electro-Optics)*, Taipei, Taiwan, Dec. 15–19, 2003.
- [95] S. Adachi, P. Kumbhakar, and T. Kobayashi. Characterization of quasi-monocycle NIR pulses with stabilized carrier-envelope phase by XFROG. *CLEO/Pacific Rim 2003(the 5th Pacific Rim Conference of Lasers and Electro-Optics)*, Taipei, Taiwan, Dec. 15–19, 2003.
- [96] A. Yabushita and T. Kobayashi. Spectroscopy by frequency entangled photon pairs. *CLEO/Pacific Rim 2003(the 5th Pacific Rim Conference of Lasers and Electro-Optics)*, Taipei, Taiwan, Dec. 15–19, 2003.
- [97] T. Kobayashi. Self-stabilization of carrier-envelope phase of an OPA verified by with a photonic crystal fiber. *2004 CLEO/IQEC*, San Francisco, Calif. USA, May 16–21, 2004.
- 招待講演
- [98] T. Kobayashi. Sub-5-fs nonlinear spectroscopy of organic systems. *ICFPAM(7th International conference on frontiers of polymers and advanced materials)*, Bucharest, Romania, Jun. 10–15, 2003.

- [99] T. Kobayashi. Control of the carrier envelope phase by optical parametric processes. *Gordon Research Conference on Nonlinear Optics and Lasers*, New Hampshire, USA, Jul. 27–Aug. 1, 2003.
- [100] T. Kobayashi. Absolute-phase control of extremely short pulses: control of electronic wave packets in molecules. *3rd Gordon Research Conference on Quantum Control of Light and Matter*, Mt. Holyoke College, Mass. USA, Aug. 3–8, 2003.
- [101] T. Kobayashi. Geometrical relaxation studied by ultrashort pulselaser. *Excited States Processes in Electronic and Bio-Materials*, Los Alamos, New Mexico, USA, Aug. 10–16, 2003.
- [102] T. Kobayashi. Ultrashort pulse generation and carrier-envelope phase auto-stabilization with OPA. *Korea Conference on Innovative Science and Technology (KCIST-2003): Femto Science and Technology-Future Implications*, Cheju, Korea, Nov. 2–5, 2003.
- [103] T. Kobayashi. Ultrashort visible pulse generation by NOPA. *CLEO/Pacific Rim 2003 (the 5th Pacific Rim Conference of Lasers and Electro-Optics)*, Taipei, Taiwan, Dec. 14–19, 2003.
- [104] T. Kobayashi. Mechanism of ultrafast optical nonlinearity in polydiacetylene with sub-5-fs laser. *International Mini-Symposium on Nano-Photonics*, Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku Univ., Japan, Mar. 11, 2004.
- [105] T. Kobayashi. Sub-5fs spectroscopy. *Emerging Ultrafast Spectroscopies: From Chemistry to Biophysics at the 227th ACS National Meeting*, Anaheim, CA, USA, Mar. 28–Apr. 1, 2004.
- (国内会議)
- 一般講演
- [106] 小林孝嘉, 平澤正勝, 板崎雄三, 羽根広記, 足立俊輔. フタロシアニン錯体の高速分光. 日本物理学会秋季大会, 岡山大学, Sep. 20–23, 2003.
- [107] 平林正史, 四條崇弘, 徳永英司, 小林孝嘉. 水の電場変調分光. 日本物理学会秋季大会, 岡山大学, Sep. 20–23, 2003.
- [108] 小川高史, 徳永英司, 小林孝嘉. ポルフィリン J 会合体の電場変調分光. 日本物理学会秋季大会, 岡山大学, Sep. 20–23, 2003.
- [109] 平澤正勝, 小澤陽, 岸慶憲, 小林孝嘉. 無機有機層状ペロブスカイト半導体の超高速分光. 日本物理学会秋季大会, 岡山大学, Sep. 20–23, 2003.
- [110] P. Kumbhakar, T. Kobayashi. A new nonlinear optical crystal for the generation of tunable ultrafast laser radiation by noncollinear OPA. 日本物理学会秋季大会, 岡山大学, Sep. 20–23, 2003.
- [111] 湯淺吉晴, 井久田光弘, 斎藤敬, 木村龍実, 松田宏雄, 小林孝嘉. ポリジアセチレンのフェムト秒実時間分光. 日本物理学会春季大会, 九州大学, Mar. 27–30, 2004.
- [112] 井久田光弘, 湯淺吉晴, 斎藤敬, 木村龍実, 松田宏雄, 小林孝嘉. ポリジアセチレンのフェムト秒実時間分光. 日本物理学会春季大会, 九州大学, Mar. 27–30, 2004.
- [113] 徳永英司, 小林孝嘉, 李定植, 西研一, 榎本泰章. マルチチャンネルロックインによる単一量子点の非線形吸収分光. 日本物理学会春季大会, 九州大学, Mar. 27–30, 2004.
- [114] 西本智一, 徳永英司, 小林孝嘉. マルチチャンネルロックインアンブによるペリレンの電場変調分光. 日本物理学会春季大会, 九州大学, Mar. 27–30, 2004.
- [115] 浅野敏之, 徳永英司, 小林孝嘉. マルチチャンネルロックインによる溶媒和電子の研究. 日本物理学会春季大会, 九州大学, Mar. 27–30, 2004.
- [116] 三上秀治, 李永民, 小林孝嘉. パラメトリック増幅された光の量子状態の解析. 日本物理学会春季大会, 九州大学, Mar. 27–30, 2004.
- 招待講演
- [117] 小林孝嘉. 特別講義. 名古屋大学理学部物理学科, Oct. 9–10, 2002.
- [118] 小林孝嘉. サブ 5 フェムト秒パルスを用いた超高速化学反応の研究. レーザー学会学術講演会第 23 回年次大会, アクティシティ浜松コンgresセンター, Jan. 30–31, 2003.
- [119] 小林孝嘉. コヒーレント状態を基底としたテレポーテーションの解析. CREST 研究会, 通信総合研究所, Apr. 22–24, 2003.
- [120] 小林孝嘉. サブ 5fs パルスを用いた分子の実時間分光. FST2003, 幕張メッセ, Jul. 16–17, 2003.
- [121] 小林孝嘉. 大学院特別講義. 東京理科大学大学院理学部物理学科, Jul., 17, 2003.
- [122] 小林孝嘉. 特別講義. 関西学院大学理工学部, Sep. 1–3, 2003.
- [123] 小林孝嘉. Carrier-envelope phase stabilization of ultrashort pulse. 日米セミナー *Quantum Correlation and Coherence*, ハケ岳ロイヤルホテル, Sep. 17–19, 2003.
- [124] 小林孝嘉. Sub-5-fs spectroscopy of organic molecules and polymers for photonics device applications. *Nano and Microscale Photonics*, 淡路夢舞台国際会議場, Oct. 27–31, 2003.
- [125] 小林孝嘉. サブ fs 可視光パルスによる分子振動コヒーレンスの研究. 物性研短期研究会, 東京大学物性研, Nov. 14–15, 2003.
- [126] 小林孝嘉. 超高速光・光制御材料の探査的研究. 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業光科学第 6 回公開シンポジウム, KKR ホテル東京, Dec. 12, 2003.
- [127] 小林孝嘉. 大学院特別講義「レーザー分光学特論 III: 超短光パルスで超高速現象を見る」. 神戸大学理学部物理学科, Dec. 24–25, 2003.
- [128] 小林孝嘉. 現代物理学特論. 神戸大学理学部物理学科, Dec. 24, 2003.

- [129] 小林孝嘉, 房暁俊. CEP 制御パルスの発生とその応用. 第 4 回超高速光エレクトロニクス研究会 高強度フェムト秒科学と応用, 日本原子力研究所関西研究所光量子科学研究センター多目的ホール, Jan. 8-9, 2004.
- [130] 足立俊輔, 小林孝嘉. 非同軸光パラメトリック増幅器による準単サイクル近赤外レーザーパルスの発生. 第 4 回超高速光エレクトロニクス研究会 高強度フェムト秒科学と応用, 日本原子力研究所関西研究所光量子科学研究センター多目的ホール, Jan. 8-9, 2004.
- [131] 小林孝嘉. 超短パルスレーザーで分子の動きを見る. レーザー学会学術講演会第 24 回年次大会, 仙台国際センター, Jan. 29-30, 2004.
- [132] 湯浅吉晴, 井久田光弘, 齋藤敬, 木村龍実, 松田宏雄, 小林孝嘉. ポリジアセチレンのフェムト秒実時間分光. 物性研究所短期研究会 [超高速レーザー分光における最近の発展], 物性研究所, Feb. 17-18, 2004.
- [133] 小林孝嘉. サブ 5 フェムト秒可視光パルスを用いて, 視覚初期過程を探る. 日本化学会第 84 春季年会, 関西学院大学上原キャンパス, Mar. 26-29, 2004.

6.2 牧島研究室

6.2.1 太陽と星のフレアの研究

○ 太陽フレアにおける粒子加速

古徳らは、太陽フレアで生成された高速電子が、太陽光球めがけて降下するさいの制動放射を、GEANT4を用いてシミュレーションした。その結果、下方に放射されたガンマ線が、光球でコンプトン散乱して我々に到達するさい、スペクトルは劇的に軟化することを発見した。従来はこの効果を考えていなかったため、電子スペクトルの推定には大きな誤差があったことになる。ガンマ線の強いフレアでは、電子は広いピッチ角分布をもつ必要がある [25] [68] [85] [95]。

○ 星形成領域からの広がった X 線放射

江副らは、*Chandra* 衛星による星形成領域 NGC 6334 や NGC 2024 のデータを解析した。点源を慎重に取り除いたのち、どちらの天体からもディフューズな X 線放射を検出することに成功した。放射は、温度が数 keV の熱的成分と、硬い非熱的放射が混在したものと考えられる。若い大質量星からの星風が衝撃波を形成し、プラズマ加熱や粒子加速が起きている結果であろう [18] [24] [40] [69] [86] [93]。

○ X 線を放射する若い連星の候補

昨年度に引き続き柳田らは、星形成領域 M78 の *Chandra* 公開データを解析し、最も明るい X 線の点源が、B4 型の主系列星と暗い伴星との連星系であるという解釈を進めた [19] [41]。

6.2.2 コンパクト天体の観測的研究

○ 特定領域「ブラックホール天文学の新展開」[22]

牧島が領域代表者となって昨年度に発足した科研費特定領域「ブラックホール天文学の新展開」(www-utheal.phys.s.u-tokyo.ac.jp/tokuteiBH) では、京都大学と共催で、10月28-31日に京都で国際ワークショップ *Stellar-Mass, Intermediate-Mass, and Supermassive Black Holes* を開いた。80人を越す外国人を含め、約200名が参加する大盛会となった [33] [34] [45] [46]。他にも、一般向け成果公開に努めた [110] [112] [113]。

○ ブラックホールへの質量降着 [4] [33]

XTEJ1650-500 は、典型的なトランジェント型ブラックホール連星である。伊藤らは、ハード状態にあったこの天体のデータを、コンプトン化の影響を考えて解析したところ、光学的に厚い降着円盤が2週間かけて徐々に内向きに成長し、その内縁が Schwarzschild 半径の約3倍(最終安定軌道)に達した時点で、ソフト状態への遷移が完了することを発見した [63]。

村島らは、「あすか」のデータに *XMM-Newton* のデータを加えて、いくつかの狭輝線1型セイファート銀河の X 線スペクトルを研究した。どの天体も ~ 2 keV 以下で軟 X 線の超過を示し、超過成分は多くの場合、光子指数およそ2のべき関数に、温度 ~ 0.5

keV のボルツマン因子を掛けたモデルで再現できた。よって円盤からの放射は、低温で濃いプラズマにコンプトン散乱されている可能性がある [42] [45] [72]。

○ 超大光度コンパクト X 線源 (ULX)

近傍の銀河に見られる超大光度コンパクト X 線源 (ULX) の研究も続行した [13] [43] [83] [109]。宮脇らは、NGC 4449 銀河にある2つの明るい X 線源が、一方は power-law 状態の ULX、他方は通常のブラックホール連星であると結論した [2]。同様なブラックホール連星は、NGC 253 でも確認された [46] [64]。

久保田(宇宙研 PD)らと協力し、「すばる」望遠鏡 FOCAS 装置を用い、代表的な ULX である M81 X-6 の光学対応天体を3夜にわたり観測し、良質のデータを得た。データ解析を続けている。

○ X 線パルサーのサイクロトロン線

理研などと共同で、*RXTE* 衛星で観測した X 線パルサー X0115+63 のデータを解析した。二河らは、X 線光度が下がると、11 keV に見られる電子サイクロトロン吸収線のエネルギーが、17 keV 付近に移動することを明らかにした [65] [66]。これはパルサーの磁極で、降着円盤の高さが変わるためと考えられる。

我々は *INTEGRAL* 衛星 (欧) にマシントimeを獲得し、岡田らはその観測により、X 線パルサー GX301-2 から、45 keV 付近にサイクロトロン吸収線の検出に成功した [54] [84] [96]。これは「ぎんが」衛星で得られていた徴候を強めるものである。

6.2.3 星間・銀河間での高エネルギー現象

○ 星間空間でのプラズマ加熱と粒子加速

Chandra や *XMM-Newton* の公開データを用い、星間空間における高エネルギー現象を追求した。高橋(弘)らは M31 や M33 の中心部を [32] [70] [88]、また岡田らは銀河系バルジ領域をターゲットとし [15] [44] [59] [71]、点源を取り除いた解析を行った。その結果いずれにおいても、異なる温度 (0.9 keV、0.3 keV、0.1 keV など) をもつ複数の熱的なディフューズ X 線放射と、より硬い放射 (高温の熱的成分、もしくは非熱的成分) の存在が確認された。銀河系バルジに関しては、国分らが「あすか」や *RXTE* 衛星で得た結果 [14] と、また M31 では高橋(弘)らが「あすか」で導いた結果と、よく合致する。渦巻き銀河の星間空間で、プラズマ加熱や粒子加速が、普遍的に起きていることが明らかになりつつある。

○ 球状星団からの広がった X 線

岡田らは、*Chandra* で観測した球状星団 47 Tuc のデータを解析し、点源を除いたのち、ここでもディフューズな X 線放射を検出した [87]。熱的放射とすると温度は ~ 1 keV だが、重イオンの輝線が見られないため、放射の正体は不明である。前項の成果とあわせ、星の回転運動やランダム運動が、加熱や加速を引き起こしている可能性が考えられる。

○ 銀河の合体の証拠

川原田らは、楕円銀河 NGC 1550 の研究を続けた。*XMM-Newton* のデータでは、プラズマ中に重イオン

が広がって分布することから、この天体は過去には銀河群だったと推測される。濃いプラズマ中を運動することで、銀河は抵抗を受けエネルギーを失い、巨大楕円銀河 NGC 1550 へと合体した可能性が考えられる [1] [17] [39] [73]。

○ 銀河団プラズマの熱的進化 [20][23]

ケンタウルス銀河団では、中心部で X 線放射プラズマの温度が著しく低下する。高橋 (勲) らは *XMM-Newton* 衛星による観測を通じ、これは中心部の 100 kpc 以内に、温度 ~ 1.8 keV と ~ 4 keV の 2 成分が共存し、中心ほど低温成分の占める割合が増えるためであることを立証した [16] [21] [26] [31] [38] [90] [94]。これは「あすか」で得られた描像をと一致し、低温成分は中心銀河に根をもつ磁気ループの内部に閉じ込められ、高温成分がその外側を満たすという、我々の「磁気コロナモデル」をサポートする [20] [29] [23] [35] [36] [37] [58] [74] [91]。

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

○ *Astro-E2* 衛星と硬 X 線検出器 HXD-II

宇宙 X 線衛星 *Astro-E2* は、2005 年 2 月の打ち上げ目ざし、日米協力で、準備の最終段階に入った。搭載される 4 つの観測装置のうち 1 つが硬 X 線検出器 (HXD-II) で、10–600 keV のエネルギー域で、きわめて低いバックグラウンドをもち、硬 X 線領域での宇宙観測を刷新する威力をもつ。今年度も 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、国分を中心に、HXD-II の製作に総力を挙げた [9] [47] [60] [82] [114]。

○ 検出器部 (HXD-S)

HXD-II 装置の検出器部 (HXD-S) は、16 本の井戸型フォスウィッチ検出器 (Well 検出器) と、その周辺を囲む 20 本の BGO アンチ検出器の複眼配置をもち、重量は 186 kg に達する。昨年度から研究室の総員で、Well 検出器を製作した [104]。岡田、古徳らは、理研でアンチ検出器の製作に参加したが、低温で BGO 結晶にクラックが入るトラブルがあり、対処に追われた [105]。7 月には半ば完成した HXD-S を、いったん衛星の 1 次噛み合わせ試験に供出し、その終了を待って、11 月から完成に向けた残り作業を続行した。

1 月には JAXA 相模原キャンパスにて、フライト品の HXD-AE と結合して低温 (-20) での性能確認を行い、並行して Well 検出器の準スペア品 1 本を用い、熱真空試験の条件出しを行った。その後、アンチ検出器のフォトチューブが破損する事故などが生じ、予備ユニットとの交換を行い、2004 年 5 月半ばの時点でほぼ完成に漕ぎ着けた。HXD-S は今後、単体振動試験、衛星上での機械・電気噛み合わせ、単体での熱真空試験および低温較正などを経て、7 月には最終的に衛星に搭載され、各種の試験を経て 2005 年 2 月の打ち上げに臨む。

○ アナログ電子回路部 (HXD-AE)

アナログ電子回路部 (HXD-AE) は、HXD-S からの 100 チャンネルを越す信号を、わずか 32W の消費電力で高速に並列処理する。今年度は、国分、川原田、村島らを中心に、JAXA、広島大、理研、青学大、明星電気 (株)、クリアパルス (株) などと共同し、回路パラメータを決め、消費電力を推定し、グラウンドの取り回しに注意し、さまざまな確認試験を行いつつ、HXD-AE フライト品を製作した。HXD-S と同様、半ば完成したものを衛星の 1 次噛み合わせ試験に供出し、その後さまざまな作業を経て、ほぼ完成に漕ぎ着けた。

この間、1 品種の FET が十分な放射線耐性をもたないことが発覚し、 ^{60}Co 照射試験で選んだ代替品種に交換したほか、高圧コンデンサにリークが生じたり、8K ゲート FPGA (Actel RT1280) の書き込み不良が発生するなど、トラブルの対処が続いた。FPGA は低温でオンした際に、異常に高い電流を引き込むことがわかり、急ぎ HXD-AE にヒーターを付けることになった。今後の予定は、HXD-S に準じる。

○ デジタル電子回路部 (HXD-DE) とソフトウェア

観測データの CPU 処理を行う、HXD-II デジタル電子回路部 (HXD-DE) のフライト品は、東大、理研、埼玉大、宇宙研、三菱重工 (株) などの協力で開発された B 高橋 (弘) らがその試験を行なった結果、多チャンネルから同時に入力があると、稀に誤動作することがわかり、改修を行った [57]。それを除けば順調に製作が進み、HXD-DE はまもなく衛星に搭載される。あわせて DE 搭載ソフトウェアの開発や、衛星運用およびデータ解析のための、地上ソフトウェアの開発が進められた。

○ 加速器ビーム実験

昨年度の実績を踏まえ、村島、川原田、国分らは、12 月 17 日に放射線医学総合研究所にて、100 MeV 陽子を Well 検出器のプロトタイプに照射し、検出器の放射化を実測した。ビーム停止直後から、速く減衰する放射化成分を追った結果、BGO シールド結晶の放射化が及ぼす影響は少ないことが確認された [8] [12] [92]。

○ *Astro-E2* 観測の立案

Astro-E2 打ち上げから半年間は、衛星チームが優先的に性能実証 (Performance Verification; PV) 観測を行う。今年度は数回にわたり国際 Science Working Group 会議を開き、軌道上での較正観測に用いる天体 (かに星雲など)、および PV 観測のターゲットを選定した。

6.2.5 将来に向けての技術開発

○ *Swift* 衛星 BAT 検出器の開発

ガンマ線バーストの即時位置決めと、可視光・X 線での追跡観測を目的とした *Swift* 衛星は、*HETE-2* (理研などが運用中) の後継機として、アメリカを

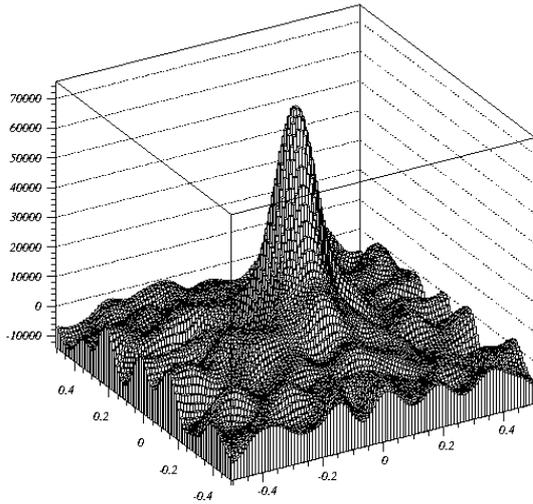


図 6.2 a: A two-dimensional map ($25 \times 25 \text{ mm}^2$) of a collimated ^{241}Am source, obtained with the prototype Fourier-synthesis hard X-ray imager which utilizes 64-channel CdTe strip detectors [27].

中心に開発され、2004 年秋に打ち上げられる。日本からは、宇宙研、埼玉大、および東大が、バースト監視の主力 BAT (Burst Alert Telescope) 装置の開発に参加している。岡田、高橋 (弘) らは昨年引き続き、BAT 検出器の較正データ解析に貢献した [50] [51] [75] [76]。

○ NeXT 衛星計画

Astro-E2 に続くミッションとして、2010 年頃の打ち上げを旨とし、全日本の協力体制の下、NeXT (New X-ray Telescope) 計画が立ち上がった。~ 70 keV まではスーパーミラー (名大などが開発) で撮像し、より高いエネルギーは、我々が JAXA、広島大、理研などと協同で開発する、SGD (Soft Gamma-Ray Detector) 装置が受け持つ [10] [11] [48] [49] [77] [111]。SGD は、HXD-II のアクティブシールドと複眼構成を踏襲し、シールドの底に、シリコン両面ストリップ検出器や、CdTe ピクセル検出器を段重ねに積む。高エネルギー (200–1000 keV) では多重コンプトン散乱を用いてバックグラウンドを極限まで下げつつ撮像する。低エネルギー (50–300 keV) では、次項で述べるフーリエ合成光学系などを用いた、光電吸収モードを併用することを検討している。

SGD の科学観測目的は、ジェットのスเปクトル [78] や偏光の検出 [52] [53]、R-プロセス元素からの核ガンマ線 [79]、電子陽電子の対消滅線、さまざまなブラックホール天体、広がった天体での粒子加速 [36] [37] など、多岐にわたる。

○ フーリエ合成型の硬 X 線望遠鏡・顕微鏡の開発

理研と協力し、「ようこう」HXT 装置のフーリエ合成撮像法を改良し、宇宙用/医療用の硬 X 線望遠鏡/顕微鏡を開発している [7]。宮脇、岡田、二河らは、JAXA、ACRORAD(株)、三菱重工(株)などと協力

し、150 μm ピッチの CdTe ストリップ検出器を開発し、64 チャンネルの同時読み出しや、隣接チャンネル間のキャリア分割の評価を行った [27] [62] [101]。宮脇はこの検出器を、理研や東レ・プレジジョン(株)と協同で開発した、タングステンの微細加工の「すだれ」と組み合わせ、図 6.2 a のように硬 X 線の像合成を実証した [27] [107]。このシステムは、NeXT SGD の低エネルギー側 (50–300 keV) を受け持つものとして検討を進めている。

○ 多結晶シンチレータの開発

単結晶の無機シンチレータより安価で機械的に強く、ドーピングが容易なものとして、単結晶の微粒子を焼結した「多結晶シンチレータ」が登場している。柳田、高橋 (弘)、国分、伊藤らは、バイコウスキ-ジャパン(株)や神島化学(株)と協力し、Ce をドープした YAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) 多結晶の、可視光スペクトル、ガンマ線や線に対する応答などを調べた。単結晶と遜色ない優れたシンチレーション特性を示すこと、Ce の最適濃度が 0.5–0.8% であることが確認された [28] [55] [56] [61] [100] [102] [103]。

○ アバランシェフォトダイオードの利用

フォトチューブに替る受光素子として、東工大などと協力し、アバランシェフォトダイオード (APD; 浜松ホトニクス S8664-55) の利用を進めた。とくに前項の YAG(Ce) 結晶は、530 nm 付近に発光ピークがあるため、APD で読み出すと図 2 のように、フォトチューブを用いた場合より優れた分解能が得られた [28] [80] [100] [106]。大型の結晶を端面から APD で読み出す方法も開発した [28]。

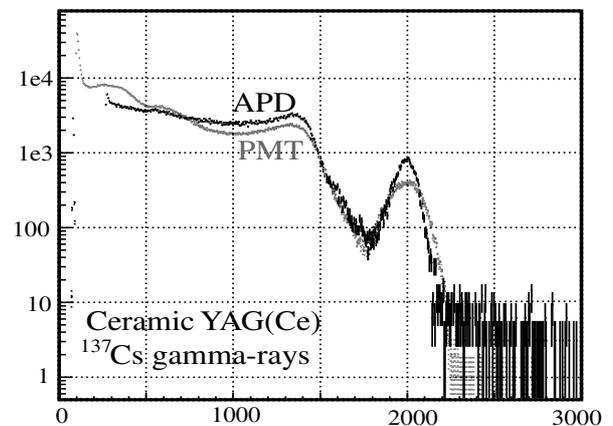


図 6.2 b: Typical spectra of the Ce-doped ceramic YAG scintillator, in response to the 661 keV gamma-rays from ^{137}Am [28]. Black and gray indicate readouts by an APD and a phototube, respectively.

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Kawaharada, M., Makishima, K., Takahashi, I., Nakazawa, K., Matsushita, K., Shimasaku, K., Fukazawa, Y. & Xu, H: "A New Candidate for a Dark Group of Galaxies, RXJ 0419+0225", *Publ. Astr. Soc. Japan* **55**, 573 (2003)
- [2] Miyawaki, R., Sugiho, M., Kokubun, M., & Makishima, K.: "Chandra Observation of Luminous Sources in the Nearby Irregular Galaxy NGC 4449", *Publ. Astr. Soc. Japan*, in press (2004)
- [3] Urata, Y., Nishiura, S., Miyata, T., Mito, H., Kawabata, T., Nakada, Y., Aoki, T., Soyano, T., Tarusawa, K., Yoshida, A., Tamagawa, T., & Makishima, K.: "Multiband Optical Follow-up Observations of GRB 020813 at the Kiso and Bisei Observatories", *Astrophys. J. Lett.* **595**, L21 (2003)
- [4] Kubota, A., Makishima, K.: "The Three Spectral Regimes Found in the Stellar Black Hole XTE J1550-564 in Its High/Soft State", *Astrophys. J.* **601**, 428 (2004)
- [5] Urata, Y., Miyata, T., Nishiura, S., Tamagawa, T., Burenin, R. A., Sekiguchi, T., Miyasaka, S., Yoshizumi, C., Suzuki, J., Mito, H., Nakada, Y., Aoki, T., Soyano, T., Tarusawa, K., Shiki, S., & Makishima, K.: "Early (< 0.3 Days) R-Band Light Curve of the Optical Afterglow of GRB 030 329", *Astrophys. J. Lett.* **601**, L17 (2004)
- [6] Katayama, H., Takahashi, I., Ikebe, Y., Matsushita, K., & Freyberg, M.J.: "Properties of the background of EPIC-pn onboard XMM-Newton", *Astron. Astrophys.* **414**, 767 (2004)
- [7] Kotoku, J., Makishima, K., Okada, Y., Negoro, H., Terada, Y., Kaneda, H., & Oda, M.: "Fourier Synthesis Image Reconstruction using One-Dimensional Position Sensitive Detectors", *Applied Optics* **42**, 4176 (2003)
- [8] Murakami, M.M., Kobayashi, Y., Kokubun, M., Takahashi, I., Okada, Y., Kawaharada, M., Nakazawa, K. *et al.*: "Activation Properties of Schottky CdTe Diodes Irradiated by 150 MeV Protons", *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, **1013**, 50 (2003)
- [9] Kokubun, M., Abe, K., Ezoe, Y., Fukazawa, Y., Hong, S., Inoue, H., Itoh, K., Itoh, T., Kasama, D., Kawaharada, M., *et al.*: "Improvements of the ASTRO-E2 Hard X-ray Detector (HXD-II)", *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, in press (2004)
- [10] Takahashi, T., Nakazawa, K., Kamae, T., Tajima, H., Fukazawa, Y., Nomachi, M., & Kokubun, M.: "High resolution CdTe detectors for the Next-Generation Multi-Compton Gamma-Ray Telescope", *SPIE* **4851**, 1228 (2003)
- [11] Takahashi, T., Makishima, K., Fukazawa, Y., Kokubun, M., Nakazawa, K., Nomachi, M., Tajima, H., Tashiro, M., & Terada, Y.: "Hard X-ray and Gamma-ray Detectors for the *NeXT* Mission", *New Astronomy Reviews*, **48**, 269 (2004)
- [12] Kawaharada, M., Kokubun, M., Makishima, K., Hong, S., Terada, Y., *et al.*, "Response of the HXD-II Detector to Cosmic Heavy Ions", *RIKEN Accel. Prog. Rep.* **37**, in press (2004)
- (Proceedings [printed or electronic])
- [13] Makishima, K., Murakami, M. M., Sugiho, M., Takahashi, H., Kubota, A., & Kobayashi, Y.: "Intermediate mass Black Holes, and their Relation with AGN", *Active Galactic Nuclei: from Central Engine to Host Galaxy*, Eds.: S. Collin, F. Combes and I. Shlosman, ASP Conference Series Vol. 290, p. 383 (2003)
- [14] Kokubun, M. & Makishima, K.: "Diffuse X-Ray Emission from the Galactic Bulge", *Japan-Germany Workshop on Galaxies and Clusters of Galaxies*, J. Soc. Prom. Science, p.1 (2003)
- [15] Okada, Y., Kokubun, M., & Makishima, K.: "Observation of the Galactic Diffuse X-Ray Emission with *XMM-Newton*", *ibid*, p.21
- [16] Takahashi, I., Ikebe, Y., Kawaharada, M., & Makishima, K.: "*XMM-Newton* Observation of the Central Region of the Centaurus Cluster", *ibid*, p.61
- [17] Kawaharada, M., Takahashi, I., Nakazawa, K., Matsushita, K., Fukazawa, Y., Shimasaku, K., & Makishima, K.: "The Dark Group Candidate, RXJ 0419+0225", *ibid*, p.87
- [18] Ezoe, Y., Kokubun, M., Makishima, K., Sekimoto, Y., & Matsuzaki, K.: "Chandra Observations of the Massive Star-Forming Region NGC 6334", *X-ray and Radio Emission of Young Stars*, ed. S. Kitamoto, p.15 (2003)
- [19] Yanagida, T., Ezoe, Y., & Makishima, K.: "The X-ray Flaring from a Possible Algol Type Binary HD38563S in NGC 2068", *ibid*, p.108
- [20] Makishima, K.: "The *ASCA* View On Cooling Flows and Its Implications", *The Riddle of Cooling Flows in Galaxies and Clusters of Galaxies*, eds. T. Reiprich, J. Kempner, and N. Soker (2004) <http://www.astro.virginia.edu/coolflow/>
- [21] Takahashi, I., Kawaharada, M., Makishima, K., Ikebe, Y., & Tamura, T.: "*XMM-Newton* Observation of the Centaurus Cluster", *ibid*
- (解説, 和文報告)
- [22] 牧島一夫:「ブラックホールの観測的研究の進展」, 日本物理学会誌 **58**, No.12, 888 (2003)
- [23] 牧島一夫, 池辺靖:「クーリングフロー学説の終焉」, 天文月報 **97**, No.1, 9 (2004)
烈史, チーム,
- (学位論文)
- [24] Ezoe, Yuichiro: "Investigation of Diffuse Hard X-ray Emission Associated with the Formation of Massive Stars", 博士論文

- [25] Kotoku, Jun'ichi: "Numerical Studies of the Electron Transport and Gamma-ray Emission in Solar Flares", 博士論文
- [26] Takahashi, Isao: "X-ray Diagnostics of Thermal Condition of the Hot Plasmas in Clusters of Galaxies", 博士論文
- [27] 宮脇良平, 「フーリエ合成光学系と1次元半導体検出器を用いた宇宙硬X線撮像装置の基礎開発実験」, 修士論文
- [28] 柳田健之, 「多結晶シンチレータとアパランシェフォトダイオードを用いた宇宙ガンマ線検出器の基礎実験」, 修士論文
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [29] Makishima, K.: "The ASCA View On Cooling Flows and Its Implications", *The Riddle of Cooling Flows in Galaxies and Clusters of Galaxies* (Charlottesville, May 31 - June 4)
- [30] Makishima, K.: "High Energy Astrophysics in Japan", *Beyond the Milky Way: Progress in Extragalactic X-Ray Astronomy* (Shanghai Jiaotong University; September 21-24)
- [31] Takahashi, I.: "X-Ray Emission from Clusters of Galaxies", *ibid.*
- [32] Takahashi, H.: "Diffuse X-ray Emission from the Galaxy and M31", *ibid.*
- [33] Kubota, A., Makishima, K., & Done, C.: "Understanding of X-ray Spectra of Black Hole Binaries in the High State", *Stellar-Mass, Intermediate-Mass, and Supermassive Black Holes* (Kyoto International Community House; October 28-31)
- [34] Makishima, K.: "Conference Summary", *ibid.*
- [35] Makishima, K.: "Thermal Evolution of the Hot Gas in Galaxy Clusters", *Frontiers in Astrophysics and Cosmology: the 6th RESCEU Int'l Symposium* (University of Tokyo; November 4-7)
- [36] Makishima, K.: "Large-Scale Electromagnetic Interactions in the Universe", *Prospects on Fundamental Physics in the 21st Century* (University of Tokyo; February 16-18)
- [37] Makishima, K.: "Are the Largest-Scale Cosmic Hot Plasmas Heated by Reconnection?", *Explosive Phenomena in Magnetized Plasmas: New Development in Reconnection Research* (Kyoto University; March 17 - 19)
- 一般講演 (口頭, ポスター)
- [38] Takahashi, I., Kawaharada, M., Makishima, K., Ikebe, Y., & Tamura, T.: "XMM-Newton Observation of the Centaurus Cluster", *The Riddle of Cooling Flows in Galaxies and Clusters of Galaxies* (Charlottesville; May 31 - June 4)
- [39] Kawaharada, Takahashi, I., Shimasaku, K., Makishima, K., Nakazawa, K., Matsushita, K., & Fukazawa, Y.: "The Dark Group Candidate, RXJ 0419+0225", *ibid.*
- [40] Ezoe, Y., Kokubun, M., Makishima, K., Sekimoto, Y., & Matsuzaki, K.: "Chandra Observations of the Massive Star-Forming Region NGC 6334", *X-ray and Radio Emission of Young Stars* (Rikkyo University; July 28-29)
- [41] Yanagida, T., Ezoe, Y., & Makishima, K.: "The X-ray Flaring from a Possible Algol Type Binary HD38563S in NGC 2068", *ibid.*
- [42] Murakami, Mio M., Makishima, K., & Kubota, A.: "X-Ray Spectra of Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies in Comparison with Galactic Black Holes", *Germany-Japan Workshop on X-rays from Galaxies to AGN* (Garching, Germany; August 20-22)
- [43] Makishima, K.: "The ULX phenomenon, as a Possible Manifestation of Intermediate-Mass Black Holes", *ibid.*
- [44] Okada, Y., Kokubun, M., Takahashi, H., & Makishima, K.: "ASCA and XMM-Newton Observation of the Diffuse X-ray Emission in the Galactic Bulge", *ibid.*
- [45] Murashima, Mio M., Kubota, A., & Makishima, K.: "X-ray Spectra of Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies in Comparison with Galactic Black Holes", *Stellar-Mass, Intermediate-Mass, and Supermassive Black Holes* (Kyoto International Community House; October 28-31)
- [46] Tanaka, T., Kubota, A., & Makishima, K.: "Spectral Evolution of an Ultraluminous Compact X-ray source in NGC 253", *ibid.*
- [47] Kokubun, M., Abe, K., Ezoe, Y., Fukazawa, Y., Hong, S., Inoue, H., Itoh, K., Itoh, T., Kasama, D., Kawaharada, M., *et al.*: "Improvements of the ASTRO-E2 Hard X-ray Detector (HXD-II)", *IEEE Nuclear Science Symposium* (Portland, Oregon; October 19-25)
- [48] Makishima, K. & the NeXT WG: "Scientific Objectives of NeXT- Exploring the Non-Thermal Universe", *Workshop on the NeXT Mission* (JASA/ISAS; November 13)
- [49] Kokubun, M. & the NeXT WG: "Concept of the Soft Gamma-ray Detector (SGD)", *ibid.*
- [50] Okada, Y.: "Ground calibration of the Burst Alert Telescope (BAT) aboard the Swift Satellite", *Symposium on the New Frontier of Gamma-Ray Burst Astronomy* (RIKEN; December 8-10)
- [51] Takahashi, H.: "Data Processing of Burst Alert Telescope onboard the Swift Satellite", *ibid.*
- [52] Tajima, H., Madejski G., Takahashi T., Fukazawa Y., Kokubun M., *et al.*: "EGS4 MC Simulation Results for NeXT/SGD Polarization Performance", *X-ray Polarimetry* (SLAC, Stanford; Feb 9-11)

- [53] Takahashi, T., Fukazawa Y., Kamae T., Kataoka J., Makishima K., *et al.*: “Development of Gamma-ray Polarimeters in Japan and the Soft Gamma-ray Detector (SGD) for the *NeXT* mission”, *ibid.*
- [54] Okada, Y., Mihara, T., Terada, Y., Nagase, F., Niko, H., Nakajima, M., Kokubun, M., & Makishima, K.: “A Search for Cyclotron Resonance Features with the INTEGRAL Observatory”, *The INTEGRAL Universe* (Munich; February 16–20)
- [55] Takahashi, H., Yanagida, T., *et al.*; “Comparative Studies of YAG:Ce Single/Poly-Crystal Scintillators”, *KEK-RCNP International School and Mini-Workshop for Scintillation Crystals and Their Applications in Particle and Nuclear Physics* (KEK, Tsukuba; November 17-18)
- [56] Yanagida, T., Takahashi, H., *et al.*; “Evaluation of Properties of YAG(Ce) Poly-Crystal Scintillator with APD”, *ibid.*
- (国内会議)
- 日本物理学会・秋の分科会 (2003年9月9~12日, 宮崎シーガイア)
- [57] 高橋弘充, 国分紀秀, 牧島一夫, 田代信, 鈴木雅也, 寺田幸功ほか: 「*Astro-E2* 衛星搭載 HXD-II 検出器のデジタルエレクトロニクス部の現状とその性能」, 9pSK-5
- [58] 牧島一夫, 池辺靖, 川原田円, 高橋勲, 田村隆幸, 中澤知洋, 深沢泰司, 松下恭子: 「新しい描像にもとづく銀河団プラズマの熱的進化」, 10aSB2
- [59] 岡田祐, 国分紀秀, 牧島一夫: 「X線観測による銀河系付随の拡散プラズマの温度・空間構造」, 10aSB3
- [60] 国分紀秀, 牧島一夫, 中澤知洋, 高橋忠幸, 深沢泰司, 田代信, 山岡和貴ほか: 「*Astro-E2* 衛星搭載硬 X線検出器 (HXD-II) の現状報告 (2)」, 10aSB10
- [61] 柳田健之, 国分紀秀, 高橋弘充, 岡田祐, 伊藤健, 牧島一夫, 柳谷高公, 八木秀喜, 繁田岳志, 伊東孝之: 「線検出用多結晶シンチレータの特性評価」, 10pSF7
- [62] 宮脇良平, 岡田祐, 二河久子, 国分紀秀, 牧島一夫, 田中孝明, 三谷烈史ほか: 「1次元半導体検出器を用いた硬 X線ガンマ線撮像検出器の開発」, 10pSF8
- 日本天文学会・秋の年会 (2003年9月25~27日, 愛媛大学)
- [63] 伊藤健, 牧島一夫, 久保田あや: 「*RXTE* 衛星による XTE J1650-500 の X線スペクトル解析」, H02a
- [64] 田中孝明, 久保田あや, 高橋忠幸, 杉保昌彦, 牧島一夫: 「NGC 253 銀河中の ULX のスペクトル」, H04a
- [65] 中島基樹, 三原建弘, 牧島一夫, 二河久子: 「X線連星バルサー 4U0115+63 の X線光度とサイクロトロン共鳴エネルギーの変化 (1)」, H20a
- [66] 二河久子, 牧島一夫, 中島基樹, 三原建弘: 「X線連星バルサー 4U0115+63 の X線光度とサイクロトロン共鳴エネルギーの変化 (2)」, H21a
- [67] 浦田裕次, 山田亨, 吉田篤正, 戸谷友則, 小杉城治, 小林尚人, 河合誠之, 水本好彦, 高田唯史, 玉川徹, 牧島一夫: 「すばる望遠鏡による暗黒 GRB (GRB980329) の起源」, H39b
- [68] 古徳純一, 玉川徹, 小浜光洋, 寺田幸功, 牧島一夫: 「太陽フレアで加速された粒子のエネルギースペクトルの推定」, M40a
- [69] 江副祐一郎, 松崎恵一, 関本裕太郎, 国分紀秀, 牧島一夫, 大島泰: 「*Chandra* 衛星による NGC6334 における広がった X線放射の検証」, P28a
- [70] 高橋弘充, 岡田祐, 国分紀秀, 牧島一夫: 「*XMM-Newton* 衛星による M33 中心領域のディフューズ X線放射の観測」, R62a
- [71] 岡田祐, 国分紀秀, 牧島一夫: 「*Newton* 衛星による銀河系バルジ領域の広がった熱的 X線放射の観測」, R63a
- [72] 村上未生, 久保田あや, 牧島一夫: 「*XMM-Newton* 衛星を用いた 1 型狭輝線セイファート銀河における逆コンプトン散乱過程の観測的研究」, S19a
- [73] 川原田円, 嶋作 一大, 高橋勲, 牧島一夫, 中澤知洋, 松下恭子, 深沢泰司: 「X線観測による暗黒銀河群候補天体 RX J0419+0225 の進化に関する研究」, T04a
- [74] 牧島一夫, 高橋勲, 川原田円, 池辺靖, 深沢泰司, 田村隆幸, 松下恭子: 「何が銀河団プラズマの放射冷却を止めているか?」, T12a
- [75] 佐藤悟朗, 高橋忠幸, 中澤知洋, 渡辺伸, 鈴木雅也, 田代信, 岡田祐, 高橋弘充ほか: 「ガンマ線バースト観測用 *Swift* 衛星」, W01a
- [76] 鈴木雅也, 田代信, 佐藤悟朗, 高橋忠幸, 中澤知洋, 渡辺伸, 岡田祐, 高橋弘充ほか: 「ガンマ線バースト観測衛星 *Swift* 搭載 BAT 検出器の有効面積の見積もり」, W02a
- 第 4 回宇宙科学シンポジウム (2004年1月8~9日, JAXA 宇宙科学研究本部)
- [77] 国分紀秀: 「軟ガンマ線検出器の開発」
- [78] 片岡淳, 田代信, 深沢泰司, 磯部直樹, 高橋忠幸, 牧島一夫ほか: *NeXT* チーム: 「*NeXT* 衛星が目指すサイエンス: 活動銀河ジェット」の物理」
- [79] 寺田幸功, 望月優子, 玉川徹, 牧島一夫, 高橋忠幸, 山岡和貴, 岡田祐, 洪秀徴: 「*NeXT* による核線観測でひらく新しい物理」
- [80] 五十川知子, 片岡淳, 谷津陽一, 倉本祐輔, 齊藤孝男, 河合誠之, 深沢泰司, 三谷烈史, 高橋忠幸, 国分紀秀, 柳田健之: 「宇宙用アバランシ F フォトダイオードの開発と *NeXT* 衛星への応用」
- [81] 深沢泰司, 大杉節, 吉田勝一, 河合誠之, 片岡淳, 高橋忠幸, 尾崎正伸, 寺田幸功, 牧島一夫, 釜江常好: 「次世代ガンマ線観測衛星 *GLAST*」
- [82] 牧島一夫, 国分紀秀, 山岡和貴, 高橋忠幸, 中澤知洋, 能町正治, 村上敏夫, 米徳大輔ほか: 「*Astro-E2* 衛星に搭載する硬 X線検出器 (HXD-II) の開発と製作状況
- 日本天文学会・春の年会 (2004年3月22~24日, 名古屋大学)

- [83] 角田奈緒子, 川端潔, 並木雅章, 牧島一夫, 三原建弘:「*Chandra*, *XMM-Newton* 衛星による ULX の X 線スペクトル解析」, H14b
- [84] 岡田祐, 二河久子, 国分紀秀, 牧島一夫, 三原建弘, 中島基樹, 寺田幸功, 長瀬文昭, 田中靖郎:「ガンマ線衛星 *INTEGRAL* による銀河面パルサーの撮像分光観測」, H25b
- [85] 古徳純一, 牧島一夫, 小浜光洋, 寺田幸功, 玉川徹:「太陽フレアにおける磁気ループ根元からのガンマ線放射」, M25a
- [86] 江副祐一郎, 国分紀秀, 牧島一夫, 内山泰伸, 関本裕太郎, 松崎 恵一:「星形成領域 NGC 2024 からの広がった X 線放射の検出」, P05a
- [87] 岡田祐, 高橋弘充, 国分紀秀, 牧島一夫:「球状星団に付随する広がった X 線放射の検出」, Q48a
- [88] 高橋弘充, 岡田祐, 国分紀秀, 牧島一夫:「*Chandra* 衛星による M33 中心領域のディフューズ X 線放射の観測」, R50a
- [89] 磯部直樹, 金田英宏, 田代信, 阿部圭一, 伊藤光一, 牧島一夫, 伊代本直子:「*XMM-Newton* 衛星による電波銀河 Fornax A の東ローブの観測」, S13b
- [90] 高橋勲, 牧島一夫, 川原田円, 池辺靖, 田村隆幸:「*XMM-Newton* 衛星による Centaurus 銀河団の観測 III」, T17a
- [91] 牧島一夫, 高橋勲, 川原田円, 常田佐久:「太陽コロナとの類推にもとづく銀河団プラズマ低温成分の解釈」, T18a
- [92] 村島未生, 川原田円, 国分紀秀, 牧島一夫, 川添哲志ほか:「*Astro-E2* 衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD-II) の放射化バックグラウンドの評価」, W53a
- 高宇連第 2 回博士論文発表会 (2004 年 3 月 26 日, JAXA 宇宙科学研究本部)
- [93] 江副祐一郎:「Investigation of Diffuse Hard X-ray Emission Associated with the Formation of Massive Stars」
- [94] 高橋勲:「X-ray Diagnostics of Thermal Condition of the Hot Plasmas in Clusters of Galaxies」
- [95] 古徳純一:「Numerical Studies of the Electron Transport and Gamma-ray Emission in Solar Flares」
- 日本物理学会・春の年会 (2004 年 3 月 27 ~ 30 日, 九州大学)
- [96] 岡田祐, 牧島一夫, 二河久子, 国分紀秀, 三原建弘ほか:「ガンマ線衛星 *INTEGRAL* を用いた銀河面パルサーのサイクロトロン共鳴線探査」, 27aZE2
- [97] 寺田幸功, 牧島一夫:「白色矮星の磁極にたつ降着円筒のプラズマ診断」, 27aZE3
- [98] 浦田裕次, 山田亨, 吉田篤正, 戸谷友則, 小杉城治, 小林尚人, 河合誠之, 水本好彦, 高田唯史, 玉川徹, 牧島一夫:「すばる望遠鏡による暗黒 GRB (GRB980329) の起源」, 27aZE12
- [99] 玉川徹, 牧島一夫, 桜井郁也, 宮坂浩正, 門叶冬樹, 浜垣秀樹, 犬塚将英, 角田奈緒子:「レーザー加工を用いたガス電子増幅 (GEM) フォイルの開発」, 27pZB9
- [100] 柳田健之, 高橋弘充, 伊藤 健, 国分紀秀, 牧島一夫, 柳谷高公, 八木秀喜ほか:「単/多結晶シンチレータと APD を用いた宇宙線検出器の基礎実験」, 27pZB10
- [101] 二河久子, 宮脇良平, 岡田 祐, 古徳純一, 国分紀秀, 牧島一夫ほか:「線イメージャーへ向けた一次元テレル化カドミウム・沛器の開発」, 27pZB11
- [102] 伊藤健, 柳田健之, 高橋弘充, 国分紀秀, 牧島一夫, 柳谷高公ほか:「硬 X 線検出用多結晶シンチレータの基礎特性評価 (1)」, 27pZB12
- [103] 高橋弘充, 柳田健之, 伊藤 健, 国分紀秀, 牧島一夫, 柳谷高公ほか:「硬 X 線検出用多結晶シンチレータの基礎特性評価 (2)」, 27pZB13
- [104] 川原田円, 村島未生, 伊藤 健, 二河久子, 宮脇良平, 柳田健之, 国分紀秀, 牧島一夫, 三谷烈史ほか:「*Astro-E2* 衛星搭載 HXD-II 検出器 WELL 検出部の組み上げとキャリブレーション」, 28aZK6
- [105] 洪秀徴, 森正統, 寺田幸功, 川原田円, 岡田祐, 国分紀秀, 牧島一夫ほか:「*Astro-E2* 衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD-II) シールド部開発の現状」, 28aZK7
- [106] 片岡淳, 河合誠之, 五十川 知子, 谷津陽一, 倉本祐輔, 斎藤孝男, 松永三郎, 宮下直己, 宮澤航, 占部智之, 岸本俊二, 三谷烈史, 高橋忠幸, 柳田健之, 国分紀秀, 深沢泰司:「アバランシェフォトダイオードを用いた宇宙 X 線・ガンマ線検出器の開発 (II)」, 28aZK8
- [107] 宮脇良平, 二河久子, 岡田祐, 古徳純一, 国分紀秀, 牧島一夫ほか:「1 次元 CdTe 検出器を用いたフリーエ合成型硬 X 線イメージャー の性能実証」, 28aZK10
- その他
- [108] 牧島一夫:「最近の X 線観測から」, 京都大学宇宙物理学教室集中講義 (7 月 15 ~ 17 日)
- [109] 牧島一夫:「中質量ブラックホールの候補天体の X 線観測」, 京都大学理学研究科談話会 (7 月 16 日)
- [110] 牧島一夫:「ガスを吸い込むブラックホールと X 線の放射」, 天文学会公開講演会 (松山, 9 月 28 日)
- [111] 国分紀秀:「*NeXT* 衛星搭載用軟ガンマ線検出器」, 第 4 回・高エネルギー宇宙物理連絡会研究会 (名大 21 世紀 COE プログラム共催)「高エネルギー宇宙観測装置の現在と未来」(名古屋大学, 10 月 2 日)
- [112] 牧島一夫:「電磁波と粒子線の観測から探る宇宙の進化」, 第 18 回「大学と科学」公開シンポジウム「ビッグバン宇宙の誕生と未来」(朝日マリオン, 2 月 1 日)
- [113] 牧島一夫:「ブラックホール天文学の最前線」, JAXA 天文講演イベント「ブラックホールの謎に挑む: リカルド・ジャッコーニ博士を迎えて」(東京国際交流館, 2 月 27 日), http://www.jaxa.jp/news_topics/column/no7/index.j.html
- [114] 高橋弘充:「*Astro-E2* 衛星搭載の硬 X 線検出器 (HXD) で狙うサイエンス」,「超高エネルギーガンマ線天体研究会」(宇宙線研究所, 3 月 20 日)

6.3 高瀬研究室

6.3.1 TST-2 球状トカマクプラズマの生成・加熱・維持実験

通常のトカマク装置では、変流器の一次巻線にあたる変流器コイル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誘導発生させ、この電流でプラズマを閉じ込め、加熱している。変流器コイル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・高出力密度化が可能となり、経済性が著しく改善される。これは特に中心部の空間を最小限にした球状トカマク(ST)では最重要課題である。本研究室では複数のアプローチを用いてこの課題に取り組んでいる。平成15年度には、東京大学のTST-2球状トカマク装置は一時的に九州大学に移設され(TST-2@Kと呼ぶ)、九大の所有するマイクロ波発振器(8.2 GHz, 200 kW)を用いて実験を行った。

マイクロ波によるプラズマ立ち上げと維持

TST-2@Kで、マイクロ波によるプラズマ立ち上げ及びその維持を目指した実験を行った。定常的なトロイダル磁場(約0.15 T)と弱い垂直磁場(約1 mT)のある状態でマイクロ波を弱磁場側から8本のホンアンテナを用いて入射した。図6.3 aは、この時のプラズマ電流 I_p 、トロイダル磁場 B_t 、線積分電子密度 n_{el} の時間変化を示したもので、約300 msの間、 $I_p = 4$ kA、 $n_{el} = 0.3 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$ が維持されている。この放電では、 $t = 260$ msから B_t を減少させた結果、290 msで急激に I_p が減衰した。これは、 B_t の低下により、電子サイクロトロン(EC)共鳴層が真空容器中に存在しなくなり、プラズマへの入熱がなくなったためと考えられる。こうして生成された

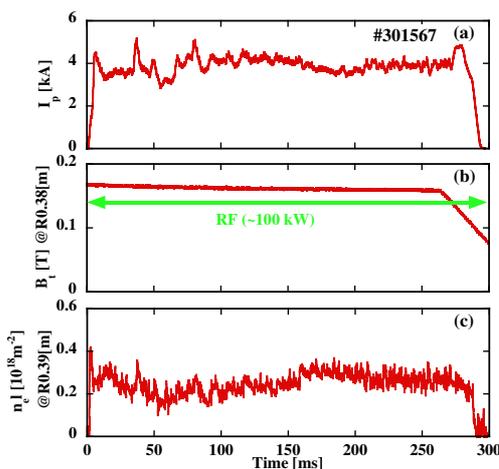


図 6.3 a: Time evolutions of (a) I_p , (b) B_t , (c) n_{el} .

プラズマは、CIIIの発光分布から、通常のST放電と同程度の、比較的大きなプラズマであると推察される。また、軟X線のエネルギースペクトルから導出された電子温度(次節参照)は約160 eVであった(図6.3 b)。このスペクトルの絶対値から、軟X線は高エネルギー電子由来のものではなく、バルクプラズマからの制動放射であると考えられる。一方、不純物イオンの温度は非常に低く、10 eV以下である。測定された電子温度、電子密度は非常に高い β_p を意味しており、どのような平衡配位が実現されているかを調べる必要がある。電流の生成・維持機構は、現在のところ未解明である。電子温度がより高い場合には、プラズマは無衝突のパナナ領域にあり、プラズマが自発的に流すブートストラップ電流(I_{BS})が数kAに達することは、十分起こりうる。しかし測定された電子温度では、プラズマは衝突領域にあり、大きな I_{BS} は期待できない。また、垂直磁場の曲率に起因する曲率ドリフトは、電流を生成するが、計算によれば、これはこの実験の場合は無視できるほど小さい。

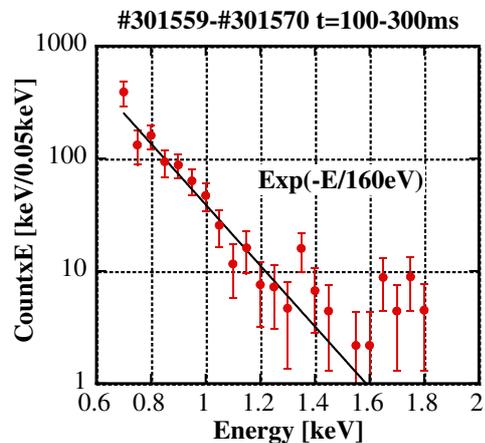


図 6.3 b: Soft X-ray energy spectrum.

外側コイルによるプラズマ立ち上げ実験

上記のシナリオではST装置の中心部に位置する変流器コイルだけでなく、トーラスの外側に位置する垂直磁場コイル(形状制御の役割も担い、PFコイルという)の誘導も使っていない。ST核融合炉では変流器コイルは存在しないが、PFコイルは平衡を保ち、プラズマ断面形状を制御するために必要なので、PFコイルの誘導電場を使った I_p 立ち上げを考える。この新手法は本研究グループが主導し、日本原子力研究所の大型トカマクJT-60Uで開発したものであり、世界的に注目されている。JT-60Uの実験では実験上の制約により、僅かながらトーラス内側のコイルも使用せざるをえなかったが、TST-2@Kでは完全に外側PFコイルのみしか使わない I_p 立ち上げに成功した。前もってPFコイルに電流を流し

ておき、マイクロ波で水素ガスを電離し、PF コイル電流を時間変化させることで、最大 $I_p = 9.5 \text{ kA}$ のプラズマを得ることができた。プラズマを生成する際にはヌル点（ポロイダル磁場がゼロの点）が必要であるというのが従来の常識であったが、本実験で大きな垂直磁場が存在する場合でも I_p 立ち上げが可能であることが実証された。これは大変意義の高い成果である。

電子バーンシュタイン波を用いたプラズマ加熱実験

ST プラズマを加熱する有力な手段として電子バーンシュタイン波 (EBW) を用いる方法が提案されている。EBW はプラズマ中に存在する縦波の一つで EC 共鳴によりプラズマに吸収されることが実験的にも知られている。しかし ST では EBW の励起法がこれまでの実験とは異なるので、これを実証する必要がある。そこで TST-2@K において 8.2 GHz, 200 kW のマイクロ波を用いてプラズマ加熱実験を行った。この実験では X-B モード変換シナリオに基づき、X モードをプラズマに垂直に入射した。このシナリオでは ST の弱磁場側周辺部で、右回り (R) と左回り (L) の二つの遮断層、及びその間にある高域混成 (UH) 共鳴層が三重層を成しており、X モードを EBW に効率よく変換させるためにはこの領域の密度勾配を急峻にする必要がある。このため、にマイクロ波入射アンテナの周囲をリミターで囲み (図 6.3 c 参照)、密度勾配を急峻化した。実験結果を図 6.3 d に示す。

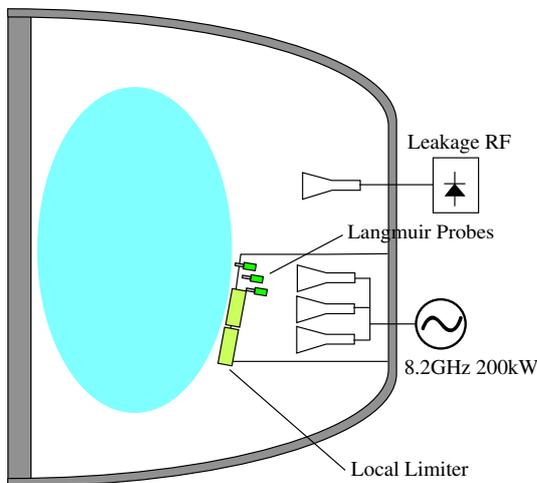


図 6.3 c: Schematic of EBW heating experiment.

95 kW の RF パワー入射と同時にプラズマ周辺部で発光している H_α 線の発光強度のステップ状の増大がみられ、プラズマからの輻射を計測する AXUV 及び SBD の信号レベルが徐々に増大している。この理由として、RF 入射により (1) 電子加熱が起こった、或いは (2) アンテナから出た不純物がプラズマ中に混入した、の二つの可能性が考えられる。平衡計算では約 10% の蓄積エネルギーの増加が観測されてい

る。これは入射パワーから期待される増大率の約 1/5 である。従って入射パワーは少なくとも一部は EBW に変換されているものの、周辺部で強く吸収されていると推察できる。

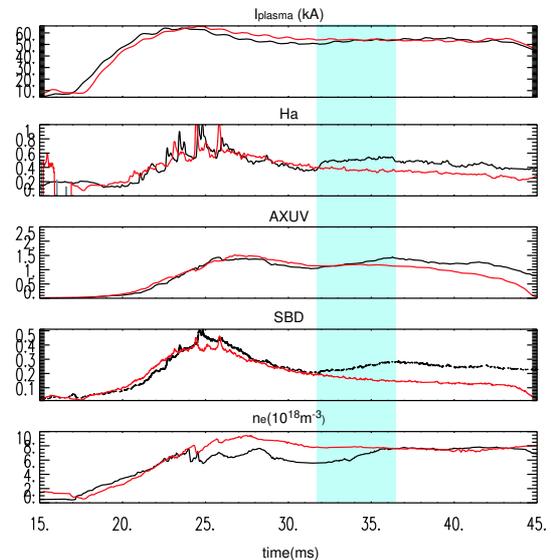


図 6.3 d: Comparison of plasma parameters with (black) and without (red) RF power injection.

6.3.2 プラズマ計測

TST-2 の電子温度・電子密度を測定するために、トムソン散乱を利用した計測装置を開発している。トムソン散乱計測では、レーザをプラズマ中に入射し、散乱光のドップラー広がりから電子温度、散乱光子数から電子密度を求める。夏の実験では YAG レーザの倍波 (波長 532 nm, 230 mJ, 10 Hz)、冬の実験では YAG レーザの基本波 (波長 1064 nm, 450 mJ, 10 Hz) を用いた測定を試みた。倍波の問題点は、主に制動輻射によるプラズマ光の量が散乱光より大幅に多く、S/N 比を大きく取れなかったことである。そのため、散乱光はわずかに測定することができたが、物理量を求めることはできなかった。基本波を用いた実験でも、依然として散乱光子数が少ないのでいまだ散乱光を測定することはできていないが、今後集光系や分光系を改良して、測定装置を完成させる予定である。

SiLi 検出器は SiLi の結晶に高電圧を付加することで、この結晶を通過する軟 X 線のエネルギー $h\nu$ [keV] に比例した電荷が生じる。プラズマから放射される制動放射 P_{brems} は、

$$\frac{dP_{\text{brems}}}{dh\nu} \propto \frac{n_e^2 Z_{\text{eff}}}{T_e} \exp\left(\frac{-h\nu}{T_e}\right) h\nu$$

で与えられる。ここで Z_{eff} は実効電荷数、 n_e は電子密度、 T_e は電子温度である。軟 X 線のエネルギー

スペクトルより T_e が得られることがわかる。また、SXR 領域のエネルギー積分した全制動放射は、電子密度や不純物の種類、濃度のほか、電子温度に関する情報を含んでいる。その時間変化及び空間分布を計測する装置を準備中である。

6.3.3 JT-60U トカマクにおけるプラズマ立ち上げ実験

JT-60U においても、前年度の成果を基盤として外側 PF コイルの誘導による I_p 立ち上げ実験を継続している。平成 15 年度の実験では I_p 立ち上げ条件の調査を系統的に行い、以下の結果を得た。(1) ガス注入量は 0.2 Pa m^3 で最大到達プラズマ電流 (I_p^{max}) は最大となる。(2) EC 共鳴によるガス電離用の高周波パワー P_{EC} は 1 MW 程度で I_p^{max} は飽和する。これはこの程度の P_{EC} で I_p 立ち上げに十分な電離が得られることを示す重要な結果である。(3) EC 共鳴層が中心部付近にある場合に比べ、周辺部に位置する場合には I_p^{max} は劣化する。プラズマ圧力が高くなると、プラズマが自発的にブートストラップ電流 (I_{BS}) を流すようになる。これが全プラズマ電流を上回る ($I_{\text{BS}}/I_p > 1$) をブートストラップオーバードライブ (BSOD) という。これが実証されれば電流駆動装置に対する要求を軽減することができるため、核融合炉にとっては大変重要な課題である。今回の実験で BSOD を過渡的に実現した可能性が高い。今後より明確な実験結果が必要であるが、BSOD 実証にとって期待の持てる成果である。

6.3.4 JFT-2M トカマク周辺部における揺動と輸送

磁場閉じ込めプラズマの揺動成分 (力学的平衡の時間スケールよりも速く、系の大きさに比べて細かい構造を持つ成分) は、高温磁化プラズマの安定性・閉じ込め性能及び構造形成に重要な役割を担うことが理論的に指摘されている。日本原子力研究所との協力研究として、中型トカマク JFT-2M にて三種類の測定器 (高速駆動プローブ、反射計、高速磁気プローブ) を用い、トカマクプラズマ周辺部におけるコヒーレント及び乱流的な揺動の性質を調べた。オーミック加熱 (I_p のジュール損失による加熱) されたプラズマの周辺部で、高速駆動静電プローブにより 10 kHz のコヒーレントな浮遊電位揺動を観測した。この揺動は、イオン飽和電流や磁気揺動には観測されていない。トロイダル方向とポロイダル方向の相関は 4 mm 離れた位置で相関はほぼ 1 で、位相差は極めて小さい。また、 15 kHz 以上の揺動レベル (規格化した揺動振幅) は浮遊電位揺動とイオン飽和電流揺動でほぼ等しいのに対し、 10 kHz の揺動レベルは浮遊電位揺動が 2-3 倍ほどイオン飽和電流揺動よりも高かった。 10 kHz 揺動のこれらの性質は、Geodesic Acoustic Mode (GAM) という電場揺動と類似している。GAM は磁力線に沿った方向の圧力揺動もし

くは速度揺動が非一様性を持つことにより励起される。GAM の角周波数 ω はイオン音速 / プラズマ主半径で記述されるが、イオン温度が電子温度の 3 倍程度であると考えたと実験値とほぼ一致する。さらに、GAM は密度揺動レベルが小さくても電場揺動レベルとしては観測可能な大きさになる。乱流のレイノルズ応力によってポロイダル流の生成が予測されているが、その非一様性が GAM の発生に関与することは十分考えられる。また波数空間と周波数空間に一对一の対応関係があると仮定すれば、電位揺動と生成された流れの間の非線形結合が周波数空間での解析で観測される可能性がある。そこで浮遊電位揺動に関して、バイコヒーレンス解析 (三波の非線形結合の度合いを示す) を行った結果、 10 kHz と他の周波数の間に有意な非線形相互作用があることが判明した (図 6.3 e)。 10 kHz 揺動が GAM であるとするれば、これは 10 kHz 揺動が乱流のエネルギー輸送の変調に起因していることを示している。この結果より、仮定を含んだ議論であるが、レイノルズ応力によるコヒーレントな流れ構造の生成過程を実験的に観測したと言える。

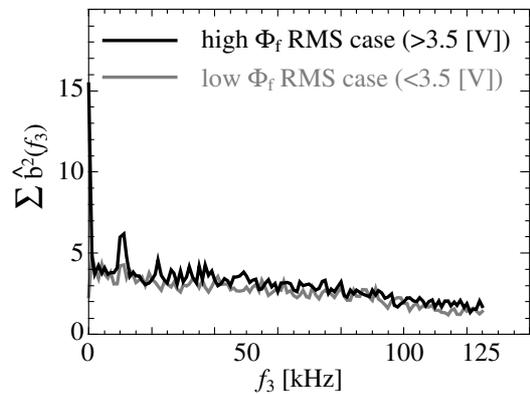


図 6.3 e: Sum of squared bicoherence as a function of $f_3 = f_1 \pm f_2$, during two time intervals: when the 10 kHz fluctuation amplitude is large (black) and when it is small (grey).

大きな周辺局在不安定性 (ELM) の存在しない高閉じ込めモード (H モード) 放電中に 2 種類の特徴的なコヒーレントな揺動が観測された。静電プローブ、反射層の異なる 2 チャンネルの反射計、高速磁気プローブの 3 種類の測定器を用いて、揺動のタイプ (密度、磁場、電位) や空間構造を調べた。2 種類の揺動のうち一つは JFT-2M の高リサイクリング定常 (HRS) H モード中に観測されている 300 kHz 程度の磁気揺動であり、もう一つは D_α 輻射強度の非常に小さい時間帯で観測されている 80 kHz 程度の密度揺動である。 300 kHz の揺動は最外殻磁気面の外側の広い領域で浮遊電位揺動として観測され、その減衰長は 2 cm 程度である。一方相関解析によって、 300 kHz 揺動が反射計で計測した密度揺動にも存在することを明らかにし、低密度側のチャンネルで相関

が検出されるものの高密度側のチャンネルでは相関が観測されない場合があることが判明した。これは 300 kHz の揺動がプラズマの内側深くに浸透していないことを示している。周辺部に局在した MHD 揺動としては、高いモード数を持つバルーニングモード等が考えられるが、MIT のトカマク装置 (Alcator C-Mod) でも類似の放電でバルーニングモードが観測されている。後者の 80 kHz の揺動は、高速磁気プローブでは観測できず、静電プローブでは強い電場のある領域においてのみ浮遊電位とイオン飽和電流に観測された。浮遊電位の揺動レベルはイオン飽和電流の揺動レベルに対して 4 倍ほど大きく、80 kHz の揺動が静電波であると仮定した場合、ドリフト波ではないと考えられる。候補としては GAM が考えられるが、周波数が GAM としては高い値である。

6.3.5 LHD ヘリカルプラズマにおける粒子輸送

プラズマ中には燃料 (水素同位体) イオンの他に不純物イオンが混在し、不純物線スペクトル放射および制動放射による放射損失や燃料イオンの希薄化を起こす。核融合反応を実現するためには高温・高密度プラズマを効率良く閉じ込めることが必要であり、プラズマ中での粒子輸送機構を理解することは重要である。トカマク及びヘリカルプラズマを含めたトロイダル (ドーナツ状) プラズマの粒子輸送機構を解明する意義は大きい。本研究では、文部科学省核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) において、不純物ペレット入射と長時間・空間分解能の可視放射計測を用いて、粒子輸送係数のプラズマ電子密度及び原子番号依存性を調べた。実験手法としては中性粒子入射により加熱されている定常プラズマに 3 種類の不純物 (C, Al, Ti) ペレットを入射し、その発光を詳細に計測する。不純物粒子は燃料イオンとの衝突周波数が高いため流体的な取り扱いが可能となるため、拡散対流モデルを用いて粒子輸送を評価した。ペレット入射後のプラズマ過渡応答から不純物粒子輸送係数を評価するために、高空間分解能制動放射計測器を用いて 0.1 msec の時間サンプリングで測定した。拡散対流モデルを用いて、制動放射の計測値と計算値の残差が最小となるように拡散係数 D と対流速度 V を導出した。この解析結果から、LHD プラズマでは規格化小半径 $\rho < 0.6$ (電子密度勾配を持たない領域) では対流速度がなく、 $\rho > 0.6$ (電子密度勾配を持つ領域) では内向き対流速度を持つというモデルによって実験結果を説明できることがわかった。図 6.3 f に示すように不純物の拡散係数は電子密度勾配や粒子の電荷に対しては弱い依存性を示し、対流速度はそれらに強く依存するという結果を得た。これらの結果はプラズマ粒子の衝突に基づく新古典論で現象論的には説明できるが、拡散係数は理論値より 1 桁以上大きかった。実際のプラズマは乱流状態にあるため、新古典論を上回る輸送が生じるのは自然であるが、この実験結果より LHD プラズマでは乱流による輸送が支配的であることがわかる。また粒子の価数と密度勾配が対流速度を決める重要な物

理パラメータであることを示した。

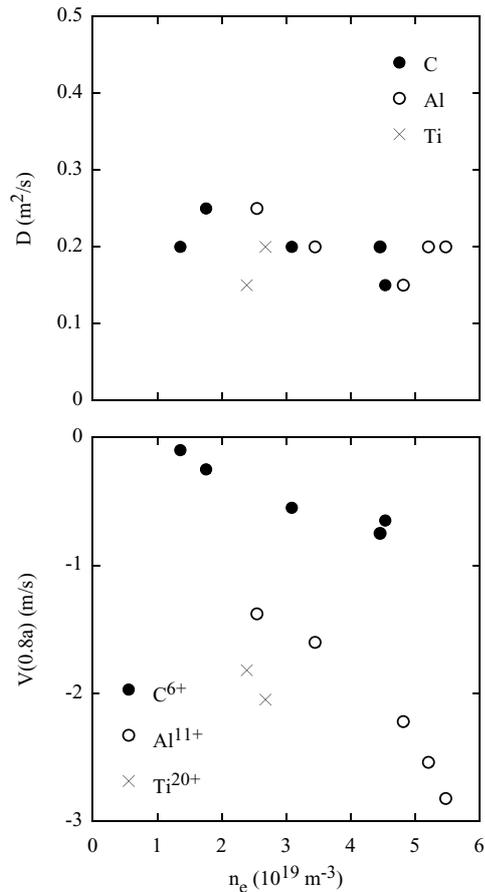


図 6.3 f: Dependences of D (upper figure) and V (lower figure) at $\rho = 0.8$ on n_e .

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Plasma Current Rampup by the Outer Vertical Field Coils in a Spherical Tokamak Reactor, O. Mitarai, Y. Takase: Fusion Sci. Technol. **43**, 67–90 (2003).
- [2] S. Shiraiwa, Y. Nagashima, M. Ushigome, T. Yamada, T. Taniguchi, S. Ohara, K. Yamagishi, H. Kasahara, D. Iijima, Y. Kobori, T. Nishi, M. Aramatsu, A. Ejiri, Y. Takase: Electron Bernstein wave emission diagnostic assisted by reflectometry on TST-2 spherical tokamak, Rev. Sci. Instrum. **74**, 1453–1456 (2003).
- [3] N. Kasuya, K. Itoh, Y. Takase: Asymmetrical bifurcation of the radial electric field structure induced by electrode biasing in tokamaks, Plasma Phys. Control. Fusion **45**, 183–198 (2003).

- [4] N. Kasuya, K. Itoh, Y. Takase: Effect of electrode biasing on the radial electric field structure bifurcation in tokamak plasmas, *Nucl. Fusion* **43**, 244–249 (2003).
- [5] J.R. Wilson, R.E. Bell, S. Bernabei, M. Bitter, P. Bonoli, D. Gates, J. Hosea, B. LeBlanc, T.K. Mau, S. Medley, J. Menard, D. Mueller, M. Ono, C.K. Phillips, R.I. Pinsker, R. Raman, A. Rosenberg, P. Ryan, S. Sabbagh, D. Stutman, D. Swain, Y. Takase, J. Wilgen, NSTX Team: Exploration of high harmonic fast wave heating on the National Spherical Tokamak Experiment, *Phys. Plasmas* **10**, 1733–1738 (2003).
- [6] D. Mueller, M. Ono, M.G. Bell, R.E. Bell, M. Bitter, C. Bourdelle, D.S. Darrow, P.C. Efthimion, E.D. Fredrickson, D.A. Gates, R.J. Goldston, L.R. Grisham, R.J. Hawryluk, K.W. Hill, J.C. Hosea, S.C. Jardin, H. Ji, S.M. Kaye, R. Kaita, H.W. Kugel, D.W. Johnson, B.P. LeBlanc, R. Majeski, E. Mazzucato, S.S. Medley, J.E. Menard, H.K. Park, S.F. Paul, C.K. Phillips, M.H. Redi, A.L. Rosenberg, C.H. Skinner, V.A. Soukhanovskii, B. Stratton, E.J. Synakowski, G. Taylor, J.R. Wilson, S.J. Zweben, W.D. Dorland, Y.K.M. Peng, R. Barry, T. Bigelow, C.E. Bush, M. Carter, R. Maingi, M. Menon, P.M. Ryan, D.W. Swain, J. Wilgen, S.A. Sabbagh, F. Paoletti, J. Bialek, W. Zhu, R. Raman, T.R. Jarboe, B.A. Nelson, R.J. Maqueda, G.A. Wurden, R.I. Pinsker, M. Schaffer, J. Ferron, L. Lao, D. Stutman, M. Finkenthal, W. Wampler, S. Kubota, W.A. Peebles, M. Gilmore, T.K. Mau, K.C. Lee, C.W. Domier, B.H. Deng, M. Johnson, N.C. Luhmann, Jr., P. Bonoli, A. Bers, A. Ram, R. Akers, Y. Takase, A. Ejiri, Y. Ono, S. Shiraiwa, N. Nishino, O. Mitarai, M. Nagata, J.G. Yang, H. Na, D. Pacella: Results of NSTX Heating Experiments, *IEEE Trans. Plasma Science* **31**, 60–67 (2003).
- [7] T. Fujita and the JT-60 Team: Overview of JT-60U results leading to high integrated performance in reactor-relevant regimes, *Nucl. Fusion* **43**, 1527–1539 (2003).
- [8] Y. Takase, C.P. Moeller, T. Seki, N. Takeuchi, T. Watari, R. Callis, A. Ejiri, H. Ikezi, H. Kasahara, N. Kasuya, R. Kumazawa, T. Mutoh, K. Ohkubo, R.A. Olstad, M. Saigusa, K. Saito, S. Shiraiwa, T. Taniguchi, H. Torii, H. Wada, K. Yamagishi and T. Yamamoto: Development of a Fishbone Travelling Wave Antenna for LHD, *Nucl. Fusion* **44**, 296–302 (2004).
- [9] H. Tamai, M. Matsukawa, G. Kurita, N. Hayashi, K. Urata, Y.M. Miura, K. Kizu, K. Tsuchiya, A. Morioka, Y. Kudo, S. Sakurai, K. Masaki, T. Suzuki, M. Takechi, Y. Kamada, A. Sakasai, S. Ishida, K. Abe, A. Ando, T. Cho, T. Fujii, T. Fujita, S. Goto, K. Hanada, A. Hatayama, T. Hino, H. Horiike, N. Hosogane, M. Ichimura, S. Tsuji-Iio, S. Itoh, M. Katsurai, M. Kikuchi, A. Kohyama, H. Kubo, . Kuriyama, M. Matsuoka, Y. Miura, N. Miya, T. Mizuuchi, K. Nagasaki, H. Ninomiya, N. Nishio, Y. Ogawa, K. Okano, T. Ozeki, M. Saigusa, M. Sakamoto, , M. Satoh, M. Shimada, R. Shimada, M. Shimizu, T. Takagi, Y. Takase, T. Tanabe, K. Toi, Y. Ueda, Y. Uesugi, K. Ushigusa, Y. Yagi, T. Yamamoto, K. Yatsu, K. Yoshikawa: Progress in Physics and Technology Developments for the Modification of JT-60, *Plasma Sci. Tech.* **6**, 2141–2150 (2004).
- [10] A. Ejiri, S. Shiraiwa, Y. Takase, T. Yamada, Y. Nagashima, H. Kasahara, D. Iijima, Y. Kobori, T. Nishi, T. Taniguchi, M. Aramasu, S. Ohara, M. Ushigome, K. Yamagishi: Ion Temperature Increase During MHD Events on the TST-2 Spherical Tokamak, *Nucl. Fusion*, **43**, 547–552 (2003).
- [11] S. Sudo, T. Ozaki, N. Ashikawa, M. Emoto, M. Goto, Y. Hamada, K. Ida, T. Ido, H. Iguchi, S. Inagaki, M. Isobe, K. Kawahata, K. Khlopenkov, T. Kobuchi, Y. Liang, S. Masuzaki, T. Minami, S. Morita, S. Muto, Y. Nagayama, H. Nakanishi, K. Narihara, A. Nishizawa, S. Ohdachi, M. Osakabe, B. J. Peterson, S. Sakakibara, M. Sasao, K. Sato, M. Shoji, N. Tamura, K. Tanaka, K. Toi, T. Tokuzawa, K. Watanabe, T. Watanabe, I. Yamada, LHD Team, P. Goncharov, A. Ejiri, S. Okajima, A. Mase, S. Tsuji-Iio, T. Akiyama, J. F. Lyon, L. N. Vyacheslavov and A. Sanin: Recent diagnostic developments on LHD, *Plasma Phys. Contr. Fusion*, **45**, 1127–1142 (2003).
- [12] S. Sudo, Y. Nagayama, B. J. Peterson, K. Kawahata, T. Akiyama, N. Ashikawa, M. Emoto, M. Goto, Y. Hamada, K. Ida, T. Ido, H. Iguchi, S. Inagaki, M. Isobe, T. Kobuchi, A. Komori, Y. Liang, S. Masuzaki, T. Minami, T. Morisaki, S. Morita, S. Muto, Y. Nakamura, H. Nakanishi, M. Narushima, K. Narihara, M. Nishiura, A. Nishizawa, S. Ohdachi, M. Osakabe, T. Ozaki, R. O. Pavlichenko, S. Sakakibara, K. Sato, M. Shoji, N. Tamura, K. Tanaka, K. Toi, T. Tokuzawa, K. Y. Watanabe, T. Watanabe, H. Yamada, I. Yamada, M. Yoshinuma, P. Goncharov, D. Kalinina, T. Kanaba, T. Sugimoto, A. Ejiri, Y. Ono, H. Hojo, K. Ishii, N. Iwama, Y. Kogi, A. Mase, M. Sakamoto, K. Kondo, H. Nagasaki, S. Yamamoto, N. Nishino, S. Okajima, T. Saida, M. Sasao, T. Takeda, S. Tsuji-Iio, D. S. Darrow, H. Takahashi, Y. Liu, J. F. Lyon, A. Yu Kostrioukov, V. B. Kuteev, V. Sergeev, I. Viniar, A. V. Krasilnikov, A. Sanin, L. N. Vyacheslavov, D. Stutman, M. Finkenthal, O. Motojima and LHD Group: Recent diagnostic developments on LHD, *Plasma Phys. Contr. Fusion* **45**, A425–A443 (2003).
- [13] A. Ejiri, S. Shiraiwa, Y. Takase, Y. Nagashima, H. Kasahara, T. Yamada, D. Iijima, Y. Kobori, T. Nishi, T. Taniguchi and K. Yamagishi: Visible Fluctuation Measurements on the TST-2 Spherical Tokamak, *Jap. J. Appl. Physics*, **42**, Part1, 7557–7563, (2003).

- [14] B. Jones, P. C. Efthimion, G. Taylor, T. Munsat, J. R. Wilson, J. C. Hosea, R. Kaita, R. Majeski, R. Maingi, S. Shiraiwa, J. Spaleta, and A. K. Ram: Controlled Optimization of Mode Conversion from Electron Bernstein Waves to Extraordinary Mode in Magnetized Plasma, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 165001 (2003)
- [15] H. Nozato, S. Morita, M. Goto, A. Ejiri and Y. Takase: Acceleration characteristics of spherical and nonspherical pellets by the impurity pellet injector, *Rev. Sci. Instrum.* **74**, 2032–2035 (2003).
- [16] K. Tsuzuki, H. Kimura, H. Kawashima, M. Sato, K. Kamiya, K. Shinohara, H. Ogawa, K. Hoshino, M. Bakhtiari, S. Kasai, K. Uehara, H. Sasao, Y. Kusama, N. Isei, Y. Miura, T. Ogawa, M. Yamamoto, T. Shibata, K. Kikuchi, K. Miyachi, T. Ito, H. Ajikawa, S. Nomura, H. Tsutsui, R. Shimada, T. Ido, Y. Hamada, N. Fukumoto, M. Nagata, T. Uyama, H. Niimi, S. Yatsu, N. Kayukawa, T. Hino, Y. Hirohata, Y. Nagashima, A. Ejiri, A. Amemiya, Y. Sadamoto and A. Tsushima: High performance tokamak experiments with a ferritic steel wall on JFT-2M, *Nucl. Fusion* **43**, 1288–1293 (2003).
- [17] S. Shiraiwa, S. Ide, S. Itoh, O. Mitarai, O. Naito, T. Ozeki, Y. Sakamoto, T. Suzuki, Y. Takase, S. Tanaka, T. Taniguchi, M. Aramasu, T. Fujita, T. Fukuda, X. Gao, M. Gryaznevich, K. Hanada, E. Jotaki, Y. Kamada, T. Maekawa, Y. Miura, K. Nakamura, T. Nishi, H. Tanaka, K. Ushigusa and JT-60 Team: Formation of Advanced Tokamak Plasmas without the Use of an Ohmic-Heating Solenoid, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 035001 (2004)
- [18] Y. Nagashima, K. Shinohara, K. Hoshino, A. Ejiri, K. Tsuzuki, T. Ido, K. Uehara, H. Kawashima, K. Kamiya, H. Ogawa, T. Yamada, S. Shiraiwa, S. Ohara, Y. Takase, N. Asakura, N. Oyama, T. Fujita, S. Ide, H. Takenaga, Y. Kusama, Y. Miura and JFT-2M group: Coherent edge fluctuation measurements in H-mode discharges on JFT-2M, *Plasma Phys. Control. Fusion* **46**, A381–A386 (2004).
- [19] H. Nozato, S. Morita, M. Goto, Y. Takase, A. Ejiri, T. Amano, K. Tanaka, S. Inagaki and LHD Experimental Group: A study of charge dependence of particle transport with impurity pellet injection and high-spatial resolution bremsstrahlung measurement on the large helical device, *Phys. Plasmas*. **11**, 1920–1930 (2004).
- (国内雑誌)
- [20] 高瀬雄一:「ST研究の最近の進展—MASTとNSTX—」(解説)、*プラズマ・核融合学会誌* **79**, 336–344 (2003).
- [21] 江尻晶:「プラズマ計測のためのマイクロ波反射計」(解説)、*プラズマ・核融合学会誌* **79**, 742–749 (2003).
- [22] 江尻晶:「マイクロ波反射計を作ってみよう」(講座)、*プラズマ・核融合学会誌* **79**, 921–928 (2003).
- (学位論文)
- [23] 大原伸也:「回転ミラーを用いたTST-2プラズマの可視発光分布測定」(修士論文)
- [24] 永島芳彦:“A study of coherent and turbulent fluctuations in the edge region of JFT-2M tokamak plasma” (博士論文)
- [25] 野里英明:“A Study of Charge Dependence of Particle Transport using Impurity Pellet Injection and High-Spatial Resolution Bremsstrahlung Measurement on the Large Helical Device” (博士論文)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [26] Y. Takase: Solenoidless Start-up Experiments on the TST-2 Spherical Tokamak, 9th International ST Workshop, Culham, UK, Sept. 15–17, 2003.
- [27] Y. Nagashima, K. Shinohara, K. Hoshino, A. Ejiri, K. Tsuzuki, T. Ido, K. Uehara, H. Kawashima, K. Kamiya, H. Ogawa, T. Yamada, S. Shiraiwa, S. Ohara, Y. Takase, N. Asakura, N. Oyama, T. Fujita, S. Ide, H. Takenaga, Y. Kusama, Y. Miura and JFT-2M group Edge coherent fluctuation measurements in H-mode discharges on JFT-2M The 9th IAEA TCM on H-mode Physics and Transport Barrier, San Diego, CA. U.S.A., Sep. 24–26, 2003.
- [28] T. Yamada, A. Ejiri, S. Shiraiwa, Y. Takase: AM Microwave Interferometer, The 28th International Conference on Infrared and Millimeter Waves, Otsu, Shiga, Japan, Sep. 29–Oct. 2, 2003.
- [29] Y. Takase, M. Aramasu, A. Ejiri, H. Kasahara, S. Ohara, S. Shiraiwa, T. Yamada, K. Hanada, M. Hasegawa, H. Hoshika, H. Idei, A. Iyomasa, N. Maezono, K. Nakamura, M. Sakamoto, K. Sasaki, K.N. Sato: EBW and outer PF start-up on the TST-2 spherical tokamak, 45th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Albuquerque, NM, USA, Oct. 27–31, 2003.
- 招待講演
- [30] Y. Takase: Profile Control and Plasma Start-up by RF Waves Towards Advanced Tokamak Operation in JT-60U, 15th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas, Moran, WY, USA, May 19–21, 2003.
- (国内会議)
- 一般講演
- [31] 白岩俊一、高瀬雄一、江尻晶、荒益将、出射浩、今村紀仁、彌政敦洋、江崎康一、大原伸也、笠原寛史、北口将博、坂本瑞樹、佐々木啓介、佐藤浩之助、関子秀樹、中村一男、長谷川真、花田和明、星加博之、前園伸美、山田琢磨:「TST-2球状トカマクにおける電子バンシュタイン波を用いた加熱電流駆動実験計画」、日本物理学会秋季大会、岡山大学津島キャンパス、2003年9月23日

- [32] 高瀬雄一、D. Gates、J. Menard、御手洗修：「NSTXにおけるCSなしプラズマ立ち上げシナリオの検討」、日本物理学会 2003 年秋季大会、岡山大学、2003 年 9 月 20-23 日
- [33] 江尻晶：「通信におけるマイクロ波技術」、マイクロ波研究会、ひたちなか市、2003 年 11 月
- [34] 高瀬雄一：「TST-2 球状トカマクにおける電流立ち上げ実験」、LHD への CT 入射作業部会、核融合研、2003 年 11 月 20-21 日
- [35] 山田琢磨、江尻晶、白岩俊一、笠原寛史、荒益将、大原伸也、高瀬雄一、出射浩、彌政敦洋、江崎康一、坂本瑞樹、佐々木啓介、佐藤浩之助、関子秀樹、中村一男、長谷川真、花田和明、星加博之、前園伸美：「TST-2 球状トカマクにおける電子温度・密度測定」、プラズマ核融合学会第 20 回年会、水戸、2003 年 11 月 25-28 日
- [36] 笠原寛史、荒益将、出射浩、彌政敦洋、江崎康一、江尻晶、大原伸也、坂本瑞樹、佐々木啓介、佐藤幸之助、白岩俊一、関子秀樹、高瀬雄一、中村一男、山田琢磨：「TST-2 球状トカマクにおける高電力マイクロ波入射実験」、プラズマ・核融合学会 2003 年第 20 回年会、茨城県立県民文化センター、2003 年 11 月 25-28 日
- [37] 高瀬雄一：「ST における閉じ込めの現状」、第 6 回 ST 研究調査専門委員会、核融合研、2004 年 1 月 15-16 日
- [38] 高瀬雄一：「先進領域における RF 物理」、日米科学技術協力事業核融合分野事業報告会、東京ガーデンパレス、2004 年 3 月 4-5 日
- [39] 高瀬雄一：「NSTX における高次高調速波電流駆動実験」、日米科学技術協力事業核融合分野事業報告会、東京ガーデンパレス、2004 年 3 月 4-5 日
- [40] 白岩俊一、荒益将、出射浩、彌政敦洋、江尻晶、大原伸也、笠原寛史、鎌田悠介、川崎昌二、坂本瑞樹、佐々木啓介、佐藤浩之助、高木康伸、高瀬雄一、中島寿年、中村一男、長谷川真、花田和明、東島亜紀、星加博之、関子秀樹、山田琢磨：「TST-2 球状トカマクにおける電子バーンシュタイン波を用いた加熱電流駆動実験」、日本物理学会、九州大学箱崎地区、2004 年 3 月 27 日
- [41] 野里英明、森田繁、後藤基志、高瀬雄一、江尻晶、天野恒雄、田中謙司、稲垣滋、LHD 実験グループ：「LHD プラズマにおける不純物ペレット入射と高空間分解能制動放射計測を用いた粒子輸送研究」、日本物理学会 2004 年春季大会、九州大学箱崎地区、2004 年 3 月 27-30 日
- [42] 永島芳彦、星野克道、江尻晶、篠原孝司、都筑和泰、上原和也、川島寿人、小川宏明、高瀬雄一、JFT-2M グループ：「JFT-2M 高三角度 OH 放電プラズマ周辺部における揺動の振る舞い」、日本物理学会 2004 年春季年会、九州大学箱崎キャンパス、2004 年 3 月 27-30 日

招待講演

- [43] 高瀬雄一：「ITER 計画への研究参加および国内体制の構築について」、原子力委員会核融合研究開発基本問題検討会（第 5 回）、中央合同庁舎、2003 年 7 月 25 日

[44] 高瀬雄一：「ITER 計画への研究参加および国内体制の構築について」、プラズマ核融合学会第 20 回年会特別企画「ITER を主導する核融合研究の進め方」、水戸、2003 年 11 月 25-28 日

[45] 高瀬雄一：「球状トカマク研究の現状と展望」、核融合プラズマを知る・操る技術調査専門委員会第 10 回会合、電気学会、2003 年 12 月 24 日

6.4 坪野研究室

本研究室では重力と相対論に関する実験的研究を進めている。その中でも、重力波検出は一貫して研究室の中心テーマとなっている。現在は、高感度なレーザー干渉計を用いた重力波検出に力を注いでいる。これらの研究に関連して、熱雑音や精密計測に関する研究も同時に進めている。

重力波は光速で伝搬する時空のひずみであり、超新星爆発や連星中性子星の合体などの非常に激しい天体現象にともなって発生する。これを観測することによって、新しい分野「重力波天文学」を確立することが現在の重力波研究の目的である。重力波を使って宇宙を見ることは、人類の新たな知の獲得である。[1, 61, 62, 63]

2001年度より科学研究費特定領域研究「重力波研究の新しい展開」(領域代表:坪野公夫)が5カ年の計画で始まっている。この研究では、三鷹に設置されたTAMA300を用いた重力波探査と、次世代レーザー干渉計の開発が2つの主軸となっている。この研究を進展させて、将来計画である3kmレーザー干渉計(LCGT)の建設につなげることが本領域の主目的である。この中で本研究室では、次世代干渉計のための防振機構を中心に研究開発している。[3, 7, 8, 9, 13, 14, 40, 52]

6.4.1 レーザー干渉計を用いた重力波の検出

TAMA プロジェクトの現状

TAMA プロジェクトは、日本国内の関係機関が協力して基線長 300m のレーザー干渉計型重力波検出器(TAMA300)を国立天文台三鷹キャンパス内に建設し、重力波観測を行う計画である。同様の計画は、アメリカ合衆国のLIGO、イタリア・フランスのVIRGO、ドイツ・イギリスのGEOなど世界各国でも進められている。現在までにTAMAでは、我々の銀河系内での連星中性子星合体や超新星爆発といった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。2003年2月より2ヵ月間にわたるLIGOとの同時観測運転が行われ、1000時間以上のデータが取得された。取得されたデータは現在、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。[6, 10, 11, 21, 22, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 44, 48, 49, 50, 55, 56, 60]

TAMA300 重力波検出器のデータ解析

TAMAでは、超新星爆発などで発生すると考えられているバースト的な重力波を観測対象の1つとしており、その信号をターゲットにデータ解析が行なわれている。これらの信号は、数値シミュレーションなどから、10 msec 以下程度の持続時間しか持たな

い短い波形を持つことが知られている。しかし、その波形は、中性子星のパラメータや爆発のメカニズムに強く依存し、正確には予測しきれない。従って、予想波形を用いたマッチト・フィルタリングの手法を用いて重力波信号を探す事はできない。そこで、バースト重力波解析では、検出器出力に含まれる非定常成分を取り出すという手法が用いられる。

ただ、レーザー干渉計は、非常に高感度であるがゆえに、様々な外乱の影響を受けやすく、その出力には非定常な雑音成分も多く含まれる。その場合、バースト的な重力波は、これらの非定常雑音に埋もれてしまい、検出する事が困難になる。そこで、非定常成分の時間スケールなどの特徴を用いて、重力波信号と雑音成分を区別する手法や、観測時に記録された検出器のモニタ信号を用いて検出器の不安定動作を調べることによって非定常雑音を除去する手法を用いて、バースト重力波探査を行なっている。また、外国のプロジェクトとの同時観測によって、雑音を除去する解析も進められている。[4, 5, 21, 25, 26, 27, 38, 45, 46, 47, 57, 58, 59]

TAMA300 データを用いた連続重力波解析

SN1987Aの跡に発見されたパルサーから放射されていると思われる連続重力波(935Hz)をターゲットにしたデータ解析に関する研究を進めた。

通常、連続的な重力波の解析ではマッチドフィルタと呼ばれる手法がよく用いられる。この手法では、テンプレートとして正確な波形を用いた場合には高いSNR(信号のパワーと雑音のパワーの比)を実現することが可能である。一方で、テンプレートの波形が実際の波形とずれている場合にはSNRの低下を招くことになる。パルサーからの重力波は、基本的には規則正しい正弦波的な波形をもつが、スピンドアウンやパルサーの回転軸の方向といったパラメータによって観測される波形は異なる上、これらのパラメータは前もって正確に分かっているわけではないため、予想重力波のずれからSNRの低下を招く可能性がある。

そこで、SNRの低下を抑えつつデータ解析時間も増やさないテンプレート群(パラメータの範囲の区切り方)を求めた。さらに、そのテンプレート群を評価するためにモンテカルロシミュレーション(存在しうる様々な状態のパルサーからくる重力波を観測したと仮定してそのときのSNRを求める)を行った。その結果、SNRの低下を2%に抑えつつ解析時間も十分短いテンプレート群を得ることができた。[2, 39]

懸架点干渉計の開発

レーザー干渉計型重力波検出器の感度を低周波で制限するのは地面振動である。懸架点干渉計とは鏡の懸架点に構成される補助レーザー干渉計をセンサーとして用いた能動防振装置の一種である。これは非常に低雑音であることと、振子などの受動防振系で

は難しい低周波で高い防振性能を持つという特徴がある。特に低雑音性は、LCGTのような低温干渉計におけるヒートリンクの防振に応用できると期待されている。[41, 53]

これまでに開発してきた、水平方向 [17] および垂直方向 [30] のプロトタイプ懸架点干渉計の結果を元に、現在この2つを組み合わせた大型プロトタイプ干渉計を開発中である。本年度は、カリフォルニア工科大学において低周波縦防振パネ、MGAS フィルターを開発し、さらにサスペンションシステム、光学系の設計を完了した。現在は実験装置の組み立て作業を行っているところである。この新しい装置によって懸架点干渉計に関する知見をさらに深め、大型干渉計へ応用されることが期待されている。

宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO

スペースクラフト間で Fabry-Perot 共振器を構成した、0.1Hzの周波数を観測帯域にする Fabry-Perot 型の宇宙レーザー干渉計 (FP-DECIGO) について考察をおこなった。

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、0.1Hz の周波数を観測する DECIGO が検討されている。0.1Hz という周波数は、LISA と地上干渉計の観測周波数の間にあり、重力波源として、(1) LISA と地上干渉計の帯域の間の連星、(2) 初期宇宙の重力波などが挙げられる。DECIGO においては、レーザー光の直接反射による干渉計が構成可能である。しかし、そのためには大直径の鏡の作成が欠かせない。また、Fabry-Perot 共振器は、安定に動作するために共振器長を厳密に一定に保たなければならない。よって、干渉計の公転によるスペースクラフト間の距離の変化を知り、制御の要求を求めることは重要である。そこで、0.1Hz を目標とする Fabry-Perot 型の宇宙レーザー干渉計の実現しうる感度を求め、更にそれを実現するのに必要なスペースクラフトの軌道計算をおこなった。[23, 34, 43, 51]

6.4.2 熱雑音の研究

熱雑音の直接測定

干渉計型重力波検出器の観測帯域の感度を制限するのは、鏡や懸架系の熱雑音である。それらの熱雑音は、その振幅の小ささゆえ、これまでに幅広い周波数帯域で直接測定された例はない。このような背景の下、実際の検出器に近い系における熱雑音を直接測定するための、短基線長光共振器を用いた実験を行っている [4, 18, 24]。

基本的な構成は、固定光共振器に対して周波数安定

化されたレーザー光を、二つの短基線長光共振器に入射し、その変位雑音を測定するものである。光共振器におけるレーザーのスポットサイズを非常に小さくするようにデザインし、鏡の熱振動の効果を大きくした。鏡は地面振動の影響を避けるために、サスペンションとスタックによって防振が行われている。装置を構成し、地面振動、散乱雑音、周波数雑音、強度雑音、電気雑音などの各種雑音を抑圧した。それによって、鏡基材による熱雑音、およびコーティングによる熱雑音を、約 100Hz から 100kHz の 3 桁に渡って測定することができた。ここで測定したのは BK7 基材の Brownian noise, CaF₂ 基材の Thermoelastic noise, 及び SiO₂ 基材に施したコーティングの Brownian noise である。図 6.4 a に BK7, SiO₂ における測定結果について示す。おのおの、BK7 基材、コーティングの内部損失から計算した理論値に一致していることが確認できる。これらは、機械系の共振周波数以下の幅広い帯域で、熱雑音を測定した最初の実験例となっており、物理学的にも重要である。今後は、LIGO との協力の下、サファイア基材を用いて測定を行う予定である。

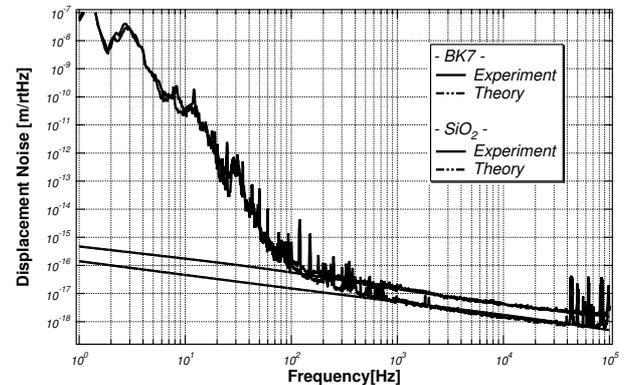


図 6.4 a: BK7 基材、SiO₂ 基材を用いた鏡の熱雑音の測定結果。点線はおのおのの理論値を示す。低周波の変位雑音は地面振動により制限されている。

非一様な散逸による熱雑音の研究

熱雑音の大きさを推定し、低減することは重要な課題である。従来はモード展開という方法を用いて熱雑音の推定が行われてきた。しかしいくつかの理論的研究はこの方法は散逸が非一様に分布しているとき正しくないことを示唆している。にも関わらず非一様な散逸による熱雑音の研究はあまり行われていなかった。我々はこの問題に取り組み、これに関するほぼ全ての問題を解決することができた。その概略を以下に紹介する。

まず新しい熱雑音推定方法を 2 通り開発した。この 2 つの方法と他のグループにより開発された別の新しい方法は全て同じ結果を与えることを確認した。そして散逸が非一様な場合、これらの新しい方法はモード展開と異なる結果を与える。

次に実験で新しい推定方法を検証した。非一様な散逸を持つ振動子(板バネとdrum(鏡と同じく円柱であるが、中空 [6])の2種類)を用意し、実験によりこの熱雑音を求め、推定結果と比較した。測定結果は新しい推定方法を支持した。これらはモード展開の破綻を示した初めての実験例である。

次に干渉計の鏡が非一様な散逸を持つ場合の熱雑音について新しい方法で計算した。その結果モード展開と大きく異なる結果が得られた。今まで鏡の反射膜の機械的散逸の熱雑音への寄与は小さいと考えられてきたが、予想以上に大きいことがわかった。逆に鏡の位置を制御するためのアクチュエータや鏡を懸架するワイヤーを鏡に接続する部分の散逸は熱雑音を大幅に増加させると懸念されていたが、深刻な問題にならないことが明らかになった。

反射膜の散逸が問題になりうるということがわかったので、その測定を行った [6, 16, 19, 28, 29]。特に日本の将来計画、LCGT 計画、では鏡を冷却することになっているので、散逸の温度依存性を調べた。その結果常温からヘリウム温度にわたって散逸の大きさはほぼ一定であることがわかった。これは反射膜による熱雑音は絶対温度の平方根に比例することを意味している。測定結果を新しい推定方法に適用すると、常温では熱雑音は LCGT 計画の目標感度より大きい、冷却することによって目標感度以下に低減できることがわかった。

6.4.3 精密計測の研究

低周波防振装置 SAS の開発

本研究室では次世代の重力波検出器のために、低周波防振装置 SAS(Seismic Attenuation System)の研究開発を行ってきた。この研究は 1999 年から米国の LIGO をはじめ、海外のグループと共同で行っているものである。次世代検出器では、観測可能帯域の拡大と検出器の安定性向上が最重要課題であるが、これらとともに低周波での機械的外乱(地面振動)を抑制することで達成できる。SAS で用いられている技術は、低周波(数 100mHz 以下)に共振をもつ受動防振機構と、受動防振特性を損なわずに、機械系の共振による検出器の振動増幅のみを抑制する能動ダンピングである。特に、鉛直方向の低周波防振用に、非常に単純な機構である MGAS (Monolithic Geometric Anti-Spring) を開発、採用している。3m の Fabry-Perot 光共振器(図 6.4 b)を実際に動作させる実験を行い、SAS に吊られた鏡に制御を加えることによって光共振器を安定に動作させることが可能であることを実証した。

低周波帯域では従来の TAMA300 の感度を少なくとも 100 倍から 1000 倍程度改善することが可能であることを実証することに成功した。干渉計の動作安定性に関しては、Fabry-Perot 共振器を共振させた状態で、TAMA SAS の能動ダンピング機構を動作させ、0.1Hz 以上での鏡の変動量の積分値が $0.2\mu\text{m}$ (レーザー波長の $1/5$ 程度)まで抑制されることを示すことができた。これらの結果から、SAS を用いること

によって干渉計の安定性、制御性を改善することが可能であることが実証された。

本研究の成果をうけて、TAMA SAS を TAMA300 に組み込む計画が進展している。今年度は、機械系の改良など、来年度の組み込みに向けた準備を行っている。



図 6.4 b: SAS を組み込んだ、3m Fabry-Perot 干渉計。干渉計の 2 枚の鏡は SAS によって防振される。

磁気浮上を利用した防振システム

磁気浮上を利用した高感度加速度計の開発を行っている。重力波検出などの精密計測においては、地面振動が計測の妨げとなる。よりよい防振性能を得るためには制御を用いた能動防振の併用が必要となる。しかし、現在採用されている能動防振装置は補助的なものでしかない。これは、能動防振に必要な高感度加速度計の開発が困難だからである。

ここで開発した加速度計(maglev)の原理は、慣性系に静止した試験質量と測定対象物との相対変位の変動から加速度の情報を得るものである。実際には試験質量を機械的なバネで懸架し、防振することで擬似的に実現している。しかし、このように機械的に懸架するとその構成要素でのクリープ現象や静摩擦が問題となりうる。そこで、このような欠点を克服するために、試験質量を磁気浮上で非接触懸架する方式の加速度計を提案した。この方式では、試験質量に固定した磁石と加速度計本体に固定した磁石との間の位置と試験質量の荷重を調整することによって、支持系の固有周波数をゼロにすることが原理的に可能である。これは、加速度計として理想的な状態である。また、試験質量の剛体 6 自由度にサーボ型フィードバック制御を施すことにより、1 つの試験質量から、6 自由度すべての加速度情報を得ることができる。

現在までに、試作品の開発を行い、鉛直方向地面変位スペクトルの測定で市販加速度計(Rion)との比較を行った。その結果、およそ 0.2Hz から 100Hz の範

囲で Rion と一致した結果（それ以外の帯域は Rion の測定保証範囲外）を得ている。また、低周波帯域（1Hz 以下）での感度に関しては、世界最高感度を持つ STS-2 にあと 1 桁というところまで迫っている。そして、maglev を能動防振装置に組み込み、能動防振の実験を始めている。これは、アクチュエータ付の台に maglev を乗せ、その加速度信号を除去するようにアクチュエータにフィードバックし、台を防振するものである。台の実際の振動レベルを測るために Rion も乗せている。現在までのところ、防振された台の鉛直方向変位の RMS 値として、地面振動のそれのおよそ 1/10 に低減化することに成功している。[42, 54]

光ファイバー干渉計を用いた精密計測

レーザー干渉計重力波検出器などの光干渉計を用いた精密計測技術や高安定化技術では、主に空間光が用いられており、細かい光学素子の扱いが困難な場合もあった。そこで、新しい試みとして、光ファイバー光学系を用いた干渉計を製作し、高感度センサーとして利用する研究を行なっている。これによって、レーザー光の引き回しや光学素子の調節などの取り扱いが容易でありながら、 $10^{-14}\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度の高い感度を持つセンサーが実現される事が期待できる。当研究室では、これまでに、このような干渉計を動作させ、センサーとして使用に耐える性能が実現されている。また、さらに高感度化するため、光共振器を用いたレーザー周波数安定化等の改良も行なわれている。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] K. Tsubono: Search for Gravitational Waves Prog. Theor. Phys. Suppl. **151** (2003) 115.
- [2] K. Tsubono: Application of material damping for gravitational wave detectors, Journal of Alloys and Compounds, **355** (2003) 224.
- [3] K. Numata, M. Ando, K. Yamamoto, S. Otsuka, and Kimio Tsubono: Wide-band direct measurement of thermal fluctuations in an interferometer, Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 260602.
- [4] M. Ando, K. Arai, R. takahashi, D. Tasumi, P. Beyersdorf, S. Kawamura, S. Miyoki, N. Mio, S. Moriwaki, K. Numata, Y. Aso, M. Fujimoto, K. Tsubono, K. Kuroda and the TAMA collaboration: Methods to characterize non- Gaussian noise in TAMA, Class. Quantum Grav. **20** (2003) 697.
- [5] K. Soida, M. Ando, N. Kanda, H. Tagoshi, D. Tatsumi, K. Tsubono and the TAMA collaboration: Search for continuous gravitational Waves from the SN1987A remnant using TAMA300 data, Class. Quantum Grav. **20** (2003) 645.
- [6] R. Takahashi and the TAMA collaboration: Operational status of TAMA300, Class. Quantum Grav. **20** (2003) 593.

- [7] M. Ohashi, K. Kuroda, S. Miyoki, T. Uchiyama, K. Yamamoto, K. Kasahara, T. Shintomi, A. Yamamoto, T. Haruyama, Y. Saito, Y. Higashi, T. Suzuki, N. Sato, T. Tomaru, D. Tatsumi, S. Telada, M. Ando, A. Araya, S. Takemoto, T. Higashi, H. Momose, J. Akamatsu, W. Morii: Design and construction status of CLIO, Class. Quantum Grav. **20** (2003) S599.
- [8] K. Kuroda, M. Ohashi, T. Uchiyama, K. Yamamoto, K. Kasahara, T. Shintomi, A. Yamamoto, T. Haruyama, Y. Saito, Y. Higashi, T. Suzuki, N. Sato, T. Tomaru, A. Araya, M. Ando, S. Miyoki, D. Tatsumi, N. Kanda, S. Telada, H. Ishitsuka, S. Kawamura, R. Takahashi, T. Yamazaki, K. Arai, A. Ueda, M. Fukushima, S. Sato, S. Nagano, Y. Tsunesada, Z-H. Zhu, T. Suzuki, K. Tsubono, A. Takamori, K. Numata, Y. Aso, K-I. Ueda, H. Yoneda, K. Nakagawa, M. Musha, N. Mio, S. Moriwaki, K. Somiya, N. Kanda, H. Tagoshi, T. Nakamura, M. Sasaki, T. Tanaka, K. Oohara, H. Takahashi, O. Miyakawa and M E Tobar: Current status of large-scale cryogenic gravitational wave telescope, Class. Quantum Grav. **20** (2003) 871.
- [9] N. Kanda (the TAMA collaboration): Advantages of simultaneous observation for TAMA300 with recently operating interferometric gravitational wave detectors, Class. Quantum Grav. **20** (2003) 761.
- [10] S. Nagano, S. Kawamura, M. Ando, R. Takahashi, K. Arai, M. Musha, S. Telada, M.-K. Fujimoto, M. Fukushima, Y. Kozai, S. Miyama, A. Ueda, K. Waseda, and T. Yamazaki H. Ishizuka, K. Kuroda, S. Matsumura, O. Miyakawa, S. Miyoki, M. Ohashi, S. Sato, D. Tatsumi, T. Tomaru, T. Uchiyama, K. Kawabe, N. Ohishi, S. Otsuka, A. Sekiya, A. Takamori, S. Taniguchi, K. Tochikubo, K. Tsubono, K. Ueda, K. Yamamoto, N. Mio, S. Moriwaki, G. Horikoshi, N. Kamikubota, Y. Ogawa, Y. Saito, T. Suzuki, K. Nakagawa, K. Ueda, A. Araya, N. Kanda, N. Kawashima, E. Mizuno, M. Barton, N. Tsuda, N. Matsuda, and T. Nakamura: Development of a multistage laser frequency stabilization for an interferometric gravitational-wave detector, Rev. Sci. Instrum. **74** (2003) 4176.
- [11] T. Tomaru, S. Miyoki, M. Ohashi, K. Kuroda, T. Uchiyama, T. Suzuki, A. Yamamoto, T. Shintomi, A. Ueda, D. Tatsumi, S. Sato, K. Arai, M. Ando, K. Watanabe, K. Nakamura, M. Watanabe, K. Ito, I. Kataoka, H. Yamamoto, B. Bochner, Y. Hefetz: Evaluation of the performance of polished mirror surfaces for the TAMA gravitational wave detector by use of a wave-front tracing simulation Appl. Optics. **42** (2003) 1306.
- [12] M. Ando, K. Arai, R. Takahashi, D. Tatsmii, P. Beyersdorf, S. Kawamura, S. Miyoki, N. Mio, S. Moriwaki, K. Numata, N. Kanda, Y. Aso, M.-K. Fujimoto, K. Tsubono, K. Kuroda: Analysis for

- burst gravitational waves with TAMA300 data, *Class. Quantum Grav.* **21** (2004) S735.
- [13] T. Uchiyama, K. Kuroda, M. Ohashi, S. Miyoki, H. Ishitsuka, K. Yamamoto, H. Hayakawa, K. Kasahara, M-K. Fujimoto, S. Kawamura, R. Takahashi, T. Yamazaki, K. Arai, D. Tatsumi, A. Ueda, M. Fukushima, S. Sato, Y. Tsunesada, Zhu ZH, T. Shintomi, A. Yamamoto, T. Suzuki, Y. Saito, T. Haruyama, N. Sato, Y. Higashi, T. Tomaru, K. Tsubono, M. Ando, K. Numata, Y. Aso, KI. Ueda, H. Yoneda, K. Nakagawa, M. Musha, N. Mio, S. Moriwaki, K. Somiya, A. Araya, A. Takamori, N. Kanda, S. Telada, H. Tagoshi, T. Nakamura, M. Sasaki, T. Tanaka, KI. Ohara, H. Takahashi, S. Nagano, O. Miyakawa, ME. Tobar: Present status of large-scale cryogenic gravitational wave telescope, *Class. Quantum Grav.* **21** (2004) S1161.
- [14] S. Miyoki, T. Uchiyama, K. Yamamoto, H. Hayakawa, K. Kasahara, H. Ishitsuka, M. Ohashi, K. Kuroda, D. Tatsumi, S. Telada, M. Ando, T. Tomaru, T. Suzuki, N. Sato, T. Haruyama, Y. Higashi, Y. Saito, A. Yamamoto, T. Shintomi, A. Araya, S. Takemoto, T. Higashi, H. Momose, J. Akamatsu, W. Morii: Status of the CLIO project, *Class. Quantum Grav.* **21** (2004) S1173.
- [15] K. Yamamoto, S. Otsuka, Y. Nanjo, M. Ando, and K. Tsubono: Experimental study of the thermal noise of mirrors with an inhomogeneous loss used in gravitational wave detectors, *Phys. Lett. A* **321** (2004) 79.
- [16] K. Yamamoto, S. Miyoki, T. Uchiyama, H. Ishitsuka, M. Ohashi, K. Kuroda, T. Tomaru, N. Sato, T. Suzuki, T. Haruyama, A. Yamamoto, T. Shintomi, K. Numata, K. Waseda, K. Ito, K. Watanabe: Mechanical loss of the reflective coating and fluorite at low temperature, *Class. Quantum Grav.* **21** (2004) S1075.
- [17] Y. Aso, M. Ando, K. Kawabe, S. Otsuka, K. Tsubono: Stabilization of a Fabry-Perot interferometer using a suspension-point interferometer, *Phy. Lett. A* (2004)(in press).
- [18] K. Numata, K. Yamamoto, H. Ishimoto, S. Otsuka, K. Kawabe, M. Ando, and K. Tsubono: Systematic measurement of the intrinsic losses in various kinds of bulk fused silica, *Phy. Lett. A* (2004)(in press).
- (会議抄録)
- [19] K. Yamamoto, S. Miyoki, T. Uchiyama, H. Ishitsuka, M. Ohashi, K. Kuroda, T. Tomaru, N. Sato, T. Suzuki, T. Haruyama, A. Yamamoto, T. Shintomi, K. Numata, K. Waseda, K. Ito, and K. Watanabe: Mechanical loss of reflective coating at low temperature, *The 28th International Cosmic Ray Conference*, (Universal Academy Press, 2003) p3111-p3114.
- [20] M. Ando: Recent Results from Gravitational Wave Detectors, in: *Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology* pp.279-286, eds.: K.Sato and S.Nagataki (2004 Universal Academy Press Inc. Tokyo).
- [21] M. Ando, K. Arai, R. Takahashi, D. Tatsumi, P. Beyersdorf, S. Kawamura, S. Miyoki, N. Mio, S. Moriwaki, K. Numata, N. Kanda, Y. Aso, M-K. Fujimoto, K. Tsubono, K. Kuroda, and the TAMA collaboration: Search for Burst Gravitational Waves Using TAMA300 Data, *Proceedings in: 28th International Cosmic Ray Conference* pp.3067-3070, eds.: T. Kajita, Y. Asaoka, A. Kawachi, Y. Matsubara, M. Sasaki (2003 Universal Academy Press Inc. Tokyo).
- (国内雑誌)
- [22] 坪野公夫: TAMA300 重力波検出器の現状と今後、*応用物理学学会誌* **72-11** (2003) 1408-1412.
- (学位論文)
- [23] 高城毅: 宇宙空間レーザー干渉計重力波検出器の可能性、*修士論文*、2004年1月。
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [24] K. Numata: Direct Measurement of Mirror Thermal Noise 5th Edoardo Amaldi Conference (July 09, 2003, Pisa, Italy).
- [25] M. Ando, K. Arai, R. Takahashi, D. Tatsumi, P. Beyersdorf, S. Kawamura, S. Miyoki, N. Mio, S. Moriwaki, K. Numata, N. Kanda, Y. Aso, M-K. Fujimoto, K. Tsubono, K. Kuroda, and the TAMA collaboration: Analysis for burst gravitational waves with TAMA300 data, 5th Edoardo Amaldi Conference (July 2003, Pisa, Italy).
- [26] M. Ando and the TAMA Collaboration: Search for burst gravitational waves with TAMA data, The 8th Gravitational Wave Data Analysis Workshop (December 2003, Milwaukee, Wisconsin, USA).
- [27] M. Ando, K. Arai, R. Takahashi, D. Tatsumi, P. Beyersdorf, S. Kawamura, S. Miyoki, N. Mio, S. Moriwaki, K. Numata, N. Kanda, Y. Aso, M-K. Fujimoto, K. Tsubono, K. Kuroda, and the TAMA collaboration: Analysis for burst gravitational waves with TAMA300 data, the 28th International Cosmic Ray Conference (August 2003, Tsukuba, Japan).
- [28] K. Yamamoto, S. Miyoki, T. Uchiyama, H. Ishitsuka, M. Ohashi, K. Kuroda, T. Tomaru, N. Sato, T. Suzuki, T. Haruyama, A. Yamamoto, T. Shintomi, K. Numata, K. Waseda, K. Ito, and K. Watanabe: Mechanical loss of reflective coating at low temperature, *The fifth Edoardo Amaldi conference on gravitational waves* (July 2003, Tirrenia, Italy).

- [29] K. Yamamoto, S. Miyoki, T. Uchiyama, H. Ishitsuka, M. Ohashi, K. Kuroda, T. Tomaru, N. Sato, T. Suzuki, T. Haruyama, A. Yamamoto, T. Shin-tomi, K. Numata, K. Waseda, K. Ito, and K. Watanabe: Mechanical loss of reflective coating at low temperature, The 28th International Cosmic Ray Conference (August 2003, Tsukuba, Japan).
- [30] Y. Aso: Active vibration isolation using a Suspension Point Interferometer, 2004 ASPEN Winter Conference on Gravitational Waves (Feb. 2004, Aspen Center for Physics, Aspen, Colorado, USA).
- 招待講演**
- [31] K. Tsubono: TAMA project, Thinking, Observing and Mining the Universe (Sep. 2003, Grand Hotel Vesuvio, Sorrent, Italy).
- [32] M. Ando and the TAMA collaboration: Observation Runs of TAMA300 Gravitational Wave Detector, XII-th International School on Particles and Cosmology (April 2003, Baksan Valley, Russia).
- [33] M. Ando: Recent results from gravitational wave detectors, The 6th RESCEU International Symposium (November 2003, University of Tokyo, Tokyo).
- (国内会議)**
- 一般講演**
- [34] 安東正樹, km スペース重力波アンテナの可能性, 第 2 回 スペース重力波アンテナワーキンググループミーティング (2003 年 5 月, 国立天文台 三鷹キャンパス).
- [35] 新井宏二, 佐藤修一, 阿久津智忠, 高橋竜太郎, 長野重夫, 神田展行, 辰巳大輔, 常定芳基, 安東正樹, 三尾典克, 森脇成典, 武者満, 川村静児, 福嶋美津広, 山崎利孝, 藤本眞克, 坪野公夫, 大橋正健, 黒田和明, TAMA Collaboration, レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 のパワーリサイクリング VIII (観測), 日本物理学会 2003 年秋季大会 (2003 年 9 月, 宮崎ワールドコンベンションセンター).
- [36] 佐藤修一, 新井宏二, 阿久津智忠, 高橋竜太郎, 長野重夫, 神田展行, 辰巳大輔, 常定芳基, 安東正樹, 三尾典克, 森脇成典, 武者満, 川村静児, 福嶋美津広, 山崎利孝, 藤本眞克, 坪野公夫, 大橋正健, 黒田和明, 他 The TAMA Collaboration, レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 のパワーリサイクリング IX (検出器改良), 日本物理学会 2003 年秋季大会 (2003 年 9 月, 宮崎ワールドコンベンションセンター).
- [37] 阿久津智忠, 新井宏二, 佐藤修一, 高橋竜太郎, 長野重夫, 神田展行, 辰巳大輔, 常定芳基, 安東正樹, 三尾典克, 森脇成典, 武者満, 川村静児, 福嶋美津広, 山崎利孝, 藤本眞克, 坪野公夫, 大橋正健, 黒田和明, 他 The TAMA Collaboration, レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 のパワーリサイクリング X (雑音解析), 日本物理学会 2003 年秋季大会 (2003 年 9 月, 宮崎ワールドコンベンションセンター).
- [38] 安東正樹, 新井宏二, 高橋竜太郎, 辰巳大輔, Peter Beyersdorf, 川村静児, 三代木伸二, 三尾典克, 森脇成典, 沼田健司, 神田展行, 藤本眞克, 坪野公夫, 黒田和明, 他 TAMA Collaboration, TAMA300 データを用いたバースト重力波解析, 日本物理学会 2003 年秋季大会 (2003 年 9 月, 宮崎ワールドコンベンションセンター).
- [39] 榎村幸, 副田憲志, 安東正樹, 坪野公夫, TAMA300 データを用いた連続重力波解析, 日本物理学会 2003 年秋季大会 (2003 年 9 月, 宮崎ワールドコンベンションセンター).
- [40] 黒田和明, 大橋正健, 三代木伸二, 内山 隆, 石塚秀喜, 山元一広, 早河秀章, 近藤寿浩, 奥富 聡, 笠原邦彦, 徳成正雄, 藤本眞克, 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, 長野重夫, 常定芳基, 朱宗宏, 新富孝和, 山本 明, 鈴木敏一, 斎藤芳男, 春山富義, 佐藤伸明, 東保男, 都丸隆行, 坪野公夫, 安東正樹, 高森昭光, 沼田健司, 麻生洋一, 植田憲一, 米田仁紀, 中川賢一, 武者満, 三尾典克, 森脇成典, 宗宮健太郎, 新谷昌人, 神田展行, 寺田聡一, 田越秀行, 中村卓史, 佐々木節, 田中貴浩, 大原謙一, 高橋弘毅, 前田恵一, 関戸 文, 阪田紫帆里, 川添史子, 宮川 治, M.E. Tobar, 大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) 計画 VI, 日本物理学会 2003 年秋季大会 (2003 年 9 月, 宮崎ワールドコンベンションセンター).
- [41] 麻生洋一, 安東正樹, Riccardo DeSalvo, 坪野公夫, Suspension Point Interferometer による低周波防振 II, 日本物理学会 2003 年秋季大会 (2003 年 9 月, 宮崎ワールドコンベンションセンター).
- [42] 飯田幸美, 高森昭光, 安東正樹, 坪野公夫, 磁気浮上を利用した加速度計, 日本物理学会 2003 年秋季大会 (2003 年 9 月, 宮崎ワールドコンベンションセンター).
- [43] 坪野公夫, 川村静児, 中村卓史, 瀬戸直樹, 高野忠, 安東正樹, 井岡邦仁, 植田憲一, 神田展行, 阪上雅昭, 佐々木節, 佐藤孝, 柴田大, 田中貴浩, 千葉剛, 中尾憲一, 長野重夫, 沼田健司, 細川瑞彦, 横山順一, 吉野泰造, 端山和大, 井上太郎, 真貝寿明, 田代寛之, 西條統之, 山元一広, 藤本眞克, 他 DECIGO ワーキンググループ, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 III, 日本物理学会 2003 年秋季大会 (2003 年 9 月, 宮崎ワールドコンベンションセンター).
- [44] 辰巳大輔, 常定芳基, 他 TAMA Collaboration, TAMA300 オンライン雑音解析, 日本物理学会 2003 年秋季大会 (2003 年 9 月, 宮崎ワールドコンベンションセンター).
- [45] 中野寛之, 高橋弘毅 A, 田越秀行, 佐々木節, 常定芳基, 神田展行, 辰巳大輔, The TAMA Collaboration, ブラックホール準固有振動重力波の探索テンプレートの設計, 日本物理学会 2003 年秋季大会 (2003 年 9 月, 宮崎ワールドコンベンションセンター).
- [46] 常定芳基, 神田展行, 中野寛之, 辰巳大輔, 田越秀行, 高橋弘毅 他 TAMA Collaboration, ブラックホール準固有振動にともなう重力波探査, 日本物理学会 2003 年秋季大会 (2003 年 9 月, 宮崎ワールドコンベンションセンター).

- [47] 高橋弘毅、田越秀行、神田展行、中野寛之、辰巳大輔、常定芳基、and The TAMA Collaboration, コンパクト連星合体重力波探査, 日本物理学会 2003 年秋季大会 (2003 年 9 月、宮崎ワールドコンベンションセンター).
- [48] 新井宏二、佐藤修一、高橋竜太郎、阿久津智忠、辰巳大輔、常定芳基、福嶋美津広、山崎利孝、長野重夫、安東正樹、森脇成典、武者満、神田展行、三尾典克、川村静児、藤本眞克、坪野公夫、大橋正健、黒田和明、TAMA Collaboration レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 のパワーリサイクリング XI (観測), 日本物理学会第 59 回年次大会 (2004 年 3 月、九州大学箱崎キャンパス).
- [49] 佐藤修一、新井宏二、高橋竜太郎、阿久津智忠、辰巳大輔、常定芳基、福嶋美津広、山崎利孝、長野重夫、安東正樹、森脇成典、武者満、神田展行、三尾典克、川村静児、藤本眞克、坪野公夫、大橋正健、黒田和明、TAMA Collaboration, レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 のパワーリサイクリング XII (検出器改良), 日本物理学会第 59 回年次大会 (2004 年 3 月、九州大学箱崎キャンパス).
- [50] 高橋竜太郎、新井宏二、佐藤修一、阿久津智忠、辰巳大輔、常定芳基、福嶋美津広、山崎利孝、長野重夫、安東正樹、森脇成典、武者満、神田展行、三尾典克、川村静児、藤本眞克、坪野公夫、大橋正健、黒田和明、TAMA Collaboration, レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 のパワーリサイクリング XIII (自動運転), 日本物理学会第 59 回年次大会 (2004 年 3 月、九州大学箱崎キャンパス).
- [51] 高城毅、安東正樹、坪野公夫, 直接干渉型宇宙重力波検出器の可能性, 日本物理学会第 59 回年次大会 (2004 年 3 月、九州大学箱崎キャンパス).
- [52] 黒田和明、大橋正健、三代木伸二、内山隆、石塚秀喜、山元一広、早河秀章、岡田淳、近藤寿浩、奥富聡、笠原邦彦、徳成正雄、阿久津朋美、藤本眞克、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、常定芳基、朱宗宏、新富孝和、山本明、鈴木敏一、斎藤芳男、春山富義、佐藤伸明、東保男、都丸隆行、坪野公夫、安東正樹、沼田健司、麻生洋一、植田憲一、米田仁紀、中川賢一、武者満、三尾典克、森脇成典、宗宮健太郎、竹野耕平、丹治亮、新谷昌人、高森昭光、神田展行、寺田聡一、長野重夫、田越秀行、中村卓史、佐々木節、田中貴浩、大原謙一、高橋弘毅、前田恵一、関戸文、阪田紫帆里、川添史子、宮川治、M.E. Tobar 大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) 計画 VII, 日本物理学会第 59 回年次大会 (2004 年 3 月、九州大学箱崎キャンパス).
- [53] 麻生洋一、安東正樹、Riccardo DeSalvo、大塚茂巳、南城良勝、坪野公夫, Suspension Point Interferometer による低周波防振 III, 日本物理学会第 59 回年次大会 (2004 年 3 月、九州大学箱崎キャンパス).
- [54] 飯田幸美、高森昭光、安東正樹、坪野公夫, 磁気浮上型加速度計の開発, 日本物理学会第 59 回年次大会 (2004 年 3 月、九州大学箱崎キャンパス).
- [55] 阿久津智忠、新井宏二、佐藤修一、高橋竜太郎、辰巳大輔、常定芳基、川村静児、藤本眞克、他 The TAMA Collaboration, 重力波検出器 TAMA300 レーザー雑音による寄与の推定, 日本物理学会第 59 回年次大会 (2004 年 3 月、九州大学箱崎キャンパス).
- [56] 辰巳大輔、常定芳基、他 TAMA Collaboration, TAMA300 オンライン雑音解析 (2), 日本物理学会第 59 回年次大会 (2004 年 3 月、九州大学箱崎キャンパス).
- [57] 安東正樹、新井宏二、長野重夫、高橋竜太郎、佐藤修一、辰巳大輔、常定芳基、神田展行、川村静児、Peter Beyersdorf、Zonh-Hong Zhu、沼田健司、飯田幸美、麻生洋一、三尾典克、森脇成典、宗宮健太郎、三代木伸二、近藤寿浩、高橋弘毅、端山和大、他 TAMA Collaboration, TAMA300 データを用いたバースト重力波解析 II, 日本物理学会第 59 回年次大会 (2004 年 3 月、九州大学箱崎キャンパス).
- [58] 阿久津朋美、岡田淳、早河秀章、内山隆、三代木伸二、大橋正健、黒田和明、安東正樹、神田展行、辰巳大輔、寺田聡一、他 TAMA Collaboration, ALF フィルタを用いた TAMA300 データのバースト重力波解析, 日本物理学会第 59 回年次大会 (2004 年 3 月、九州大学箱崎キャンパス).
- [59] 常定芳基、神田展行、中野寛之、辰巳大輔、新井宏二、田越秀行、高橋毅弘 他 TAMA Collaboration, ブラックホール準固有振動に伴う重力波とイベント選別, 日本物理学会第 59 回年次大会 (2004 年 3 月、九州大学箱崎キャンパス).
- [60] 寺田聡一、辰巳大輔、阿久津朋美、岡田淳、大橋正健、黒田和明、TAMA Collaboration, レーザー干渉計型重力波検出器における時系列伝達関数補正, 日本物理学会第 59 回年次大会 (2004 年 3 月、九州大学箱崎キャンパス).

招待講演

- [61] 安東正樹, 重力波をとらえる, ICEPP Symposium 10 (2004 年 2 月 岳美山荘, 白馬, 長野).
- [62] 安東正樹, 干渉計型重力波検出器入門, 重力波物理学冬の学校 (2004 年 2 月 京都大学 基礎物理研究所, 京都).
- [63] 安東正樹, 重力波をもとめて, TEA03: New Direction of Particle Physics (2003 年 10 月 京都大学基礎物理研究所, 京都).

6.5 佐野研究室

佐野研究室では、熱平衡から遠く離れた系に起こる自発的な秩序形成や乱れの現象に潜む法則を実験的・理論的に解明することを目的としている。そのために非線形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流体現象においてその存在が広く知られていた。しかし、非線形力学系における分岐理論や相空間アトラクターの概念、カオスなどの理解の進展により、流体力学的現象がより具体的かつ新たな枠組みで捉えられるとともに、さらに大きなクラスである非線形力学系が持つ一般的性質の一つとして体系が再編成されつつある。そのような観点からは、流体力学、固体力学、粉体、化学反応系、生命システムまで含めてパターン形成や非線形振動、カオスや乱流といった現象の力学は共通した面を持っており、系の詳細によらず統一的に議論し扱うことが可能である。また一方で、非平衡現象は多彩であり、系の対称性や境界条件、初期条件、有効な自由度の数などにより多様な運動形態が生じ、普遍性だけではなくくりきれない多様性と新奇な現象が発見される宝庫でもある。したがって研究の戦略としては、典型的と思われる非平衡系の実験系を選び、良く制御された実験を行い非平衡度を上げていった時に見られる新たな現象を詳細に観測すると言ったアプローチを取っている。また、実験結果と理論との緊密なフィードバックにより新たな手法開発と概念構築を目指している。

6.5.1 散逸系の研究

熱乱流の究極状態

発達した乱流状態を調べるのに、熱乱流系は様々の点で優れた実験系である。本研究では、Rayleigh-Benard 対流系を用いて制御パラメータであるレイリー数が極めて高い状態を実現し、発達した熱乱流における普遍的な法則を探求している。具体的には、非平衡度の高い極限でどのような乱流状態が実現されるのか、またその時、温度と速度境界層はどのような統計的性質を持つかなど、熱乱流の基本問題の解決を目的とし、液体水銀を作用流体とする発達した熱乱流研究を行っている。従来、熱対流系では速度場の計測に困難があったが、超音波流速測定法 (USV) を用い時間空間の両面から捉えるための実験系を立ち上げ、水銀対流内の速度分布の時間発展を測定することに昨年度初めて成功した。

散乱体として比重の同じ金 - パラジウム合金を作成し、200 ミクロン程度の粒子にして混入させることでエコーの検出に成功し、中心軸に沿った垂直方向の速度分布の時間発展を長時間にわたり測定することが可能になった。この結果から、乱流中に巨視的流れが存在し、上半分では上昇流、下半分では下降

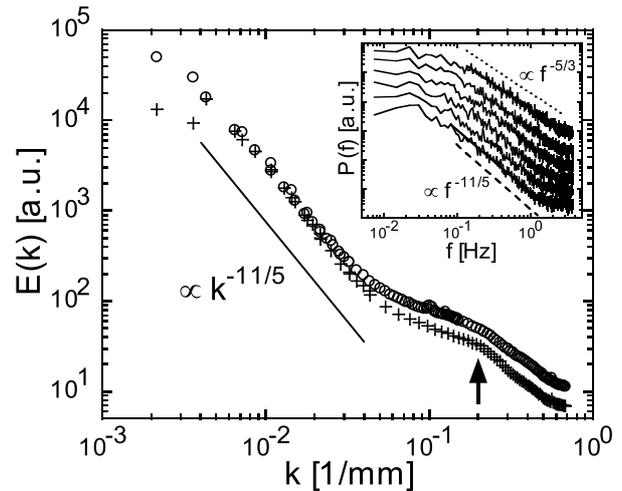


図 6.5 a: 熱乱流における Taylor 仮説を使わないエネルギースペクトラム: $Ra = 4.79 \times 10^{10}$ 、挿入図は Taylor 仮説を使用したもの。測定場所により傾きが異なる。

流が主流となっており、その境界が時間的に変動しているため、一点での速度ゆらぎの確率密度分布は 2 ピーク型の分布となることがわかった。また、上側の境界層付近では低温で下降する励起構造と上昇してきた巨視的流れが衝突して、速度の向きが反転する位置が存在することがわかった。(下側境界では逆のことが起こっている。) 乱流の統計的性質に関しては、空間速度分布からフーリエ変換により直接エネルギースペクトラム $E(k)$ を決定した。 $E(k)$ の計算に Taylor 仮説を用いず直接測定を行った実験は我々の知る限りではこれが初めてである。その結果を図 6.5 a に示す。理論的には Obukov 等により予測された $E(k) \sim k^{-11/5}$ の関係に極めて近い結果が得られた。さらに、空間の各点における速度の確率密度関数を測定すると図 6.5 b のように 2 ピークの構造を持つ分布関数が得られ、乱流中に発生した平均流が上下に往復運動していることが明らかになった。これらのことは、主成分分析や条件付サンプリングでも確認され、複雑なダイナミクスは、熱乱流における平均流の生成機構と安定性に深く関わるものであることが示唆され、さらに詳しい研究を行っている [5]。

流体と変形する境界の相互作用が生み出すカオス

境界条件は流体の運動を考える場合不可欠である。境界が柔らかく、流体運動によって変形を受け、同時に境界条件の変形が流体運動に影響を与えるような状況では、相互作用により複雑な運動が発生しうるため、標記の問題は重要な課題となっている。ここではそのような運動の例として、流体を含むチューブの安定性と運動に関する研究を行った。チューブ内を流れる流体の速度が増すとチューブの運動は、静止状態、振動状態、カオス的運動へと次々と遷移し

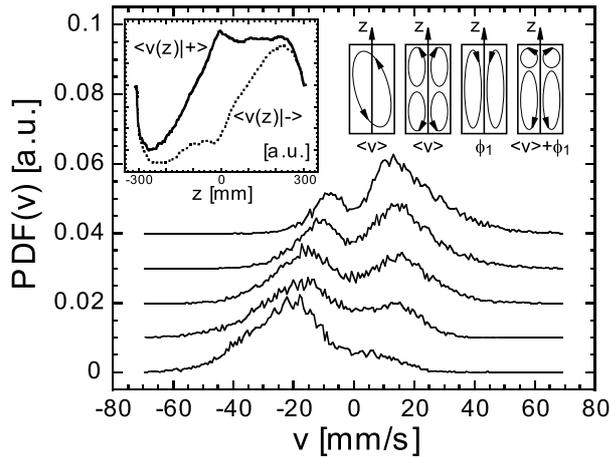


図 6.5 b: 速度の確率密度分布、挿入図は条件付サンプリングによる速度空間分布と予想される平均流の発展形式

ていく。チューブの端点が固定されている場合と回転可能な場合の2つの端点境界条件について運動を記録し、画像解析やフーリエ解析から相図を作成し比較を行った。その結果、端点が回転可能な場合は、系の回転対称性のため運動の分岐が一変し、相図の全体構造も大きく変わることが明らかになった。これは回転のゴールドストーンモードと新しく生成する分岐が結合するためと解釈される。理論的には2次元までは実験結果と定性的に一致する結果が得られているが3次元の問題は未解決である [2]。

一次元散逸粒子系における協同拡散の異常

粉粒体に代表される散逸粒子系の振舞いは、近年の統計力学の一つの課題となっている。非平衡定常状態下の1次元散逸粒子系においては、粒子が散逸によりクラスター化し、空間分布がフラクタル的になることや、粒子系の状態方程式が構築できることなどが数値的に示されている。平衡状態とは異なり、粒子のクラスターは非常に動的であるが、これまではその静的な側面しか研究されてこなかった。この研究では、1次元散逸粒子系にランダムな外場を加えて数値計算を行い、非平衡定常状態下での粒子の分布の時空間構造を調べた。粒子の反発係数 $r \rightarrow 0$ の極限で、粒子の空間相関、時間相関がともに傾き $1/2$ のべき乗則に従うことを見出した。また動的構造因子が Fick の法則を破って $S(q, t) \sim \exp(-Dq^2t^2)$ のように振舞うことを見出した。これは大きさ l 程度のクラスターが特性時間 l/\sqrt{D} で ballistic に緩和することを意味する。このときの1粒子の拡散は、粒子の平均自乗距離が時間に比例する通常の拡散的振舞いを示す。そのような1粒子の振舞いにもかかわらず、協同拡散には異常が現れる。この異常の起源の解明は今後の課題である。さらにこの関数形から、空間相関と時間相関のべきの指数が一致することを理論的に確かめた。

膜弾性と結合した相分離パターンのダイナミクス

一般に、多成分からなる膜面内で相分離が進行すると、膜の平面的構造は不安定化する。ところが、微小空間に閉じ込められた流体膜は立体斥力相互作用によって安定化する。相分離の不安定性と膜弾性が競合する結果、膜面内にマイクロ相分離した構造が出現する。Ginzburg-Landau 型のモデル自由エネルギーを理論的・数値的に解析し、膜面内における特徴的な遅い秩序形成の動力学を明らかにした [3]。

流体場の非平衡ゆらぎが示す長距離相関

定常的な濃度勾配を持つ溶液がシア流にさらされたときの空間相関関数を fluctuating hydrodynamics にもとづいて解析的に導出し、初めて長距離での非平衡揺らぎの振る舞いを明らかにした。従来の知見 q^{-4} (q : 波数) に反し、驚くべきことに十分長距離では異常な相関はより強い減衰 $q^{-4/3}$ へと crossover する。近年の光散乱技術の進歩によって、これらの予測は実験的に検証可能である [1, 4]。

6.5.2 非線形系としての生命システム

人工遺伝子ネットワークによる細胞内ダイナミクスの定量的解析

分子生物学の発展により、核酸やタンパク質などの機能に関する「分子レベルでの理解」が飛躍的に進歩した。しかしながら生物は、分子という「部品」によって構成された「システム」の総体であり、その本質はシステムの構造と振る舞いにある。したがって生命の本質的理解には、これまでに得られた分子という「部品」の知識を基盤に「システム」の全体構造とダイナミクスに着目した「システムレベルでの理解」が不可欠である。近年、複雑と思われていたネットワークは高度にモジュール化され、各々のモジュールを構成する分子には特徴的な結合パターンがあることが明らかとなってきた。本研究では、ポジティブフィードバックが細胞周期、概日振動、発生過程で頻繁に見出されていることに着目し、(1)人工遺伝子ネットワークと(2)GFPによる *in vivo* ダイナミクス解析という方法を用いて、ポジティブフィードバックのシステム特性を定量的に明らかにすることを目的として実験を行った。

また、ポジティブフィードバックを理論的に解析するためにモデル方程式を構築した。これまでの理論的研究は、定性的に現象を再現するが、タンパク質とDNAの解離定数や mRNA およびタンパク質の分解速度などの未知パラメータに任意性を伴い、定量的に事実を記述しているかどうか不明確であった。そのような問題を解決するため、遺伝子発現の時系列データから *in vivo* パラメータを抽出・定量化する方法を考案し、その結果、理論的 *in vivo* ダイナミクスの定性的・定量的解析に成功した。モデル方程式の考察から、ポジティブフィードバックの有無に

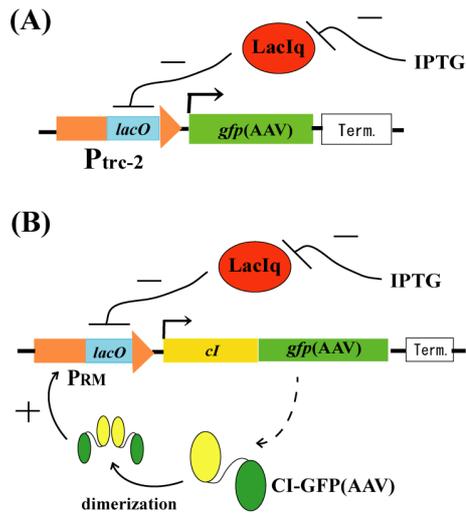


図 6.5 c: 作成した人工遺伝子ネットワーク (A) フィードバックなし (B) ポジティブフィードバック

よって遺伝子発現の *in vivo* ダイナミクスに変化が現れ、時間遅れが生じることを理論的に予測し、それを検証する実験を行った。その結果、ポジティブフィードバックのある系では実際に時間遅れが生じることが明らかとなった。これらの結果は、システムレベルでの生命現象の定量的解析の発展につながる大きな一歩であるといえる。

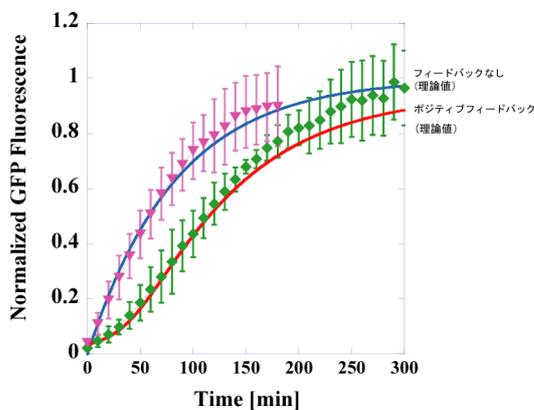


図 6.5 d: ポジティブフィードバックによる遺伝子発現の時間遅れ フィードバックなし (実験値) ポジティブフィードバック (実験値)

高分子電解質の非線形弾性応答

”等しい電荷符号を持つ分子鎖どうしに引力が働く”、この一見直感に反した現象はDNAやアクチンフィラメント、微小管などの生体高分子に広く見られる。DNAの凝縮転移現象は静電効果が引き起

こすユニークな相転移の代表例であるが、通常の平均場近似では説明できず、物理・化学分野の未解決問題として大きな関心を集めている。さらに近年、細胞内や核内への遺伝子輸送への応用を目指し、この現象が生物・医学分野でも注目されている。昨年度までの研究において、凝縮転移下における1分子DNAの力学応答には、1次相転移が生じていることを示すプラトー特性や非線形非平衡状態でスティックリリース応答が現れることが実験的に明らかとなった。本研究では、凝縮DNAの特異な力学応答をミクロレベルから理解するため、対イオンの自由度を考慮した高分子電解質のランジュバン動力学シミュレーションを行った。その結果、高分子・対イオン複合体の凝縮が著しい場合には引っ張りに対して鎖内部に弾性エネルギーが蓄積され続け、やがて急激な内部構造の崩壊とともに間欠的にエネルギーが解放される。その結果、力学応答がスティックリリース応答を示すことがわかった。これらの結果は、電荷による相転移と強い非平衡性が競合する系のダイナミクスに注目した数少ない報告例のひとつである。

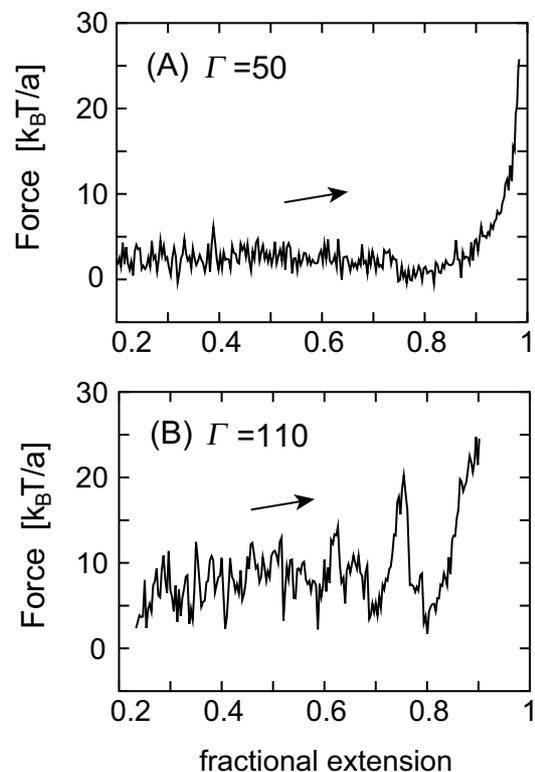


図 6.5 e: シミュレーションから得られた張力曲線: (A) Force-plateau および (B) Stick-release pattern. Γ は熱エネルギー ($k_B T$) に対する静電相互作用の強さをあらわす無次元パラメータ。

DNA凝縮転移における対イオン交換

高分子電解質の凝縮転移現象を解明するためには、高分子鎖を遮蔽する対イオンの振る舞いを理解することが不可欠である。本研究では2種類の蛍光色素、YO-PRO-1 (2+), YOYO-1 (4+) を用いて、凝縮転移下における対イオンの交換過程を調べた。これらの色素は対イオンとして振る舞うと同時にDNAに結合することで蛍光を発するため、蛍光強度変化から色素の結合率を見積もることができる。その結果、凝縮剤であるスperlミジン (3+) 濃度の増加にともない蛍光強度は単調に減衰するが、凝縮転移濃度を境に減衰が大きく変化することが分かった。この結果は色素 → スperlミジンの対イオン交換が生じていることを示すと同時に、色素の親和性がDNAの形態に依存して変化することを示している。またこれらの実験結果は、対イオン凝縮と対イオン競合下での化学平衡を考慮することで理論的に説明可能であることが分かった。

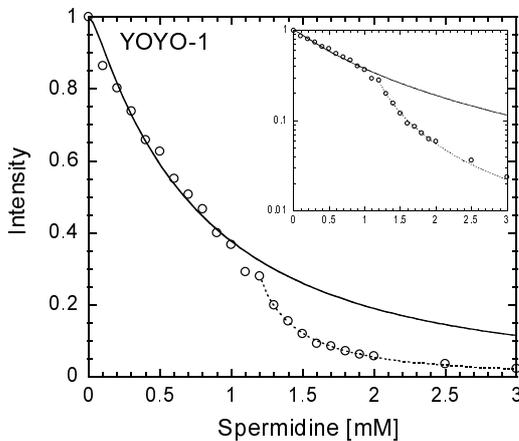


図 6.5 f: YOYO-1 蛍光強度のスperlミジン濃度依存性 (実線、点線は理論曲線)

変異複製系における空間構造形成

しばしば、進化は物理的空間を伴うが、空間の進化に対して果たす役割は明らかではない。そこで、空間構造と進化の間の相互作用を理解することを目指して数値計算を行った。ここで想定しているのは、変異を伴いながら要素が空間上で複製していく系である。空間構造 (パターン) は、要素の取捨選択に拘束条件を与え、また、選択された要素が空間構造を形成する。この時、仮に要素同士の相互作用が陽に存在しなくとも、Darwin 的な適者生存の概念を超える高次の選択が創発するのではないかと考え、その検証を行った。まず、複製系における成長パターンにおいて、Eigenのエラーカストロフィー理論が受ける修正について調べた。その結果、以前に知られていた結果とは異なり、2次元成長パターンにおいては、エラーカストロフィーの生じる臨界変異率

P_c は開放系における場合よりも常に高い値となり、かつ、拡散係数無限小の極限においても、 P_c が有限の値に留まることを発見した。これは、野生型の成

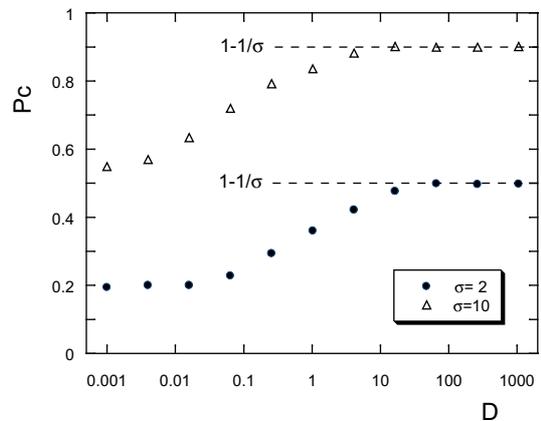


図 6.5 g: 拡散係数 D とエラーカストロフィーの生じる臨界変異率 P_c の関係。 σ は、野生型の変異型に対する選択的優位性

長速度が変異型よりも速いため、変異型が現れてもこれを空間的に抑制するためであることが分かった。現在、配列情報を持った複製分子が空間上で複製を繰り返す系をセルラーオートマトンにより構成している。このような系においては、線型成長が実現するために変異蓄積が容易となり、かつ、先の研究から得られた空間的な抑制効果が、複製粒子の環境への急速な適応を促すと期待できる。また、以上の結果を実験的に示すことを試みている。まず、ゲルと膜からなる2次元複製系を構成し、RNA複製酵素である $Q\beta$ Replicase による RNA 複製の観察に成功した。現在、局所的に添加した鋳型 RNA から複製される成長パターンの観測を目指して実験を行っている。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] H. Wada, and S. Sasa: Anomalous Pressure in Fluctuating Shear Flow, Phys. Rev. E 67, 065302(R) (2003)
- [2] S. Kuronuma and M. Sano: Stability and Bifurcations of Tube Conveying Flow, J. Phys. Soc. Jpn. 72, 3106-3112 (2003)
- [3] H. Wada: Dynamics of Phase Separation in Confined Two-component Fluid Membrane, J. Phys. Soc. Jpn. 72, 3142-3150 (2003)
- [4] H. Wada: Shear-induced quench of long-range correlations in a liquid mixture, Phys. Rev. E 69, 031202 (2004)
- [5] T. Mashiko, Y. Tsuji, T. Mizuno, and M. Sano: Instantaneous Measurement of Velocity Fields in Developed Thermal Turbulence in Mercury, Phys. Rev. E 69, 036306 (2004)

(会議抄録)

- [6] H. Wada: Dynamics of Phase Separations in Confined Two-Component Fluid Membranes, AIP Conference series (2004) in press.
- [7] Y. Murayama and M. Sano: Reentrant Collapsing Transition of Single DNA Molecules: Elastic Response Depending on Spermidine Concentration, AIP Conference series (2004) in press.
- [8] 益子岳史、辻義之、水野孝俊、佐野雅己:「超音波ドップラー法による熱乱流速度場の測定」、理論応用力学講演会講演論文集 53 巻 507-508 (2004 年 1 月)
- [9] 佐野雅己、益子岳史、水野孝俊、辻義之:「熱乱流と乱流速度場の計測: 最近の発展」、九州大学応用力学研究所研究集会報告 15ME-S5、乱流研究の異分野融合と新たな創成、23-30 (2004 年 3 月)

(学位論文)

- [10] 片野厚人: AFM によるタンパク質の伸張過程とミクロ非平衡現象 (修士論文)
- [11] 小林康明: 1 次元系の非平衡定常状態における輸送とゆらぎ (修士論文)
- [12] 鳥谷部祥一: 変異複製系における空間構造形成 (修士論文)

(著書)

- [13] スペクトル解析ハンドブック、佐野雅己 (共著) 1-640 (2003、朝倉書店)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [14] H. Wada, Y. Murayama, and M. Sano: Simple Model on Mechanical Responses of Collapsed DNA Chains, International school of physics, Enrico Fermi "The physics of complex systems (New advances and perspectives)", July 1-11, 2003, Varenna (Lake Como), Italy.
- [15] Yusuke T. Maeda and Masaki Sano: Quantitative Experimental Analysis of a Genetic Positive Feedback Module, International Symposium New Horizons in Molecular Sciences and Systems: An Integrated Approach, October 16-18, 2003, Okinawa, Japan.
- [16] H. Wada: Dynamics of Phase Separations in Confined Two-Component Fluid Membranes, The 3rd International Symposium on Slow Dynamics in Complex Systems, November 3-8, 2003, Sendai, Japan.
- [17] Y. Murayama and M. Sano: Reentrant Collapsing Transition of Single DNA Molecules: Elastic Response Depending on Spermidine Concentration, The 3rd International Symposium on Slow Dynamics in Complex Systems, November 3-8, 2003, Sendai, Japan.

- [18] T. Mashiko, M. Sano, Y. Tsuji, T. Mizuno: Pattern Dynamics of Velocity Fluctuations in High Rayleigh Number Thermal Turbulence, 56th annual meeting of Division of Fluid Dynamics, American Physical Society, November 23-25, 2003, New Jersey, USA.
- [19] K.Sugawara, T.Mizuguchi, H.Nishimori, T.Kazama, T.Tao, H.Nakagawa, Y.Hayakawa and M.Sano, Collective Dynamics of Active Elements: group motions, task allocation and pheromone trailing, International Symposium on Dynamical Systems Theory and Its Applications to Biology and Environmental Sciences, March 14-17, 2004, Hamamatsu, Japan
- [20] H. Wada, Y. Murayama and M. Sano: Nonlinear mechanical responses of a collapsed polyelectrolyte, Dynamics of Complex Fluids, March 8-10, 2004, Kyoto, Japan.
- [21] Y. Murayama and M. Sano: Exchange of Counterions in DNA Condensation, Dynamics of Complex Fluids, March 8-10, 2004, Kyoto, Japan.

招待講演

- [22] M. Sano, T. Mashiko, T. Mizuno, and Y. Tsuji: Instantaneous Measurement of Velocity Fields in High Rayleigh Number Thermal Convection of Mercury, Euromech 443 Colloquium and High Rayleigh Number Thermal Convection, June 9-20, 2003, Leiden, Holland.
- [23] M. Sano and Y. Murayama: Single Molecule Observation of the Reentrant Collapsing Transition of DNA, JSPS-DST Asia Academic Seminar: NCBS Japan Workshop on "Single Molecule Biophysics", January 4-9, 2004, Bangalore, India.

(国内会議)

一般講演

- [24] 益子岳史、辻義之、水野孝俊、佐野雅己:「水銀熱乱流における速度境界層の測定」、日本流体力学会年会 2003 (東京) 2003 年 7 月 28-30 日
- [25] 和田浩史、村山能宏、佐野雅己:「Simple Model for Mechanical Responses of Collapsed DNA」、ソフトマターの物理学 2003 - 普遍性と多様性 (京都大学基礎物理学研究所) 2003 年 7 月 30 日 - 8 月 1 日
- [26] 和田浩史、村山能宏、佐野雅己:「Simple Model for Mechanical Responses of Collapsed DNA Chains」、第 4 回関東ソフトマター研究会 (東京都立大学) 2003 年 8 月 19 日
- [27] 益子岳史、辻義之、水野孝俊、佐野雅己:「水銀熱乱流における速度場の即時測定」、日本物理学会 2003 年秋季大会 (岡山大学津島キャンパス) 2003 年 9 月 20-23 日
- [28] 和田浩史:「閉じ込められた流体膜内の相分離ダイナミクス」、日本物理学会 2003 年秋季大会 (岡山大学津島キャンパス) 2003 年 9 月 20-23 日

- [29] 片野厚人、佐野雅己：「生体分子の伸張実験による自由エネルギー曲面の測定」、日本物理学会 2003 年秋季大会（岡山大学津島キャンパス）2003 年 9 月 20-23 日
- [30] 辰己創一、佐野雅己：「MBBA 液晶対流中におけるパターンの安定性」、日本物理学会 2003 年秋季大会（岡山大学津島キャンパス）2003 年 9 月 20-23 日
- [31] 村山能宏、佐野雅己：「DNA 凝縮転移と対イオン交換」、日本生物物理学会第 4 1 回年会（朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター）2003 年 9 月 24-26 日
- [32] 佐野雅己：「水銀による熱対流乱流」、研究集会「地球コアの対流とその基礎物理」（海洋科学技術センター）2003 年 9 月 30 日
- [33] 松尾美希：「ガラスのなかの記憶構造」、統計数理研究所研究会 動的システムの情報論（3）（統計数理研究所，東京）2003 年 11 月 28-30 日
- [34] 和田浩史、村山能宏、佐野雅己：「Semiflexible Polymer 一分子の凝縮構造と弾性」、平成 15 年度高分子基礎研究会（国民休暇村大久野島，広島）2003 年 12 月 4-6 日
- [35] 前多裕介、佐野雅己：「Quantitative Experimental Analysis of a Genetic Positive Feedback Module」、第 26 回日本分子生物学会年会（神戸国際会議場）2003 年 12 月 10-13 日
- [36] 益子岳史、辻義之、水野孝俊、佐野雅己：「超音波ドップラー法による熱乱流速度場の測定」、第 53 回理論応用力学講演会（東京）2004 年 1 月 27-29 日
- [37] 鳥谷部祥一、石田良、前多祐介、村山能宏、佐野雅己：「変異複製系における空間構造形成」、日本物理学会第 59 回年次大会（九州大学箱崎キャンパス）2004 年 3 月 27-30 日

招待講演

- [38] 佐野雅己：「生命非平衡論の新局面」松下貢先生還暦記念講演会（中央大学駿河台会館）2003 年 5 月 10 日
- [39] 佐野雅己、村山能宏、前多裕介：「DNA の物理と遺伝子発現の制御」、第 18 回生体・生理工学シンポジウム（新潟）2003 年 10 月 8 日
- [40] 佐野雅己、益子岳史、水野孝俊、辻義之：「熱乱流と乱流速度場の計測：最近の発展」、研究集会：乱流研究の異分野融合と新たな創成（特別講演）（九州大学応用力学研究所）2003 年 12 月 4 日
- [41] 佐野雅己：「DNA と遺伝子ネットワーク：実験から解析まで」（東北大学電気通信研究所、工学研究会）2003 年 12 月 19 日
- [42] 佐野雅己：「非線形動力学とその周辺」、蔵本由紀先生退官記念講演会（京都大学、大学会館）2004 年 4 月 17 日

(セミナー)

- [43] 村山能宏：「凝縮 DNA の 1 分子力学応答」（東北大学理学研究科）2003 年 11 月 6 日
- [44] 松尾美希：「不規則系の記憶概観」（九州大学理学部）2003 年 3 月 23 日
- [45] 前多裕介：「人工遺伝子ネットワークによるシステムバイオロジー」（東京大学遺伝子実験施設）2004 年 4 月 26 日

6.6 山本研究室

6.6.1 はじめに

星と星との間にはガスと塵からなる希薄な雲（星間雲）が漂っている。星間雲の中でも比較的密度が高いものが星間分子雲で、恒星が形成される場所として銀河系における物質循環の主要経路にあっている。本研究室では、星間分子雲に存在する原子・分子に着目して、サブミリ波望遠鏡による観測的研究と、実験室における分子分光実験を行っている。これらを通して、星間分子雲の構造、形成、進化を物質的視点から研究している。

サブミリ波、テラヘルツ領域（波長 1 mm から 0.1 mm）は、天文学における未開拓の波長域である。本研究室では、わが国ではじめてのサブミリ波望遠鏡（口径 1.2 m）を富士山頂に設置して観測を行っている。中性炭素原子の放つ $^3P_1-^3P_0$ （周波数 492 GHz; 波長 0.6 mm）と $^3P_2-^3P_1$ （周波数 809 GHz; 波長 0.4 mm）の微細構造スペクトル線について、星間分子雲スケールでの広域観測を展開しており、その分布を一酸化炭素の分布などと比較することで、星間分子雲の形成・進化を解明しつつある。また、このような研究を銀河系スケールで展開するために、口径 18 cm 可搬型サブミリ波望遠鏡を開発し、チリ・アタカマ砂漠の高地で運用している。さらに、国立天文台が中心となって推進する ASTE、ALMA (Atacama Large Millimeter Array) にも参加している。

一方、テラヘルツ帯での観測を実行するために、超伝導ホットエレクトロン・ポロメータ・ミクス素子の開発を国立天文台野辺山観測所のグループと共同して行なっている。本年度から、研究室内に素子製造装置を順次導入して開発を進める。この素子を用いて 1.47 THz の窒素イオンのスペクトル線の広域観測を実現することで、銀河系における星間プラズマの分布と運動を明らかにし、プラズマ相から原子相、分子相に至る星間雲の「相変化」を解明する。この研究を通して、テラヘルツ天文学を創生したい。

6.6.2 富士山頂サブミリ波望遠鏡

富士山頂サブミリ波望遠鏡（口径 1.2 m）は、わが国初めてのサブミリ波望遠鏡である。冬季の富士山頂はサブミリ波天体観測を妨げる水蒸気が少なく、絶好の観測サイトである。その優れた観測条件を生かして、中性炭素原子のサブミリ波微細構造スペクトル線を観測し、星間分子雲の構造、形成、およびそこでの星形成を研究している。

富士山頂サブミリ波望遠鏡は 1995 年度より製作を開始し、1998 年 7 月に富士山頂に設置された。その後、衛星通信回線を利用した遠隔制御によって観測運用を行っている。これまでに 6 回の観測シーズンで、492 GHz のスペクトル線については約 50 平方度の領域を観測できた。これは、他のグループと比べて観測領域の広さで 1 桁以上も上回るものであり、近傍星間分子雲における中性炭素原子の分布の全貌を描き出しつつある。また、809 GHz のスペクトル

線についても、代表的星間分子雲でのマッピング観測を世界ではじめて実現した。2003 年から 2004 年の観測シーズンにおいては、後で個々の報告で述べるように、492 GHz のスペクトル線の広域観測、詳細観測を推進した。

本研究はビッグバン宇宙研究センターの研究プロジェクトの 1 つとして推進しており、国立天文台の立松健一氏、関本裕太郎氏、野口卓氏、前澤裕之氏、大石雅壽氏、福井大学の斎藤修二氏、宇宙開発事業団の尾関博之氏、稲谷順司氏、理化学研究所の池田正史氏らとの共同研究である。

ρ Oph 分子雲へびつかい座 (ρ Oph) 領域には、活発な星形成領域とフィラメント状分子雲が隣接するという特徴的な構造を持つ分子雲（距離 145 pc）が広がっており、その分子雲形成過程と南西に付随する Sco OB2 アソシエーションの関係が指摘されている。我々は富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いた 5 シーズンにわたる観測により、この領域全体（約 6 平方度）の [C I] 492 GHz 輝線の分布を初めて捉えることに成功した。その結果、[C I] 輝線の大局的な分布は ^{13}CO のそれによく似ており、分子雲の内部にも豊富に C^0 が存在することが示された。個々の分子雲に注目すると、L1688 内には紫外線源から [C II]/CO/[C I] と並ぶ配列が存在し、その [C I] のピーク位置では、 A_V が非常に大きい (81 mag) にもかかわらず C^0 /CO 柱密度比が定常状態 PDR モデルによる予測より 1 桁近く大きい (0.076) ことが見出された。これは領域内の $\text{C}^0 \rightarrow \text{CO}$ の化学的進化が十分に進行していない可能性を示唆している。一方、フィラメント状分子雲 L1709 は、全体的に他の 2 つの星形成領域よりも小さい C^0 /CO 柱密度比を示すことから、化学的な進化がより進んだ領域であると考えられる。以上の結果は、Sco OB2 内で起きた超新星爆発の影響で、元々存在していた長大なフィラメント状分子雲の一部が圧縮されることにより星形成領域が形成されたとする説で矛盾なく説明できる。

B18 おうし座分子雲複合体に属する B18 分子雲のほぼ全領域にわたって、[C I] (492 GHz) 輝線によるマッピング観測を行った。その結果、4 つのコアにおいて、 $M_{\text{VIR}}/M_{\text{LTE}}$ 比や $N(\text{C})/N(\text{CO})$ 比がほぼ等しことが分かった。このことから、各コアは同じ化学進化段階にあると考えられる。一方、領域全体で平均された $N(\text{C})/N(\text{CO})$ 比は、これまで我々が観測を行ってきた HCL2 (0.41)、L1495 (0.37)、B213 (0.31) と比べて有意に低いこと (0.16)、そして、これらの分子雲中で、Class II までの YSO を考慮して $N(\text{C})$ および $N(\text{CO})$ から導かれる星形成率 ($M_{\text{star}}/M_{\text{gas}}$) が最も高いことも分かった。これらのことは、B18 分子雲は、複合体中で進化の進んだ段階にあることを示唆している。時間依存性 PDR モデルによる計算結果との比較においても、同様の進化段階の違いを示す結果が得られた。

W3/W4/W5 W3/W4/W5 領域（距離 2.3 kpc）は Perseus arm に位置する大質量星形成領域である。昨年度までに行った富士山頂サブミリ波望遠鏡による

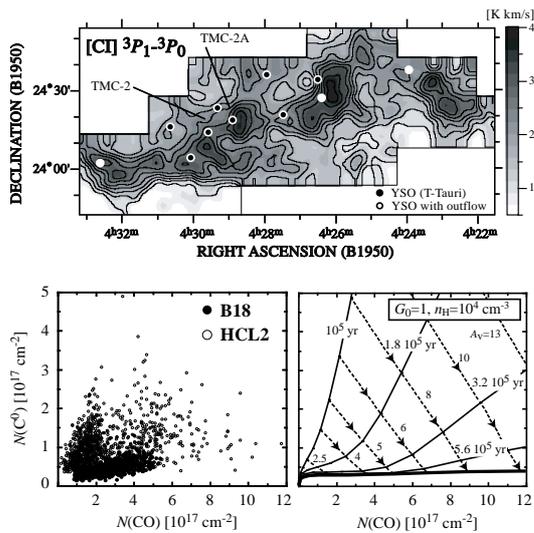


図 6.6 a: [CI] 輝線による B18 分子雲の積分強度マップ。Lowest コントアは 4σ (1 K km s^{-1}) で、 1.5σ きざみ。黒丸は T-tauri 型星 (Class II)、白丸はアウトフローが附随しているとされる YSO (Class 0 or I)。

W 3 領域の [CI] マッピングに加え、W4/W5 領域にも観測を広げた。その結果、[CI] の分布は W3/W4/W5 全領域において、大局的には CO の分布と似ていることがわかった。また、W3 領域において [CI] の強かった AFGL 333 領域と、その他、W 3 領域内にある大質量分子雲コアに対し、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて、様々な分子輝線の観測を行った。その結果、AFGL 333 領域でのみ CCS 輝線を検出できた。CCS 分子は化学進化の初期の段階をトレースすると考えられており、AFGL 333 領域が化学的に若い可能性を示唆している。さらに、AFGL 333 領域では、コアの質量が $1 - 3 \times 10^3$ と大質量であるにもかかわらず、活発な星形成が起きていない。これらのことは、AFGL 333 領域が分子雲進化の初期の段階にあり、[CI] が分子雲形成の初期に豊富に存在することを強く示唆している。

おうし座 L1521 領域 おうし座 L1521 領域については ^{13}CO 輝線、 C^{18}O 輝線の観測により複数の分子雲コアが発見されており、また T Tauri 型星の存在も知られている。我々は富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて、同領域の CI ($^3P_1 - ^3P_0$: 492 GHz) 輝線マッピング観測を行い、3 分角グリッドにて約 500 点を観測した。CI 輝線強度のピーク位置は ^{13}CO 輝線のそれとほぼ一致し、その方向での C 柱密度は $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ であった。一方で大局的な分布は CI と CO で大きく異なっており、北東の部分で C/CO 存在量が特に高い領域が見出された。この領域は可視減光も高く、光解離起源の C とは考え難い。むしろこれは、化学進化の若い段階にあり、 $\text{C} \rightarrow \text{CO}$ の変換が進行中の領域であると考えられる。

IC1396 領域 HII 領域内にある孤立した小分子雲には、表面の電離領域が可視光のリム構造として観測されるものがあり、これらは Bright-Rimmed Globule として知られている。本年度は、昨年度までに行なわれていた IC1396 領域の Bright-Rimmed Globule の [CI] $^3P_1 - ^3P_0$ 輝線のマッピング領域を拡大し、同領域中のグロービュール C, F, H における C^0 の分布を明らかにした。また野辺山 45m 望遠鏡を用いて IC1396 領域を観測し、 $\text{C}^{18}\text{O } J=1-0$ の分布、およびグロービュール中心での $\text{SO } J_N=3_2-2_1$, $\text{N}_2\text{H}^+ J=1-0$ 輝線強度を測定した。以上の観測から、次の結果を得た。1) 全てのグロービュールに対して、古典的な PDR モデルの描像が予言する [CI] のリム状構造は確認されなかった。[CI] 輝線のピークは CO ピークと同位置か、あるいは紫外線源に対して CO ピークの後方に見られた。2) C^0/CO 比は、IRAS ポイントソースが附随する、あるいは N_2H^+ 輝線の検出されるグロービュールにおいて系統的に低い値を示した。ピリアル解析からは、これらのグロービュールは、他のグロービュールに比べて重力束縛に近い状態にあることが分かっている。この結果は、 C^0/CO 比が分子雲の力学的進化段階と関連していることを示す。3) グロービュールの SO/CO の輝線強度比は、 C^0/CO 比の低いグロービュールにおいて低いことがわかった。一般に SO は分子雲の化学的な進化の後期で主に生成される分子であるため、この観測結果は、化学的に若い分子雲において C^0/CO 比が高くなるとする非定常化学モデルの結果と矛盾しない結果である。

λ -Orionis 領域 λ -Orionis に附随する分子雲リングに対して、[CI] $^3P_1 - ^3P_0$ 輝線のマッピング観測を行い、本年度までに、B30, B35, B228 分子雲を含む約 3500 点、2.2 平方度の領域のマッピングを完了した。B30, B35 分子雲に対しては、野辺山 45m 望遠鏡を用いて CO , ^{13}CO および C^{18}O の $J=1-0$ 輝線のマッピングも行った。B30, B35 分子雲はともに Bright-Rimmed Globule として知られているが、両分子雲内での CO , C^0 の柱密度分布は大きく異なることが分かった。B35 は、 C^0 と CO は空間的な拡がり、ピーク位置ともに略ぼ一致する構造を持つ。一方 B30 では、CO は IRAS のデータ解析から得られた可視減光度 (A_V) マップと同位置に柱密度ピークが現われるが、一方、 C^0 は分子雲の中心にはピークを持たず、分子雲と HII 領域の境界領域に沿って多く分布していることが分かった。B35 における CO と C^0 分布の相関は、オリオン分子雲や IC1396 領域など HII 領域に隣接した分子雲に多く見られる特徴であるのに対し、B30 は非常に特異な C^0 の分布を示しており、PDR に起源をもつ [CI] 輝線が観測されている可能性がある。

S252 S252 は、距離 2.0 pc にあるふたご座分子雲複合体中に存在し、励起星 (O6V) からの強烈な紫外線にさらされた分子雲である。[CI] 輝線による観測の結果、[CI] は分子雲内部にまで存在していることが分かった。また、[CI] ピークにおいて OMC-1 と同程度の高い C^0 の柱密度 (10^{18} cm^{-2}) が得られた。最近の [CI] 輝線観測から、OMC-1 や ρ -Oph、NGC1333 などにおいて、平衡平板構造を仮定した

標準 PDR モデル”が予想する C^0/CO 配列と矛盾するような CO/C^0 配列が報告されているが、S252 でもそのような CO/C^0 配列が確認された。さらに、野辺山 45m 鏡による C_2H と N_2H^+ 輝線のマッピング観測から、高密度領域が分子雲表層付近に存在し、[CI] はその後方に分布していることも分かった。以上の観測結果から、分子雲の密度構造がモデルと矛盾する配列を引き起こしている一つの要因である可能性があると考えられる。

M16/M17 領域 M16/M17 はともに銀河面近傍に位置する HII 領域であり、それぞれ質量 $10^5 M_\odot$ 以上の巨大分子雲が付随した活発な大質量星形成領域である。我々のグループでは一昨年、可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡を用いた観測により、M17 方向の CI 輝線スペクトルに速度幅 40 km s^{-1} に達する高速度成分を検出した。これは M16/M17 領域をエッジとする巨大なスーパーシェル構造に起因する分子雲形成初期の中性原子ガス成分の名残を見ていると考えられる。今回我々は、この M17 方向の高速度成分の空間分布を明らかにし、また同じ環境にある M16 領域に同様の高速度成分の有無を確認するため、富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて CI 492GHz 輝線による $3'$ グリッドのマッピング観測を行った。その結果、M17 分子雲に付随する高速度成分は分子雲コアの西側 $30' \times 30'$ ($15 \text{ pc} \times 15 \text{ pc}$) にわたって広域に分布していることが分かった。一方で M16 分子雲については、 $15'$ 四方の領域を平均したスペクトルに高速度成分の気配が 3σ レベルで見出されている。

銀河系中心領域 銀河系の中心数百パーセクの領域は、星の強い集中と大量の星間物質で特徴づけられる銀河系内で最も特異な領域である。この領域にある星間分子雲は、銀河系円盤部のそれに比べて高温・高密度であり速度幅が非常に広いことが知られているが、そのエネルギー供給メカニズムは重要かつ未解明の問題である。我々は、この領域においても特に速度幅の広い特異分子雲 “Clump 2” に対して、富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いた CI 492GHz スペクトル輝線のマッピング観測を行った。その結果、Clump 2 方向から $T_A^* = 1 \text{ K}$ 程度、速度幅 200 km s^{-1} の極めて広い輝線スペクトルを得た。その輝線プロファイルは、一酸化炭素分子 (CO) のそれと大きく異なっており、この分子雲が大規模な衝撃波によって加速・解離された可能性を示唆している。

6.6.3 可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡

本研究室では、小型 (口径 18cm) で可搬型のサブミリ波望遠鏡を開発・運用している。この望遠鏡は、中性炭素原子が放射する二本のサブミリ波スペクトル線 (CI $^3P_1-^3P_0$: 492GHz, $^3P_2-^3P_1$: 809GHz) による広域サーベイ観測を行うことによって、銀河系スケールにおける原子ガスの大局的分布・運動・物理状態を調べることを目的としている。この望遠鏡の特長は、可搬型のため世界中のあらゆる優良観測サイトに持ち込むことが出来、しかも主鏡口径が 18cm

と小さい (HPBW = $13' @ 492 \text{ GHz}$) のので広い領域をサーベイするのに適しているところにある。

2003 年 9 月、この望遠鏡を南米チリのパンパラボラ ASTE サイトに設置し、CI 492GHz 輝線による銀河面サーベイを開始した。観測は 11 月末の望遠鏡撤収まで行われ、銀経 300° から 355° の銀河面上を 1° おきに $\Delta T_A^* = 0.1 \text{ K} (1\sigma)$ を下回る高質なスペクトルを得た。今シーズンのサーベイ結果と、その解析結果について以下にまとめる (カラーページ参照)。

中性炭素原子の大局的分布 銀河系内域における炭素原子 (C^0) の大局的な分布・運動は一酸化炭素分子 (CO) のそれに酷似しており、銀河系回転に沿う運動をしていることが分かった。サーベイ領域に含まれる 3 つの銀河系の渦状腕のうち、 C^0 、CO とともに Scutum-Crux 腕と Norma 腕に付随する成分が特に顕著である。また励起モデル計算の結果から、銀河系円盤部の CI $^3P_1-^3P_0$ スペクトル輝線放射は、熱化が不十分かつ光学的に薄い雲、いわゆる “translucent clouds” と呼ばれる雲が支配的であることが分かった。

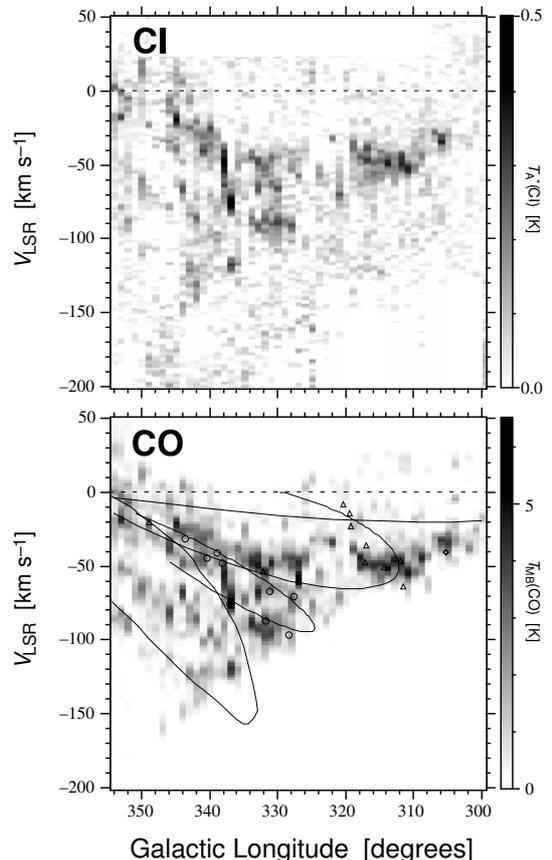


図 6.6 b: 銀河面上の CI $^3P_1-^3P_0$ 輝線および CO $J=1-0$ 輝線位置-速度図。

銀河半径依存性の検出 銀河系の回転曲線を仮定して、CI、CO 輝線放射強度の銀河半径分布を導出し

た。両輝線とともに銀河系中心から 4–6kpc の間に広い分布ピークを示し、CI/CO 輝線放射強度比はその分布ピーク両側で低くなる傾向が見られる。この結果に励起モデル計算を適用すると、 C^0/CO 存在比が銀河半径に対して単調に増加していく傾向が見出された。これは言い換えれば、銀河系内域の中性ガスは銀河中心に近いほど分子の形態をとる割合が高い事を示している。

渦状腕上での相変化の発見 位置-速度図の解析から、CI/CO 輝線放射強度比が高い領域は、銀河系回転に対して渦状腕の上流に位置する事が見出された。一般に重力ポテンシャルの極小点である渦状腕をガスが通過する際、主に原子相であった拡散ガス雲が集結し、星形成の母胎である星間分子雲という形態に数百万年の時間をかけて進化すると考えられている。我々の結果は、その渦状腕通過に伴う原子・分子相変化の過程、つまり渦状腕上での星間分子雲形成の過程を、初めて観測によって捉えたものである。

6.6.4 テラヘルツ帯ミキサ素子の開発

18 cm 可搬型サブミリ波望遠鏡などのサブミリ波望遠鏡を用いてテラヘルツ波帯域にある窒素イオンのスペクトル線 (NH:1.47 THz) の観測を行う目的で、国立天文台のグループ (野口卓氏、前澤裕之氏) と共同で Nb を用いた拡散冷却型 Hot-Electron Bolometer (HEB) ミクサ、および NbTiN を用いた格子冷却型 HEB ミクサを開発している。この目的のため、実験室にクリーンブースを設置し、素子製造装置一式を順次導入する。本年度は、100 nm サイズのブリッジ構造をもつ HEB 素子を製作するために、電子ビーム描画装置を導入した。

Nb 拡散冷却型 HEB ミクサの製作 本年度は国立天文台野辺山・三鷹のクリーンルームの露光装置・製膜装置などを用いて、前年度に引き続き 850 GHz 帯 HEB ミクサの製作試験を行った。超伝導体に Nb を用いた拡散冷却型 HEB ミクサの場合、望遠鏡に搭載する実用的なミキサ素子のスペックとして、超伝導細線の長さを 0.2 μm 程度、細線部のインピーダンスを 27 Ω 程度とする必要がある。そこで電子ビーム描画装置による描画工程や描画図形の形状などの改善を行い、また製作した素子の超伝導特性を良好に保つ観点から、製作プロセスにおける酸化膜除去エッチングなどの各工程で条件を変えての素子の試作を重ねた。その結果、目標とする設計のミキサ素子を歩留まり良く製作することが可能となった。そのミキサ素子は液体ヘリウムによる冷却において良好な超伝導特性を示している。

また、製作した HEB ミクサについて、野辺山の Joule-Thomson 型機械式冷凍機を用いて冷却を繰り返し行ったところ、液体ヘリウムによる冷却と同様の超伝導特性が得られ、それは数度の冷却サイクルに対して再現性を持つことが確認された。そして冷却状態の HEB ミクサに 800 GHz のサブミリ波を入

射したところミクサの電気特性に変化が見られた。更に常温および液体窒素温度の黒体輻射とのミキシングを試みたところ、IF 出力応答に明らかな変化があり、ミキシングの挙動が見られた。その差分スペクトルにはミクサの IF 帯域幅に対応する減衰が見出された。

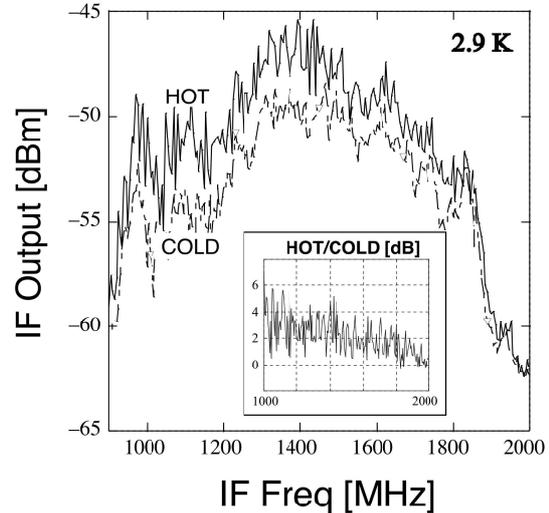


図 6.6 c: 850 GHz 帯 HEB ミクサ、常温 (Hot)・液体窒素 (Cold) を用いたミキシング試験で得られた IF 出力。内側は Hot-Cold の出力差。IF 周波数 1.5 GHz 付近で減衰が見られる。

NbTiN 格子冷却型 HEB ミクサの製作 我々は HEB ミクサに用いるもう一つの素材として NbTiN に着目している。NbTiN は、 SiO_2 基板に製膜が可能な上に、Nb に比べて酸化しにくくかつ臨界温度が高いなどの利点を持っている。NbTiN 薄膜は、Ar と N_2 の混合気体のもとで NbTi の合金ターゲットを使用して DC マグネトロンスパッタにより生成されるが、ターゲットのエロージョンなどの影響でスパッタ条件が一定せず、これが膜質の再現性を低下させている。我々は、Ar と N_2 の混合気体の全圧を 0.65 Pa に固定して圧縮応力が小さくかつ抵抗率が低い薄膜を得ている。さらに、 N_2 の流量を 0.5% (~ 0.01 sccm) の精度で、Ar と N_2 の混合気体の全圧を 0.15% (~ 0.001 Pa) の精度で測定できるようにスパッタ装置を改良して詳細な測定を可能にするとともに、エロージョンの効果を考慮したシミュレーションを構築している。これまでに、厚さ 300 nm の膜においては臨界温度 14.8 K、抵抗率 140 $\mu\Omega\text{cm}$ 、厚さ 3 nm の膜においても臨界温度 4.9 K、抵抗率 280 $\mu\Omega\text{cm}$ の良質な薄膜が得られている。これらの NbTiN 薄膜を用いて、850 GHz 用、1.5 THz 用の HEB ミクサの製作を始めている。

6.6.5 実験室分子分光

星間分子雲には微量ではあるが様々な分子が存在している。それらの中には、実験室の環境では寿命が短いフリーラジカルなどの「短寿命分子」が多数含まれている。そのような分子の回転スペクトルは実験室での測定が容易でないため、星間分子雲に存在することが予想されていても、スペクトル線の周波数がわからないために探査できていないものが多い。そこで、本研究室では「短寿命分子」の回転スペクトルを測定するためのフーリエ変換ミリ波分光計を開発してきた。本研究室のフーリエ変換分光器は、この種の分光器としては世界で唯一、85 GHz までの周波数をカバーし、それを生かして星間分子として予想される基本的な炭化水素ラジカルの回転スペクトルの研究を行ってきた。その結果、HCS, HSC, ビニルラジカル (C_2D_3), エチルラジカル (C_2H_5), シクロプロピルラジカル (C_3H_5) など重要な分子のスペクトルを明らかにする成果を挙げた。

なお、本研究室におけるテラヘルツ帯ミキサの開発実験の本格的開始に伴い、この実験は 2004 年 1 月をもって終了した。

エチルラジカル (C_2H_5) 基本的な炭化水素ラジカルであるエチルラジカル (C_2H_5) はメチル基の内部回転自由度を持つ。本研究では C_2H_5 の $1_{01}-0_{00}$ 遷移を探索し、電子スピンおよび核スピンによって分裂した 28 本のスペクトル群を測定した。ゼーマン効果を手がかりに、そのうち 22 本の遷移を内部回転量子数 $m=0$ の状態 (A_2'') に帰属することができた。それを元に、回転定数や微細・超微細構造相互作用定数をはじめ決定することができた。さらに微細・超微細構造の強度パターンに対して、状態間の混合効果を厳密に考慮したシミュレーションを行い、測定した強度パターンを再現するとともに、数本の帰属できないスペクトル線も拾い出すことができた。これらは内部回転量子数 $m=1$ の状態の回転スペクトルであると考えられる。

シクロプロピルラジカル (C_3H_5) シクロプロピルラジカルは、 α 位の水素原子 (H_α) が三員環面に対してトンネル効果によって反転運動を行う事が知られている。その分光学的な重要性にも関わらず、これまで回転遷移スペクトルの分光測定は行われていなかった。今回、我々は *ab initio* 計算で得られたシクロプロピルラジカルの分子定数に基づいて純回転遷移の周波数を予測し、フーリエ変換ミリ波分光計を用いて回転遷移スペクトルの検出を試みた。その結果、 $1_{11}-0_{00}$ 、そして $1_{10}-1_{01}$ 純回転遷移スペクトルを、それぞれ 37.4 GHz、10.6 GHz 領域で検出することに成功した。得られたスペクトルは微細や超微細構造分裂により極めて複雑なスペクトルパターンを示しており、現在のところ完全にはスペクトルの帰属はついていないが、類似分子のスペクトルパターンを手がかりに解析を行っている。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Hirota, M. Ikeda, & S. Yamamoto, "Mapping Observations of DNC and $HN^{13}C$ in Dark

Cloud Cores", *The Astrophysical Journal*, **594**, 859 (2003)

- [2] T. Hirota, H. Maezawa, & S. Yamamoto, "Molecular Line Observations of Carbon-Chain-Producing Regions L1495B and L1521B", *The Astrophysical Journal*, (submitted)
- [3] P.G. Ananthasubramanian, S. Yamamoto, T.P. Prabhu, and D. Angchuk, "Measurements of 220 GHz Atmospheric Transparency at IAO, Hanle, during 2000 - 2003", *Bull. Astr. Soc. India* (submitted).
- [4] T. Oka, M. Iwata, H. Maezawa, M. Ikeda, T. Ito, K. Kamegai, T. Sakai, & S. Yamamoto, "Submillimeter-wave CI Spectral Lines from the NGC 1333 Region", *The Astrophysical Journal*, **602**, 803 (2004)
- [5] K. Kamegai, M. Ikeda, H. Maezawa, T. Ito, M. Iwata, T. Sakai, T. Oka, S. Yamamoto, Y. Sekimoto, K. Tatematsu, T. Noguchi, S. Saito, H. Fujiwara, H. Ozeki, J. Inatani, & M. Ohishi, "Distribution of the [CI] emission in the ρ Ophiuchi Dark Cloud", *The Astrophysical Journal*, **589**, 378 (2003)
- [6] E. Kim & S. Yamamoto, "Fourier transform millimeter-wave spectroscopy of $CS(X^1\Sigma^+)$ and $SO(b^1\Sigma^+)$ in highly excited vibrational states", *J. Mol. Spectrosc.*, **219**, 296 (2003)
- [7] E. Kim & S. Yamamoto, "Fourier transform millimeter-wave spectroscopy of the ethyl radical in the electronic ground state", *J. Chem. Phys.* **120**, 3265 (2004)
- [8] N. Kuboi, T. Oka, Y. Aikawa, M. Ikeda, and S. Yamamoto, "The [CI] $^3P_2 - ^3P_1$ Line Distribution in the Orion Molecular Cloud 1 Region", *The Astrophysical Journal* (submitted).

(学位論文)

- [9] 亀谷和久, "Neutral Atomic Carbon Distribution in the ρ Ophiuchi Dark Cloud (へびつかい座暗黒星雲における中性炭素原子の広域分布)", 学位論文 (博士 (理学))
- [10] 金 銀淑, "Molecular Structure and Internal Motion of Hydrocarbon Radicals by Fourier Transform Millimeter-wave Spectroscopy (フーリエ変換ミリ波分光による炭化水素ラジカルの分子構造と分子内運動)", 学位論文 (博士 (理学))
- [11] 平松雄司, "冷凍機冷却ステージの温度安定化とへびつかい座北部領域における CI 輝線の観測", 修士論文
- [12] 酒井 剛, "Atomic Carbon in Molecular Clouds Interacting with Expanding HII Regions (膨張する HII 領域と相互作用した分子雲における中性炭素原子)", 学位論文 (博士 (理学))

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [13] S. Yamamoto, “CI results from Mt. Fuji Telescope”, Nagoya Workshop on Sub-mm Astronomy with NANTEN2, Nagoya, Japan (May 8–10, 2003)
- [14] T. Oka, S. Yamamoto, & Mt. Fuji Submillimeter-wave Telescope Group, “Atomic Carbon in the Galaxy”, Japan-UK Collaboration in Astronomy N+N meeting, Tokyo, Japan (December 11–12, 2003)
- [15] K. Shimbo, T. Sato, T. Oka, S. Yamamoto, H. Maezawa, & T. Noguchi, “Recent progress on THz HEB mixer”, “The 4th Workshop on Submillimeter-wave Receiver Technologies in Eastern Asia”, Korea Astronomy Observatory, Daejeon, Korea (November 27–28, 2003)
- [27] 佐藤高之、新保謙、岡朋治、山本智、前澤裕之、野口卓: NbTiN 薄膜を用いた HEB ミクサの開発、日本天文学会 (名古屋大学、2004 年 3 月)
- [28] 永井 誠: HEB ミクサ (1.5THz) 搭載用デューワーの製作、ミリ波・サブミリ波受信技術に関するワークショップ (名古屋大学、2004 年 3 月)
- [29] 永井 誠、岡 朋治、山本 智: [CI] 輝線による M16 分子雲の構造、日本天文学会 (名古屋大学、2004 年 3 月)
- [30] 伊藤哲也、岡 朋治、山本 智: 富士山頂サブミリ波望遠鏡による暗黒星雲 B335 の CI マッピング、日本天文学会 (愛媛大学、2003 年 9 月) (愛媛大学、2003 年 9 月)

(国内会議)

一般講演

- [16] 岡 朋治、山本 智、亀谷和久、林田将明、永井 誠、池田正史: 可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡 (POST18) による CI $^3P_1-^3P_0$ 輝線銀河面サーベイ (I)、日本天文学会 (名古屋大学、2004 年 3 月 22-24 日)
- [17] 亀谷和久、岡 朋治、山本 智: ρ Oph 領域における中性炭素原子の広域分布とその起源、日本天文学会 (名古屋大学、2004 年 3 月)
- [18] 金 銀淑、山本 智: シクロプロピルラジカルのフリーエ変換ミリ波分光、分子構造総合討論会、4Pp045 (神戸大学、2003 年 9 月)
- [19] 酒井剛、岡朋治、山本智: AFGL 333 領域にある活発な星形成を伴わない大質量分子雲コアの性質、日本天文学会 (愛媛大学、2003 年 9 月)
- [20] 酒井 剛、岡 朋治、山口伸行、ASTE チーム: ASTE によるふたご座 S254-S257 領域の $^{12}\text{CO}(J=3-2)$ 観測、日本天文学会
- [21] 久保井信行、岡 朋治、山本 智、相川祐理: 光解離領域の CI 存在量に対する時間依存の効果、日本天文学会 (愛媛大学、2003 年 9 月)
- [22] 久保井信行、岡 朋治、山本 智: [CI] $^3P_1-^3P_0$ 輝線による暗黒星雲 B18 のマッピング観測、日本天文学会 (名古屋大学、2004 年 3 月)
- [23] 田中邦彦、岡 朋治、山本 智: IC1396 領域の Bright Rimmed Globule における中性炭素原子の分布、日本天文学会 (名古屋大学、2004 年 3 月)
- [24] 新保 謙、富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ: 2002 年度富士山頂サブミリ波望遠鏡活動報告、NRO ユーザーズミーティング (野辺山宇宙電波観測所、2003 年 7 月)
- [25] 新保 謙: Nb 拡散冷却型 HEB ミクサの開発、ミリ波・サブミリ波受信技術に関するワークショップ (名古屋大学、2004 年 3 月)
- [26] 新保 謙、佐藤高之、山本 智、岡 朋治、前澤裕之、野口卓: Nb 拡散冷却型 HEB ミクサの開発、日本天文学会 (名古屋大学、2004 年 3 月)
- [31] 山本 智: 宇宙で星はどのように生まれるのか? - 富士山サブミリ波望遠鏡で探る星のゆりかご、第 18 回「大学と科学」公開シンポジウム、ビッグバン - 宇宙の誕生と未来 - (有楽町マリオン、2004 年 2 月)
- [32] 山本 智: テラヘルツ・ヘテロダインセンシングの開拓による銀河系星間雲の形成と進化の研究、大研究会「サブミリ波でみる宇宙」(国立天文台、2003 年 12 月)
- [33] 岡 朋治: 銀河系中心領域の分子ガス、21 世紀 COE ワークショップ「 H_3^+ をめぐる星間化学」(名古屋大学、2003 年 11 月 13 日)
- [34] 岡 朋治: 可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡、大研究会「サブミリ波でみる宇宙」(国立天文台、2003 年 12 月 26-27 日)

招待講演

6.7 酒井広文 研究室

本研究室では、(1) 高強度レーザー電場と分子内の非共鳴誘起双極子との相互作用に基づく中性分子のマニピュレーションとその応用、(2) 整形された超短光パルスによる原子分子中の量子過程制御、(3) 高次非線形過程 (多光子イオン化や高次高調波発生など) に代表される高強度レーザー物理や原子分子中の超高速現象、(4) 高次高調波を用いたアト秒パルス発生とその測定、(5) レーザー誘起クーロン爆裂を用いた分子の構造とダイナミクスに関する研究を中心に活発な研究活動を展開している。本年度の主要な研究内容は以下のとおりである。

6.7.1 静電場とレーザー電場の併用による分子の配列制御

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、交差分子線実験を始め、化学反応ダイナミクスにおける配置効果の研究等に、全く新しい実験手法を提供する。昨年度は、静電場と楕円偏光したレーザー電場を併用し、3,4-dibromothiopheneなどの分子面を持つ分子の3次元的な配列制御が可能であることを原理実証実験に成功した。すなわち分子の向きを規定する3つのオイラー角の制御が可能であることを示した。配列した試料分子を応用実験に利用するためには、さらに配列度を上げることが不可欠であり、今年度はそのための装置開発に着手した。配列度の増大には静電場強度を上げることが有効であり、そのために電極間隔を既存の装置の約1/5に狭めることを計画している。しかし、実効的な静電場の増大により、装置特性がデリケートになる可能性がある。電極とその周辺部分を適切に設計しないとイオンの飛行軌道が大きく歪み、装置が正常に動作しなくなる。装置の形状を適切に設計するため、荷電粒子の電場中での飛行軌道をシミュレーションにより十分検討した。

6.7.2 フェムト秒パルスの偏光状態の時間変化の制御

近年、フェムト秒パルスの波形整形技術の進展が著しい。強度や位相だけでなく偏光状態が時間とともに変化するパルスも生成できるようになって来た。しかし、従来の技術では、対象とする物理過程を最適制御するような偏光特性を持つパルスを生成することはできても、あらかじめ指定したとおりに偏光状態が時間変化するパルスを整形することは不可能であった。このため、ある物理過程に対する適切な偏光状態が理論的に予測できても、これを実現し、実証することはできなかった。そこで本年度は、指定おりの偏光状態をもつフェムト秒パルスを整形する技術の開発を行った。

光の偏光は、直交する2つの偏光成分の強度比と位相差によって定義できる。すなわち、2つの偏光成分の強度や位相を独立に制御することにより、任意の偏光状態が実現できる。偏光状態の測定も同様に、2つの偏光成分の強度比と位相差を調べることにより可能である。そこで、偏光状態の測定結果を直接フィードバックし、パルス整形器における変調量を最適化することにより偏光を制御した。光源にはTi:sapphireレーザー増幅器の出力 (中心波長 ~ 800 nm、パルス幅 ~ 50 fs) を使用し、最適化アルゴリズムとして遺伝的アルゴリズムを採用した。

偏光状態を制御するための第一段階として、偏光を規定する2つの偏光成分のうち一方の成分に関する最適化を行った。その一例として、ダブルパルス (参照パルスからの時間遅延: 900 fs および 1100 fs、パルス幅: 90 fs) をターゲットとし、50世代にわたって最適化した時の結果を図6.7 aに示す。世代を経るごとに徐々にダブルパルスに近づき、最終的なパルスのピーク位置はそれぞれ 912 fs および 1094 fs であり、パルス幅は 111 fs および 105 fs であった。

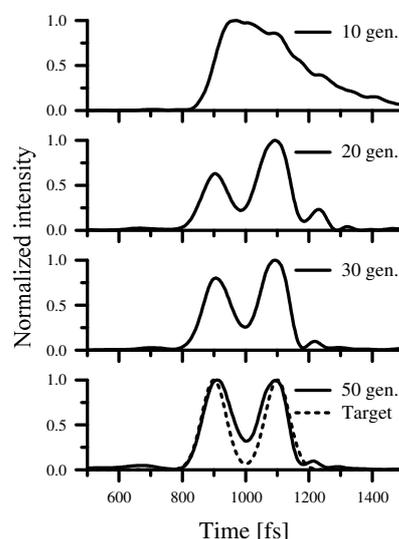


図 6.7 a: 1 偏光成分を最適化した結果。世代を経るごとに、整形された波形 (実線) がターゲット (破線) に近づいている。

次に、最適化を2つの偏光成分に拡張し、POLLIWOGと呼ばれる解析手法を用いて偏光状態の時間変化を制御した。楕円偏光の楕円率 ε (楕円偏光の長軸に対する短軸の比) の時間変化率 $d\varepsilon/dt$ を指標とした。ここでは、 $d\varepsilon/dt$ が一定値 ($3.44 \times 10^{-3} \text{ fs}^{-1}$) となるパルスをターゲットに選び、150世代にわたって最適化したときの結果を図6.7 bに示す。最適化されたパルスの主要部分での $d\varepsilon/dt$ は $3.24 \times 10^{-3} \text{ fs}^{-1}$ であり、ターゲットとの差は6%以下であった。

この手法を用いれば、偏光の楕円率だけでなく、楕円偏光の主軸の向きも制御可能である。この技術は、分子のイオン化確率の制御や高次高調波の短パルス化をはじめとする多くの研究分野での応用が期待されている。

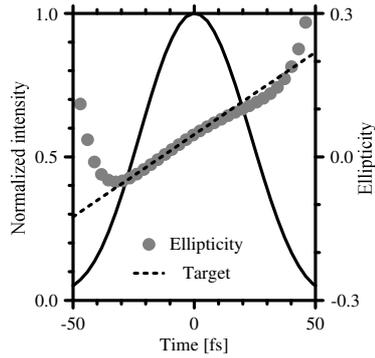


図 6.7 b: 2 偏光成分の同時制御による偏光状態の最適化の結果。整形されたパルスの楕円率 (グレーの点) は、実線で示されたパルス波形の主要部分でターゲット (破線) と良く一致している。

6.7.3 時間に依存した偏光状態をもつ高強度フェムト秒レーザー電場による 2 原子分子のトンネルイオン化の制御

高強度レーザー電場によるトンネルイオン化過程の理解は多価イオンの生成や高次高調波発生などの高強度レーザー物理に関する多くの現象を解析する際の基礎となる。原子のイオン化速度は ADK 理論によって比較的正しく予測できるが、分子に対する動的な効果を含めた理論は存在しない。そこで、ADK 理論を分子へ拡張した理論 (Molecular-ADK 理論) と準位交差の考え方 (Landau-Zener 遷移) を組み合わせ、高強度レーザー電場による 2 原子分子のイオン化確率の計算手法を一般化した。

高強度レーザー電場中では低いエネルギー固有状態 ψ_1 から高いエネルギー固有状態 ψ_2 への Landau-Zener 遷移が起こる。ここで、 ψ_1 と ψ_2 各々からのイオン化速度を Molecular-ADK 理論を用いて計算し、レーザーパルスの時間発展について時間積分することによりイオン化確率が求められる。図 6.7 c に計算結果の一例を示す。レーザー光のピーク強度が同じ場合 ($2 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$) でも、レーザー光の偏光状態を適切に時間発展させることにより、直線偏光の場合と比較してもイオン化を著しく促進できることが分かる。

6.7.4 長波長レーザー電場の併用による高効率高次和・差周波発生

実験

高次高調波発生の基本波として用いるフェムト秒 Ti:sapphire レーザーよりも波長が長く強度が 2 桁以上低いナノ秒 Nd:YAG レーザー光 (それ自身の高次高調波は発生しない) を併用したときに、ナノ秒レ

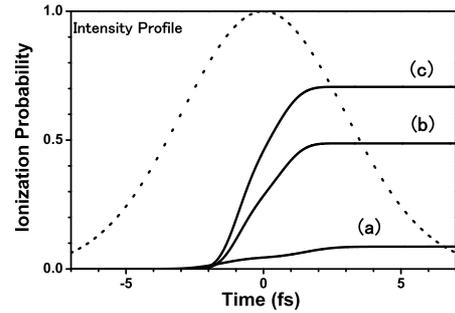


図 6.7 c: (a) 円偏光、(b) 直線偏光、(c) 時間依存偏光パルスによる H_2 分子のイオン化確率。レーザー光のピーク強度は $2 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ である。

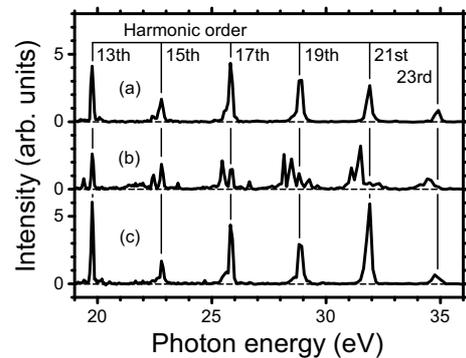


図 6.7 d: N_2 分子中で発生したコヒーレント XUV 光。(a) は Nd:YAG レーザー光を併用しない時、(b) と (c) は Nd:YAG レーザー光 ($6 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$) を併用した時で、その偏光状態はそれぞれ Ti:sapphire レーザー光 ($2 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$) と平行および垂直の時である。(b) では、高調波の両側に和周波光や差周波光が発生しているのが分かる。

ザー光の光子が 1 つあるいは 2 つ関与した和・差周波光が高効率で発生することを発見した (図 6.7 d)。非摂動論的領域における高次非線形過程の新現象の発見であり、工学的にもコヒーレント XUV 光 ~ 軟 X 線発生の新しいアプローチとなり得る。イオン化ポテンシャルのほぼ等しい Ar と N_2 あるいは Xe と O_2 を比較した場合、高次高調波に対する和・差周波光の相対的な発生効率は分子の方が高く、分子制御の観点からも興味深い。

理論

上記の実験で観測された高次和・差周波発生のメカニズムを調べるため、高次高調波発生の標準的理論として知られている Lewenstein モデルを、2 波長の場合を記述できるように拡張し、物理的考察を行った。

この拡張モデルでは、トンネルイオン化、自由電子の振動電場中での運動、再結合の全ての過程において量子力学的効果が考慮されている。量子効果を

考慮することによって初めて、半古典モデルでは見られない量子干渉、拡散など、自由電子の軌跡以外の効果も高調波発生に顕著に現れる。

拡張モデルを用いて計算したスペクトル強度を図 6.7 e に示す。併用するレーザー光が高調波の基本波と比べて長波長の時、その強度が基本波と比べて 2 桁以上小さいにも拘らず、和周波・差周波の強度が高調波と同程度になることが分かる。また、2 波長を併用した場合に特有な高次和・差周波発生を選択則も導ける。例えば、2 つのレーザー光の偏光方向が互いに直交しているとき、併用した長波長レーザー光の光子を 1 つ吸収、あるいは放出する過程は禁制となる。以上の結果は、実験結果をよく説明できる。さらに、併用するレーザーの強度比が一定の場合、基本波に対し長波長側に高次の和・差周波光の発生効率を著しく高める波長域が存在することも分かった。

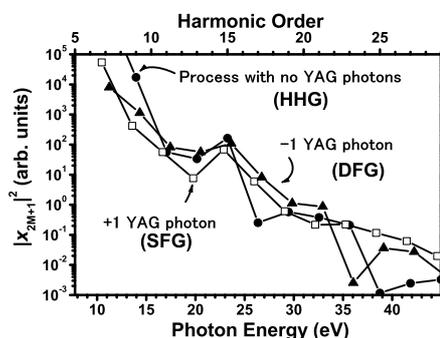


図 6.7 e: 高次高調波 (HHG)、和周波 (SFG)、差周波 (DFG) のスペクトル。Ti:sapphire レーザーと Nd:YAG レーザーの強度として、それぞれ $1.1 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ と $1.4 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ を仮定している。

6.7.5 アト秒パルスの発生を目指した偏光ゲート法の原理実証

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 ($\text{fs} = 10^{-15}$ 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 ($\text{as} = 10^{-18}$ 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。ここでは、特に偏光ゲート法と呼ばれる手法に着目し、高次高調波の短パルス化の可能性を検討した。

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。逆回りの円偏光パルス ($\text{FWHM} \sim 55 \text{ fs}$) を

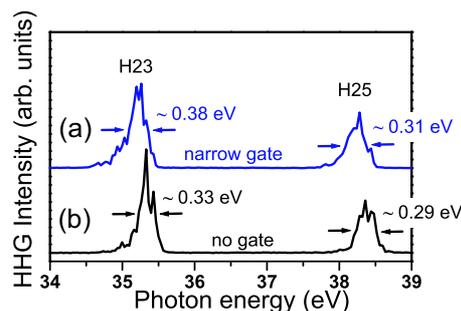


図 6.7 f: 偏光ゲートをかけた時 (a) とかけない時 (b)、Ar 原子中で発生した高次高調波のスペクトル。偏光ゲートをかけたことにより、スペクトル幅が広がっていることが分かる。

$\sim 50 \text{ fs}$ の遅延時間をつけて重ね合わせることで、このような偏光状態をもつパルスを作ることができる。

実際、媒質として Ar 原子を用い、基本波として Ti:sapphire レーザー光 (重ね合わせた時のピーク強度 $\sim 1.4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$) を用いて偏光ゲート法を適用したところ、例えば 23 次高調波のスペクトル幅 (FWHM) は 0.38 eV となり、偏光ゲート法を用いていないとき (0.33 eV) より広がっていた (図 6.7 f)。これらは、ガウス型のフーリエ変換限界パルスを仮定すれば、パルス幅としてそれぞれ 4.7 fs および 5.5 fs に相当し、偏光ゲート法による短パルス化が実現していることを示唆している。

6.7.6 非断熱的に配向した分子からの高次高調波発生

本研究室ではこれまでに、配向した分子の多光子イオン化過程について実験的および理論的研究を精力的に進めて来た。一方、高次高調波発生においてもその発生効率は分子軸とレーザー電場のなす角に著しく依存すると予想される。実際、分子を非断熱的に配向させることにより、高次高調波発生に大きな影響があることが分かった。

マイケルソン干渉計によりポンプ光 (配向用) とプローブ光 (高次高調波発生用) の遅延時間 τ を変化させながら発生する高調波の強度を測定した。媒質に N_2 分子を用いた時の、23 次高調波の τ 依存性を図 6.7 g に示す。回転周期の $1/4$ 周期ごとに高調波強度が著しく変化することがわかる。これは、分子の配向状態が非断熱的に変化した結果、高次高調波発生の配向度依存性が観測されていることに対応する。同様に、 O_2 分子、 CO_2 分子を媒質として実験すると、分子軌道の対称性に応じて、高調波発生の τ 依存性が大きく異なることが分かった。

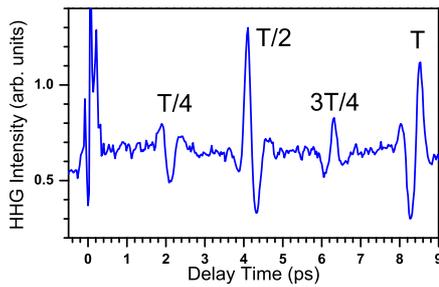


図 6.7 g: ポンプ光とプローブ光の間の遅延時間 τ に対する N_2 分子中で発生した 23 次高調波の強度変化。 N_2 分子の回転周期は、8.4 ps である。

6.7.7 高強度レーザー電場による Xe_2 の多光子イオン化

高強度レーザー電場中の分子は、多光子イオン化によって多価イオンとなりクーロン爆裂を起こす。二原子分子では、クーロン爆裂により生成されるフラグメントイオンは、enhanced ionization と呼ばれる効果を反映して偏光方向に大きく偏ることが知られている。一方、昨年度行った実験で、希ガス二量体 Rg_2 では、フラグメントイオンの角度分布に偏光依存性がほとんど見られないことが分かった。今回、 Rg_2 におけるイオン化過程を調べるため、パルス幅 τ_p を変化させながら Xe_2 のフラグメントイオンの分布を測定し、 Xe_2 とほぼ同じ質量を持つ I_2 と比較した。

フラグメントイオンの角度分布の偏りを表すパラメータ $\langle\langle \cos^2 \theta \rangle\rangle$ (θ は偏光方向とフラグメントイオンのなす角) のパルス幅依存性を図 6.7 h に示す。 I^++I^+ 、 $Xe^{++}+Xe^+$ チャンネルについて求めた $\langle\langle \cos^2 \theta \rangle\rangle$ である。 I^+ の場合、超短パルス光 (45 fs) で $\langle\langle \cos^2 \theta \rangle\rangle = 0.4$ であったものが、パルス幅が広がるにつれて急激に大きくなり、 $\tau_p = 660$ fs では 0.58 になっている。この変化は enhanced ionization の効果によると考えられる。すなわち、パルス幅が広がるにつれて核間距離が伸び、臨界核間距離に近づくほど、偏光方向に平行な向きを向いている分子のイオン化確率が著しく増大した結果と考えられる。

一方、 Xe_2 では、フラグメントイオンの分布は超短パルスの時はほぼ等方的 ($\langle\langle \cos^2 \theta \rangle\rangle = 0.33$) で、パルス幅を広げても非等方向性が若干大きくなる ($\tau_p = 710$ fs で $\langle\langle \cos^2 \theta \rangle\rangle = 0.35$) 程度である。フラグメントイオンの運動エネルギーから見積もられた核間距離が、パルス幅によらずほぼ一定であることを考えると、 Xe_2 では enhanced ionization の効果がほとんど効かず、中性分子の非断熱的な配向によって非等方向性が增大していると考えられる。実際、数値シミュレーションにより Xe_2 の非断熱的な配向度の上限を調べると (図 6.7 h 実線)、700 fs で $\langle\langle \cos^2 \theta \rangle\rangle = 0.4$ 程度まで増大しうることが分かった。

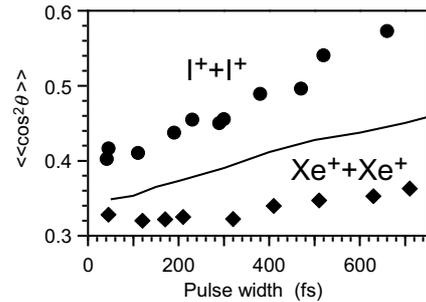


図 6.7 h: クーロン爆裂により生成される I^+ () と Xe^+ () イオンの非等方向性パラメータ $\langle\langle \cos^2 \theta \rangle\rangle$ のパルス幅依存性。実線は、計算で求めた Xe_2 の非断熱的な配向度の最大値。

6.7.8 4 年生特別実験

夏学期

上記のアト秒パルス発生のための基本波として利用することを目的として、中空ファイバーとプリズム対、およびチャープミラーを用いたフェムト秒 (~50 fs) パルスの圧縮実験を行った。実験条件を最適化した結果、目標としたサブ 20 fs パルスの発生に成功した。本研究において、サブ 20 fs パルスの計測が可能な SHG-FROG の測定系を新たに構築すると共に、チャープミラーを設計するための計算コードの開発も行った。

冬学期

複雑な非線形光学現象の一例として、楕円偏光したフェムト秒レーザーパルスが、希ガス等の充填された中空ファイバーを通過した後に、偏光状態がどのように変化するかを調べる予備的な実験を行った。POLLIWOG 測定の結果、実際に複雑な変化をしていることが確認できた。任意の偏光状態を持つパルスが中空ファイバー中を伝搬する時の特性を評価するため、数値計算コードの開発も行った。

さらに、各種の超高速光学現象をウィグナー分布関数を用いて評価するための手法を開発した。実際に、液晶空間光変調器を用いた超短パルスの整形、上記の中空ファイバーを用いたパルスの圧縮実験の解析や偏光状態の伝搬特性の解析、さらには、2 波長を用いた場合を含む高次高調波発生などの適用し、有益な知見を得た。

6.7.9 その他

本年度は大学院生 1 名が加入する一方、修士 1 名が誕生した。ここで報告した研究成果は、研究室のメンバー全員と学部 4 年生の特別実験で本研究室に配属された池上一隆君、深澤正裕君 (以上夏学期)、柳田伸太郎君、山地洋平君 (以上冬学期) の活躍によるものである。

なお、本年度の研究活動は、以下の補助金によって行われた。ここに記して謝意を表する。

1. 科学研究費補助金、基盤研究 (S)、「未到時間領域の超短パルス光発生とその計測」(研究代表者：酒井広文)。
2. 科学研究費補助金、特定領域研究、計画研究、「強光子場とパルス整形技術による分子操作と量子過程制御」(研究代表者：酒井広文)。

<受賞>

- [1] 鈴木隆行、「偏光状態が指定どおりに時間変化するフェムト秒パルスの発生」(共同研究者：峰本紳一郎、酒井広文)、第9回レーザー学会優秀論文発表賞、2004年5月。

<報文>

(原著論文)

- [2] Hirofumi Sakai, Jakob Juul Larsen, Ida Wendt-Larsen, Johannes Olesen, Paul B. Corkum, and Henrik Stapelfeldt, "Non-sequential double ionization of D₂ molecules with intense 20 fs pulses," *Phys. Rev. A* **67**, 063404-1–063404-4 (2003).
- [3] Hirofumi Sakai, Shinichirou Minemoto, Hiroshi Nanjo, Haruka Tanji, and Takayuki Suzuki, "Orientation of polar molecules with combined electrostatic and pulsed, nonresonant laser fields," *Eur. Phys. J. D* **26**, 33–37 (2003).
- [4] Shinichirou Minemoto, Haruka Tanji, and Hirofumi Sakai, "Polarizability anisotropies of rare gas van der Waals dimers studied by laser-induced molecular alignment," *J. Chem. Phys.* **119**, 7737–7740 (2003).
- [5] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Optimal control of multiphoton ionization processes in I₂ molecules with time-dependent polarization pulses (in Japanese)," *The Review of Laser Engineering*, **31**, 762–769 (2003).
- [6] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, Tsuneto Kanai, and Hirofumi Sakai, "Optimal control of multiphoton ionization processes in aligned I₂ molecules with time-dependent polarization pulses," *Phys. Rev. Lett.* **92**, 133005-1–133005-4 (2004).
- [7] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Nontrivial polarization shaping of femtosecond pulses by referring to the results of dual-channel spectral interferometry," to appear in *Opt. Lett.*
- [8] Tsuneto Kanai and Shinji Tsujikawa, "MSW-resonant fermion mixing during reheating," *Nucl. Phys. B* **90**, 289–306 (2003).

(国内雑誌)

- [9] 酒井広文、「時間依存偏光パルスによる分子制御」, *O plus E (新技術コミュニケーションズ)*, **25**, 996–1003 (2003).

(学位論文)

- [10] Yutaka Nomura, "Control of high-order harmonics generated in atoms and molecules," Master's thesis, January 2004.

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [11] Hirofumi Sakai, "Manipulation of molecules and its applications to the optimal control experiments," *The First Canadian Workshop on Ultrafast Dynamic Imaging*, Orford, Quebec, October 2003.

一般講演

- [12] Shinichirou Minemoto, Haruka Tanji, and Hirofumi Sakai, "Experimental determination of polarizability anisotropies of van der Waals dimers by molecular alignment technique with an intense laser field," *The XX International Symposium on Molecular Beams*, Lisbon, Portugal, June 2003.
- [13] Shinichirou Minemoto, Haruka Tanji, and Hirofumi Sakai, "Alignment of rare gas dimers with an intense nonresonant laser field," *The XXIII International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC)*, Stockholm, Sweden, July 2003.
- [14] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Correlation between a femtosecond time-dependent polarization pulse and the production efficiency of evenly- or oddly-charged molecular ions," *The XXIII International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC)*, Stockholm, Sweden, July 2003.
- [15] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Active control of multiphoton ionization processes in molecules with femtosecond time-dependent polarization pulses," *The 10th International Workshop on Femtosecond Technology*, Chiba, Japan, July 2003.
- [16] Haruka Tanji, Shinichirou Minemoto, Yutaka Nomura, Takayuki Suzuki, and Hirofumi Sakai, "Three-dimensional orientation of molecules with combined electrostatic and elliptically polarized laser fields," *The XX International Symposium on Molecular Beams*, Lisbon, Portugal, June 2003.
- [17] Haruka Tanji, Shinichirou Minemoto, Yutaka Nomura, Takayuki Suzuki, and Hirofumi Sakai, "Three-dimensional orientation of asymmetric top molecules using electrostatic and elliptically polarized laser fields," *The XXIII International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC)*, Stockholm, Sweden, July 2003.
- [18] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, Tsuneto Kanai, and Hirofumi Sakai, "Optimal control of multiphoton ionization of aligned I₂ molecules with time-dependent polarization pulses," *The 2004 Multiphoton Processes Gordon Research Conference*, New Hampshire, U.S.A., June 2004.

- [19] Yutaka Nomura, Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Efficient generation of high-order sum and difference frequencies in the XUV region by mixing a weak, longer-wavelength field," The 2004 Multiphoton Processes Gordon Research Conference, New Hampshire, U.S.A., June 2004.
- [20] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Controlling the tunnel ionization of molecules by intense femtosecond laser pulses with time-dependent polarization," The 2004 Multiphoton Processes Gordon Research Conference, New Hampshire, U.S.A., June 2004.
- [21] Shinichirou Minemoto and Hirofumi Sakai, "Multiphoton ionization processes of Xe₂: diatomic molecules exempted from enhanced ionization," The 2004 Multiphoton Processes Gordon Research Conference, New Hampshire, U.S.A., June 2004.
- [22] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, Tsuneto Kanai, and Hirofumi Sakai, "Control of multiphoton ionization of aligned I₂ molecules by optimizing time-dependent polarization of femtosecond pulses," The Fourteenth International Conference on Ultrafast Phenomena, Niigata, Japan, July 2004.
- [23] Yutaka Nomura, Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Efficient generation of high-order sum and difference frequencies in the XUV region by combining a weak, longer-wavelength field," The Fourteenth International Conference on Ultrafast Phenomena, Niigata, Japan, July 2004.
- [24] Tsuneto Kanai, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Control of tunnel ionization in molecules by intense femtosecond laser pulses with time-dependent polarization," The Fourteenth International Conference on Ultrafast Phenomena, Niigata, Japan, July 2004.
- (国内会議)
- 招待講演
- [25] 酒井広文、「レーザー光による分子操作と最適制御実験への応用」、特定領域研究「強光子場分子制御」蔵王セミナー「化学反応制御とアト秒科学の現状と展望」、蔵王ハイツ、2003年11月。
- [26] 酒井広文、「レーザー光による分子操作と分子制御への応用」、JAXA 宇宙科学研究本部 2003年度宇宙空間原子分子過程研究会「偏極・配向による原子分子過程の制御」、宇宙科学研究本部、2004年1月。
- [27] 酒井広文、「時間依存偏光パルスを用いた分子の多光子イオン化過程の最適制御」、レーザー学会学術講演会第24回年次大会、仙台国際センター、2004年1月。
- 一般講演
- [28] 鈴木隆行、峰本紳一郎、酒井広文、「TADPOLEを指標としたフェムト秒パルスのフィードバック制御」、日本物理学会 2003年秋季大会、岡山大学、2003年9月。
- [29] 金井恒人、峰本紳一郎、酒井広文、「楕円偏光した高強度レーザー電場による2原子分子のトンネルイオン化過程」、日本物理学会 2003年秋季大会、岡山大学、2003年9月。
- [30] 野村雄高、峰本紳一郎、金井恒人、酒井広文、「原子内双極子の制御に基づく高次高調波発生」、日本物理学会 2003年秋季大会、岡山大学、2003年9月。
- [31] 峰本紳一郎、酒井広文、「I₂ および Xe₂ の多光子イオン化に対するレーザー光のパルス幅の効果」、日本物理学会 2003年秋季大会、岡山大学、2003年9月。
- [32] 鈴木隆行、峰本紳一郎、酒井広文、「分子内過程を最適化するための時間に依存する偏光パルスの精密制御」、2003年分子構造総合討論会、京都テルサ、2003年9月。
- [33] 金井恒人、峰本紳一郎、酒井広文、「楕円偏光した高強度非共鳴レーザー電場による2原子分子のトンネルイオン化」、2003年分子構造総合討論会、京都テルサ、2003年9月。
- [34] 野村雄高、峰本紳一郎、金井恒人、酒井広文、「誘起双極子を制御した原子分子気体における高次高調波発生」、2003年分子構造総合討論会、京都テルサ、2003年9月。
- [35] 峰本紳一郎、酒井広文、「高強度レーザー電場によるI₂ および Xe₂ の多光子イオン化に対するパルス幅の効果」、2003年分子構造総合討論会、京都テルサ、2003年9月。
- [36] 金井恒人、峰本紳一郎、酒井広文、「時間に依存した偏光状態をもつ高強度レーザー電場による配向分子のトンネルイオン化の制御」、JAXA 宇宙科学研究本部 2003年度宇宙空間原子分子過程研究会「偏極・配向による原子分子過程の制御」、宇宙科学研究所、2004年1月。
- [37] 鈴木隆行、峰本紳一郎、酒井広文、「偏光状態が指定どおりに時間変化するフェムト秒パルスの発生」、レーザー学会学術講演会第24回年次大会、仙台国際センター、2004年1月。
- [38] 野村雄高、峰本紳一郎、金井恒人、酒井広文、「長波長レーザー光の併用による高効率高次和・差周波発生：I. 実験」、レーザー学会学術講演会第24回年次大会、仙台国際センター、2004年1月。
- [39] 金井恒人、峰本紳一郎、野村雄高、酒井広文、「長波長レーザー光の併用による高効率高次和・差周波発生：II. 理論」、レーザー学会学術講演会第24回年次大会、仙台国際センター、2004年1月。
- [40] 金井恒人、峰本紳一郎、酒井広文、「時間に依存した偏光状態をもつ高強度フェムト秒レーザーパルスによる2原子分子のトンネルイオン化の制御」、レーザー学会学術講演会第24回年次大会、仙台国際センター、2004年1月。
- [41] 峰本紳一郎、酒井広文「高強度フェムト秒レーザー光によるXe₂とI₂の多光子イオン化に対するパルス幅

- の効果」、レーザー学会学術講演会第 24 回年次大会、仙台国際センター、2004 年 1 月。
- [42] 鈴木隆行、峰本紳一郎、酒井広文、「フェムト秒パルス内の時間に依存する偏光状態の精密制御」、2004 年春季第 51 回応用物理学関係連合講演会、東京工科大学、2004 年 3 月。
- [43] 野村雄高、峰本紳一郎、金井恒人、酒井広文、「長波長レーザー電場の併用による高効率高次和・差周波発生：I. 実験」、2004 年春季第 51 回応用物理学関係連合講演会、東京工科大学、2004 年 3 月。
- [44] 金井恒人、峰本紳一郎、野村雄高、酒井広文、「長波長レーザー電場の併用による高効率高次和・差周波発生：II. 理論」、2004 年春季第 51 回応用物理学関係連合講演会、東京工科大学、2004 年 3 月。
- [45] 金井恒人、峰本紳一郎、酒井広文、「非断熱的に配向した分子を用いた高次高調波発生」、2004 年春季第 51 回応用物理学関係連合講演会、東京工科大学、2004 年 3 月。
- [46] 金井恒人、峰本紳一郎、酒井広文、「アト秒台パルスの生成を目指した偏光ゲート法の原理実証」、2004 年春季第 51 回応用物理学関係連合講演会、東京工科大学、2004 年 3 月。
- [47] 峰本紳一郎、酒井広文、「Xe₂ と I₂ の多光子イオン化に対するパルス幅の効果」、2004 年春季第 51 回応用物理学関係連合講演会、東京工科大学、2004 年 3 月。
- [48] 金井恒人、峰本紳一郎、野村雄高、酒井広文、「時間に依存した偏光状態をもつ高強度フェムト秒レーザー電場による 2 原子分子のトンネルイオン化の制御」、2004 年春季第 51 回応用物理学関係連合講演会、東京工科大学、2004 年 3 月。

(セミナー)

- [49] Hirofumi Sakai, "Molecular manipulation and its applications to the optimal control experiments," University of Aarhus, Denmark, August 2003.
- [50] 金井恒人、「時間依存偏光パルスを用いた 2 原子分子のトンネルイオン化過程の制御」、東北大学大学院理学研究科化学専攻、2004 年 1 月。

(その他)

- [51] Hirofumi Sakai, Jakob Juul Larsen, Ida Wendt-Larsen, Johannes Olesen, Paul B. Corkum, and Henrik Stapelfeldt, "Nonsequential double ionization of D₂ molecules with intense 20-fs pulses," *Virtual Journal of Ultrafast Science*, **2**, No. 7 (2003).
- [52] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, Tsuneto Kanai, and Hirofumi Sakai, "Optimal control of multiphoton ionization processes in aligned I₂ molecules with time-dependent polarization pulses," *Virtual Journal of Ultrafast Science*, **3**, No. 4 (2004).
- [53] 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 15 年度報告書。

7 生物物理

桑島研究室

桑島研究室では、球状蛋白質の天然立体構造構築（フォールディング）の物理原理に関する研究を行っている。研究内容は、(1) 蛋白質工学を用いた蛋白質のフォールディング研究、(2) 細胞内での蛋白質フォールディングに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 15 年度より文部科学省特定領域研究「水と生体分子」が始まることとなり、桑島が領域代表を務めている。この特定領域研究の目的は、「分子レベルの生命現象を第一原理より化学と物理学の立場から解き明かす」ことである。平成 16 年 1 月 9 日、大阪・千里ライフサイエンスセンターにて、第 1 回の特定領域研究公開ワークショップを開催した。国内外より約 180 名の参加者があり、大変盛会であった。

7.0.10 蛋白質工学を用いた蛋白質のフォールディング研究

球状蛋白質の構造形成機構を明らかとするには、天然状態の熱力学的安定性に関する研究とともに、巻き戻り過程の速度論的な研究が必要である。多くの蛋白質で、巻き戻り反応初期に二次構造を持った過渡的な中間状態の蓄積されることが知られている。この中間体は、平衡条件下で観測されるモルテン・グロビュール (MG) 状態と同一であり、蛋白質構造形成にとって必須であると考えられている。このような中間体の構造や巻き戻り反応の遷移状態の構造を明らかにすることが蛋白質のフォールディング研究にとって重要である。そのためには、蛋白質工学の手法を用いて、対象とする蛋白質に部位指向的な変異を導入し、導入されたアミノ酸変異がその蛋白質の構造安定性や巻き戻り速度過程にどのような影響を及ぼすかを調べる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 α -ラクトアルブミン変異体の安定性とフォールディング反応

(佐伯、高橋美穂子 (4 年生特別実験)、新井博士 (産総研) 桑島)

昨年度までの研究により、ヤギ α -ラクトアルブミン (α -LA) のフォールディング遷移状態ではイソロイシン 55 (α ドメインと β ドメインの境界) とイソロイシン 89 (Ca^{2+} 結合部位付近) の周りで部分的に側鎖の特異的パッキング構造が形成されていることがわかった。今年度はヤギ α -LA の遷移状態の構造をさらに詳しく知るために、様々な部位の変異体を 9 種類作製した。どの変異体も大腸菌で大量発現して、野生型と同様に精製することができた。平衡条件下でのアンフォールディング転移を円二色性 (CD) スペクトルで測定したところ、V90A 変異体は野生型よりも安定化していたが、その他の変異体はいずれも野生型より不安定化していた。フォールディング反応とアンフォールディング反応の速度過程をストップフロー CD 法で測定した。D87N (Ca^{2+} 結合部位) は野生型よりもフォールディング速度が遅くなったが、アンフォールディング速度は野生型と差が見られず、 Φ 値は約 1.0 になった。V90A (C-ヘリックス) では野生型と比べてアンフォールディング速度が遅くなり、フォールディング速度が速くなったので、 Φ 値は 0.5 付近であった。その他の変異体は野生型よりもアンフォールディング速度が速くなったが、フォールディング速度は野生型と差が見られず、 Φ 値は 0 付近になった。これらの結果と昨年度までの結果をあわせてみると、 Ca^{2+} 結合部位付近および C-ヘリックスと β ドメインの境界では遷移状態で天然の特異的側鎖パッキング構造が形成されているが、その他の部分では遷移状態でも天然構造は形成されていないことがわかった。

ヒト α -ラクトアルブミン変異体の作製

(佐伯、桑島)

ヒトとヤギの α -ラクトアルブミンの天然状態での構造は似ているが、フォールディング中間体の構造は異なっている。ヒト α -ラクトアルブミンのフォールディングの遷移状態における構造を蛋白質工学的に解析し、それらの構造が似ているかどうかを調べることを目的とする。ヒト α -ラクトアルブミンの様々な部位に変異を導入した変異体を作製した。どの変異体も大腸菌で大量発現した。今後は変異体を精製して、安定性とフォールディング反応を測定する予定である。

イヌ・ミルク・リゾチームのフォールディングの解析

(中尾、楨、桑島：新井博士 (産総研)、小柴博士 (カリフォルニア工科大)、新田教授 (北大) との共同研究)

昨年度から引き続いて、イヌ・ミルク・リゾチームの大腸菌による発現、精製、フォールディングに

関する実験を行った。

昨年度までに観測されていた二つの中間体（バースト相中間体、速度論的中间体）をさらに特徴づけるために、イヌ・ミルク・リゾチームの巻き戻り反応を、CD スペクトルをプローブとして 215 nm から 240 nm まで 10 個の波長で測定した。得られた 10 個の反応曲線を同時に解析することにより、反応の二つの速度定数 $k_1=22\pm 2\text{ s}^{-1}$ 、 $k_2=0.53\pm 0.02\text{ s}^{-1}$ と、バースト相中間体およびその後形成される速度論的中间体の CD スペクトルを得ることが出来た。これらの CD スペクトルを平衡条件における蛋白質の CD スペクトルと比較した結果、平衡の変性中間体の CD スペクトルがバースト相中間体のスペクトルと非常に類似していることがわかった。さらにこの結果を確認するために、変性状態から平衡中間体に巻き戻す反応を測定した。すると、装置の不感時間内にシグナルの変化が完了しており、平衡中間体が速度論的にもバースト相中間体と類似していることがわかった。以上から平衡中間体は、巻き戻りの速度過程におけるバースト相中間体と同一であると考えられる。

得られた速度過程における各中間体のスペクトルから、バースト相中間体から速度論的中间体への相、および速度論的中间体から天然状態への相のそれぞれにおける速度論的差スペクトルを得た。前者の相においては、二次構造成分の増加とチロシン残基やトリプトファン残基の側鎖の周りの環境が非対称になっていく過程であることがわかった。一方後者の相の差スペクトルを見ると、225 nm と 227.5 nm の中間を境に強度の符号が入れ替わるスペクトルが得られた。これは芳香族側鎖が接近することによって生じるエキシトンカップリングが起こっていることを示唆している。X線結晶構造解析で得られたイヌ・ミルク・リゾチームの構造を見てみると、28番と108番のトリプトファン残基の側鎖、および、63番と64番のトリプトファン残基の側鎖が互いに接近していることがわかる。以上のことから、速度論的中间体から天然状態への相は、これらのトリプトファン残基の天然の特異的パッキングを表していると推定される。

緑色蛍光蛋白質変異体 (Cycle3) の酸変性と巻き戻り

(榎、佐伯、楨、桑島)

発光オワンクラゲ由来の緑色蛍光蛋白質 (GFP) は、 β バレル型の構造の内側に、天然状態で緑色の蛍光を発する発色団を持ち、その特有の蛍光は細胞内などの複雑な環境下でも天然状態形成の良い指標となる。昨年度に引き続き、酸変性状態からの巻き戻りの速度過程をさらに詳細に解析し、少なくとも5つの速度相の存在が明らかになった。そのうち、一番速い相は非特異的凝縮であり、次いで部分的にゆるやかに構造ができた MG 状態類似の経路上中間体を検出することができた。また、巻き戻り反応の遅い速度過程が本当にプロリンペプチド結合の遅い異性化反応に由来していることを、プロリン異性化酵素を使った実験により直接確認することができた。

7.0.11 細胞内での蛋白質フォールディングに 関与する分子シャペロンの作用機構

細胞内での蛋白質の構造形成はさまざまな分子シャペロンにより介助されている。分子シャペロンは、細胞内での蛋白質の構造形成とアセンブリーに関係するのみならず、蛋白質の細胞内輸送、DNA の複製、ストレス応答など、細胞内でのさまざまな現象に関与しており、分子シャペロンの概念は、生物物理学、生化学、分子生物学、細胞生物学、医学、バイオテクノロジーなどの広い分野を包括する新しい研究分野を提供しつつある。われわれは、このような *in vivo* の現象を理解することを目的として、分子シャペロンの一つ、大腸菌のシャペロニン (GroEL/ES) に関する研究を行っている。特に、蛋白質の巻き戻りの速度過程に及ぼすシャペロニンの影響やシャペロニンの機能発現にとって必要な ATP によるアロステリックな構造転移を *in vitro* のモデル系を用いて調べている。

単一経路モデルによる GroEL アロステリック転移の Φ 値解析

(伊野部、桑島)

標的蛋白質の効率的な巻き戻りはヌクレオチドによる GroEL のアロステリック転移により促進される。我々は ATP による GroEL のアロステリック転移の速度論を研究している。現在低 ATP 濃度 (20 μM 付近) で起こるアロステリック転移の速度論に関して二つの対立するモデルがある。一つは Horowitz らが提唱するモデルでアロステリック転移には二つのパラレルな経路が存在し、ATP 濃度に依存して二つの経路が入れ替わるというモデルである。もう一つのモデルは二つのパラレルな経路を仮定せずに、遷移状態理論と Monod-Wyman-Changeux (MWC) アロステリックモデルを組み合わせた、我々の提唱する速度論的 MWC モデルである。この対立する二つのモデルの違いは転移が可逆的であると見なすか不可逆と見なすかに起因していると考えられる。そこで我々は 0 ~ 70 μM ATP のアロステリック転移の可逆性をストップフローダブルジャンプ法で調べた。この方法により高 ATP 濃度における R 状態から低 ATP 濃度における T 状態への逆反応の時間変化を測定することが出来る。この測定ではトリプトファンを挿入した GroEL 変異体の蛍光変化を指標として時間変化を調べた。その結果、アロステリック転移は可逆的であることが明らかとなり、我々のモデルの正しさが立証された。また我々は蛋白質フォールディングにおける変異体 Φ 値解析によく似た速度論的 MWC の Φ 値解析を行ったところ、遷移状態における ATP 結合部位の環境は R 状態によく似ている ($\Phi=0.9$) ことが明らかとなった。

GroEL に結合するコシャペロニン GroES の個数

(伊野部、榎、鎌形、桑島)

生体内での GroEL の効率的なシャペロン活性発現には GroEL とそのコシャペロニンである GroES との相互作用が必要不可欠である。我々はそのような GroEL-GroES 相互作用の分子メカニズムを知るために、「GroEL 一個に対して GroES は何個結合するのか?」という問題について研究を行った。GroEL は 1 分子につき 2 個の GroES 結合サイトをもつ。しかしながら生体内で働く GroEL に何個の GroES が結合しているのか未だにはっきりとしていない。そこで我々は GroEL に結合する GroES の数を X 線小角散乱法 (SAXS) を用いて測定した。

GroEL に結合する GroES の個数を求めるために、さまざまなヌクレオチド (ATP, ADP, ATP γ S, ATP + BeF $_x$) 存在下での慣性半径と見かけの分子量、分子の最大長を GroEL と GroES のモル比を変えながら SAXS 測定により求めた。その結果 ATP と BeF $_x$ が存在するときには 2 個の GroES が GroEL に結合するものの、ADP や ATP、ATP γ S 存在下では 1 個の GroES しか結合しないことがわかった。ATP-BeF $_x$ は ATP の加水分解遷移状態に似ていると考えられている。これら GroEL-GroES 複合体の散乱パターンは結晶構造から計算した散乱パターンとほぼ一致することから GroES は GroEL の頂上ドメインに結合していると考えられる。

以上の結果は ATP 加水分解中に 2 個の GroES が過渡的に GroEL に結合する可能性はあるものの、細胞内のような ATP 加水分解定常状態において、ほとんどの GroEL には 1 個の GroES しか結合しないことを示している。この結果は以前他の研究グループにより電子顕微鏡法や化学架橋法により報告された結果と異なっているが、これら以前の研究では測定条件が細胞内の環境とは大きくかけ離れている。SAXS では生体内とほぼ同じ溶液環境で測定しているので、生体内の GroEL には 2 個の GroES が同時に結合することはないという結論が得られる。

シャペロニン GroEL がスタフィロコッカス・ヌクレアーゼの巻き戻りのエネルギー地形に及ぼす影響

(廉岡、鎌形、伊野部、佐伯、桑島)

昨年度に引き続き、プロリンをすべて他のアミノ酸に置換し、さらに A69T という不安定化の変異を導入したスタフィロコッカス・ヌクレアーゼ (SNase) 変異体 (Pro $^-$ +A69T) を用いて、そのフォールディング速度過程に及ぼすシャペロニン GroEL の影響を調べた。

GroEL 自身の蛍光スペクトルへの影響のない、定量的なデータを得るため、トリプトファンから外来性色素への蛍光共鳴エネルギー移動を利用した実験を行った。変異体 (Pro $^-$ +A69T+K64C) を IAEDANS でラベルした蛋白質について、ストップフロー法で pH 2.5 から pH 7.5 にジャンプさせ、励起波長 295nm における IAEDANS の蛍光変化の速度過程を測定した。その結果、GroEL 非存在下で 0.56 s $^{-1}$ と 0.082

s $^{-1}$ と 0.0055 s $^{-1}$ の 3 つの相が観測された。この結果は、GroEL 存在下では、SNase が GroEL に結合したままパラレル経路を通して巻き戻るとする昨年度の結論を支持するものである。

さらに、GroEL の結合が SNase のフォールディング自由エネルギー地形を変化させることを直接確かめるため、ストップフローダブルジャンプの手法を用いて、SNase 巻き戻り中に GroEL を加えるタイミングを変える実験を行った。GroEL を巻き戻り初期に加えた場合と巻き戻り開始後 100 ms 後に加えた場合を比較した。両者で、速度定数は一致したが、速度論的アンプリチュードが明らかに異なり、GroEL 結合による標的蛋白質フォールディングの自由エネルギー地形の変化を直接的に観測することに初めて成功した。また、この結果から、遊離 SNase のフォールディングの各速度相が GroEL 存在下のどの速度相に対応しているかが明らかになった。その結果、速度相の中には GroEL との結合によりフォールディングが加速されるものもあることがわかった。

グループ II シャペロニンのヌクレオチドによる構造転移の解析

(伊野部、榎、桑島: 飯塚氏 (東京農工大)、養王田教授 (東京農工大) との共同研究)

グループ II シャペロニンの一つである超好熱古細菌 (*Thermococcus* sp. strain KS-1) の α 鎖シャペロニンの ATP などのヌクレオチドによる構造転移を X 線溶液散乱とストップフロー蛍光スペクトルを用いて研究している。

低分子量分子シャペロン α B クリスタリンと Hsp33 の機能と溶液構造

(伊野部、榎、桑島: V. Srinivas 博士 (CCMB, India)、M.C. Rao 教授 (CCMB, India) との共同研究)

低分子量分子シャペロンである α B クリスタリンと Hsp33 の機能発現には、これらの蛋白質のオリゴマー状態が重要であることがわかっている。これらの溶液中でのオリゴマー状態と機能発現との関係を X 線溶液散乱を利用して研究している。

7.0.12 新しい測定技術と計算機シミュレーションを利用した蛋白質のフォールディング研究

蛋白質のフォールディング機構を実験的に研究するには、ストップフロー法などの高速反応測定法を用いて、巻き戻りの速度過程を、光吸収、円二色性、蛍光スペクトル、X 線溶液散乱などの分光学的な測定手段を用いて調べる。しかし、現在まで用い

られているストップフロー法の時間分解能はミリ秒が限界であり、サブミリ秒以下の速い反応過程を追跡することはできない。この時間分解能の限界は、多くの場合、検出器にあるのではなく、フォールディング反応を誘起するためのストップフロー混合装置の混合時間によってもたらされる。現在、ミリ秒内に素早く巻き戻ってしまう蛋白質の例がいくつも明らかとなっており、サブミリ秒からマイクロ秒の時間域におけるフォールディング反応を実験的に研究することが重要となっている。さらに、現在では、分子動力学などの計算機シミュレーションによる蛋白質のアンフォールディング過程の解析もフォールディング研究には有効なアプローチである。われわれは、このような観点から新しい測定技術と計算機シミュレーションを利用した蛋白質のフォールディング研究を行っている。

高圧下温度ジャンプ装置による蛋白質の巻き戻り初期過程の観測

(鎌形、桑島)

前年度に引き続き、高圧下温度ジャンプ装置の立ち上げを行った。この装置を用いれば、高圧条件下 (e.g. 1000-2000 気圧) で蛋白質の低温変性状態からの巻き戻り初期過程を測定することができると期待される。この装置の性能を調べた結果、以下の2つの改善すべき点があることが明らかとなった。(1) S/N が従来の温度ジャンプ装置 (常圧下) に比べると劣る。(2) 温度ジャンプ時に、一部漏電がみられる。これらの問題点を解決するために、現在、装置の改良を行っているところである。

3状態の巻き戻りを示す蛋白質の巻き戻り速度と構造の相関に関する統計的解析

(鎌形、新井 (産総研)、桑島)

球状蛋白質のフォールディング機構は、単純な2状態の巻き戻りを示すものと非2状態 (多くの場合は、3状態) の巻き戻りを示すものに分類される。2状態の巻き戻りを示す蛋白質について、フォールディング速度は 10^5 秒から 10^{-1} 秒という6桁のオーダーにまたがっているが、その速度は主鎖トポロジー (主鎖構造の配置) に関係していることがわかってきた。つまり、蛋白質分子は、主鎖と側鎖から構成されているが、主鎖だけのトポロジーによって主に巻き戻り速度が決まっていることになる。しかしながら、3状態の巻き戻りを示す蛋白質の場合には、中間体を経るという複雑さゆえに、あまり研究がなされていない。

本研究では、3状態蛋白質の巻き戻り過程を「中間体の形成」と「天然状態の形成」という2つの過程に分け、それぞれの過程の形成速度定数と立体構造パラメータとの相関を調べた。いろいろな球状蛋白質の巻き戻り速度過程に関する過去の文献をすべて調査し、巻き戻り速度過程に関する実験データを

収集して、それらの統計的解析を行った。

その結果、中間体形成速度は、蛋白質の大きさ (主鎖の長さ) や主鎖トポロジーと強い相関があった。つまり、蛋白質の大きさが大きくなればなるほど、または、鎖に沿って長距離の相互作用 (天然の) が多ければ多いほど、中間体形成速度は遅くなる。また、天然状態形成速度も、蛋白質の大きさや主鎖トポロジーと相関があった。以上のことから、3状態の蛋白質では、経路上の中間体は、多かれ少なかれ天然類似の主鎖構造をとり、天然状態を探しあてる上で重要な役割を果たしていることが示唆された。

また、2状態蛋白質と非2状態 (3状態) 蛋白質との間で、巻き戻り速度の値や速度過程の主鎖トポロジー相関に本質的な違いはないことも明らかになった。このことは、2状態フォールディングと非2状態フォールディングの違いは見かけ上のものでありどちらも同じ物理機構で説明されることを示している。

N 末近傍に変異を持つ α -ラクトアルブミンのアンフォールディング解析: 実験とシミュレーション

(笠口、佐伯、桑島: 池口助教授 (横浜市大)、木寺教授 (横浜市大) との共同研究)

カルシウム結合型蛋白質である α -ラクトアルブミンの真正体と組み換え体では大きく安定性に差があり、組み換え体は真正体よりも 5.7 倍も速くアンフォールドする。組み換え体の構造は真正体の構造と比べて全体的に同じで、N 末端にメチオニンが付加されているだけであり、安定性に違いがでる理由は明確になっていない。そこで、これら二つの蛋白質を 398 K と 498 K の二つの温度でアンフォールドさせる 5 ns のシミュレーションをそれぞれ 10 回 (合計 220 ns) 行った。実験と同じように組み換え体により速くアンフォールドするかを計算の妥当性の指標としながら、計算結果からアンフォールディング過程に関する原子レベルの解析を行った。

398 K におけるシミュレーションの結果は実験結果とよく一致し、組み換え体の不安定性は N 末構造の不安定性に由来することを示していた。そこで、シミュレーションの結果から真正体を不安定にすると推測される変異体 (Thr38 を Ala に置換した変異体) を作成し、その熱転移を測定した。その結果は、明確にシミュレーション結果と一致していた。以上より、 α -ラクトアルブミンのアンフォールディングは N 末端から開始されるため、組み換え体の N 末構造の不安定性はこの蛋白質のアンフォールディング速度に直接的に影響を与えることが結論される。

498 K における計算シミュレーションでは、組み換え体と真正体のほどける速さに明確な差異を観察することはできなかったが、遷移状態を超えてアンフォールドしたトラジェクトリーを得ることができた。そこで、アンフォールド状態における蛋白質の見掛けのエントロピーを、0 へと収束させる祖視化されたコンフォメーション空間の表現方法を開発し、その表現座標系を用いた主成分解析を行うことにより遷移状態を抽出することに世界で初めて成功した。抽出された遷移状態の構造的特徴は、当研究室にお

いて行われた Φ 値解析 (佐伯) の結果と明確に一致した。これらの結果より、 α -ラクトアルブミンは遷移状態において最初にカルシウム結合部位近傍の構造を形成し、さらに遷移状態から天然状態にいたる過程で、疎水核の側鎖のパッキングが起きて天然構造を形成することが分かった。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] S.A. Ali, N. Iwabuchi, T. Matsui, K. Hirota, S. Kidokoro, M. Arai, K. Kuwajima, P. Schuck, and F. Arisaka: Reversible and fast association equilibria of a molecular chaperone, gp57A, of bacteriophage T4. *Biophys. J.* **85** (2003) 2602-2618.
- [2] M. Arai, K. Maki, H. Takahashi, and M. Iwakura: Testing the relationship between foldability and the early folding events of dihydrofolate reductase from *Escherichia coli*. *J. Mol. Biol.* **328** (2003) 273-288.
- [3] M. Arai, M. Kataoka, K. Kuwajima, C.R. Matthews, and M. Iwakura: Effects of the difference in the unfolded-state ensemble on the folding of *Escherichia coli* dihydrofolate reductase. *J. Mol. Biol.* **329** (2003) 779-791.
- [4] K. Kamagata, Y. Sawano, M. Tanokura and K. Kuwajima: Multiple parallel-pathway folding of proline-free staphylococcal nuclease. *J. Mol. Biol.* **332** (2003) 1143-1153.
- [5] Y. Zhu, D.O. Alonso., K. Maki, C.Y. Huang, S.J. Lahr, V. Daggett, H. Roder, W.F. DeGrado, and F. Gai: Ultrafast folding of α 3D: a *de novo* designed three-helix bundle protein. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* **100** (2003) 15486-15491.
- [6] T. Inobe and K. Kuwajima: Φ value analysis of an allosteric transition of GroEL based on a single pathway model. *J. Mol. Biol.* **339** (2004) 199-205.
- [7] R. Iizuka, S. So, T. Inobe, T. Yoshida, T. Zako, K. Kuwajima, and M. Yohda: Role of the helical protrusion in the conformational change and molecular chaperone activity of the archaeal group II chaperonin. *J. Biol. Chem.* **279** (2004) 18834-18839.
- [8] K. Maki, H. Cheng, D.A. Dolgikh, M.C. Shastri, and H. Roder: Early events during folding of wild-type staphylococcal nuclease and a single-tryptophan variant studied by ultrarapid mixing. *J. Mol. Biol.* **338** (2004) 383-400.
- [9] K. Kamagata, M. Arai and K. Kuwajima: Unification of the folding mechanisms of non-two-state and two-state proteins. *J. Mol. Biol.* in press.

(学位論文)

- [10] 中尾正治: Studies on the folding of canine milk lysozyme. (博士論文)
- [11] 村上健次: トロポニン三者複合体の NMR 分光法による構造解析 (博士論文)

- [12] 笠口友隆: Experimental and simulation studies on the unfolding of authentic and recombinant α -lactalbumin: Effect of an N-terminal methionine residue. (修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [13] T. Inobe, M. Arai, K. Kikushima, T. Makio, M. Nakao, K. Kamagata, and K. Kuwajima: Molecular mechanism of the allosteric transition of GroEL. *17th Symposium of the Protein Society* (Boston, U.S.A., July 26-30, 2003) (Poster).
- [14] S. Enoki, K. Saeki, and K. Kuwajima: Acid denaturation and refolding of a mutant (Cycle3) of Green Fluorescent Protein. *17th Symposium of The Protein Society* (Boston, USA, July 26-30, 2003) (Poster)
- [15] K. Kamagata, T. Nakagawa and K. Kuwajima: Protein folding/unfolding studied by a high-pressure temperature-jump apparatus. *17th Symposium of the Protein Society* (Boston, U.S.A., July 26-30, 2003) (Poster)
- [16] R. Yoshida, K. Kamagata, A. Kadooka, K. Saeki, and K. Kuwajima: Folding with multiple initiation sites in staphylococcal nuclease. *17th Symposium of the Protein Society* (Boston, U.S.A., July 26-30, 2003) (Poster)
- [17] S. Enoki, K. Saeki, and K. Kuwajima: Acid denaturation and refolding of a mutant (Cycle3) of Green Fluorescent Protein. *The 9th Keihanna Conference on Molecular Biophysics* (Kyoto, Japan, January 5-8, 2004) (Poster)
- [18] T. Oroguchi, M. Ikeguchi, K. Saeki, A. Kidera, and K. Kuwajima: Experimental and simulation studies of the unfolding of recombinant and authentic α -lactalbumin: Effect of an N-terminal methionine residue. *The 9th Keihanna Conference on Molecular Biophysics* (Kyoto, Japan, January 5-8, 2004) (Poster)
- [19] K. Kamagata, M. Arai and K. Kuwajima: What determines the folding rates of non-two-state and two-state proteins? *The 9th Keihanna Conference on Molecular Biophysics* (Kyoto, Japan, January 5-8, 2004) (Poster)
- [20] A. Kadooka, K. Kamagata, T. Inobe, K. Saeki, and K. Kuwajima: Chaperonin GroEL alters the free energy landscape of folding of staphylococcal nuclease *The 9th Keihanna Conference on Molecular Biophysics* (Kyoto, Japan, January 5-8, 2004) (Poster)

招待講演

- [21] K. Kuwajima: Multiple parallel-pathway folding of proline-free staphylococcal nuclease. *Third KIAS*

Conference on Protein Structure and Function: Folding Mechanism, Proteomics, and Bioinformatics (Korea Institute for Advanced Study, Seoul Korea, September 29-October 1, 2003)

- [22] K. Kuwajima: What determines the folding rates for two-state and three-state folding proteins? *2003 POSTECH Symposium of Structure and Folding in Protein Science* (Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea, October 2, 2003)
- [23] K. Kuwajima: Mechanism of protein folding and its relation to protein hydration. *The 5th ORCS International Symposium on Development of New Structural Biology Including Hydrogen and Hydration* (Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki, Japan, November 19-21, 2003)
- [24] K. Kuwajima: The rate-determining step of kinetic folding of globular proteins. *The 9th Keihanna Conference on Molecular Biophysics* (Kyoto, Japan, January 5-8, 2004)

(国内会議)

一般講演

- [25] 桑島邦博: 蛋白質フォールディングの物理化学的解析、第1回「高次構造からみるプロテオーム機能発現メカニズム」研究会(長浜、2003年5月21-23日)
- [26] 飯塚怜、吉田尊雄、庄村康人、三木邦夫、丸山正、伊野部智由、桑島邦博、養王田正文: ATP結合に伴う古細菌型シャペロニンの構造変化、第3回日本蛋白質科学会年会(札幌コンベンションセンター、2003年6月23-25日)
- [27] 伊野部智由、菊島健児、新井宗仁、榎尾匡、桑島邦博: フッ化金属-ADP複合体によるGroELのアロステリック転移、第3回日本蛋白質科学会年会(札幌コンベンションセンター、2003年6月23-25日)
- [28] 榎佐和子、佐伯喜美子、桑島邦博: 緑色蛍光蛋白質変異体(Cycle3)の酸変性と巻き戻り、第3回日本蛋白質科学会年会(札幌コンベンションセンター2003年6月23-25日)
- [29] 荻口友隆、池口満徳、木寺詔紀、桑島邦博: 分子動力学法を用いた、N末端近傍の構造のみに違いがある α ラクトアルブミンの野生型と組換え体のアンフォールディング解析、第3回日本蛋白質科学会年会(札幌コンベンションセンター2003年6月23-25日)
- [30] 鎌形清人、中川達央、桑島邦博: 高圧下温度ジャンプ装置による蛋白質の巻き戻り・変性過程の観測、第3回日本蛋白質科学会年会(札幌コンベンションセンター、2003年6月23-25日)
- [31] 廉岡昭雄、鎌形清人、伊野部智由、佐伯喜美子、桑島邦博: シャペロニンGroELがスタフィロコッカール・ヌクレアーゼの巻き戻りに及ぼす影響、第3回日本蛋白質科学会年会(札幌コンベンションセンター、2003年6月23-25日)
- [32] 佐伯喜美子、新井宗仁、桑島邦博: ヤギ α -ラクトアルブミンC-ヘリックス変異体の安定性とフォールディング反応、第3回日本蛋白質科学会年会(札幌コンベンションセンター、2003年6月23-25日)
- [33] 吉田龍平、鎌形清人、廉岡昭雄、佐伯喜美子、桑島邦博: スタフィロコッカール・ヌクレアーゼにおける複数部位からのフォールディング、第3回日本蛋白質科学会年会(札幌コンベンションセンター、2003年6月23-25日)
- [34] 鎌形清人、桑島邦博: 球状蛋白質の巻き戻り速度はどのような構造パラメータによって支配されているか? 日本物理学会2003年秋季大会(岡山大学、2003年9月20-23日)
- [35] 榎佐和子、佐伯喜美子、桑島邦博: 緑色蛍光蛋白質変異体(Cycle3)の酸変性と巻き戻り、日本生物物理学会第41回年会(朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター2003年9月23-25日)
- [36] 荻口友隆、池口満徳、佐伯喜美子、池口満徳、桑島邦博: 生物物理学会第41回年会(朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター、2003年9月23-25日)
- [37] 廉岡昭雄、鎌形清人、伊野部智由、佐伯喜美子、桑島邦博: シャペロニンGroELがスタフィロコッカール・ヌクレアーゼの巻き戻りに及ぼす影響、日本生物物理学会第41回年会(朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター2003年9月23-25日)
- [38] 佐伯喜美子、新井宗仁、桑島邦博: ヤギ α -ラクトアルブミン α -ドメイン変異体の安定性とフォールディング反応、日本生物物理学会第41回年会(朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター、2003年9月23-25日)
- [39] 伊野部智由、菊島健児、新井宗仁、榎尾匡、桑島邦博: フッ化金属-ADP複合体によるGroELのアロステリック転移、日本生化学会第76回年会(パシフィコ横浜、2003年10月15-18日)
- [40] 佐伯喜美子、新井宗仁、桑島邦博: 変異蛋白質の安定性とフォールディング反応、第15回生物学技術研究会(岡崎コンファレンスセンター、2004年2月19-20日)

招待講演

- [41] 桑島邦博: 分子シャペロンによる凝集の抑制と再生、大阪大学蛋白研セミナー「タンパク質の構造・機能発現の品質管理 凝集と再生」(大阪大学、平成15年6月5-6日)
- [42] 桑島邦博: Kinetic folding mechanism of goat α -lactalbumin. 特定領域研究「水と生体分子」第1回公開ワークショップ(大阪、千里ライフサイエンスセンター、平成16年1月9日)
- [43] 桑島邦博: 蛋白質フォールディングの分子機構、理工学研究所プロジェクト研究シンポジウム「蛋白質を主とする生体系の化学-生物科学と溶液化学の融合-」(立命館大学・エポック立命21、平成16年1月15日)
- [44] 桑島邦博: A unified view of the protein folding rate: What is the relationship between the folding rates of non-two-state and two-state proteins? 理研シンポジウム「タンパク質のデザイン, 実験室進化, フォールディング」(理研中央研究所(和光)、平成16年3月5日)

(セミナー)

-
- [45] 桑島邦博：大腸菌シャペロニンのアロステリック転移、(北海道大学・大学院理学研究科、平成 15 年 6 月 30 日)
- [46] 伊野部智由：シャペロニン GroEL のヌクレオチドによるアロステリック転移の分子機構、(東京農工大学・工学部、2004 年 3 月 22 日)

7.1 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。

7.1.1 シナプス特異性を決める分子の同定の機能解析

発生過程において神経細胞はいかにして、その行き先を正しく見つけたのだろうか。われわれは、ショウジョウバエの神経系をモデル系として、この問題にアプローチしている。ショウジョウバエの神経筋結合系では、神経細胞を個々に見分けて、その配線（軸索）ができる過程を詳しく調べることができる。以前の研究において、特定の筋肉において発現し、シナプス特異性を決定する標識として働く分子としてカブリシャス、コネクチンを発見した。本年度はバイオイメージング等によるカブリシャスの機能解析を進めるとともに、DNAチップによる新たな機能分子の探索を行った。

特異的シナプス形成過程におけるカブリシャス分子の役割（高坂洋史、能瀬聡直）

これまでの研究により、神経筋シナプス形成過程において、カブリシャスが標的細胞の出す突起の先端に局在することを示した。このことは、特異的シナプス形成過程において、神経細胞の成長円錐と標的細胞の突起の先端が接触した時点から既にカブリシャスが特異性を担っていることを示唆する。そこで、シナプス形成過程におけるカブリシャスの機能を調べるために、カブリシャスを通常発現する筋肉12とそれを支配する運動神経細胞RP5に着目し、欠失変異体の解析を行った。まず、固定標本を用いて運動神経細胞RP5の成長円錐の形態変化を段階的に調べた結果、欠失体において約2割の成長円錐のシナプスへの形態変化が遅れることが明らかとなった。次にシナプス形成過程を生体において解析するために、膜局在型蛍光蛋白質を一部の運動神経細胞と筋肉細胞に発現する系統を作成した。正常胚とカブリシャス欠失胚のそれぞれについて、生理食塩水中でシナプス形成が進んでいく様子を共焦点顕微鏡

により経時的に可視化した。正常胚においては、成長円錐と筋肉細胞の出す突起（マイオポディア）が接触するとそのままシナプス構造へと形態変化した。一方カブリシャス欠失胚では、一度接触した成長円錐とマイオポディアが離れるという現象が観察された。以上のことから、標的細胞の突起の先端および成長円錐に分布する特異性を決める分子（カブリシャス）は、神経細胞と標的細胞との結合を安定化させることにより、特異的シナプス形成を担っていることが示唆される。

神経標的認識分子のDNAチップを用いた網羅的探索（稲木美紀子、能瀬聡直）

ショウジョウバエの神経-筋結合系における神経の標的認識には、カ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。そこで、標的認識の分子機構を解明するためには、遺伝子の網羅的な解析が必要不可欠である。そこで、DNAチップ法を用い、ゲノムレベルで神経標的認識分子を探索することを試みた。我々が用いるDNAチップには、約1万4千個の遺伝子のcDNAがスポットされており、ショウジョウバエゲノム上の全遺伝子について発現量の違いを解析することが可能である。標的認識に働く分子は個々の標的細胞間で発現様式が異なると考えられるため、異なる運動神経細胞RP1及びRP5によりそれぞれ支配されている二つの筋肉、筋肉13及び筋肉12で発現様式が異なる遺伝子を網羅的に同定することを試みた。まず、胚を解剖し、マイクロピペットを用いて筋肉12及び筋肉13を200個ずつ単離し、RNAを抽出した。逆転写及び転写反応による増幅を2回行った後、標識したcRNAを合成し、DNAチップのハイブリダイゼーションを行った。その結果、両筋肉間で発現量に違いのある遺伝子（候補遺伝子と呼ぶ）を約200個検出した。これらのうち20個の候補遺伝子について、in situハイブリダイゼーションを行ったところ、6個について実際に両筋肉間で発現差異があることが確認された。また、43個の候補遺伝子について定量的PCRを行ったところ、30個について発現差異が認められた。以上の結果から、この実験系が期待通りに動くことがわかった。現在、発現差異の確認された遺伝子のうち、膜結合型及び分泌型たんぱく質をコードする遺伝子について、異所発現が可能な形質転換体を作製し、機能解析を行っている。

7.1.2 シナプス形成の生物物理

シナプスは神経細胞が他の神経細胞や筋肉細胞と接合、連絡する部位で、神経伝達の中心的位置を占める。にもかかわらず、秩序だった分子装置の集積であるシナプス構造がどのようにしてできていくのか、という問いかけに答える研究はまだ始まったばかりである。当研究室ではショウジョウバエ神経-筋シナプスをモデルとして、シナプス形成の分子機

構を探っている。特に、バイオイメーシング、電気生理学等の生物物理学的諸技術を用い、機能的側面と、形態的側面の両方向からシナプス形成の分子機構を理解することを目標としている。

シナプス形成過程における接着分子ファシクリン II の *in vivo* 可視化 (高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直)

シナプス構造を安定化させるために、前膜と後膜の双方に発現し互いに細胞外で接着する蛋白質(接着分子)が重要である。接着分子がないとシナプスは剥がれてしまうことが報告されているが、シナプスができる際の接着分子の挙動は不明な点が多い。我々は、ショウジョウバエ神経筋結合部に局在する接着分子ファシクリン II を *in vivo* で可視化することによって、シナプス形成過程における接着分子の挙動の解析を行った。このため、ファシクリン II と蛍光蛋白質との融合蛋白質 (FasII-XFP) を第 12 番筋肉特異的に発現させ、シナプス形成期におけるシナプス後膜上の FasII-XFP の局在を観察した。運動神経細胞の成長円錐と筋肉細胞がまだ接触しない産卵後 13 時間において、FasII-XFP は筋肉細胞の出す突起(マイオボディア)上に一様に分布した。これは、突起の先端に局在した標的認識分子カプリヤスとは異なるタイプの挙動制御がなされていることを示す。成長円錐が筋肉細胞上でシナプス構造へと変化する産卵後 15 時間になると、FasII-XFP はシナプス部に強く局在する。シナプス構造形成と FasII-XFP の局在とのこの強い時空間的相関は、FasII の挙動制御がシナプス形成に重要であることを予見させる。そこでシナプス後細胞上で FasII-XFP がシナプス部へ局在するしくみを遺伝学的に探索した。まず、シナプス後膜部での FasII-XFP の局在が、シナプス前細胞の成長円錐に依存しているかを確かめるために、運動神経細胞の軸索伸長が遅れる変異体で、FasII-XFP の局在を観察した。すると、この変異体では産卵後 15 時間になっても FasII-XFP は局在しなかった。このことから、シナプス後細胞における FasII-XFP のシナプス部への局在には、成長円錐との相互作用が必要であることが分かった。前細胞のファシクリン II を欠失していても、シナプス後細胞における FasII-XFP のシナプス部への局在は見られたので、この過程はシナプス前、後細胞間のファシクリン II の homophilic な結合の結果ではなく、シナプス前細胞による順行的な制御によるものであることが示唆された。

シナプス形成に関わる蛋白質の可視化プローブの作成 (高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直)

シナプス部は、情報伝達及びその安定化のために様々な蛋白質が構造化されている。我々は、情報伝達物質であるグルタミン酸の受容体 GluRIIA、及びシナプス構造を安定化させる膜蛋白質結合蛋白質 DLG に注目し、その蛍光蛋白質融合遺伝子を作成し、ショウジョウバエゲノムに挿入し系統化した。GluRIIA

に関して、異なる 3 箇所に蛍光蛋白質 YFP を挿入した系統をそれぞれ作成した。GluRIIA は 3 齢幼虫の筋肉細胞においてシナプス部に局在するが、作成した GluRIIA-YFP は 3 種ともシナプス部への局在は見られなかった。しかし、GluRIIA-YFP の発現量を低く抑えたところ、一つの系統 GluRIIA-YFP-N1 はシナプス部に弱く局在した。GluRIIA-YFP-N1 をグルタミン酸受容体のプローブとして用いるためには、さらなる検討が必要である。一方 DLG に関しては、既にプローブとして用いられている DLG-GFP の系統のゲノムから、DLG 遺伝子をクローニングし、DLG-YFP 遺伝子を作成しショウジョウバエゲノムに挿入した。今後この系統を用いて、他の CFP 融合蛋白質との *in vivo* 同時可視化によって、シナプス形成の動的過程を解析する計画である。

シナプス形成初期におけるシナプス前細胞とシナプス後細胞の同時可視化 (石橋和也、高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直)

近年の研究により、シナプス形成過程において、シナプス前細胞とシナプス後細胞が共に細かい突起を出し、相互作用を行っていることが分かってきた。しかしながら、この相互作用を生体内において詳細に研究した例は非常に少ない。そこで、我々はショウジョウバエ神経筋結合過程において、シナプス前細胞とシナプス後細胞の突起が接触し相互作用する様子を、それぞれに別の色の蛍光蛋白質を発現させることで観察することを試みた。前シナプス細胞を可視化するために、中枢神経系全体での発現を促すプロモータ (elav プロモータ) 配列の下流に膜局在型シグナルをもつ GFP の color variants (CFP, YFP) をコードする遺伝子をもつショウジョウバエ系統を作成し、実際に前シナプス細胞を *in vivo* 観察することに成功した。一方、後シナプス細胞を可視化するために、従来より用いられている UAS 配列下流に膜局在型シグナルをもつ GFP の color variants (CFP, YFP 版) を作成した。これら 2 系統と M12-GAL4 系統を掛け合わせることでシナプス前細胞とシナプス後細胞の突起の同時可視化を今後行う予定である。

シナプス形成機構の解析: シナプス形成初期過程に於ける CaMKII の役割 (風間 北斗、谷藤 (森本) 高子、能瀬聡直)

シナプスの形成には神経細胞とその標的細胞間の綿密な相互作用が重要である。我々は、標的細胞に端を発して逆行的に働くシナプス形成調節の分子機構を解明するため、細胞に流れ込む微小電流が測定できるパッチクランプ法と、免疫組織学的手法を用いて研究を進めている。これまでに、標的細胞である筋肉細胞内に解析したい分子を発現させた時の、シナプス伝達に対する影響を特異的に検出できる系を確立した。具体的には、同じ神経細胞がシナプスを形成している隣り合う 2 つの筋肉細胞において、

GAL4-UAS システムを用い、目的分子を片方の筋肉細胞にのみ発現させた実験系である。この系において、同一個体、同体節内の2つの筋肉細胞間でシナプス応答を比較すると、個体差や発生段階のばらつきを除外でき、神経細胞側に関しては同一条件の下で、筋肉細胞に発現させた分子の特異的な影響が解析できる。我々は標的細胞内のシグナル伝達系を変化させたときのシナプス形成に対する影響について調べた。種々のシグナル伝達機構に参与する分子のうち、カルシウム/カルモジュリン依存性キナーゼ II (CaMKII) に着目した。CaMKII はシナプス構造の後細胞側に豊富に含まれ、シナプス可塑性や、学習・記憶において重要な働きをされると考えられている酵素である。先に述べた実験系を用い特定の筋肉細胞に活性化型 CaMKII、もしくは阻害ペプチドを発現させ、そのシナプス伝達に与える影響について検討した。その結果、後シナプス細胞内の CaMKII は、前シナプスの逆行的な調節、及び前シナプスと後シナプスの協調的成熟の促進という二つの機能を持つことが明らかになった。さらに、CaMKII の下流に位置する逆行性因子の探索に取り組んでいる逆行的調節の範囲が局限していたことから、NCAM のホモログである接着分子 Fasciclin II などの膜局在分子の可能性が高いと考えられるが、予備的な形態的解析の結果はそれと矛盾しないものであった本年度は、Fasciclin II を始めとした様々な膜局在分子の機能喪失バックグラウンドで活性化型 CaMKII を発現する系統を樹立した。現在、それら系統のシナプスの形態解析を進めている。

シナプス形成過程における CaMKII の発生段階依存的な役割 (谷藤 (森本) 高子、風間 北斗、能瀬 聡直)

我々は、これまでに筋肉細胞内の CaMKII 活性化によるシナプス形成に対する影響が発生段階によって異なることを明らかにしてきた。さらに、今年度、3 齢幼虫において、CaMKII の活性を筋肉細胞内で変化させたときに、神経伝達物質受容体 (GluR) の局在が変化することが明らかになった。具体的には、筋肉細胞内に活性化型 CaMKII を発現させると、GluR のシナプス部における含有量が減少し、逆に、CaMKII 活性を阻害するペプチドを発現させると、GluR のシナプス部における含有量が増大した。このことは、CaMKII の活性化レベルによって、GluR のシナプスへの局在が制御されていることを示している。また、CaMKII によって調節を受けた GluR の局在の変化が引き金となって、神経終末の方にも働きかけ、シナプス全体の機能を調節している可能性も考えられた。そこで、さらに、CaMKII による GluR の局在制御の分子機構とシナプス形成に対する影響について詳しく検討している。

シナプス形成過程におけるカルシウムシグナルの可視化 (風間 北斗、谷藤 (森本) 高子、能瀬 聡直)

種々の組織が機能するとき、細胞内ではカルシウム濃度の変動が見られる。すなわち、定常状態では細胞内カルシウム濃度は nM のオーダーに低く保たれているが、細胞内カルシウム濃度が μ M レベルへと上昇することが引き金となって、様々な生体の反応が引き起こされる。シナプス形成過程においても例外ではなく、神経細胞が標的細胞の方に伸長していく際に自発的な一過性のカルシウム濃度変動が見られること、また、神経細胞が標的細胞に接触したときにカルシウム濃度上昇が見られることが報告されている。しかし、特に後者は培養細胞系における結果であり、生体内では果たしてどうなのか、神経細胞が接触する標的細胞の方にはカルシウム濃度変化があるのかなど、その詳細は明らかになっていない。我々はシナプス形成が起こるときのカルシウム濃度変化を可視化することにより、シナプス形成に関わるシグナル機構を明らかにしたいと考え研究を進めている。具体的には、カルシウムイオンとの結合により蛍光強度が変化する指示薬を用いた、一励起一蛍光もしくは二蛍光波長型イメージングを行っている。高感度冷却 CCD カメラ、Ar-Kr レーザー、ニポウ式共焦点ユニットを組み合わせ、全画素読み出しでありながらも高速な画像取得が可能で、4 次元解像度の高い測定系を構築した。本年度は、タイムラグ無しに画像取得ができるよう、系の性能を向上させた。シナプス形成期における標的細胞内カルシウムダイナミクスの解明に主眼を置いているが、特に、筋肉細胞から伸展される myopodia という細かな突起内に注目してイメージングを行った。ポスト内のカルシウム濃度をキレート剤で減少させると、myopodia の挙動が変化したので、カルシウムが何らかの役割を果たしている可能性が示唆された。現在、プレとポストの接触前後に myopodia や他のポストの構造内で特徴的なカルシウム濃度変動があるかどうか、データ解析を行うと共に更なる測定を続けている。また、この時期にポスト内でカルシウム濃度変化を引き起こす因子として、神経伝達物質が働いている可能性を検証するために、神経伝達物質を局所部分においてのみ、パルス状に放出するシステムを構築した。

7.1.3 シナプス成長・可塑性の分子機構

シナプスは形成された後も、学習や記憶といった過程で、また、環境の変化などに対応して適切に情報を伝えるために、その伝達能力を可塑的に変化させる。ショウジョウバエ神経筋シナプスでは、孵化後の活発な運動や筋肉の成長に対応してシナプスが成長し、一定の伝達能力を保つように調節されている。当研究室ではこの性質を利用し、シナプス可塑性の原理を探っている。

シナプス形成過程からシナプス成熟機構へのスイッチング：神経活動依存的な過程の解明（中山 浩明、谷藤（森本）高子、能瀬 聡直）

ショウジョウバエの幼虫は孵化後も著しい体の成長を続け、幼虫期には筋肉細胞の大きさは100倍以上にもなり、それに対応して筋肉上のシナプスの数も増大する。筋肉細胞の大きさに合わせてシナプスを成長させる機構には筋肉細胞からの何らかの働き（因子）が関与していることが推測されているが、その分子機構については不明な点が多い。我々はこれまでのCaMKIIの役割を調べる実験から得られた知見から、この機構は孵化後の神経活動によりスイッチオンされるという仮説を立てた。この仮説をさらに検証し、メカニズムを明らかにするための研究を行っている。これまで扱ってきた実験系である、同一の神経細胞がシナプスを形成する、二つの筋肉細胞（6番、7番筋肉（M6、M7））では、二つの筋肉細胞は大きさが異なりM6の方が大きい。シナプスの大きさもそれに合わせて、M6のほうが大きいことが知られている。（この現象をわれわれは、Matchingと呼ぶことにする。）我々はこれまでに、Matchingは孵化直後の幼虫では見られず、孵化7時間以上後の幼虫にはじめて見られること、Matching機構には感覚神経の活動が必要であることを明らかにした。本年度はさらに、Matchingの分子機構を解明するため、骨誘導因子BMP signalingの関与について調べた。BMP signalingは近年、筋肉細胞から神経細胞へと働きかけシナプスの成長に関与すると注目されているシグナル系である。我々はBMP type receptorであるwishful thinking (wit)の変異体において、Matchingが見られるかどうかを調べるため、電気生理学的、免疫組織学的手法を用いて、孵化7時間後でのシナプスの応答、形態を測定した。その結果、wit変異体においては、シナプスの応答はM6の方がM7よりも大きかった。また、その形態においても、wit変異体においてはシナプスの大きさは全体的にやや小さくなるものの、やはりM6の方がM7より大きかった。したがって、BMP signalingはMatching機構には関与していないと考えられる。今後は他の分子の関与を検討するなどして、シナプス成熟の分子機構をさらに明らかにしていきたい。

シナプス成長に伴う形態変化の可視化（石橋和也、高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直）

シナプス成長に伴う形態変化には、シナプス可塑性一般に通ずる分子メカニズムが関与していると考えられている。ショウジョウバエ幼虫の神経筋シナプスでは、シナプス発達に伴う形態変化を、生きた個体内で長時間観察できる。これまでに、後シナプス部を可視化するGFPプローブを用いてシナプスの成長の過程を調べる研究が他のグループにより報告されている。しかしながら、この過程において前シナプス部がどのような挙動をとるのかを同時に見た研究はない。そこで、我々は、シナプス前部と後部を異なったGFP変異体（CFP, YFP）により可視

化することを試みた。まず前部を可視化する手法として、上記のUAS配列下流にCFP, YFP遺伝子を持つショウジョウバエ系統を中枢神経系で発現するC380-GAL4という系統とかけ合わせることが有効であることを見いだした。一方、後部の可視化のために先行研究において用いられたCD8-Shaker蛋白質（シナプス局在部位をもつ膜タンパク質マーカー）とGFP変異体の融合蛋白質のcolor variant（CFP, YFP版）を筋肉全体で発現する系統を作成した。現在この2系統とC380-GAL4系統を掛け合わせることで、シナプス前細胞と後細胞の同時可視化を試みている。また、シナプス可塑性において重要な働きをすることが知られている細胞接着分子FasciclinIIのシナプス成長過程におけるライブイメージングも試みている。以前の研究においてシナプスが成長する箇所においてFasciclinIIの発現量が減少する現象が報告されている。生体においてFasciclinIIの挙動とシナプスの形態を同時に可視化することにより、この分子の発現量の変化とシナプス形成との因果関係を明らかに出来る可能性があると考えている。このため上記のGFP変異体との融合蛋白質を発現する系統を用いた研究を進めている。

生体イメージングによるアクチン細胞骨格制御の研究（田中宏昌、高須悦子、能瀬聡直）

異所発現トラップ株G6系統は、ショウジョウバエ胚における神経全体での強制発現が軸索のパターンに異常を生ずるものとして単離された系統である。G6遺伝子（我々はformin3と名づけた）は残基数1644の新規フォーミンホモロジータンパク質をコードしており胚発生過程において、気管系で発現している。また、formin3突然変異体は気管系においてドーサルトランクのルーメンが途切れるという異常が見られることも見出している。この気管発生における異常をさらに詳しく解析するために、本年度、我々はGal4-UASシステムとGFPイメージング手法を用いて気管系のライブ観察を行った。気管細胞内におけるアクチン細胞骨格のライブ観察により、formin3突然変異体においては、フュージョンセルと呼ばれる気管のルーメンの融合において重要な役割をしている細胞において、本来形成されるはずのアクチン性の繊維状の構造が安定に形成されないことが分かった。この結果からこの遺伝子は気管のルーメンの融合に重要なアクチン細胞骨格構造を形成するのに重要な役割を果たしていることが示唆された。

緑色蛍光タンパク質GFPの光物理学的性質の研究（加藤明彦、桑島邦博、小林孝嘉、能瀬聡直）

生命科学分野で分子マーカー等の用途で広範に用いられているGreen Fluorescent Protein(GFP)のNeutral form(発色団のフェノール環のプロトンが未解離な状態)の光励起直後のダイナミクスについて知見を得る為に、物理学教室の小林研究室で開発された中心波長約400nmのフェムト秒パルスレーザーを用

い、GFP 変異体の 1 種である Cycle3(桑島研究室より提供して頂いた)を測定試料とするポンプ・プローブ分光実験を行った。この結果、電子遷移にカップルして約 23cm^{-1} という低周波数分子振動が励振されている事が明らかとなった。なお本研究は、小林研究室及び桑島研究室との共同研究として行われた。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Kazama, H., Morimoto-Tanifuji, T. and Nose, A.: Postsynaptic activation of calcium/calmodulin-dependent protein kinase II promotes coordinated pre- and postsynaptic maturation of *Drosophila* neuromuscular junction. *Neuroscience* 117, 615-625 (2003).

(国内雑誌)

- [2] 新座 亀田麻記子、能瀬聡直：層特異的投射における標的特異性決定のメカニズム、蛋白質・核酸・酵素 49, 345 (2003).

(学位論文)

- [3] 田中宏昌：ショウジョウバエの気管形成に関わる新規遺伝子 *formin3* の解析 (博士論文)
- [4] 中山浩明：標的細胞の大きさに合わせたシナプス成熟機構の解析 (修士論文)
- [5] 加藤明彦：生体関連分子のフェムト秒分光 (修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [6] Hiroshi Kohsaka and Akinao Nose: Clustering of the target recognition molecule *Capricious* at the tips of myopodia. 2003 international congress of genetics: a *Drosophila* conference (Cairns, Australia, July 2003)
- [7] Hiroshi Kohsaka and Akinao Nose: Concentration of the target recognition molecule *Capricious* at the tips of myopodia and the nascent synapse in *Drosophila*. EMBO workshop on "The assembly of neural circuits" (Varenna, Italy, September 2003)
- [8] Hiroshi Kohsaka and Akinao Nose: Postsynaptic dynamism and neural specificity: Concentration of the target recognition molecule *Capricious* at the tips of myopodia. FMI conference on "Formation and function of neuronal circuits" (Ascona, Swiss, September 2003)
- [9] Makiko Shinza-Kameda and Akinao Nose: Control of photoreceptor targeting by layer-specific expression of the LRR protein *Capricious*. 2003 meeting on "Neurobiology of *Drosophila*" (Cold Spring Harbor, U. S. A., October, 2003)

- [10] Takako Morimoto-Tanifuji, Hiroaki Nakayama, Hokto Kazama and Akinao Nose: Activity-dependent mechanisms for synaptic growth matched with postsynaptic muscle volume in *Drosophila* neuromuscular junctions. 2003 meeting on "Neurobiology of *Drosophila*" (Cold Spring Harbor, U. S. A., October, 2003)

- [11] Takako Morimoto-Tanifuji, Hiroaki Nakayama, Hokto Kazama and Akinao Nose: Activity-dependent synaptic maturation matched with the size of postsynaptic cells in *Drosophila* neuromuscular junctions. 33th Annual Meeting of Society for Neuroscience (New Orleans, November, 2003)

(国内会議)

招待講演

- [12] 能瀬聡直、高坂洋史：神経筋シナプス形成過程における標的認識分子の動態観察、日本顕微鏡学会第 48 回シンポジウム (東京、2003 年 12 月)

一般講演

- [13] 谷藤(森本)高子、風間 北斗、能瀬 聡直：シナプス細胞内の CaMKII はシナプスの発達段階に応じてシナプス形成機構に対し異なった作用を持つ、第 26 回日本神経科学大会 (名古屋、2003 年 7 月)
- [14] 高坂洋史、能瀬聡直：神経標的認識過程において、標的認識分子カプリシャスは、標的細胞の突起の先端に凝集する、第 26 回日本神経科学大会 (名古屋、2003 年 7 月)
- [15] 新座(亀田)麻記子、能瀬聡直：ショウジョウバエ視神経の層特異的投射における *Capricious* の役割、第 26 回日本神経科学大会 (名古屋、2003 年 7 月)
- [16] Takako Morimoto-Tanifuji, Hokto Kazama, and Akinao Nose: Developmental Stage-dependent Effects of Postsynaptic Activation of CaMKII on Synapse Formation at *Drosophila* Neuromuscular Junctions, 日本ショウジョウバエ研究会第 6 回集会 (東京、2003 年 7 月)
- [17] Hiromasa Tanaka, Etsuko Takasu, Takeshi Umemiya, Toshiro Aigaki, Kagayaki Kato, Shigeo Hayashi and Akinao Nose: A novel *formin* homology protein implicated in tracheal formation in *Drosophila*. ショウジョウバエ研究会第 6 回研究会 (東京、2003 年 7 月)
- [18] Hiroaki Nakayama, Takako Morimoto-Tanifuji, Hokto Kazama, and Akinao Nose: Activity-dependent mechanisms for synaptic growth matched with postsynaptic muscle volume in *Drosophila* Neuromuscular Junctions 日本ショウジョウバエ研究会第 6 回集会 (東京、2003 年 7 月)
- [19] Hokto Kazama, Takako Morimoto-Tanifuji, and Akinao Nose: In vivo imaging of calcium dynamics within identified target cells during synaptogenesis 日本ショウジョウバエ研究会第 6 回集会 (東京、2003 年 7 月)

-
- [20] Hiroshi Kohsaka and Akinao Nose : The target recognition molecule Capricious concentrates at the tips of protrusion of muscle cells. ショウジョウバエ研究会第6回研究集会(東京、2003年7月)
- [21] Mikiko Inaki and Akinao Nose : Comprehensive identification of the neuronal target recognition molecules in Drosophila neuromuscular system using GeneChip. ショウジョウバエ研究会第6回研究集会(東京、2003年7月)
- [22] Makiko Shinza-Kameda and Akinao Nose : Control of photoreceptor targeting by layer-specific expression of the LRR protein Capricious. ショウジョウバエ研究会第6回研究集会(東京、2003年7月)
- [23] 中山 浩明、森本 - 谷藤 高子、風間 北斗、能瀬 聡直 : 標的細胞の大きさに応じて適切な大きさのシナプスを形成する仕組み、第41回日本生物物理学会、(新潟、2003年9月)
- [24] 風間 北斗、森本 - 谷藤 高子、能瀬 聡直 : シナプス形成過程における標的細胞内カルシウムシグナルの可視化、第41回日本生物物理学会、(新潟、2003年9月)

8 技術部門

8.1 技術部門

8.1.1 実験装置試作室

利用状況

2003年4月から2004年3月までの、実験装置試作室の主な利用状況は以下のとおりである。

- | | |
|--|-----|
| 1. 内部製作件数 | 91件 |
| 2. 設計及び部品等の問い合わせ | 70件 |
| 3. 外注発注 | 30件 |
| 4. 他教室等からの作業依頼及び問い合わせ
(地質学、鉱物学、動物学、五月祭) | 4件 |

工作実習

当教室所属の大学院1年生を対象として、6月16日から7月7日まで下記の内容で工作講習会を行なった。

- 参加人員：42名
- 実習内容
 1. 実験用機器・部品等の製作に必要な設計・製図の基礎
 2. 測定器(ノギス、マイクロメーター等)の使い方
 3. ケガキ、ポンチ、タツブ、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

その他

理学系研究科・理学部技術部集合研修(機械工作関係)を11月19日～21日まで試作室で行なった。

II

Summary of group activities in 2003

1 Theoretical Nuclear Physics Group

Subjects: Structure and reactions of unstable nuclei, Monte Carlo Shell Model, Molecular Orbit Method, Mean Field Calculations, Quantum Chaos
Quark-Gluon Plasma, Lattice QCD simulations, Structure of Hadrons

Member: Takaharu Otsuka, Tetsuo Hatsuda, Naoyuki Itagaki, and Shoichi Sasaki

In the nuclear theory group, a wide variety of subjects are studied. The subjects are divided into two major categories. One is Nuclear Structure Physics and the other Hadron Physics.

Nuclear Structure Physics

Among various subjects of the Nuclear Structure Physics, we have studied mostly, during the past one year, (1) Structure and reaction of unstable nuclei, (2) Monte Carlo Shell Model, (3) various new approaches to the nuclear many-body problems.

(1) Exotic (Unstable) nuclei stand for the nuclei far from the beta stability line. We are studying various features of such nuclei. This year, a systematic study has recently been made for unstable nuclei around $A=30$, focusing upon varying shell gap, vanishing magic number and anomalous deformation, by applying the Monte Carlo shell model described below. We found that magic numbers of unstable nuclei can be quite different systematically from those of stable nuclei, and this difference is one of the consequences of the shell evolution [1, 2, 3]. The tensor interaction has been shown to have significant effect on the shell evolution. Significant influences of the spin-isospin interaction are also for magnetic moments and Gamov-Teller transitions [4].

(2) We have proposed, several years ago, the Quantum Monte Carlo Diagonalization (QMCD) method for solving many-body problems. This method enables us to generate, through a Monte Carlo process, a small number of many-body bases which are important to the final solution. The method therefore can be characterized as *importance truncation scheme*. Thus, this study is expected to produce enormous progress in our understanding of nuclear structure. This kind of studies are referred to as Monte Carlo Shell Model (MCSM) [1, 2, 3].

(3) The molecular structure of unstable nuclei is studied extensively also [5, 6]. The quantum chaos and symmetry are shown to be closely connected. The relativistic mean field approaches are studied from some new perspectives as well.

Hadron Physics

In 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 Hadrons in quark-gluon plasma [7, 8]
 - 1.2 Color superconductivity in quark matter [9]
 - 1.3 Superfluidity, pion condensation and chiral restoration in strong coupling QCD [10, 11]
 - 1.4 Induced critical phenomena in strong coupling QCD [12]
2. QCD structure of hadrons
 - 2.1 Axial structure of the nucleon in lattice QCD simulations [13]
 - 2.2 Lattice QCD study of the penta-quark

References

- [1] M. Honma, T. Otsuka, B.A. Brown and T. Mizusaki : New effective interaction for pf-shell nuclei and its implications for the stability of the N=Z=28 closed core, Phys. Rev. C **69**, 034335-1 - 034335-34 (2004).
- [2] S.N. Liddick, B.A. Brown, M. Honma, T. Otsuka, T. Mizusaki, et al.: Lowest Excitations in ^{56}Ti and the predicted N=34 shell closure, Phys. Rev. Lett. **92**, 072502-1 - 072502-4 (2004).
- [3] A.F.Lisetskiy, M. Honma, T. Otsuka, T. Mizusaki, et al.: Experimental evidence for ^{56}Ni -core breaking from the low-spin structure of the N = Z nucleus $^{58}\text{Cu}_{29}$, Phys. Rev. C **68**, 034316-1 - 034316-10 (2003).
- [4] T. Suzuki, R. Fujimoto and T. Otsuka : Gamow-Teller transitions and magnetic properties of nuclei and shell evolution, Phys. Rev. C **67**, 044302-1 - 044302-15, (2003).
- [5] N. Itagaki, T. Otsuka, K. Ikeda, and S. Okabe : Equilateral triangular shape in ^{14}C , Phys. Rev. Lett. **92**, (2004), 142501
- [6] N. Itagaki, A. Kobayakawa, and S. Aoyama : New Description of Light Nuclei by Extending AMD approach, Phys. Rev. C **68** (2003), 054302
- [7] M. Asakawa and T. Hatsuda : J/Ψ and η_c in the Deconfined Plasma from Lattice QCD, Phys. Rev. Lett. **92**, 012001 (2004).
- [8] M. Asakawa and T. Hatsuda : Hadronic Spectral Functions below and above the Deconfinement Phase Transition, Nucl. Phys. **A721**, 869 (2003).
- [9] T.Matsuura, K.Iida, T.Hatsuda, and G.Baym: Thermal fluctuations of gauge fields and first order phase transitions in color superconductivity, Phys. Rev. D **69**, 074012 (2004).
- [10] Y. Nishida, K. Fukushima and T. Hatsuda: "Thermodynamics of strong coupling 2-color QCD with chiral and diquark condensates", Phys. Rep. (2004).
- [11] Y. Nishida: "Phase structures of strong coupling lattice QCD with finite baryon and isospin density", Phys. Rev. D **69**, 094501 (2004).
- [12] K. Fukushima, Relation between the Polyakov loop and the chiral order parameter at strong coupling, Phys. Rev. D **68**, 045004 (2003).
- [13] S. Sasaki, K. Orginos, S. Ohta and T. Blum : Nucleon Axial Charge from Quenched Lattice QCD with Domain Wall Fermions, Phys. Rev. D **68**, 054509 (2003).

2 Theoretical Particle and High Energy Physics Group

Research Subjects: The Unification of Elementary Particles & Fundamental Interactions

Member: Kazuo Fujikawa, Tohru Eguchi, Tsutomu Yanagida, Yutaka Matsuo,
Ken-Ichi Izawa, Teruhiko Kawano, Yuji Sugawara, Yosuke Imamura.

The main research interests at our group are in superstring theory, quantum theory of gravity and unification theories. Superstring theory, supersymmetric field theories, topological 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. In addition to these topics, we also study various problems in quantum field theory, from the viewpoints of both continuum and lattice approaches.

We list the main subjects of our researches below.

1. String Theory
 - 1.1 Supersymmetric Gauge Theories, Topological String Theories and Superstrings [1, 2, 3, 4, 27, 32, 35, 36, 37]
 - 1.2 String Field Theory [21, 22, 23, 24, 30]
 - 1.3 Strings and D-branes on Curved Backgrounds [5, 6, 15, 16, 19, 20, 25, 28, 31, 33, 34, 38, 39, 41]
2. High Energy Phenomenology
 - 2.1 Particle Cosmology [7, 8, 9, 17, 26, 40, 42, 43, 44]
 - 2.2 Supersymmetric Unification Models [14, 18, 45]
3. Quantum Field Theory
 - 3.1 Anomalies and Fundamental Problems in Field Theory [10, 11, 12, 13, 29]

References

- [1] T. Eguchi and H. Kanno, “Topological strings and Nekrasov’s formulas,” *JHEP* **0312**, 006 (2003).
- [2] T. Eguchi and H. Kanno, “Geometric transitions, Chern-Simons gauge theory and Veneziano type amplitudes,” *Phys. Lett. B* **585**, 163 (2004).
- [3] T. Eguchi and K. Sakai, “Seiberg–Witten Curve for E -String Theory Revisited,” *Adv. Theor. Math. Phys.* **7** (2003) 419.
- [4] T. Eguchi and Y. Sugawara, “Branches of $N = 1$ vacua and Argyres-Douglas points,” *JHEP* **0305**, 063 (2003).
- [5] T. Eguchi and Y. Sugawara, “Modular Bootstrap for Boundary $N=2$ Liouville Theory,” *JHEP* **0401**, 025 (2004).
- [6] T. Eguchi and Y. Sugawara, “ $SL(2, \mathbb{R})/U(1)$ supercoset and elliptic genera of non-compact Calabi-Yau manifolds,” to appear in *JHEP*, arXiv:hep-th/0403193.
- [7] M. Fujii and M. Ibe, “Neutralino dark matter from MSSM flat directions in light of WMAP result,” *Phys. Rev. D* **69**, 035006 (2004).
- [8] M. Fujii, M. Ibe and T. Yanagida, “Thermal leptogenesis and gauge mediation,” *Phys. Rev. D* **69**, 015006 (2004).
- [9] M. Fujii, M. Ibe and T. Yanagida, “Upper bound on gluino mass from thermal leptogenesis,” *Phys. Lett. B* **579**, 6 (2004).

-
- [10] K. Fujikawa and H. Suzuki, “Anomalies, local counter terms and bosonization”, hep-th/0305008, Phys. Rep. C (in press).
- [11] K. Fujikawa and P. van Nieuwenhuizen, “Topological anomaly from the path integral measure in superspace”, Ann. of Phys. 308(2003)78.
- [12] K. Fujikawa, A. Rebhan and P. van Nieuwenhuizen, “On the nature of the anomalies in the supersymmetric kink”, Int. Jour. Mod. Phys. A18(2003)5637.
- [13] K. Fujikawa and R.E. Shrock, “On a Neutrino electroweak radius”, Phys. Rev. D69(2004)013007.
- [14] M. Ibe and T. Watari, “Upper bound of proton life-time in product-group unification,” Phys. Rev. D **67**, 114021 (2003).
- [15] K. Ideguchi and Y. Imamura, “Strings in a PP-wave background compactified on T^8 with twisted S^1 ,” Prog.Theor.Phys. 110 (2003) 1021-1035
- [16] Y. Imamura, “Decay of type 0 NS5-branes to nothing,” Phys.Rev. D69 (2004) 026005.
- [17] K.-I. Izawa, “Supergravity Minimal Inflation and its Spectral Index Revisited,” Phys. Lett. **B576** (2003) 1.
- [18] K.-I. Izawa, T. Watari, and T. Yanagida, “Super- and CP-symmetric QCD in Higher Dimensions,” Phys. Lett. **B**, in press.
- [19] T. Kawano and S. Yamaguchi, “Dilatonic Parallelizable NS-NS Backgrounds,” Phys. Lett. **B568** (2003), 78.
- [20] J. M. Figueroa-O’Farrill, T. Kawano, and S. Yamaguchi, “Parallelizable Heterotic Backgrounds,” **JHEP 0310** (2003), 012.
- [21] I. Bars, I. Kishimoto and Y. Matsuo, “Analytic study of nonperturbative solutions in open string field theory,” Phys. Rev. **D67** (2003) 126007.
- [22] I. Bars, I. Kishimoto and Y. Matsuo, “Fermionic ghosts in Moyal string field theory,” **JHEP 0307** (2003) 027.
- [23] I. Kishimoto, Y. Matsuo and E. Watanabe, “Boundary states as exact solutions of (vacuum) closed string field theory,” Phys. Rev. **D68** (2003) 126006.
- [24] I. Kishimoto, Y. Matsuo and E. Watanabe, “A universal nonlinear relation among boundary states in closed string field theory,” Prog. Theor. Phys. **111** (2004) 433.
- [25] I. Kishimoto and Y. Matsuo, “Cardy states as idempotents of fusion ring in string field theory,” Phys. Lett. B to appear.
- [26] F. Koyama, Y. Tachikawa and T. Watari, “Supergravity Analysis of Hybrid Inflation Model from D3D7 System,” hep-th/0311191, Phys. Rev. D, in press.
- [27] Y. Nakayama, “Effective gauge degrees of freedom and the (non)existence of the glueball superpotential,” **JHEP 0308**, 049 (2003).
- [28] Y. Nakayama, “Tadpole cancellation in unoriented Liouville theory,” **JHEP 0311**, 017 (2003).
- [29] M. Nishikawa, “On singular potential of the Schrödinger equation,” Mod. Phys. Lett. A **18** (2003) 1991.
- [30] K. Ohmori, “Level-Expansion Analysis in NS Superstring Field Theory Revisited,” arXiv:hep-th/0306096, to be published in Int. J. Mod. Phys. A.
- [31] K. Ohmori, “Toward Open-Closed String Theoretical Description of Rolling Tachyon,” Phys. Rev. D **69**, 026008 (2004).
- [32] Y. Konishi and K. Sakai, “Asymptotic Form of Gopakumar–Vafa Invariants from Instanton Counting,” Nucl. Phys. B **682** (2004) 465.
- [33] Y. Sugawara, “Thermal partition function of superstring on compactified pp-wave,” Nucl. Phys. B **661**, 191 (2003).
- [34] Y. Sugawara, “Thermal partition functions for S-branes,” **JHEP 0308**, 008 (2003).
- [35] Y. Tachikawa, “Derivation of the Konishi anomaly relation from Dijkgraaf-Vafa with (bi-)fundamental matters,” Phys. Lett. B **573**, 235 (2003).
- [36] Y. Tachikawa, “Derivation of the linearity principle of Intriligator-Leigh-Seiberg,” Prog. Theor. Phys. **110**, 841 (2003).
- [37] Y. Tachikawa, “Five-dimensional Chern-Simons terms and Nekrasov’s instanton counting,” **JHEP 0402**, 050 (2004).
- [38] Y. Hikida, H. Takayanagi and T. Takayanagi, “Boundary states for D-branes with traveling waves,” **JHEP 0304** (2003) 032.

-
- [39] H. Takayanagi, “Boundary states for supertubes in flat spacetime and Goedel universe,” *JHEP* **0312** (2003) 011.
 - [40] G. C. Cho and Y. Uehara, “Cosmological gravitino problem confronts electroweak physics,” *Phys. Rev. D* **69**, 075003 (2004).
 - [41] S. Yamaguchi, “AdS branes corresponding to superconformal defects,” *JHEP* **0306**, 002 (2003).
 - [42] A. Hebecker, J. March-Russell and T. Yanagida, “Higher-dimensional origin of heavy sneutrino domination and low-scale leptogenesis,” *Phys. Lett. B* **552**, 229 (2003).
 - [43] G. C. Branco, R. Gonzalez Felipe, F. R. Joaquim and T. Yanagida, “Removing ambiguities in the neutrino mass matrix,” *Phys. Lett. B* **562**, 265 (2003).
 - [44] J. R. Ellis, M. Raidal and T. Yanagida, “Sneutrino inflation in the light of WMAP: Reheating, leptogenesis and flavor-violating lepton decays,” *Phys. Lett. B* **581**, 9 (2004).
 - [45] K. Tobe, J. D. Wells and T. Yanagida, “Neutrino induced lepton flavor violation in gauge-mediated supersymmetry breaking,” *Phys. Rev. D* **69**, 035010 (2004).

3 Sakai Group

Research Subjects: Experimental Nuclear Physics

Member: Hideyuki Sakai, Kentaro Yako

We are aiming to explore nuclear structure as well as nuclear reaction mechanisms by using an intermediate energy beam from accelerators. Particular emphasis is placed on the study of the spin degrees of freedom in nuclei. Our expertise is various “spin-polarizations”: spin-polarized beams (\vec{p} , \vec{n} and \vec{d}), spin-polarized targets (\vec{p} and ${}^3\vec{\text{H}}\text{e}$), and spin-polarization analysis of reaction products (\vec{p} , \vec{n} and \vec{d}).

Major activities during the year are summarized below.

Study of three-nucleon force effects via the $n+d$ scattering

How the effect of three nucleon force (3NF) appears in nuclear reactions is one of the interesting subjects in nuclear physics. Up to now, the 3NF effects have been discussed by comparing the experimental data of $p+d$ scattering with Faddeev calculations of $n+d$ scattering since it is difficult to incorporate the Coulomb force into the calculation. In order to make clear how the Coulomb force affects the $p+d$ scattering process, we have measured the $n+d$ elastic scattering at $E_n = 250$ MeV covering a wide angular region of $\theta = 10^\circ - 180^\circ$. The result shows clear difference between the $n+d$ and $p+d$ data indicating the Coulomb force effects.

Search for super narrow dibaryon via the $p+d$ scattering

One of the interesting predictions of the quantum chromodynamics is the existence of six-quark states, i.e. dibaryons. No decisive conclusion has been drawn on the existence of the dibaryons after more than twenty years of experimental efforts. Recently Fil'kov *et al.* have found three narrow resonances in the $p+d$ scattering data at the Institute for Nuclear Research. The resonances were claimed as candidates of super-narrow dibaryons, whose decay by the strong force was forbidden by the Pauli principle and the energy conservation law. We have performed an experiment to study the resonances with an order higher statistical accuracy under very low background condition by employing a liquid deuterium target and two magnetic spectrometers. Two out of three candidates with dibaryon masses of 1904 MeV and 1926 MeV are not confirmed. The candidate at 1942 MeV is being carefully analyzed.

Experimental test of Bell's inequality via the ($d, {}^2\text{He}$) reaction

In 1935, Einstein, Podolsky and Rosen presented a paradox to quantum correlations and concluded that the quantum mechanical description of nature is incomplete. So-called hidden variables are introduced in the classical approach to describe the correlation. The Bell's inequality, discovered in 1964, shows that correlation produced by the hidden variables is weaker than that predicted by quantum mechanics. Since then many experimental tests on the Bell's inequality have been performed by using entangled photon pairs, while there are almost no severe tests in hadronic systems. To test the Bell's inequality in a two-proton system, we have measured the spin correlation between the two protons in [${}^1\text{S}_0$] produced by the ${}^{12}\text{C}(d, {}^2\text{He})$ reaction. The Bell's inequality will be tested with an accuracy of more than four standard deviations.

Elastic scattering between the RI beam and the polarized proton target

A polarized solid proton target system has been developed to study structures of unstable nuclei. The first nucleus studied was ${}^6\text{He}$, which is considered to have neutron skin structure. The analyzing powers for the $\vec{p}+{}^6\text{He}$ elastic scattering have been measured for the first time at 71 MeV/A at angles between 40° and 80° in the center of mass frame. The polarization of the proton target was $\sim 20\%$. The present analysis suggests that the spin-orbit potential of ${}^6\text{He}$ is located more outward by 0.8 fm than that of ${}^6\text{Li}$.

Study of Gamow-Teller unit cross sections at 300 MeV

We are studying the behavior of pions in nuclei by measuring the total strength of the Gamow-Teller (GT) excitations in the ${}^{90}\text{Zr}(p, n)$ and ${}^{90}\text{Zr}(n, p)$ reactions at 300 MeV. An important ingredient is the GT unit cross section, which is used when measured GT cross sections are converted to the GT strengths. To obtain the GT unit cross section, we have developed a new neutron detection system in the neutron time of flight facility at Research Center for Nuclear Physics. The commissioning runs confirmed a good energy resolution of ~ 700 keV at 300 MeV.

4 Hayano Group

Research Subjects: Study of fundamental symmetries using exotic atoms.

Member: Ryugo S. Hayano, Takashi Ishikawa and Eberhard Widmann

‘Exotic Atom’ is the keyword of Hayano group. Namely, we use antihydrogens (antiproton + positron), antiprotonic helium atoms (helium nucleus + antiproton + electron), pionic atoms (negative pion + nucleus), etc., and study fundamental symmetries of nature.

- **High-precision tests of matter-antimatter symmetry at CERN-AD (Switzerland)**

- **Antihydrogen** “Production and spectroscopy of antihydrogen” is funded by the “Grant-in-Aid for Specially Promoted Research” of MEXT (5-year project started in 2003), Japan, and is being carried out at the antiproton decelerator (AD) at CERN (Geneva, Switzerland). The ultimate goal of antihydrogen spectroscopy is to test matter-antimatter symmetry (CPT) to very high precision. In 2002, our ATHENA experiment succeeded to produce a large number of cold antihydrogen atoms, and published the result in Nature. From 2003, we are working on CO₂-laser-stimulated recombination of antihydrogen atoms, the first step towards the future laser spectroscopy.
- **Antiprotonic helium atom** Antiprotonic helium is an exotic metastable 3-body ‘atom’ (consisting of a helium nucleus, an antiproton, and an electron: $\text{He}^{++}-\bar{p}-e^{-}$ (short $\bar{p}\text{He}^{++}$)) serendipitously discovered by our group, and is currently studied in detail by using the laser-spectroscopy technique by the ASACUSA collaboration at CERN AD. We have recently reached a precision of 10^{-8} (10 ppb). This result provides the most stringent antiproton-proton mass & charge comparison. The antiprotonic helium atom spectroscopy is also funded by the Specially Promoted Research.
- **Antiprotonic helium ion** In 2003 we succeeded in observing also metastable antiprotonic helium ions, a two-body system $\text{He}^{++}-\bar{p}$ (short $\bar{p}\text{He}^{++}$), and measured the density-dependent lifetime of various states. Preliminary results show that the ions can also be used for laser spectroscopy. Since the energy levels of this highly-excited two-body system can be calculated to a much higher precision than the three-body system, it can be used to obtain theory-independent measurements of the antiproton charge and mass in the future.

- **Partial restoration of chiral symmetry in nuclei – study of the origin of proton mass at GSI (Germany)**

Recently, it has been recognized that the spectroscopy of ‘deeply-bound’ pionic atoms can provide a crucial information to understand the origin of ‘proton mass’. We have succeeded to produce 1s states of pionic Pb and pionic Sn by using the $(d,^3\text{He})$ reaction, and, for the first time, to quantitatively demonstrate that chiral symmetry is partially restored in nuclei. This is an important step toward understanding why a proton can acquire a large mass of $\sim 1\text{GeV}/c^2$, while the u and d quarks, the proton ingredients, are nearly massless.

Our next goal is to bind an η meson to a nucleus, measure the binding energy, and extract further information on the chiral symmetry restoration.

- **Search for strange tri-baryons at KEK**

Motivated by theoretical predictions that kaons can form deeply-bound states in light nuclei, we conducted a search for such states by stopping negative kaons (K^{-} meson) in a liquid helium target, and by measuring neutrons and protons emitted from the reaction. A tantalizing result showing a strong evidence for the existence of hitherto unknown strange tribaryon has been obtained. Analyses are underway.

5 Sakurai Group

Research Subjects: Structures and Reactions of Extremely Neutron-rich Nuclei, and Nuclear Reactions Related with Astrophysical Phenomena

Member: Hiroyoshi Sakurai, Hironori Iwasaki

Research activities of our laboratory have covered a particular domain of nuclear physics, i.e., the field brought out by the advent of the radioactive isotope (RI) beams, emphasizing an isospin degree of freedom in nuclei. The recent developments of RI beams have opened an access to a drastically enlarged range of nuclear species as well as nuclear reactions involving such radioactive isotopes. Our research programs are coordinated to exploit these new opportunities and are directed to subjects related to 1) stability of nuclei and exploration of new domain of nuclear chart towards the drip lines, 2) exotic properties of nuclear structure and reactions of extremely neutron-rich nuclei, such as neutron halos and skins, magicity-loss, and appearance of new magic numbers, and 3) nuclear reaction rates and nuclear properties concerning the stellar nuclear synthesis.

The experiments are mainly performed using the RI beam facility RIPS (RIKEN Projectile-fragment Separator) at RIKEN. Several R&D studies have been focused on experimental simulations and detectors to be used for the RI Beam Factory (RIBF) project at RIKEN.

Our program in the year 2003 has covered the following subjects;

1. Development of RI beams in the vicinity of ^{54}Ca and ^{78}Ni using a 63A MeV ^{86}Kr beam.
2. Particle stability and β -decay properties of very neutron-rich nuclei near the drip line.
3. In-beam shadow method for lifetime measurements of the 2^+ state in ^{16}C .
4. Proton inelastic scattering to investigate neutron-matter deformation of ^{16}C .
5. Proton inelastic scattering to determine low-lying level schemes in the very neutron-rich nuclei ^{74}Ni and ^{78}Zn .
6. Coulomb excitation of $^{76,78,80,82}\text{Ge}$ and quadrupole collectivity around $N=50$.
7. β spectroscopy of the proton-rich nuclei ^{46}Cr and $^{23,24}\text{Si}$.
8. R&D studies for Zero-degree Forward Spectrometer at RIBF.
9. Development of strip Germanium telescope for in-beam gamma spectroscopy of fast-moving RI beams.
10. Development of TOF spectrometer for gamma spectroscopy of medium-heavy neutron-rich nuclei.
11. Precise measurements of Coulomb and nuclear breakup reactions of ^{11}Be .
12. Coulomb dissociation of ^{23}Al and ^{27}P to study key reactions of the rp-process path, $^{22}\text{Mg}(p,\gamma)^{23}\text{Al}$ and $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$.

6 Komamiya group

Research Subjects: (1) Preparation for experiment at the linear e^+e^- collider GLC;(2)OPAL experiment at LEP e^+e^- collider;(3) preparation for data analysis for the ATLAS experiment at LHC (4)research on astroparticle physics with balloon-borne high resolution spectrometer (BESS experiment);(5) Detector researches and developments for future particle physics experiments.

Member: Sachio Komamiya, Tomoyuki Sanuki

1) Preparation for the e^+e^- linear collider GLC: GLC is the energy frontier machine for e^+e^- collisions in the near future. We started various GLC accelerator simulations and plan to help hardware tests at KEK. We have been studying possible physics and experiments at GLC. In the FY2002 the ACFA Linear Collider Project Report was completed. The whole picture of the Linear Collider Project is described in this report (<http://lcdev.kek.jp/ProjReport/>). The report includes expected physics, detector design, accelerator design and R&D, civil engineering, site studies, cost evaluation, international organization, benefit of the project, and a roadmap to realize the project. As for the accelerator simulation studies for the design we are involved in the following two projects; (a) An accelerator energy upgrade scheme would use C-band technology up to about 500 GeV, with X-band accelerating structures filling the remaining space in the tunnel for the future upgrade. The C-band technology for the main linac is the realistic backup option of the X-band, since the fabrication and operation tolerance of C-band is looser than those for the X-band but the acceleration gradient for X-band is higher. The simulation study demonstrated that main linac using both C-band and X-band technologies in series should work without major problems. (b)The estimation of the beam scattering by residual gas or by thermal photons in the Linear Collider main linac was performed. The estimation of emittance increase due to the beam scattering will be studied using these results.

2) OPAL experiment:The elementary particle physics experiment of a large international collaboration using the highest energy e^+e^- collider LEP is running at 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, (a) Supersymmetric particle searches and (c) W-boson physics. We have extensively searched for the Higgs boson at LEP. The lower limit of the Higgs Boson of the Standard Model was set to be 114 GeV (95% C.L.). From the precise measurement of the electro-weak interaction at LEP and other accelerators, the upper mass limit of the Higgs boson was obtained to be about 200 GeV. Therefore the Higgs boson should exist within the narrow mass range of 114-200 GeV. For the Minimal Supersymmetric Standard Model (MSSM) the lightest Higgs boson was excluded in the large MSSM parameter space, so that it is restricted into rather narrow parameter space. 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. This limit is quite independent of the models. The W boson mass was determined to be 80.490 ± 0.065 GeV by the OPAL experiment alone. The combined W boson mass for the four LEP experiments is 80.412 ± 0.042 GeV (statistical and systematic errors combined). Anomalous interactions of the W boson was searched for, and strict limits were set for these interactions.

3) BESS experiment: The spectrum of cosmic muon, proton and Helium were measured at various hight. These information is important for the calculation of the neutrino flux at Superkamiokande, hence it is valuable for the atmospheric neutrino oscillation analyses. The data was taken at the heights starting from 37 km (4.5 g/cm^2) to 27 km (30 g/cm^2) for the duration of about 11 hours in the 2001 BESS flight. The kinetic energy spectrum was measured from 0.5 GeV to 10 GeV with an accuracy of 8% for proton, 10% for Helium, and 20% for muon. This information is used for optimizing the simulation program for atmospheric muons and neutrinos. In order to measure momentum of primary cosmic ray particles in the range of 100 GeV to 1 TeV, the tracking detector system was upgraded by installing a new Jet-chamber and a outer precision tracking detector. In the October 2002 flight in Canada, the primary high momentum cosmic ray flux was measured up to about 1 TeV range.

4) Detector R&D: We are starting research and development for possible detectors in the future experiments. The group has considered the BES experiment at the Beijing e^+e^- collider BEPC as the candidate for the middle term project before GLC. We have measured the $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ decay branching fraction and

the CP violation parameters for this process. Development of TOF system for particle identification is started.

7 Minowa-Group

Research Subjects: Experimental Particle Physics without Accelerators

Member: MINOWA, Makoto and INOUE, Yoshizumi

Various kinds of non-accelerator particle physics experiments have been performed and are newly being planned in our research group. They include the direct experimental search for supersymmetric neutralino dark matter running in an underground cell in the Kamioka Observatory.

Formerly, our cryogenic detectors, aka bolometers, of lithium fluoride and sodium fluoride gave stringent limits in the parameter plane of the neutralino-proton spin-dependent coupling(a_p) and neutralino-neutron spin-dependent coupling(a_n), which excluded a part of the parameter space not excluded by UK Dark Matter Collaboration. The choice of the detector material is based on the fact that the fluorine is one of the best nuclides for the detection of spin-dependently interacting neutralinos. The sensitivity region of fluorine for the dark matter search is more or less orthogonal to the region of the widely used sodium(of NaI) when they are represented in $a_p - a_n$ plane.

In the new phase of our dark matter search project we started the development of the direction sensitive detectors. Anthracene and stilbene scintillators have directional anisotropies in the scintillation efficiency for heavy charged particles. This feature of the scintillators could be used to detect the motion of the dark matter particles relative to the earth improving the sensitivity to the dark matter detection.

We have experimentally proved that the scintillation efficiency of carbon recoils in stilbene scintillator is anisotropic with respect to its crystallographic axis. Then, we carried out a pilot run for the dark matter search with 116g stilbene crystal in Kamioka Observatory. With the crystal fixed to the earth, we searched the modulation of the light output. Although no modulation signal was found, we obtained the spin-independent neutralino-proton cross section upper limit of 7.4 pb for the neutralinos with mass 50 GeV under the spherical isothermal halo model. The present results are the first limit in the world derived from the directional signature of WIMPs. The limit is rather looser than the present best limit in the world because of the small size of the detector crystal and the higher background rate yet to be eliminated. However, it demonstrated the effectiveness of the method of direction sensitive search for the dark matter with an implementation of the anisotropic organic scintillation crystal.

We are also running an experiment to search for axions, light neutral pseudoscalar particles yet to be discovered. Its existence is implied to solve the so-called strong CP problem. The axion would be produced in the solar core through the Primakoff effect. It can be converted back to an x-ray in a strong magnetic field in the laboratory by the inverse process. We search for such x-rays coming from the direction of the sun with the AXION HELIOSCOPE. The axion helioscope consists of a cryogen-free 4 T superconducting magnet with an effective length of 2300 mm and PIN photodiodes as x-ray detectors.

The AXION HELIOSCOPE is presently under modification to implement the buffer-gas handling system to make it sensitive to axions with a mass as high as the hadronic axion window at around 1 eV. We are also developing an automatic cable handling system for it to make long-term fully automated observations possible.

8 Aihara Group

Research Subjects: Study of CP-Violation in the B Meson System, Search for Physics Beyond the Standard Model in the B Meson, JHFnu Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment, and R&D for Linear Collider

Members: H. Aihara, M. Iwasaki

The main research activity of our group has been a study of CP-violation in the B meson system and precision measurements of CKM matrix elements using the KEK B -factory (KEKB). This past year we presented an improved measurement of the Standard Model CP violation parameter $\sin 2\phi_1$ based on 152 million B -anti B pairs collected at the $\Upsilon(4S)$ resonance. One neutral B meson was fully reconstructed as a $J/\psi K_S$, $\psi(2S)K_S$, $\chi_{c1}K_S$, $\eta_c K_S$, $J/\psi K_L$ or $J/\psi K^{*0}$ decay and the flavor of the accompanying B meson was identified from its decay products. From the asymmetry in the distribution of the time intervals between the two B meson decay points, we determined $\sin 2\phi_1 = 0.733 \pm 0.057(\text{stat}) \pm 0.028(\text{syst})$ [1].

We have present an improved measurement of CP-violation parameters in $B^0 \rightarrow \phi K_S^0, K^+ K^- K_S^0$, and $\eta' K_S^0$. We find that the observed CP asymmetry ($S = -0.96 \pm 0.50_{-0.11}^{+0.09}$) in the $B^0 \rightarrow \phi K_S^0$ decay differs from the standard model (SM) expectation by 3.5 standard deviations, while the other cases are consistent with the SM[2].

We have also reported the first observation of CP-violating asymmetries in $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ decays. We find that the CP-violating asymmetry amplitudes $A_{\text{pipi}} = +0.58 \pm 0.15(\text{stat}) \pm 0.07(\text{syst})$ and $S_{\text{pipi}} = -1.00 \pm 0.21(\text{stat}) \pm 0.07(\text{syst})$. We rule out the CP-conserving case, $A_{\text{pipi}}=S_{\text{pipi}}=0$, at a level of 5.2 standard deviations. We also find evidence for direct CP violation with a significance at or greater than 3.2 standard deviations for any S_{pipi} value.

We are involved in the next generation long-baseline neutrino oscillation experiment, JHFnu, which shoot off-axis neutrino beam from Tokai 50 GeV proton synchrotron to Super Kamiokande detector. We have been developing profile monitors for the primary proton beam.

Our R&D work also includes the design of Linear Collider beam delivery system, the interaction region and the central tracker based on the silicon strip detectors.

1. K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of CP-violation parameter $\sin 2\phi_1$ with 152 million $B\bar{B}$ pairs," [arXiv:hep-ex/0308036].
2. K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of time-dependent CP-violating asymmetries in $B^0 \rightarrow \phi K_S^0, K^+ K^- K_S^0$, and $\eta' K_S^0$ decays," Phys. Rev. Lett. **91**, 261602 (2003). [arXiv:hep-ex/0308035].
3. K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of Large CP violation and evidence for direct CP violation in $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ decays," [arXiv:hep-ex/0401029].

9 Wadati Group

Research Subjects: Statistical Mechanics, Nonlinear Physics, Condensed Matter Physics

Member: Miki WADATI & Kazuhiro HIKAMI

We investigate fundamental problems in statistical mechanics and condensed matter physics. We aim to find and clarify novel phenomena, and to develop new non-perturbative analytical methods. Research themes of publications in 2001 are listed in the followings.

1. Bose–Einstein Condensation (BEC)
 - (1) Ground State Properties of a Toroidally Trapped BEC
 - (2) Free Expansion of a Bose-Einstein Condensate
 - (3) Dynamics of a Wavefunction for the Attractive Nonlinear Schrödinger Equation under Isotropic Harmonic Confinement Potential
 - (4) Statistical Mechanics of Bose–Einstein Condensation in Trap Potentials
2. Nonlinear Waves
 - (1) Noncommutative Soliton
 - (2) Cellular Automaton and Crystal Base
 - (3) Lattice W Algebra and Integrable Systems
 - (4) Quantum Soliton Equation and Baxter Equation
3. Non-Equilibrium Statistical Physics
 - (1) Asymmetric Simple Exclusion Process
 - (2) Stability of the Non-Equilibrium Steady States
 - (3) Minority Game
4. Strongly Correlated Electron System
 - (1) Thermodynamics in the Hubbard Model, t - J Model
 - (2) Integrable Boundary Condition
5. Knot Theory and Low-Dimensional Topology
 - (1) Hyperbolic Volume of Knot Complement
 - (2) Quantum Gravity
6. Quantum Many-Body Problem
 - (1) δ -function Bose gas
 - (2) Calogero–Sutherland Model
 - (3) Exclusion Statistics and Chiral Partition Function
7. Quantum Computing and Quantum Information
 - (1) Geometric Aspects of Quantum Search
 - (2) Multipartite entanglement and embeddings in algebraic geometry
8. Random Matrix
 - (1) Polynuclear Growth Model
 - (2) Random Walk

10 Tsukada Group

Research Subjects: Theory of Solid Surface and Interface

Theory of Artificial Nano-Structures

Development of Computational Material Science

Member: Masaru Tsukada, Katsunori Tagami

New methods for theoretical calculations of quantum transport properties of nanodevices have been developed, which include the first-principles recursion transfer matrix method (FP-RTM), numerical Lipman-Schwinger method, real space finite element method, and density functional tight-binding method combined with the non-equilibrium Green's function (DFTB-NEGF). Using these methods, the transmission spectra through several metallic atomic wires and organic molecules (low-gap oligoporphyrin, wide-gap benzothiophene-based oligomer, phenalenyl radical, and high-spin phenoxyradical molecules) have been clarified. Based on these calculations, we have proposed novel functions accessible in the single molecular devices, e.g., unimolecular MRAM, molecular solenoid, chemical sensor, spin filter, and so on. In addition, we have found the significance of the contact structure at the molecule/electrode interface in the quantum transport properties.

We have analyzed the attractive features recently observed on the graphite surface in Fukuyama Lab. We revealed the reason why the number of Landau peaks on the graphite surface decreases compared to that formed inside the crystal. In addition, we found that the existence of defects at the graphite edge forms the electronic superlattice structures, which explains well the $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ patterns observed by the scanning tunneling microscopy.

Publications

K.Tagami and M.Tsukada: Interface Sensitivity in Quantum Transport through Single Molecules, *Nano Letters*, 4 (2004) 209-212.

K.Tagami,M.Tsukada,Y.Wada, T.Iwasaki and H.Nishide: Electronic transport of benzothiophene-based chiral molecular solenoids studied by theoretical simulations, *J. Chem. Phys.*,119 (2003) 7491-7497.

K. Tagami, M. Tsukada, T. Matsumoto, T. Kawai: Electronic transport properties of free base tape porphyrin molecular wires studied by selfconsistent tight binding calculations, *Phys. Rev. B*67 (2003) 2453241-2453247.

K.Tagami and M. Tsukada: Chemical contact promising for coherent transport through tape porphyrin molecular bridges, *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* 1 (2003) 45-49.

K.Tagami and M.Tsukada: Current controlled magnetism in T-shape tape porphyrin molecular bridges, *Curr. Appl. Phys.*, 3 (2003) 439-444.

K. Tagami and M. Tsukada: Theoretical predictions of electronic transport properties of differently conjugated porphyrin molecular wires, *Jpn. J. Appl. Phys.* 42 (2003) 3606-3610.

L.Wang, K.Tagami, and M.Tsukada: Quantum Transport Through Multiterminal Phenalenyl Molecular Bridges, *Jpn. J. Appl. Phys.* 43 (2004) 2779-2785.

K.Tagami and M.Tsukada: Spintronic Transport through Polyphenoxyl Radical Molecules, *J. Phys. Chem. B.* 108 (2004) 6441-6444.

T.Matsui, H.Kambara, Y.Niimi, K.Tagami, M.Tsukada, and H.Hukuyama: STS Observation of Landau Levels at Graphite Surfaces, *Phys. Rev. Lett.* , submitted.

Y.Niimi, T.Matsui, H.Kambara, K.Tagami, M.Tsukada and H.Fukuyama: Scanning tunneling microscopy and spectroscopy studies of graphite edges, *Appl. Surf. Sci.*, in press.

11 Aoki Group

Subject: Theoretical condensed-matter physics

Members: Hideo Aoki, Ryotaro Arita

Our main interests are many-body effects in electron systems, i.e., **superconductivity, magnetism and fractional quantum Hall effect**, for which we envisage a “materials design for correlated electron systems”. Specifically we study:

- Superconductivity in repulsively interacting electron systems incl. models for high- T_C cuprates
 - How to optimize T_C through the “fermiology” [1-3]
 - Spin-triplet superconductivity [4]
 - Magnetic-field induced triplet pairing [5]
- Magnetism in repulsively interacting electron systems
 - Flat-band ferromagnetism in an organic polymer [6,8]
- Electronic structure of alkali-metal-loaded zeolites — “supercrystal” picture and magnetism[7,8]
- Non-equilibrium and nonlinear phenomena in correlated electron systems
 - Landau-Zener tunnelling in the breakdown of Mott’s insulator [9]
- Quantum Hall systems
 - Interaction and effective mass in the fractional quantum Hall liquid [10],
 - Integer quantum Hall effect and butterfly spectra in three dimensions [11]
 - Electron-molecule picture for quantum dots in magnetic fields,
- Electronic structure of hetero-interfaces
 - Metal-induced gap states on metal/insulator interfaces [12]
 - Metal-insulator transition in polar surfaces [13]
- Electrons on periodic curved surfaces [14]

[1] Hideo Aoki in R. F. Bishop *et al* (ed.): *Recent progress in many-body theories* (World Scientific, 2002), p.13; Hideo Aoki in T. Brandes *et al.*(ed.): *The Anderson Transition and its Ramifications — Localisation, Quantum Interference, and Interactions* (Springer Verlag, 2003), p. 219.

[2] Hideo Aoki, *J. Phys.: Condensed Matter* **16**, p.V1.

[3] A. Onari, R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **68**, 024525 (2003).

[4] R. Arita, S. Onari, K. Kuroki and H. Aoki, *Phys. Rev. Lett.*, in the press.

[5] R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **73**, 533 (2004).

[6] R. Arita, Y. Suwa, K. Kuroki and H. Aoki, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 127202 (2002); *Phys. Rev. B* **68**, 140403(R) (2003); Y. Suwa *et al*, *Phys. Rev. B* **68**, 174419 (2003).

[7] R. Arita, T. Miyake, T. Kotani, M. van Schilfhaarde, T. Oka, K. Kuroki, Y. Nozue and H. Aoki, *Phys. Rev. B*, in the press.

[8] Hideo Aoki, *Proc. 7th Int. Conf. on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures*, Nara, 2003 (to be published in *Applied Surf. Sci.*).

[9] T. Oka, R. Arita and H. Aoki, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 066406 (2003).

[10] Hideo Aoki in D. Weiss and R. Haug (ed.), *Proc. Int. Workshop on quantum Hall effect — past, present and future*, Stuttgart, July 2003 [*Physica E* **20**, 149 (2003)].

[11] M. Koshino and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **67**, 195336 (2003); *Phys. Rev. B* **69**, 081303(R) (2004).

[12] M. Kiguchi, R. Arita, G. Yoshikawa, Y. Tanida, M.Katayama, K. Saiki, A. Koma and H. Aoki, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 196803 (2003); R. Arita *et al*, *Phys. Rev. B* **69**, 115424 (2004).

[13] R. Arita, Y. Tanida, S. Entani, M. Kiguchi, K. Saiki and H. Aoki, *Phys. Rev. B*, in the press.

[14] H. Aoki, M. Koshino, D. Takeda, H. Morise and K. Kuroki, *Proc. 15th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems*, Nara, 2003, in the press.

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
 - Extended Gutzwiller approximation for the two-dimensional t - J model.[1]
 - Pseudo-gap phenomena in high- T_c superconductors.[2]
 - Low temperature specific heat and entropy in the t - J model and its spin-charge separation.
 - Kinetic energy gain in the two-dimensional Hubbard model.[3]
 - Electronic states around the vortex core.[4]
- Triplet superconductivity in Sr_2RuO_4
 - Microscopic theory within a three-band model.[5]
 - Electronic states in the vortex state under a magnetic field parallel to the plane.[6]
- Anisotropic superconductivity in Na_xCoO_2
 - $d_{x^2-y^2}+d_{xy}$ -wave superconducting state in frustrated t - J model.[7]
 - f-wave superconducting state due to charge fluctuation.[8]
 - f-wave superconducting state in a multi-orbital model.
- Organic conductors
 - Coexistence between charge order and spin Peierls state.[9]
 - Superconductivity due to charge fluctuation in θ -type organic conductors.[10]
- Electronic states in frustrated systems
 - Strongly correlated electron system on a triangular lattice.[11]
 - Ising spin chain hidden in a spin-ice system.[12]
- One-dimensional systems
 - Nature of carries in one-dimensional Hubbard model.
 - Hidden order parameter in a ladder spin system.

[1] M. Ogata and A. Himeda: J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 374-391 (2003).

[2] Y. Yanase: J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 1000-1017 (2004). Y. Yanase, T. Jujo, T. Nomura, H. Ikeda, T. Hotta and K. Yamada: Phys. Rep. **387**, 1-149 (2003).

[3] H. Yokoyama, Y. Tanaka, M. Ogata and H. Tsuchiura: J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 1119-1122 (2004).

[4] H. Tsuchiura, M. Ogata, Y. Tanaka and S. Kashiwaya: Phys. Rev. B **68**, 012509-1-012509-4 (2003).

[5] Y. Yanase and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 673 (2003).

[6] M. Udagawa, Y. Yanase and M. Ogata: submitted to Phys. Rev. B.

[7] M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 1839-1842 (2003).

[8] Y. Tanaka, Y. Yanase and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 319-322 (2004).

[9] M. Kuwabara, H. Seo, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 225 (2003).

[10] Y. Tanaka, Y. Yanase and M. Ogata: submitted to J. Phys. Soc. Jpn..

[11] T. Koretsune and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 2437-2440 (2003).

[12] Z. Hiroi, K. Matsuhira and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 3045-3048 (2003).

13 Tsuneyuki Group

Research Subjects: Theoretical condensed-patter physics

Member: Shinji Tsuneyuki and Kazuto Akagi

Computer simulations, such as the first-principles molecular dynamics method, enable us to investigate properties and behavior of materials beyond the limitation of experiments, or rather to predict them before experiments. Our main subject is to develop and apply such techniques of computational physics to investigate basic problems in condensed matter physics, especially focusing on prediction of material properties under ultra-high pressure or at surfaces.

Self-organization of N/Cu(001) surface

One of the promising ways for realizing ordered structure for nano devices is to use nano-scale self-organization at surfaces. Nitrogen-chemisorbed Cu(001) surface is an example of such self-organization, where nitrogen-covered region form square islands of typically $\sim 5\text{nm} \times 5\text{nm}$ size and the islands are regularly arranged with leaving a thin network of clean surface region. We are investigating the mechanism of the self-organization by first-principles theoretical calculations.

This interesting self-organization is probably driven by competition of two interactions. One is the short-range attractive interaction among nitrogen atoms at the surface with electronic origin, and the other is the long-range elastic interaction caused by the strain of nitrogen-chemisorbed region. The former is necessary for the nitrogen atoms to form islands, while the latter limits the size of each island and probably causes the regular arrangement of the islands. By calculating the total energy of various types of nitrogen-chemisorbed surface, we confirmed that chemisorbed nitrogen atoms exhibit attractive interaction in effect. We also performed large-scale first-principles calculation of model surfaces to find spontaneous formation of clean surface region on the full-coverage and ideal N/Cu(001) surface. It was also found that the chemisorption of nitrogen atoms change the surface stiffness.

New method of electronic-structure calculation: the transcorrelated method

We are developing a new method of calculating the total energy and electronic state of solids within the wave function theory. The method was originally proposed for molecules by S. F. Boys and N. C. Handy more than 30 years ago and named the transcorrelated method. In this method, total wave function is written by a product of a Slater determinant and a Jastrow factor, the latter of which is a function of electron-electron distance and so represents the electron correlation effect. In spite of the many-body character of the trial wave function, we can optimize the one-electron wave function in the Slater determinant by solving a self-consistent equation with at most three-body integral.

We have demonstrated that the electron correlation effect in small molecules or electron gas is efficiency treated by the transcorrelated method. Its application to realistic crystals is, however, difficult and has not been reported, since the three-body integrals indispensable for the self-consistent calculation is difficult to calculate. In this FY, we formulated the transcorrelated method with the Bloch orbitals for crystals and showed that all the integrals are efficiently evaluated by the Fast Fourier Transformation. We started coding a program for crystal calculation and demonstrated that our prototype code with plane waves reproduces the total energy of an isolated atoms and molecule calculated by a gaussian basis set.

We are also investigating the following issues.

- Chemisorption of unsaturated cyclic-hydrocarbon molecules on Si(001) Surface
- Atomic diffusion in SiO_2
- Carrier doping effects in SrTiO_3

Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki, First principles study of inter-nitrogen interaction energy of Cu(100)-c(2x2)N surface, *International Journal of Quantum Chemistry* 91, 211-215 (2003).

N. Umezawa and S. Tsuneyuki, Transcorrelated method for electronic systems coupled with variational Monte Carlo calculation, *Journal of Chemical Physics* 119, 10015-10031 (2003).

N. Umezawa and S. Tsuneyuki, Ground-state correlation energy for the homogeneous electron gas calculated by the transcorrelated method, *Phys. Rev. B* 69, 165102 (2004).

K. Uchida, S. Tsuneyuki and T. Schimizu, First-principles calculations of carrier-doping effects in SrTiO_3 , *Phys. Rev. B* 68, 174107 (2003).

14 Tarucha Group

Research Subjects: Electronic properties of artificial atoms and molecules, Spin effects and correlations in semiconductor nanostructures, Physics and technologies for quantum computing with quantum dots

Member: Seigo Tarucha, Keiji Ono

1. Electronic Properties of Artificial Atoms and Molecules

The Kondo physics: We have observed the enhanced Kondo effect associated doublet-doublet degeneracy ($SU(4)$) as well as singlet-triplet degeneracy (S-T) in a quantum dot both induced by B field. Lifting of the degeneracy leads to quenching of the Kondo effect in a symmetric (asymmetric) manner with respect to the B field for the $SU(4)$ (S-T) Kondo effect.

Strong correlation effects: Application of strong B fields makes dominant the effect of electron correlation especially in a few-electron (N) quantum dot, and the concept of the electron molecule predicts that the molecule is stabilized at certain magic-number angular momenta and total spins. For $N = 5$ we have observed consecutive transitions between stable states via unstable states as a function of B field, i.e. between two $S = 5/2$ pentagonal electron molecules via $S = 3/2$ states.

Molecular phase: A technique of rotating a sample in a dilution refrigerator is developed to study the effects of titling B field on the electronic states. This technique is useful to increase in-plane B field with keeping constant vertical B field. For a double dot system increase in the in-plane B field leads to reduction in the tunnel coupling. We have applied this technique to a strongly coupled double dot system to confirm the formation of molecular phase, which refers to filling of tunnel-coupled bonding and antibonding states. With increasing in-plane field, we have observed lowering of molecular phase energy, reflecting the reduction of tunnel coupling.

2. Nuclear Spin Effects in Quantum Dots

Dynamical coupling of an electron spin to nuclear spin ensembles: We previously observed nuclear spin effects for lifting Pauli blockade in a double dot system. The lifting of the blockade is observed as a small leakage current induced by application of small magnetic field, and the leakage current shows a hysteresis loop with respect to the sweep directions of B field. We have studied in detail the temporal response of this leakage current, and found that the low current of the hysteresis loop indicates depolarization of nuclei, whereas the high current arises from polarized nuclei.

3. Transport Properties of Quantum Wires

Negative Coulomb drag: Negative Coulomb drag was previously observed for parallel couple wires (drive and drag wires), and we discussed that particle-like electron states in the drive wire are dressed by correlation holes. To explore this effect we have performed drag experiments for similar coupled wires but containing a quantum dot in the drive wire. We have observed negative drag when a Coulomb oscillation peak appears in the drive wire, indicating that correlation holes are dragged by single electron tunneling events. The drag is only promoted in the drag wire near the barrier regions of the dot, and low compressibility of the drag wire is necessary for the negative drag to occur.

4. Spin Control for Implementing Quantum Computing

Single spin ESR: An electron spin in a quantum dot can be coherently manipulated using a local ESR technique. This enables experiments on a decoherence time and Rabi oscillations. g -factor for a GaAs-based vertical quantum dot is a key parameter for ESR. We have initially observed clear Zeeman splitting in experiments of Coulomb diamonds for various in-plane DC magnetic fields, and derived the g -factor of -0.23 . This value is significantly smaller than that for bulk GaAs probably due to the influence of AlGaAs barriers. With this knowledge a single spin ESR experiment is under operation.

-
- M. Rontani et al: Molecular phases in coupled quantum dots, *Phys. Rev. B* **69**, 85327 (2004).
- K. Ono et al: Nuclear-spin-induced oscillatory current in spin-blockaded quantum dots, to be published in *Phys. Rev. Lett.* (2004).
- T. Kodera et al: High-frequency manipulation of few-electron double quantum dots - toward spin qubits -, *Physica E* **22**, 518 (2004).
- S. Sasaki et al :Magnetically induced chessboard pattern in the conductance of a Kondo quantum dot, to be published in *Phys. Rev. Lett.* (2004).

15 Fujimori Group

Research Subjects: Photoemission Spectroscopy of Strongly Correlated Systems

Member: Atsushi Fujimori and Teppei Yoshida

The electronic structures of strongly correlated systems and complex materials are studied using high-energy spectroscopic techniques such as photoemission spectroscopy, x-ray absorption spectroscopy and x-ray magnetic circular dichroism using synchrotron radiation. We investigate mechanisms of high-temperature superconductivity [1], metal-insulator transitions, giant magnetoresistance, carrier-induced ferromagnetism [2] and spin/charge/orbital ordering [3] in strongly correlated systems such as transition-metal oxides, magnetic semiconductors, and their nano-structures.

[1] T. Yoshida, X. J. Zhou, T. Sasagawa, W. L. Yang, P. V. Bogdanov, A. Lanzara, Z. Hussain, T. Mizokawa, A. Fujimori, H. Eisaki, Z.-X. Shen, T. Kakeshita and S. Uchida: Nodal Metallic Behavior of Lightly-Doped $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ with a Fermi Surface Forming an Arc, *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) 027001-1-4.

[2] Y. Ishida, D. D. Sarma, K. Okazaki, J. Okabayashi, J. I. Hwang, H. Ott, A. Fujimori, G. A. Medvedkin T. Ishibashi and K. Sato: *In Situ* Photoemission Study of the Room-Temperature Ferromagnet $\text{ZnGeP}_2\text{:Mn}$, *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) 107202-1-4.

[3] D. J. Huang, W. B. Wu, G. Y. Guo, H.-J. Lin, T. Y. Hou, C. F. Chang, C. T. Chen, A. Fujimori, T. Kimura, H.B. Huang, A. Tanaka, and T. Jo: Orbital Ordering in $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{1.5}\text{MnO}_4$ Studied by Soft X-Ray Linear Dichroism, *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004) 087202-1-4.

16 Uchida Group

Research Subjects: High- T_c superconductivity

Member: Uchida Shin-ichi (professor), Kojima Kenji M. (research associate)

1. Project and Research Goal

The striking features of low-dimensional electronic systems with strong correlations are the “fractionalization” of an electron and the “self-organization” of electrons to form nanoscale orders. In one dimension (1D), an electron is fractionalized into two separate quantum-mechanical particles, one containing its charge (holon) and the other its spin (spinon). In two dimensions (2D) strongly correlated electrons tend to form spin/charge stripe order.

Our study focuses on 1D and 2D copper oxides with various configurations of the corner-sharing CuO_4 squares. The common characteristics of such configurations are the quenching of the orbital degree of freedom due to degraded crystal symmetry and the extremely large exchange interaction (J) between neighboring Cu spins due to large $d - p$ overlap (arising from 180° Cu-O-Cu bonds) as well as to the small charge-transfer energy. The quenching of orbitals tends to make the holon and spinon to be well-defined excitations in 1D with quantum-mechanical character, and the extremely large J is one of the factors that give rise to superconductivity with unprecedentedly high T_c as well as the charge/spin stripe order in 2D cuprates. The experimental researches of our laboratory are based upon successful synthesis of high quality single crystals of cuprate materials with well-controlled doping concentrations which surpasses any laboratory/institute in the world. This enables us to make systematic and quantitative study of the charge/spin dynamics by the transport and optical measurements on the strongly anisotropic systems. We also perform quite effective and highly productive collaboration with world-leading research groups in the synchrotron-radiation, μSR and neutron facilities, and STM/STS to reveal electronic structure/phenomena of cuprates in real- and momentum-space.

2. Accomplishment

(1) Ladder Cuprate

Significant progress has been made in the experimental study of a hole-doped two-leg ladder system $\text{Sr}_{14-x}\text{Ca}_x\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ and undoped $\text{La}_6\text{Ca}_8\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$:

- 1) From the high pressure (P) study we constructed and x - P phase diagram (in collaboration with Prof. N. Mōri'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 (with N. Fujiwara and N. Mōri, ISSP, U. of Tokyo).
- 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).
- 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) Manipulation of THz Optical Spectrum in High- T_c Cuprates

The high- T_c cuprate superconductors can be regarded as a superlattice of Josephson coupled superconducting layers along the c -axis. As a consequence, a collective excitation mode, Josephson plasma mode, is observed in the THz region for polarization parallel to the c -axis. However, the Josephson plasma is a longitudinal mode which does not directly couple with the THz radiation. We have demonstrated that, upon application of a magnetic field parallel to the layers, a new transverse Josephson plasma mode appears in the c -axis optical conductivity spectrum of underdoped $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.6}$. This mode originates from the periodic modulation of Josephson coupling strength between layers with and without Josephson vortices. The mode frequency is shown to be variable with changing the field intensity and oxygen content (doping concentration).

(3) Control of Competition between Static Stripe and Superconductivity Phase

The stripe order is the one that is obviously competing with the d -wave superconducting order in high- T_c cuprates. Although the stripe order has been identified only in La-based cuprates, it is the only known order which exists in the highly doped superconducting region ($x \sim 0.12$) in the cuprate phase diagram, so it is a candidate for the phase microscopically coexisting with the superconducting phase in other cuprate superconductors.

The pressure effect on T_c and the Hall coefficient has been investigated in the static stripe-ordered phase of $\text{La}_{1.48}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_{0.12}\text{CuO}_4$. We have demonstrated that hydrostatic pressure quite effectively controls the competition between the static stripe and high- T_c SC phases. In this compound the static stripe is most stable and in turn T_c is much reduced. We showed that hydrostatic pressure of only 0.1GPa is enough to suppress the stripe order and to enhance T_c dramatically. The uniaxial pressure experiment indicates that the pressure effect is caused primarily by the in-plane compression (in collaboration with S. Arumugam and N. Mōri).

(4) Nanoscale Electronic Phenomena in the High- T_c Superconducting State

The STM/STS collaboration with J. C. Davis' group in UC Berkeley is discovering numerous unexpected nanoscale phenomena, spatial modulation of the electronic state (local density of states, LDOS), in the superconducting CuO_2 planes using STM with sub-Å resolution and unprecedentedly high stability. These include (a) “+” or “×” shaped quasiparticle (QP) clouds around an individual non-magnetic Zn (magnetic Ni) impurity atom, (b) spatial variation (distribution) of the SC gap magnitude, (c) a “checkerboard” pattern of QP states with four unit cell periodicity around vortex cores, and (d) quantum interference of the QP. This year's highlights are as follows:

1) Granular structure of high- T_c superconductivity

The STM observation of “gap map” has been extended to various doping levels of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$. The result reveals an apparent segregation of the electronic structure into SC domains of $\sim 3\text{nm}$ size with local energy gap smaller than 60meV, located in an electronically distinct background (“pseudogap” phase) with local gap larger than 60meV but without phase coherence of pairs. With decrease of doped hole density, the (coverage) fraction of the superconducting area decreases or the density of the number of superconducting islands decreases. Apparently, this is related to the doping dependence of superfluid density as well as the doping dependence of the normal-state carrier density.

2) Modulation of LDOS induced by vortex cores

The SC order parameter is suppressed inside a vortex core with a radius of $\sim 10\text{Å}$ where the electronic excitations show a pseudogap and antiferromagnetic correlation is enhanced. We find that the additional QP states are generated by quantized vortices which show up as a four unit cell 4×4 “checkerboard” pattern.

3) 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.

17 Hasegawa Group

Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics

Members: Shuji HASEGAWA and Iwao MATSUDA

Topics in our research group are (1) electronic/mass transports, (2) atomic/electronic structures, (3) phase transitions, (4) electronic excitations, and (5) epitaxial growths of coherent atomic/molecular layers on semiconductor surfaces and nano-scale phases. Peculiar atomic arrangements and surface electronic states, characteristic of the surface superstructures, on semiconductor surfaces are our platforms for studying physics of atomic-scale low dimensional systems by using ultrahigh vacuum experimental techniques such as electron diffractions, scanning electron microscopy (STM), scanning tunneling micro/spectroscopy, photoemission spectroscopy, electron energy-loss spectroscopy, and in-situ 4-point-probe conductance measurements. Main results in this year are as follows.

(1) Surface electronic transport: metal-insulator transitions and anisotropic surface-state conductivity, measured with micro-4-point probes at variable temperatures, and with a four-tip STM .

(2) Surface phases and phase transitions: Quasi-one dimensional metallic surfaces; Si(111)- 4×1 -In, Si(557)-Au. Two-dimensional metals; Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag, Au, $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$.

(3) Construction of new apparatuses: Green function STM (low-temperature four-tip STM).

- [1] J. T. Sadowski, T. Nagao, M. Saito, A. Oreshkin, S. Yaginuma, S. Hasegawa, T. Ohno, and T. Sakurai: STM/STS Studies of the Structural Phase Transition in the Growth of Ultra-Thin Bi Films on Si(111), *ACTA PHYSICA POLONICA A* **104**, 381-387 (2003).
- [2] H. Okino, I. Matsuda, T. Tanikawa, and S. Hasegawa: Formation of Facet Structures by Au Adsorption on Vicinal Si(111) Surfaces, *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology* **1**, 84-90 (2003).
- [3] S. V. Ryjkov, S. Hasegawa, V. G. Lifshits: Epitaxial Growth of Ag on Si(111)- 4×1 -In Surface Studied by RHEED, STM, and Electrical Resistance Measurements, *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology* **1**, 72-79 (2003).
- [4] T. Tanikawa, I. Matsuda, R. Hobara, and S. Hasegawa: Variable-temperature micro-four-point probe method for surface electrical conductivity measurements in ultrahigh vacuum, *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology* **1**, 50-56 (2003).
- [5] T. Tanikawa, K. Yoo, I. Matsuda, and S. Hasegawa: Non-Metallic Transport Property of the Si(111) 7×7 Surface, *Physical Review B* **68**, 113303 (2003).
- [6] T. Kanagawa, R. Hobara, I. Matsuda, T. Tanikawa, A. Natori, and S. Hasegawa: Anisotropy in conductance of a quasi-one-dimensional metallic surface state measured by square micro-four-point probe method, *Physical Review Letters* **91**, 036805 (2003).
- [7] T. M. Hansen, K. Stokbro, O. Hansen, T. Hassenkam, I. Shiraki, S. Hasegawa, P. Boggild: Resolution enhancement of scanning four-point probe measurement on 2D systems, *Review of Scientific Instruments* **74**, 3701-3708 (2003).
- [8] T. Sekiguchi, T. Nagao, and S. Hasegawa: Transformation dynamics in Ca-induced reconstructions on Si(111) surface, *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology* **1**, 26-32 (2003).
- [9] I. Matsuda, H. Morikawa, C.-H. Liu, S. Ohuchi, S. Hasegawa, T. Okuda, T. Kinoshita, C. Ottaviani, A. Cricenti, M. D'angelo, P. Soukiassian, and G. LeLay: Electronic evidence of symmetry breakdown in surface structure, *Physical Review B* **68**, 085407 (2003).
- [10] S. Hasegawa, I. Shiraki, F. Tanabe, R. Hobara, T. Kanagawa, T. Tanikawa, I. Matsuda, C. L. Petersen, T. M. Hansen, P. Boggild, F. Grey: Electrical conduction through surface superstructures measured by microscopic four-point probes, *Surface Review and Letters* **10**, 963-980 (2003).
- [11] T. Ikuno, M. Katayama, N. Yamauchi, W. Wongwiriyanan, S. Honda, K. Oura, R. Hobara, and S. Hasegawa: Selective Growth of Straight Carbon Nanotubes by Low-Pressure Thermal Chemical Vapor Deposition, *Japanese Journal of Applied Physics* **43**, 860-863 (2004).
- [12] T. Hirahara, I. Matsuda, and S. Hasegawa: Photoemission Structure Factor Effect for Fermi Rings of the Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag Surface, *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology* **2**, 141-145 (2004).
- [13] I. Matsuda, T. Tanikawa, S. Hasegawa, H. W. Yeom, K. Tono, and T. Ohta: Quantum-well states in ultra-thin metal films on semiconductor surfaces, *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology* **2**, 169-177 (2004).

18 Fukuyama Group

Research Subjects: Low Temperature Physics:

Strong correlations, frustration effects and superfluidity in quantum fluids and solids, Low temperature scanning tunneling microscopy and spectroscopy, Low-dimensional conductors, Exotic superconductors.

Member: Hiroshi Fukuyama, Hiroshi Kambara

Our current interests are (i) quantum many body phenomena such as strong correlation effects, frustrated magnetism and superfluidity in fluid and solid ^3He especially in two dimensions, (ii) electronic properties of low-dimensional conductors in high magnetic fields such as Landau levels in graphite, (iii) exotic superconductors with non s-wave Cooper pairs, *etc.* We are investigating these topics experimentally at very low temperatures down to 50 μK .

1. Strong correlation effects in 2D ^3He :

Monolayer ^3He adsorbed on a graphite surface is an ideal model system for studying strongly correlated two dimensional (2D) Fermions, where one can tune interactions and hence correlations by changing particle density over a wide range without introducing disorder. Recently, we discovered a new quantum phase at densities slightly lower than that for the 4/7 registered phase in the second layer ^3He from high precision heat-capacity measurements. The new phase is conceived as a hole (zero-point vacancy) doped Mott localized phase and presumably a uniform phase. We observed a heat capacity anomaly near 30 mK in this phase indicating the spin polaron effect due to quantum mechanical hoppings of the holes. In this sense, 2D ^3He system has an intriguing resemblance to strongly correlated 2D electron systems such as high T_c cuprates. NMR measurements to study magnetic susceptibility and spin dynamics in the new phase are now in progress.

2. STM/STS studies of electronic states in low dimensional conductors:

(a) STS observations of Landau levels at graphite surfaces:

Scanning tunneling spectroscopy (STS) measurements were made on surfaces of two different kinds of graphite samples, Kish graphite and highly oriented pyrolytic graphite (HOPG), at very low temperatures (60 mK) and in high magnetic fields (6 T). We observed a series of peaks in the tunnel spectra, which are associated with Landau quantization of the quasi 2D electrons and holes in graphite in magnetic fields. Almost field independent Landau levels fixed near the Fermi energy, which are characteristic of the graphite crystalline structure, were directly observed for the first time. Calculations of the local density of states at the graphite surfaces allow us to identify Kish graphite as bulk graphite and HOPG as graphite with finite thickness effectively.

(b) STM/STS studies of graphite edges:

The electronic local density of states (LDOS) was studied near single step edges at the surface of exfoliated graphite. In the STM experiments, we observed the $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$ and honeycomb superstructures near both the zigzag and armchair edges. Theoretical calculations based on the non-orthogonal tight-binding model show that the coexistence of the two superstructures is due to admixing of the two types of edge. In the STS measurements, we found a clear LDOS peak at an energy just below the Fermi level only near the zigzag edge. This is the first experimental observation of the graphite “edge state” theoretically predicted for graphene ribbons.

(c) Magnetotransport measurements of graphite:

Quantum Hall effect like plateaus in the Hall resistance and metal-insulator transitions were observed for HOPG in magnetotransport measurements at low temperatures ($T > 0.5$ K) and in high magnetic fields ($B < 9$ T). The former will be closely related to the 2D nature of the electronic states in HOPG as was demonstrated by our Landau level observations with STS. We

are now preparing to extend these measurements to much lower temperatures ($T > 1$ mK) and higher fields ($B < 15$ T).

19 Okamoto Group

Research Subjects: Experimental Condensed Matter Physics,

Low temperature electronic properties of two-dimensional systems.

Member: Tohru Okamoto and Yukio Kawano

We study low temperature electronic properties of two-dimensional systems formed in the semiconductor interfaces.

The current topics are following:

1. Magnetism in strongly correlated two dimensional systems:

A zero-magnetic-field metal-insulator transition can be observed in strongly correlated two dimensional systems, such as Si electron systems and GaAs hole systems. We are investigating the relationship between the stability of the metallic state and the spin degree of freedom. We have found that the metallic state remains in a Si/SiGe sample even in the fully spin polarized regime, while it is suppressed in Si-MOSFETs and GaAs hole systems located in strong in-plane magnetic field. We also study magnetic states in the insulating phase where the formation of a Wigner solid and exchange interactions among neighboring electrons are expected. The perpendicular component of the magnetic field should drastically change the nature of the exchange interactions due to the Aharonov-Bohm effect.

2. Dynamics of nonequilibrium electrons in quantum Hall conductors:

Our studies aim at revealing local transport and optical properties of quantum Hall conductors by means of scanning probe techniques. The three following techniques have been applied: (i) Scanning near-field THz microscope: Imaging of cyclotron radiation emitted from quantum Hall devices has made it possible to specify locations where the QHE breaks down. (ii) Scanning electrometer: We have developed a novel technique for obtaining high-resolution images of electrostatic potential distribution. This exploits gate effect in a quantum Hall device by a charged nano-probe. In addition, we have constructed a new system for mapping spatial distribution of noise voltage. (iii) Hybrid system combining THz microscope and scanning electrometer: With this system, we have obtained clear images of intra- and inter-Landau-level scattering.

3. Ettingshausen effect in quantum Hall systems:

We have observed Ettingshausen effect in the IQHE breakdown regime. Electron temperature difference across the current channel has been measured using two miniature Hall bars.

4. Multi-subband electronic state of InAs surfaces:

We have measured magnetoresistance of a SiO₂-sputtered InAs surface. The results show that damage-induced electrons are distributed from the surface to $\sim 0.3\mu\text{m}$ in depth and disappear after annealing at 150 °C. On the other hand, the electron density in the inversion layer is found to increase after sputtering and annealing.

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

Astrophysics is a very broad field of research, and it is hard to cover various important astrophysical research subjects in our group only. Therefore we are currently working on the three specific areas of research interest; “Physics of the Early Universe”, “Observational Cosmology”, and “Nuclear Astrophysics”, all of which are definitely interrelated very closely. Let us describe more specifically the current interests and activities of our group in the above areas.

The understanding of the very early universe has made rapid progress in 1980’s by applying the ideas of particle physics around the epoch close to the Planck time, one notable example of which is the inflationary universe scenario. On the basis of such recent development, “Physics of the Early Universe” aims at describing the birth of the universe in a language of physics. Our group activities in this area include inflationary universe models, cosmological phase-transition and topological defects, big-bang nucleosynthesis, cosmic no-hair conjecture and the fundamental problem of general relativity.

“Observational Cosmology” attempts to understand the evolution of the universe on the basis of the observational data in various wavebands. The proper interpretation of the recent and future data provided by COBE, ASCA, the Hubble telescope, SUBARU, and large-scale galaxy survey projects is quite important both in improving our understanding of the present universe and in determining several basic parameters of the universe which are crucial in predicting the evolutionary behavior of the universe in the past and in the future. Our current interests include nonlinear gravitational evolution of cosmological fluctuations, formation and evolution of proto-galaxies and proto-clusters, X-ray luminosity and temperature functions of clusters of galaxies, hydrodynamical simulations of galaxies and the origin of the Hubble sequence, thermal history of the universe and reionization, prediction of anisotropies in the cosmic microwave background radiation, statistical description of the evolution of mass functions of gravitationally bound objects, and statistics of gravitationally lensed quasars.

“Nuclear Astrophysics” is exploring the interface between nuclear physics and astrophysics, in particular the physics of supernovae. It includes a rich variety of micro- and macro-physics, for example, neutrino transport, equation of state of high density matter, r-process nucleosynthesis, convective instability, fast rotation of a stellar core, strong magnetic field, gravitational radiation, and so on. In particular, the mechanism of the Type II supernovae itself has not been properly explained for more than 25 years. It is, therefore, quite important to make clear the physics of supernova phenomena not only for astrophysics but also for other fields of elementary physics. We are currently working on the multi-dimensional aspects of supernovae such as rotating core collapse, asymmetric neutrino emission, convective energy transfer near the neutrino sphere, possibility of r-process nucleosynthesis in the hot bubble region, and gravitational radiation from an asymmetrically bouncing core.

Let us summarize this report by presenting recent titles of the doctor and master theses in our group;

- Non-Gravitational Heating of Galaxy Clusters in a Hierarchical Universe (2003)
- Discoveries of Gravitationally Lensed Quasars from the Sloan Digital Sky Survey (2003)
- One, Two, Three – measuring evolved large scale structure of the Universe (2003)
- Higher-order Statistics as a probe of Non-Gaussianity in Large Scale Structure (2003)
- Primordial black holes as an imprint of the brane Universe (2003)
- Probing the Extra Dimensions with Gravitational Wave Background of Cosmological Origin (2003)
- Nuclear “pasta” in dense stars and its properties (2002)
- Supernova Neutrinos: Their Relic Background and Resonant Spin-Flavor Conversion (2002)
- Arrival Distribution of Ultra-High Energy Cosmic Rays and Implications for Their Source Candidates (2002)
- Non-linear evolution of the cosmological large scale structure from the local collapse model (2002)
- The Universe with Extra Dimensions — From Kaluza-Klein Perspective to Brane World (2001)
- Gravitational Collapse of Rotating Massive Stars (2001)
- Effects of Neutrino Oscillation on Supernova Neutrino (2001)
- Resolving the Central Density Profile of Dark Matter Halos with Gravitational Lensing Statistics (2001)
- The Stability of Higher Dimensional Spacetime (2001)
- Double inflation in supergravity and its observational implications (2000)

Propagation of UHECRs in the inhomogeneous source model (2000)
Effects of neutrino oscillation on the supernova neutrino spectrum (2000)
A Biasing Model for Cosmological Two-Point Statistics and the Probability Distribution Function of Non-linear Mass Fluctuations (2000)
Genus Statistics for Large-Scale Structure as a probe of Primordial Random-Gaussianity and Nonlinear Stochastic Biasing (2000)
Velocity Distribution Functions for Nonlinear Gravitationg Many-body Systems (2000)
The cosmological redshift-space distortion on two-point statistics of high-z objects (1999)
Gravitational lens theory from the wave-optics viewpoint and its application to gravitational wave astronomy (1999)
Gravitational particle productions in the early universe (1999)
Thermodynamics properties of nuclear “Pasta” in super dense matter (1999)

21 Murao Group

Research Subjects: Quantum Information Theory

Members: Mio Murao and Damian Markham

In our group, we are investigating new properties of multi-particle and multi-level entanglement and the use of these properties as resources for quantum information processing. M. Murao started working at University of Tokyo in October, 2001 and D. Markham started working at University of Tokyo in February, 2004.

Quantum information processing and entanglement: Quantum information processing seeks to perform tasks which are impossible or not efficient 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 appearing in certain types of quantum states (non-separable states) consisting of several subsystems. A non-separable state cannot be represented by a product state of constituent subsystems. Entanglement is sometimes called "quantum correlation", since it is genuine correlation of quantum systems and does not exist in classical systems. It has been considered as the fundamental resource for quantum information processing to be more effective than classical information processing. As the result of intensive study of entanglement (especially in the last 5 years), entanglement of bipartite two-level systems (two qubit systems) is now understood quite well. However, there are still many open questions regarding the entanglement of multiparticle and multi-level systems.

The current projects:

- **The properties and applications of entanglement in discrete systems**

Asymmetric quantum information sharing between two parties: The necessary and sufficient conditions for extracting quantum information of an unknown qubit which has been shared by two spatially separated qubits using only local operations and classical communications are obtained. The conditions indicate that there is a way to asymmetrically share quantum information between two parties where one party's qubit can only be used as a key (quantum key) to recover the original quantum information at the other party. A protocol which allows secure conditional transmission of quantum information using both classical and quantum keys is presented.

- **The properties and applications of entanglement in infinite dimensional systems**

Entanglement Generation from Thermal Spin States via Unitary Beam Splitters: We investigate the entanglement generated by passing a thermal spin state through a beam splitter. In the infinite temperature case this can be seen as creating distillable entanglement from a maximally mixed state through unitary operations. It is the truncation of the state that allows for entanglement generation. The output entanglement is investigated for different temperatures and it is found that more randomness - in the form of higher temperature - is better for this set up.

Extension of Schmidt rank in infinite dimensional systems Nielsen's theorem for entanglement convertibility under local operations and classical operations (LOCC) and Vidal's theorem for stochastic LOCC (SLOCC) are extended to infinite dimensional systems in fully mathematical ways by redefining LOCC and introducing a concept of ϵ -convertibility. A pair of monotones which indicate rapidity of convergence of Schmidt coefficients and is an extension of Schmidt rank to infinite dimensional pure bipartite states have been presented. The states with polynomially dumping Schmidt coefficients are shown to belong to a higher entanglement class in terms of SLOCC than the states with exponentially damping ones and their relationship to entanglement embezzling is investigated.

Entanglement convertibility for infinite dimensional pure bipartite states: It is shown that the order property of pure bipartite states under SLOCC (stochastic local operations and classical communications) changes radically when dimensionality shifts from finite to infinite. In contrast to finite dimensional systems where there is no pure comparable state, the existence of infinitely many mutually SLOCC incomparable states is shown for infinite dimensional systems even under the bounded energy and finite information exchange condition. These results show that the effect of the infinite dimensionality of Hilbert space, the "infinite workspace" property, remains even in physically relevant infinite dimensional systems.

22 Kobayashi Group

Research Subjects: Ultrafast and Nonlinear optical processes, Quantum Optics

Member: Takayoshi Kobayashi, Masakatsu Hirasawa, Takao Fuji, Akikatsu Ueki

Ultrashort pulse lasers are being developed to study ultrafast processes in condensed-phase materials including polymers, aggregates, and biological molecules. Quantum information and quantum optics are also studied.

1. Development of ultrashort pulse lasers

1. Development of Synchronously-pumped double-pass visible NOPA.
2. Numerical simulation of short pulse propagation in NOPA.
3. Investigation of novel crystals for NOPA.
4. Self-stabilization of the absolute phase (carrier-envelope phase: CEP).

2. Real-time spectroscopy for the study of molecular vibration

1. Polydiacetylene (PDA-3BCMU).
2. Pseudocyanine (PIC) J-aggregates.
3. Coherent control of molecular dynamics.
4. Naphthalocyanines (Si, Cu).
5. Ultrashort pulse chirp characterization utilizing molecular vibrations.
6. Green fluorescent protein (GFP).
7. The charge transfer (CT) excitation in tin phthalocyanine.
8. Organic-inorganic layered semiconductor.
9. Numerical simulation of the molecular vibrational phase.

3. Electric field modulation spectroscopy with multi-channel lock-in amplifier:

New method of electric field modulation spectroscopy was developed, where simultaneous measurements in spectrum saves time substantially and also makes it possible to investigate extensively.

4. Quantum optics and quantum information

1. Generation of broadband photon pairs and its application to absorption spectroscopy.
2. Photon number fluctuation and correlation in frequency domain in a optical fiber.
3. Quantum interference in the multi-mode optical parametric oscillator.
4. Four-photon correlation.
5. Quantum key distribution using the spontaneous parametric down conversion (SPDC).

23 Makishima Group

Research Subjects: High Energy Astrophysics using Scientific Satellites, X-Ray Probing of the Universe, Development of Cosmic X-Ray/ γ -Ray Instruments

Member: Kazuo Makishima, Motohide Kokubun

We study cosmic and solar high-energy phenomena in the X-ray and γ -ray frequencies, using scientific satellites launched by the Japan Aerospace Exploration Agency, as well as foreign missions.

Instrumental Developments: We have developed the Hard X-ray Telescope (HXT) onboard the *Yohkoh* mission (August 1991 – December 2002), and the Gas Imaging Spectrometer (GIS) for the *ASCA* mission (February 1993 – March 2001). We are also developing the Hard X-ray Detector (HXD-II) [1] onboard *ASTRO-E2*, to be launched soon in February 2005. The HXD-II has an unprecedented sensitivity to cosmic hard X-rays in the 10–600 keV range, and is expected to innovate our knowledge on high-energy astrophysics. We also develop future X-ray and gamma-ray technologies, including hard X-ray imagers with Fourier-synthesis optics, ceramic inorganic scintillators, and avalanche photo diodes.

Solar and stellar flares: We study solar flares using the X-ray and γ -ray data acquired with *Yohkoh*, and employing Monte-Carlo simulations. By analyzing the deep X-ray imaging data obtained with *Chandra*, we have discovered diffuse thermal/non-thermal X-ray emission associated with several massive star-forming regions. The phenomenon may result from shocks in the stellar winds from massive young stars.

Physics of Black Holes: We are reinforcing our novel view, first obtained with *ASCA*, that “ultra-luminous compact X-ray sources” (ULXs) seen in nearby galaxies are massive ($\sim 100 M_{\odot}$) stellar black holes under very high mass accretion rates. We are constructing a unified description of high-accretion-rate black holes [2], including ULXs as well as ordinary black-hole binaries ($\sim 10 M_{\odot}$) and Narrow-Line type 1 Seyfert galaxies ($\sim 10^6 M_{\odot}$). It invokes four different accretion-disk states; the optically-thin disk state, the standard-disk state, the Comptonized-disk state, and the slim-disk state.

Plasma Heating and Particle Acceleration in the Inter-Stellar Space: As established with a series of Japanese and foreign cosmic X-ray satellites, the inter-stellar space of our Galaxy is filled with enigmatic diffuse hard X-ray emission, which is a composite of thermal and non-thermal signals. We have detected similar emission from the Galactic bulge, from the central region of M31, and even from a few globular clusters. These diffuse high-energy photons may represent some unknown form of inter-stellar high-energy process, leading to the plasma heating and particle acceleration.

Physics of Cluster of Galaxies: The X-ray emitting hot plasmas associated with clusters of galaxies constitute the most dominant known baryonic component in the universe. We have established with *ASCA* and *XMM-Newton* that these plasmas exist in the form of two-phase (hot and cool) media, and their radiative cooling is somehow suppressed. We attempt to explain these puzzles by invoking a magnetic field configuration like that of the solar corona. Then, kinetic energies of the member galaxies may be dissipated on the plasma by exciting magnetohydrodynamical turbulence. This process is expected to enhance galaxy mergers within each cluster, which in turn may explain the presence of isolated elliptical galaxies each surrounded by a huge gravitational potential halo [3].

1. Kokubun, M., Abe, K., Ezoe, Y., Fukazawa, Y., Hong, S., Inoue, H., Itoh, K., Itoh, T., Kasama, D., Kawaharada, M., *et al.*: “Improvements of the *ASTRO-E2* Hard X-ray Detector (HXD-II)”, *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, in press (2004)
2. Kubota, A., Makishima, K.: “The Three Spectral Regimes Found in the Stellar Black Hole XTE J1550-564 in Its High/Soft State”, *Astrophys. J.* **601**, 428 (2004)
3. Kawaharada, M., Makishima, K., Takahashi, I., Nakazawa, K., Matsushita, K., Shimasaku, K., Fukazawa, Y. & Xu, H: A New Candidate for a Dark Group of Galaxies, RXJ 0419+0225: *Publ. Astr. Soc. Japan* **55**, 573 (2003)

24 Takase Group

Research Subjects: High Temperature Plasma Physics Experiments, Spherical Tokamak, MHD Stability, RF Heating and Wave Physics, Advanced Plasma Diagnostics Development, Fluctuations and Transport

Members: Yuichi Takase, Akira Ejiri, Syun'ichi Shiraiwa, Kenichi Yamagishi

Thermonuclear fusion, the process that powers the sun and stars, is a promising candidate for generating abundant, safe, and clean power. In order to produce sufficient fusion reactions, isotopes of hydrogen, in the form of hot and dense plasma must be confined for a long enough time. A magnetic configuration called the tokamak has reached the level where an international burning plasma experiment is ready to be constructed. However, improvement of the cost-effectiveness of the fusion reactor is still necessary. The spherical tokamak (ST) offers a promising approach to increasing the efficiency by raising the plasma beta (defined as the ratio of the plasma pressure to the confining magnetic pressure), several times greater than the conventional tokamak. High beta plasma research using the ST approach is a rapidly developing field worldwide, and is being carried out in our group using the TST-2 spherical tokamak.

Formation, heating and maintenance of the TST-2 spherical tokamak plasma

It is crucially important for ST to develop a scenario of plasma formation, heating and maintenance without the use of the central solenoid (CS) located on the inboard side of the torus. Several approaches are being investigated on TST-2. TST-2 was temporarily relocated to Kyushu University in order to take advantage of the powerful microwave power (200 kW at 8.2 GHz). An ST plasma with a plasma current of 4 kA was successfully produced and maintained for 0.3 sec using the 8.2 GHz microwave power. This plasma had a line integrated density of $n_e l = 0.3 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$.

Coils located on the outboard side, normally used to keep equilibrium, were used in combination with the 8.2 GHz microwave power to create a plasma with up to 9.5 kA of plasma current. This was the first demonstration of a completely CS-less plasma formation. It is noteworthy that plasma current was generated even without a field null (where the poloidal magnetic field is zero), contrary to conventional belief.

ST plasmas have very high dielectric constants compared to conventional tokamaks, and therefore, methods to diagnose, heat and drive current using different waves, such as the electron Bernstein wave (EBW) and the high harmonic fast wave (HHFW), must be developed. EBW heating based on the X-B mode conversion scenario was investigated. Over 100 kW of RF power was successfully injected into the plasma. Although some indications of heating were observed, only a small fraction of the injected power seemed to have contributed to heating. The possibility of power loss at the plasma edge must be considered.

Collaborations

A systematic study of conditions necessary for CS-less start-up (gas input, RF power, location of EC resonance, etc.) was carried out on the JT-60U tokamak at Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). An indications of bootstrap current overdrive was observed, but further confirmation is needed. Demonstration of bootstrap overdrive will relax requirements for current drive systems substantially.

Both coherent and turbulent fluctuations were studied on the JFT-2M tokamak at JAERI using three diagnostics: fast reciprocating Langmuir probes, two channels of reflectometers, and fast magnetic probes. A large scale coherent potential fluctuation around 10 kHz, similar to what is expected for the Geodesic Acoustic Mode (GAM) was observed in an Ohmically heated plasma. Two characteristic fluctuations were observed in a neutral beam heated H-mode plasma. The high frequency mode around 300 kHz is the high frequency mode, possibly the ballooning mode, often observed in high recycling steady H-mode. The intermediate frequency mode around 80 kHz may be the GAM, but is not positively identified.

Particle transport was studied by injecting impurity pellets and measuring the transient response of visible light emission with high temporal and spatial resolutions on the Large Helical Device at National Institute for Fusion Science. Transport can be described by a diffusion-convection model with a spatially constant diffusion coefficient and a convective velocity which is directed inward where the electron density gradient is finite. The convection velocity was found to be strongly dependent on both electron density and impurity ion charge, whereas the diffusion coefficient was weakly dependent on them.

A collaboration on the NSTX spherical tokamak (Princeton Plasma Physics Laboratory) on CS-less start-up is also being carried out.

25 Tsubono Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Gravitational Wave Physics, Laser Interferometer

Member: Kimio TSUBONO and Masaki ANDO

The detection of gravitational waves is expected to open a new window into the universe and brings us a new type of information about catastrophic events such as supernovae or coalescing binary neutron stars; these information can not be obtained by other means such as optics, radio-waves or X-ray. Worldwide efforts are being continued in order to construct detectors with sufficient sensitivity to catch possible gravitational waves. Now the detection of the gravitational waves is one of the biggest challenges in the field of physics and astronomy.

TAMA300 is a 300-m baseline laser interferometric gravitational wave detector constructed in Mitaka. We started the operation of the detector in 1999. The achieved sensitivity, $h \sim 3 \times 10^{-21} / \sqrt{\text{Hz}}$ at 700Hz to 1.5kHz, is sufficient to catch possible gravitational wave events in our galaxy. We can operate the detector for over 24 hours stably and continuously. Last year, we performed 2-month data taking run and collected over 1,000 hours data. We are now analyzing the obtained data searching for the gravitational waves from coalescing binaries, supernovae and pulsars.

We summarize the subjects being studied in our group.

- Laser interferometric gravitational wave detectors
 - TAMA project
 - Search for burst gravitational waves
 - Search for gravitational waves from SN1987A
 - Suspension point interferometer for vibration isolation
 - Study of the next-generation laser interferometer
 - Space laser interferometer DECIGO
- Study of thermal noise
 - Direct measurement of the thermal noise
 - Thermal noise caused by the inhomogeniously distributed loss
- Study of the precise measurement
 - Development of the low-frequency vibration isolation system (SAS)
 - New vibration isolation system using magnetic levitation

references

- [1] K. Tsubono: Search for Gravitational Waves Prog. Theor. Phys. Suppl. **151** (2003) 115.
- [2] K. Soida, M. Ando, N. Kanda, H. Tagoshi, D. Tatsumi, K. Tsubono and the TAMA collaboration: Search for continuous gravitational Waves from the SN1987A remnant using TAMA300 data, *Class. Quantum Grav.* **20** (2003) 645.
- [3] K. Tsubono: Application of material damping for gravitational wave detectors, *Journal of Alloys and Compounds*, **355** (2003) 224.
- [4] K. Numata, M. Ando, K. Yamamoto, S. Otsuka, and Kimio Tsubono: Wide-band direct measurement of thermal fluctuations in an interferometer, *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) 260602.
- [5] M. Ando, K. Arai, R. Takahashi, D. Tatsmui, P. Beyersdorf, S. Kawamura, S. Miyoki, N. Mio, S. Moriwaki, K. Numata, N. Kanda, Y. Aso, M.-K. Fujimoto, K. Tsubono, K. Kuroda: Analysis for burst gravitational waves with TAMA300 data, *Class. Quantum Grav.* **21** (2004) S735.
- [6] K. Yamamoto, S. Otsuka, Y. Nanjo, M. Ando, and K. Tsubono: Experimental study of the thermal noise of mirrors with an inhomogeneous loss used in gravitational wave detectors, *Phys. Lett. A* **321** (2004) 79.

26 Sano Group

Research Subjects: Nonlinear Dynamics and Fluid Mechanics

Member: Masaki Sano and Yoshihiro Murayama

Our research group studies nonlinear dynamics and pattern forming phenomena in dissipative nonlinear systems. Oscillation, chaos, and turbulent behavior of fluid, solid, granular systems, chemical reactions and biological systems are investigated based on dynamical system's theory and laboratory experiments. Through these efforts we search for novel phenomena, and to develop new methods in understanding complex phenomena arising in the systems far from equilibrium. The followings are main subjects of our study.

1. Study of turbulence

- (1) Search for the ultimate scaling regime in developed thermal turbulence
- (2) Study of statistical properties and coherent structures in turbulence
- (3) Turbulence - turbulence transition in electro hydrodynamic convection of liquid crystals

2. Nonlinear Dynamics and Chaos

- (1) Pattern forming phenomena and their universalities in dissipative systems
- (2) Spatio-temporal dynamics in spatially extended dissipative systems

3. Dynamical aspects of biological systems

- (1) Single molecule level measurement of DNA collapsing, DNA-protein interaction, and gene expression
- (2) Collective behavior of the activities in biological neural assemblies

References

1. H. Wada, and S. Sasa: Anomalous Pressure in Fluctuating Shear Flow, *Phys. Rev. E* 67, 065302(R) (2003)
2. S. Kuronuma and M. Sano: Stability and Bifurcations of Tube Conveying Flow, *J. Phys. Soc. Jpn.* 72, 3106-3112 (2003)
3. H. Wada: Dynamics of Phase Separation in Confined Two-component Fluid Membrane, *J. Phys. Soc. Jpn.* 72, 3142-3150 (2003)
4. H. Wada: Shear-induced quench of long-range correlations in a liquid mixture, *Phys. Rev. E* 69, 031202 (2004)
5. T. Mashiko, Y. Tsuji, T. Mizuno, and M. Sano: Instantaneous Measurement of Velocity Fields in Developed Thermal Turbulence in Mercury, *Phys. Rev. E* 69, 036306 (2004)

27 Yamamoto Group

Research Subjects: Submillimeter-wave Astronomy, Physical and Chemical Evolution of Interstellar Molecular Clouds, Laboratory Spectroscopy of Interstellar Molecules

Member: Satoshi Yamamoto & Tomoharu Oka

Molecular clouds are birthplaces of new stars, and understanding their physical and chemical properties provides us with fundamental bases for detailed studies on star formation, which is an elementary process in evolution of the Galaxy. With this in mind, we are studying submillimeter-wave astronomy as well as the laboratory microwave spectroscopy, as described below.

Our group is running the Mt. Fuji submillimeter-wave telescope in order to explore formation processes, detailed structure, and chemical evolution of molecular clouds. The main reflector of the telescope has a diameter of 1.2 m, and the telescope is enclosed in a space frame radome with a Gore-Tex membrane. We have developed a superconductor mixer receiver with high sensitivity for this telescope to observe the spectral lines of the atomic carbon (CI) ($^3P_1 - ^3P_0$ 492 GHz; $^3P_2 - ^3P_1$ 809 GHz). The telescope system was installed at the summit of Mt. Fuji (el. 3700 m) in July 1998, and we started astronomical observations from November 1998 in a remote way by using a commercial satellite communication system. The Mt. Fuji submillimeter-wave telescope is being operated as a research project of Research Center for the Early Universe (RESCEU) in collaboration with researchers of National Astronomy Observatory, National Space Development Agency, and Fukui University.

With this telescope, we are conducting large scale mapping observations of the 492 GHz line of CI toward a number of molecular clouds in our Galaxy. Until now we have observed various sources including dark clouds, giant molecular clouds and translucent clouds. Total observing area is more than 50 square degrees, which is the largest survey of the CI line so far made. Furthermore, a few representative clouds (Orion A, Orion B, M17, and DR21) have been mapped with the 809 GHz line of CI. By comparing the CI distribution with the CO distribution, we are studying formation and evolution of molecular clouds in detail.

In addition, our group has developed the portable 18 cm submillimeter-wave telescope (POST18). The main purpose of this telescope is a survey of the CI 492 lines over the Milky Way. In 2002, we accomplished the first observation of the CI line with this telescope at the Pampa la Bola site (alt. 4800 m) in Chile. In 2003, we have successfully conducted the CI line observation toward the southern Milky Way. With the result, we are studying formation and evolution of molecular clouds in the galaxy scale.

Furthermore, we are developing a hot electron bolometer (HEB) mixer that can be used at 1.5 THz for a survey of the NII fine structure line. With the electron beam lithography system, we fabricated a diffusion-cooled type HEB mixer using Nb as a superconductor material, and confirmed that this mixer shows a good response at 800 GHz. We are also developing a phonon-cooled type HEB mixer using NbTiN.

We are also studying rotational spectra of transient molecules in the laboratory with the Fourier transform millimeter-wave (FTMW) spectroscopy. Our spectrometer covers the frequency range up to 85 GHz with sufficient sensitivity for transient molecules. With this spectrometer, the rotational spectra of the ethyl radical, the vinyl radical, the cyclopropyl radical have been detected.

- [1] T. Oka, M. Iwata, H. Maezawa, M. Ikeda, et al. "Submillimeter-wave CI Spectral Lines from the NGC1333 Region", *The Astrophysical Journal* **602**, 803 (2004)
- [2] K. Kamegai, M. Ikeda, H. Maezawa, T. Ito, M. Iwata, T. Sakai, T. Oka, S. Yamamoto, et al. "Distribution of the [CI] emission in the ρ Ophiuchi Dark Cloud", *The Astrophysical Journal*, **589**, 378 (2003)

28 Sakai (Hirofumi) Group

Research Subjects: Experimental studies of quantum optics and atomic/molecular physics

Member: Hirofumi Sakai and Shinichirou Minemoto

Our research interests are as follows: (1) Manipulation of neutral molecules based on the interaction between the strong nonresonant laser field and the induced dipole moment 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 measurement. (5) Structures and dynamics of molecules studied by the laser induced Coulomb explosion. Some of our research activities in the academic year of 2003 are as follows:

(1) Controlling the orientation of molecules with combined electrostatic and intense, nonresonant 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 the last fiscal year, we demonstrated that polyatomic molecules such as 3,4-dibromothiophene can be three-dimensionally oriented with combined electrostatic and intense elliptically-polarized laser fields. By three-dimensional orientation, we mean controlling all of the three Euler angles which determine the spatial direction of a molecule. Although we succeeded in a proof-of-principle experiment, it is indispensable to further increase the degree of orientation in order to use a sample of oriented molecules in applications. Therefore, we started the development of a new apparatus to increase the degree of orientation. The key is to increase the magnitude of an electrostatic field. Based on the detailed simulations of ion trajectories, we carefully designed the new apparatus so that the fragment ions arrive at the detector in a correct manner.

(2) Generation and control of time-dependent polarization pulses

In the last fiscal year, we developed a closed-loop pulse shaping system by the combination of a femtosecond pulse shaper and genetic algorithm. By removing polarizers from the pulse shaper, the system can generate and control time-dependent polarization pulses. We also developed a polarization characterization system called POLLIWOG (POLarization Labeled by Interference versus Wavelength of Only a Glint). These homemade systems enable us to perform experiments in optimal control of quantum processes in molecules and get invaluable information to understand underlying physics in the interaction between time-dependent polarization pulses and molecules. We are now developing a technique to shape desired time-dependent polarization pulses based on the combination of the direct comparison between the target pulse and the result of a polarization characterization measurement and an adaptive learning loop with genetic algorithm. This technique is indispensable to verify the validity of theoretically predicted time-dependent polarization pulses required in many applications including selective preparation of one of the enantiomers, attosecond generation, control of tunnel ionization and so on.

(3) Efficient generation of high-order sum and difference frequencies in the XUV region by combining a weak longer-wavelength laser field

We have succeeded in the efficient generation of high-order sum and difference frequencies in the XUV region. The intensity of the combined field is lower than that of the fundamental field for high-order harmonic generation by more than two orders of magnitude. In fact, high-order harmonics cannot be generated by only the combined field. The key feature of the present experiments is that the wavelength of the combined field ($\lambda = 1064$ nm) is longer than that of the fundamental field ($\lambda \sim 800$ nm). Our results demonstrate a great advantage of the longer-wavelength combined field. Our approach can be a useful approach to generate XUV radiation whose wavelengths cannot be covered by only the fundamental field. Furthermore, the present experimental results are supported by the theoretical calculations based on our extended version of the Lewenstein model, by which the effect of the combined field can be studied in an appropriate manner. Our calculations also show that there are some wavelength regions of the combined field favorable to the efficient generation of high-order sum and difference frequencies.

[1] Hirofumi Sakai, Jakob Juul Larsen, Ida Wendt-Larsen, Johannes Olesen, Paul B. Corkum, and Henrik Stapelfeldt, *Phys. Rev. A* **67**, 063404-1–063404-4 (2003).

[2] Shinichirou Minemoto, Haruka Tanji, and Hirofumi Sakai, *J. Chem. Phys.* **119**, 7737–7740 (2003).

-
- [3] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, Tsuneto Kanai, and Hirofumi Sakai, Phys. Rev. Lett. **92**, 133005-1-133005-4 (2004).

29 Kuwajima Group

Research Subjects: Protein Folding, Molecular Chaperones, Protein Stability, Physico-chemical Studies of Biological Macromolecules

Member: Kunihiro Kuwajima, Kosuke Maki, & Kimiko Saeki

Recently, we studied the relationships between the folding rate constants of globular proteins and their native three-dimensional structures. What determines the folding rate of globular proteins, and how does it relate to protein hydration? Most proteins that have more than 100 amino acid residues are non-two-state proteins, which accumulate a molten globule-like intermediate at an early stage of kinetic refolding. Is such an intermediate a productive folding intermediate or kinetically trapped misfolded species? These issues are essential for fully elucidating the molecular mechanisms of protein folding.

To address the above issues, we have collected the kinetic folding data for non-two-state and two-state globular proteins reported in the literature, and investigated the relationships between the folding kinetics and the native three-dimensional structure of these proteins. We have found that the folding rates from the unfolded state to the intermediate and from the intermediate to the native state both show significant correlations with the native backbone topology of a protein. The correlation coefficients were comparable to that previously found for the two-state folders. From these results, (1) protein folding is in general occurs in a hierarchical manner, by which the backbone topology forms first, then the formation of the specific packing structure follows, and (2) the molten globule-like folding intermediates observed in many non-two-state folding proteins are real productive folding intermediates.

Based on a comparison of the folding rates of the non-two-state and two-state folders, it was also found that they are similarly dependent on the parameters reflective of the native backbone topology. This suggests that the mechanisms behind non-two-state and two-state folding are essentially identical. The present results lead us to propose a unified mechanism of protein folding. The hierarchical folding is a general mechanism of protein folding, and reflects the hierarchy of the native three-dimensional structure, as embodied in the case of non-two-state folding with an accumulation of the intermediate. Apparently, two-state folding is merely a simplified version of hierarchical folding caused either by an alteration in the rate-limiting step of folding or by destabilization of the intermediate.

- [1] K. Kamagata, Y. Sawano, M. Tanokura and K. Kuwajima: Multiple parallel-pathway folding of proline-free staphylococcal nuclease. *J. Mol. Biol.* **332** (2003) 1143-1153.
- [2] T. Inobe and K. Kuwajima: Φ value analysis of an allosteric transition of GroEL based on a single pathway model. *J. Mol. Biol.* **339** (2004) 199-205.
- [3] K. Kamagata, M. Arai and K. Kuwajima: Unification of the folding mechanisms of non-two-state and two-state proteins. *J. Mol. Biol.* in press.

30 Nose Group

Research Subjects: Molecular Mechanism of Neural Network Formation

Member: Akinao Nose, Takako Morimoto-Tanifuji and Etsuko Takasu

What is the physical basis of formation of the brain? The aim of our laboratory is to elucidate the molecular mechanism of neural development by using techniques of biophysics and molecular genetics. We are trying to identify molecules that function during neural wiring by using, as a model, the simple nervous system of a fruitfly, *Drosophila*. We are currently conducting the following research projects.

1. Molecular Mechanisms of Axon Guidance

1.1. Neuromuscular target recognition molecules, Connectin and Capricious

By using the enhancer trap method, we identified two genes, Connectin and Capricious, that encode cell surface proteins with leucine-rich repeat. During the formation of neuromuscular connectivity, these molecules are expressed in different subsets of neuromuscular synaptic partners. Loss-of-function or ectopic expression of these molecules alter neuromuscular target specificity, indicating their roles in selective synapse formation. We are currently studying the roles of these molecules during selective synapse formation more in detail and also trying to identify the downstream signaling mechanisms of these molecules.

1.2. Gain of function mutant screening

To systematically identify novel genes involved in axon guidance, we adopted a recently developed genetic method, gain-of-function mutant screening. We isolated genes whose ectopic expression in all muscles or neurons cause defects in axon projection and/or synaptogenesis. By molecularly characterizing these genes, we have identified several molecules that are implicated in axon guidance and/or synaptogenesis. We are currently studying the function of these genes.

2. Molecular Mechanisms of Synaptogenesis

2.1. Role of postsynaptic CaMKII on synaptogenesis

During synaptogenesis, synaptic proteins are rapidly assembled into both pre- and postsynaptic sites that are capable of high fidelity transmission. Interaction between the presynaptic neuron and its postsynaptic target cell(s) is essential for the development of synapses. To elucidate the role of postsynaptic cells in synaptogenesis, activity of calcium/calmodulin-dependent protein kinase II (CaMKII) was manipulated specifically in the postsynaptic cell using GAL4-UAS expression system and its effect on the synapse formation at developing *Drosophila* neuromuscular junction was examined. Together with the investigation into localization of synaptic proteins, we found that increased postsynaptic CaMKII activity enhances not only postsynaptic but also presynaptic maturation in function and morphology. We propose two significant functions of postsynaptic CaMKII during synaptogenesis - retrograde modulation of presynaptic properties and coordinated regulation of pre- and postsynaptic maturation. We are also investigating the effect of postsynaptic CaMKII modification on the synaptic response at different developmental stages.

III

2003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 : 櫻井 博儀

1. 特殊相対論

- 1.1 相対性原理
- 1.2 ローレンツ変換
- 1.3 速度の変換
- 1.4 時空間の幾何学と時空のダイアグラム
- 1.5 固有時間と時間の遅れ
- 1.6 ローレンツ収縮
- 1.7 相対論的エネルギーと運動量
- 1.8 エネルギーと運動量のローレンツ変換と保存則

2. 電磁気学と特殊相対論

- 2.1 スカラー、ベクトル、テンソル
- 2.2 4元ベクトル
- 2.3 連続の方程式と4元電流
- 2.4 4元ポテンシャルとローレンツゲージ
- 2.5 一定速度で運動する点電荷がつくる電磁場
- 2.6 電磁場テンソルと場のローレンツ変換

- 2.7 場のエネルギーと運動量 (ポインティングの定理、ポインティングベクトル、マクスウェルの応力テンソル)

3. 電磁場内の電荷の運動

- 3.1 場の中の粒子の運動方程式
- 3.2 一様な静電場中の運動
- 3.3 一様な静磁場中の運動
- 3.4 一様な静電磁場中の運動
- 3.5 電磁場のラグランジアン
- 3.6 エネルギーと運動量の保存則
- 3.7 点電荷の自己エネルギー

4. 静電磁場の境界値問題

- 4.1 ラプラス、ポアソン方程式
- 4.2 3次元ラプラス方程式の解
- 4.3 グリーン関数の方法
- 4.4 多重極展開
- 4.5 磁気モーメント

1.1.2 解析力学・量子力学 I : 相原 博昭

1. ラグランジアン力学

- 1.1 仮想仕事とダランベールの原理
- 1.2 一般化速度と一般化力
- 1.3 一般化座標と一般化速度の関数としての運動エネルギー
- 1.4 ラグランジアン
- 1.5 ハミルトニアン
- 1.6 正準共役運動量
- 1.7 例題
- 1.8 物理的に等価なラグランジアン
- 1.9 ポテンシャルが速度に依存する場合 (ローレンツ力)
- 1.10 連続体のラグランジアン

2. 変分原理とラグランジアン力学

- 2.1 オイラ - 方程式
- 2.2 ハミルトンの原理

- 2.3 連続体のオイラー・ラグランジュ方程式
- 2.4 ラグランジュの未定係数法
- 2.5 ホロノミックな束縛条件を未定係数法で解く
- 2.6 非ホロノミックな束縛条件への応用

3. ネーターの定理とハミルトニアン力学

- 3.1 角運動量と回転対称性
- 3.2 ネーターの定理
- 3.3 ハミルトン力学とルジャンドル変換
- 3.4 位相空間とリュービルの定理

4. 正準変換

- 4.1 正準変換
- 4.2 ポアソン括弧

5. ハミルトン・ヤコビ方程式

- 5.1 ハミルトン・ヤコビ方程式
- 5.2 作用変数と角変数

- 5.3 断熱不変量
- 5.4 量子仮説
- 6. 量子力学
 - 6.1 ド・ブロイの物質波とシュレーディンガー方程式
 - 6.2 ハミルトンの原理とシュレーディンガー方程式
 - 6.3 シュレーディンガー方程式
 - 6.4 確率解釈
 - 6.5 規格化
 - 6.6 運動量
 - 6.7 不確定性原理
- 7. 時間に依存しないシュレーディンガー方程式と1次元系
 - 7.1 定常状態
 - 7.2 井戸型ポテンシャル
 - 7.3 調和振動子
- 7.4 自由粒子
- 7.5 デルタ関数ポテンシャル
- 7.6 有限な高さと幅の井戸型ポテンシャル
- 7.7 散乱行列
- 8. 量子力学の定式化
 - 8.1 線形代数の復習
 - 8.2 関数空間
 - 8.3 量子力学の基本原則
 - 8.4 時間発展演算子
 - 8.5 シュレーディンガー表示とハイゼンベルグ表示
 - 8.6 不確定性原理の一般形
- 9. 補足
 - 9.1 2準位系
 - 9.2 電磁場中の荷電粒子のシュレーディンガー方程式

1.1.3 物理数学 I : 村尾 美緒

1. Complex analysis

- 1.1 Complex numbers
- 1.2 Derivative and analytic functions
- 1.3 Geometry of analytic functions
- 1.4 Basic complex functions
- 1.5 Complex integration
- 1.6 Series
- 1.7 Laurant series and Residue theorem

2. Differential equations

- 2.1 Lipschitz condition
- 2.2 Elementary methods for differential equations (Quadrature)
- 2.3 Second order linear differential equations
- 3. Fourier analysis and Laplace transforms
 - 3.1 Fourier analysis
 - 3.2 Laplace transforms

1.1.4 物理実験学 : 福山 寛、酒井広文

1. 序論 (物理実験の魅力)

2. 単位

- 2.1 SI 基本単位の定義
- 2.2 各種の常用単位系とその変換
- 2.3 代表的な物理量の単位

3. 実験環境の実現とその計測

- 3.1 真空
 - 気体分子運動論、種々の真空ポンプ、真空度の測定法
- 3.2 極低温
 - 熱力学温度、極低温の生成法、各種の温度計
- 3.3 強磁場
 - 強磁場の発生法、強磁場の応用

4. 各種の計測法

4.1 光の計測

出力の測定、パルス幅の測定、超高速ストリークカメラ、強度相関法、周波数分解光ゲート法

4.2 イオンと電子の計測

飛行時間型イオン分析装置、2次元イオン画像観測装置と数値解析法、光電子画像観測法

4.3 放射線の計測

放射線の基礎、放射線と物質の相互作用、放射線検出器

5. 誤差論

- 5.1 実験誤差
- 5.2 種々の確率統計
 - 確率分布関数、平均と分散、正規分布、二項分布、ポアソン分布
- 5.3 実験データからの推測
 - 大数の法則、中央極限の定理、最小二乗法

6. 実験レポートの書き方

1.2 3年生 夏学期

1.2.1 光学：山本 智

1. イントロダクション

1.1 光学の研究の歴史

1.2 幾何光学、波動光学、電磁光学

2. 光の伝播

2.1 平面波の伝播

2.2 金属面での反射

2.3 誘電体面での反射と透過

2.4 全反射とエバネッセント波

2.5 限られた空間での伝播（導波管と薄膜導波路）

2.6 光ビーム

3. 偏光

3.1 直線偏光、円偏光、楕円偏光

3.2 準単色光の偏光状態

3.3 可干渉行列

3.4 偏光度

3.5 偏光の発生と検出

4. 干渉

4.1 波面分割による干渉

4.2 振幅分割による干渉

4.3 鮮鋭度（Visibility）

4.4 準単色光の干渉

4.5 van Cittert and Zernike の定理

4.6 開口合成

4. 回折

4.1 Huygens の原理

4.2 Fresnel-Kirchhoff の回折理論

4.3 Fraunhofer 回折と Fresnel 回折

1.2.2 量子力学 II：小形正男

1. 3次元のシュレディンガー方程式

1.1 演算子

1.2 調和振動子（復習を兼ねて）

1.3 Laplacian

1.4 角運動量

1.5 球面調和関数

1.6 ルジャンドル多項式と直交性

1.7 軌道

1.8 直交性とエルミート演算子

1.9 動径方向とラゲール多項式

1.10 水素原子

2. スピンと角運動量

2.1 昇降演算子

2.2 角運動量の代数と行列表示

2.3 スピン

2.4 スピンの行列表示

2.5 磁場中の Larmor 歳差運動

2.6 角運動量の合成

2.7 実空間での回転

2.8 Stern-Gerlach の実験

3. 摂動論

3.1 時間に依存しない摂動

3.2 縮退のある場合

3.3 時間に依存する摂動

3.4 フェルミの Golden rule

4. 準古典近似

4.1 \hbar 展開

4.2 Bohr-Sommerfeld の量子化

4.3 調和振動子の場合

4.4 ポテンシャル障壁

5. 量子力学における対称性

5.1 対称性とは

5.2 全運動量とエネルギー保存則

5.3 回転対称性と角運動量

5.4 いろいろな対称性

5.5 パリティと選択則

5.6 時間反転対称性

6. 磁場中の運動

6.1 Lagrangian と Hamiltonian

6.2 ランダウレヴェル

6.3 古典論との対応

6.4 ゲージ対称性と AB 効果

おまけ. ファインマンの経路積分による量子力学

1.2.3 物理数学 II : 須藤 靖

1. はじめに
2. Sturm – Liouville 型方程式と直交関数
 - 2.1 自己随伴型演算子とエルミート性
 - 2.2 Sturm – Liouville 方程式と固有関数
 - 2.3 Gram – Schmidt の直交化
 - 2.4 母関数と Rodrigues の式
3. 直交多項式
 - 3.1 Hermite 多項式 $H_n(x)$
 - 3.2 Legendre 多項式 $P_l(x)$
 - 3.3 Legendre 陪関数 $P_l^m(x)$
 - 3.4 Laguerre 多項式 $L_n(x)$ と Laguerre 陪多項式 $L_n^k(x)$

- 3.5 球面調和関数
4. 偏微分方程式とグリーン関数
 - 4.1 Delta 関数
 - 4.2 Green 関数
 - 4.3 Sturm-Liouville の境界値問題
 - 4.4 Green 関数の例
5. ガンマ関数とベータ関数
 - 5.1 Gamma 関数
 - 5.2 Beta 関数
 - 5.3 Stirling の近似式
 - 5.4 誤差関数

1.2.4 現代実験物理学 I : 樽茶清悟, 藤森淳, 能瀬聡直

1. 物性実験学 (樽茶、藤森) I
 - 1.1 序論
 - 物質の多様性、歴史的な物性実験
 - 1.2 物質設計と製法
 - 単結晶育成、薄膜形成、表面微細加工
 - 1.3 実験環境の実現
 - 真空、低温、強磁場、高圧
 - 1.4 種々の物性測定法
 - 回折法、顕微法、電気測定、光電子分光、光学測定、熱測定、磁気測定
 - 教育用実験設備見学 (極低温、透過型電子顕微鏡、超短パルスレーザー)
- 1.5 最先端の物性実験
 - メゾコピック系、量子計算、超伝導、磁性
2. 生物物理実験学 (能瀬)
 - 2.1 生物物理学概論
 - 歴史的な生物物理実験、ゲノム時代の生物物理
 - 2.2 遺伝子と蛋白質の解析法
 - 遺伝子クローニングの流れ、バイオインフォマティクス、分子遺伝学による機能解析、
 - 2.3 バイオイメージング
 - 種々の顕微鏡による観察法、蛍光蛋白質による生体内可視化

1.2.5 電磁気学 II : 高瀬 雄一

1. Maxwell 方程式
 - 1.1 微視的描像と巨視的描像
 - 1.2 電磁場とポテンシャル
2. 静電場
 - 2.1 誘電体
 - 2.2 境界値問題の解法
 - 2.3 Laplace 方程式の一般解
 - 2.4 Green 関数
3. 静磁場
 - 3.1 磁性体
 - 3.2 境界値問題の解法
 - 3.3 強磁性体
4. 準静的問題
 - 4.1 電磁誘導
 - 4.2 電磁場の拡散
 - 4.3 表皮効果
 - 4.4 渦電流
5. 電磁場の保存則
 - 5.1 Poynting の定理
 - 5.2 インピーダンス
6. 物質中の電磁波
 - 6.1 誘電率と屈折率
 - 6.2 分散と吸収
 - 6.3 プラズマ中の波動
 - 6.4 群速度
 - 6.5 波束の拡散
 - 6.6 因果律

1.2.6 生物物理学：桑島邦博，能瀬聡直

1. 序

- 1.1 蛋白質・核酸の構造
- 1.2 遺伝情報の流れ
- 1.3 エネルギーの流れ
- 1.4 酸，塩基，緩衝液

2. 蛋白質

生命現象における蛋白質の役割，蛋白質のフォールディング問題

3. 蛋白質の化学構造と立体構造

- 3.1 アミノ酸の特性と蛋白質の化学構造
- 3.2 蛋白質の立体構造

4. 蛋白質立体構造の安定化因子

- 4.1 静電相互作用，Van der Waals 相互作用，水素結合

4.2 水の性質と疎水性相互作用

4.3 電解質溶液中での静電相互作用

5. 蛋白質の熱力学的安定性

蛋白質のアンフォールディング転移，二状態モデル

6. 脳・神経系の形成機構

脳と遺伝子，神経系の発生と進化

7. 個体発生の分子機構

基本的概念，細胞の多様性の生成機構，遺伝子発現の調節機構，位置情報，形態形成，遺伝学的アプローチ，細胞接着，反応拡散モデル

8. 神経系における信号の生成と伝達機構

静止電位，活動電位，ホジキンハクスレー方程式，シナプス伝達，シナプス可塑性と記憶

1.2.7 統計力学 I：和達三樹

1. I. 熱力学

- 1.1 序論
- 1.2 熱力学の基本概念
- 1.3 熱力学第一法則
- 1.4 熱力学第二法則
- 1.5 熱力学第三法則
- 1.6 熱力学関数

2. 統計力学の手法

- 2.1 序論
- 2.2 小正準集団
- 2.3 正準集団
- 2.4 大正準集団

3. 量子統計力学

- 3.1 量子論
- 3.2 量子統計力学
- 3.3 黒体輻射
- 3.4 固体の比熱
- 3.5 理想フェルミ気体
- 3.6 理想ボース気体

4. 統計力学の応用

- 4.1 強電解質の理論
- 4.2 高分子
- 4.3 磁性
- 4.4 相転移

1.3 3年生 冬学期

1.3.1 電気力学：蓑輪 眞

1. 電磁波

- (a) Maxwell の方程式
- (b) 電磁波の伝播
- (c) 電磁波の性質
- (d) 電磁波のエネルギーと運動量

2. 電磁波の放射

- (a) 電磁ポテンシャル

- (b) 遅延ポテンシャル

- (c) 多重極放射

3. 荷電粒子の出す電磁波

- (a) 運動する荷電粒子のつくる電磁場
- (b) 運動する荷電粒子の出す電磁波
- (c) Cerenkov 放射

4. 電磁波と特殊相対論

1.3.2 現代実験物理学 II : 坪野公夫、早野龍五

1. 線型応答系
 - 1.1 フーリエ変換、ラプラス変換
 - 1.2 出力の積分表示
 - 1.3 インパルス応答、ステップ応答
 - 1.4 伝達関数、インピーダンス
 - 1.5 線型系と因果律
2. データ処理
 - 2.1 エルゴードプロセス
 - 2.2 パワースペクトル
 - 2.3 自己相関関数
 - 2.4 最適フィルター
 - 2.5 積算平均効果
3. MATLAB 入門
 - 3.1 コマンド入力の基本
 - 3.2 行列の作り方
 - 3.3 演算
 - 3.4 グラフィックス
 - 3.5 応用例：線型応答
 - 3.6 応用例：データ処理
4. デジタル信号処理
 - 4.1 有限時間データであるための効果
 - 4.2 離散時間データである効果
 - 4.3 FFT
 - 4.4 デジタル信号のパワースペクトル
 - 4.5 線型デジタルシステム
- 4.6 z 変換
- 4.7 デジタルフィルター
5. 素粒子と物質の相互作用
 - 5.1 荷電粒子の電離損失、飛程、多重散乱
 - 5.2 光電効果、コンプトン散乱、電子陽電子対生成
 - 5.3 制動放射、電磁シャワー
 - 5.4 チェレンコフ放射
 - 5.5 磁気スペクトロメーター：運動量測定と粒子識別
 - 5.6 例：中間子の発見、陽電子の発見、反陽子の発見
6. 放射線測定器
 - 6.1 ガス検出器の原理
 - 6.2 ガイガーカウンタ
 - 6.3 比例計数管
 - 6.4 MWPC、ドリフトチェンバー、TPC
 - 6.5 シンチレーションカウンター
 - 6.6 半導体検出器
 - 6.7 例：ニュートリノの検出、Kamiokande
7. 加速器
 - 7.1 静電加速器
 - 7.2 サイクロトロン
 - 7.3 シンクロトロン
 - 7.4 ビーム衝突型加速器
 - 7.5 例：W, Z の発見

1.3.3 物理数学 III : 松尾 泰

Part I. 群論

1. 基礎
 - 1.1 群の定義
 - 1.2 群の例
 - 1.3 (準)同型、部分群、剰余類、商群
2. 置換群
 - 2.1 置換群の定義
 - 2.2 共役類
 - 2.3 Young 図
3. 表現論
 - 3.1 表現の定義、例
 - 3.2 Schur の補題
 - 3.3 指標とその直交性
4. 離散群の応用
 - 4.1 点群と量子力学
 - 4.2 結晶構造と空間群
5. リー群とリー代数
 - 5.1 リー群とリー代数：定義と例
 - 5.2 リー群の大局的構造、ホモトピー群
 - 5.3 リーの定理
6. リー群(代数)の表現論
 - 6.1 $SU(2)$ の表現の復習
 - 6.2 $SU(3)$ の表現
 - 6.3 root, weight, Cartan 部分群, Dynkin 図

Part II 微分形式

1. 外積代数
 - 1.1 外積の定義

- 1.2 Fermion を用いた表現
- 1.3 Hodge 双対
- 2. 微分形式
 - 2.1 微分形式の定義
 - 2.2 外微分演算子
 - 2.3 閉形式と完全形式、コホモロジー群
 - 2.4 写像の引き戻し
 - 2.5 Hodge 双対と Laplacian

- 3. 多様体
 - 3.1 多様体の定義
 - 3.2 多様体上の微分形式
 - 3.3 単体分割と境界演算子
 - 3.4 ホモロジー群
 - 3.5 Stokes の定理
 - 3.6 de Rham の定理
 - 3.7 ベクトル束の概念

1.3.4 量子力学 III : 初田哲男

- 1. 散乱の量子論
 - 1.1 1次元の散乱問題と3次元への拡張
 - 1.2 波束の散乱と微分断面積
 - 1.3 部分波振幅と位相差解析、剛体球と井戸型ポテンシャル
 - 1.4 S行列、光学定理、ボルン近似
 - 1.5 有効距離理論と低エネルギー共鳴
 - 1.6 アイコナル近似と回折散乱
- 2. 多粒子系の量子論

- 2.1 波動関数の対称性と統計
- 2.2 対称化(反対称化)された波動関数の例
- 2.3 ハートリー・フォック近似
- 2.4 第二量子化と場の演算子
- 3. 経路積分による量子論
 - 3.1 1粒子問題
 - 3.2 停留位相法と半古典近似
 - 3.3 有限温度への拡張

1.3.5 流体力学 : 佐野 雅己

- 1. 流体と流体力学
 - 1.1 流体運動の例
 - 1.2 巨視的運動と微視的運動
 - 1.3 流体力学の広がり
- 2. 流体運動の記述と運動方程式
 - 2.1 オイラー的記述とラグランジュ的記述
 - 2.2 変形体に作用する力、応力、ひずみ速度
 - 2.3 流体の運動に伴う変形
 - 2.4 保存方程式
 - 質量保存、運動量保存、エネルギー保存
 - 2.5 Navier-Stokes 方程式の性質と対称性
- 3. 完全流体モデルと運動方程式
 - 3.1 ベルヌーイの諸定理、ケルビンの循環定理
 - 3.2 ポテンシャル流

- 3.3 2次元ポテンシャル流
 - 複素速度ポテンシャル、Kutta-Joukowski の定理
- 4. 渦運動
 - 4.1 渦度と渦糸
 - 4.2 渦糸群の運動
- 5. 粘性流体の運動
 - 5.1 Reynolds の相似則
 - 5.2 様々な粘性流
 - 5.3 境界層
- 6. 流れの安定性
 - 6.1 安定性理論、分岐
 - 6.2 レーリー・ベナール対流とカオスへの遷移

1.3.6 統計力学 II : 青木秀夫

- 1. 相転移
 - 1.1 秩序パラメータと対称性の破れ
 - 1.2 2次相転移とギンツブルグ・ランダウ理論
- 2. 相互作用系の統計力学

- 2.1 多体問題—スピン系と電子系
- 2.2 平均場近似
- 2.3 Bose 気体と Fermi 気体 (ボーズ凝縮、フェルミ縮退、超伝導)
- 3. 非平衡統計力学への序論

3.1 輸送現象 (ボルツマン方程式)

3.2 線形応答理論

1.4 4年生 夏学期

1.4.1 素粒子物理学：駒宮幸男

1. 概要

1.1 自然界のスケールと自然単位

1.2 素粒子と複合粒子の種類

1.3 相互作用の種類

2. 相対論的運動学

2.1 ローレンツ変換、重心系

2.2 粒子の衝突と崩壊の運動学

3. 電磁相互作用

3.1 Dirac 方程式

3.2 Dirac Spinor の性質

3.3 Feynman Diagram

3.4 散乱断面積

4. 強い相互作用

4.1 カラーの自由度

4.2 QCD

5. 弱い相互作用

5.1 W ボゾンと Z ボゾン

5.2 パリティ非保存

5.3 CP 非保存

5.4 ニュートリノ

6. 統一ゲージ理論

6.1 ゲージ対称性

6.2 ヒッグスボゾン

6.3 電弱統一理論

7. 標準理論を越えて

7.1 大統一と超対称性

7.2 LHC とリニアコライダー

7.3 宇宙論との関係

1.4.2 原子核物理学：大塚孝治・酒井 英行

1. 原子核の大きさ

1.1 電子散乱と電荷分布

2. 質量公式と安定性

2.1 半実験的質量公式

2.2 ハイゼンベルグの谷とベータ崩壊

3. 核力と中間子

3.1 二核子系とアイソスピン

3.2 湯川中間子理論

3.3 ダイバリオン状態と三体力

4. 重陽子

4.1 磁気モーメントと四重極モーメント

4.2 テンソル力と D 状態

5. アルファ崩壊、ベータ崩壊、ガンマ崩壊

6. 魔法数と殻模型

7. 原子核のハートリー・フォック理論

8. 原子核の集団運動

8.1 回転運動モデル

8.2 振動モデル

9. 巨大共鳴

9.1 和則

9.2 電気双極巨大共鳴と TDA

9.3 ガモフテラー巨大共鳴とクオーク自由度

10. 最近の話題

10.1 不安定核現象

10.2 天体核物理

1.4.3 固体物理学 I：常行 真司

1. 固体 (結晶) の特徴

- 1.1 力学的性質
- 1.2 熱力学的性質
- 1.3 光学的性質
- 1.4 電気的性質と相転移
- 1.5 誘電的性質と相転移
- 1.6 磁氣的性質と相転移
- 2. 結晶構造と対称性
 - 2.1 並進対称性
 - 2.2 単位格子
 - 2.3 7個の結晶系
 - 2.4 14個のブラベー格子
 - 2.5 点群と空間群
 - 2.6 結晶の方位と面
 - 2.7 結晶構造
 - 2.8 結晶の対象性と物理的性質：ノイマンの原理
- 3. 周期系と波の回折
 - 3.1 物質による波の散乱
 - 3.2 散乱強度とパターンソン関数
 - 3.3 周期系の散乱強度分布
 - 3.4 逆格子
 - 3.5 周期系の散乱条件（ラウエの条件）
 - 3.6 エバルトの作図法
 - 3.7 逆格子ベクトルとミラー指数
 - 3.8 ブラッグの反射条件
 - 3.9 ブリリュアン・ゾーン
 - 3.10 原子散乱因子と構造因子
 - 3.11 X線回折実験法のいろいろ
 - 3.12 波長とエネルギー
 - 3.13 特性X線
- 4. 固体の凝集機構
 - 4.1 分子結合（ファン・デル・ワールス結合）
 - 4.2 交換斥力
 - 4.3 金属結合
 - 4.4 共有結合
 - 4.5 イオン結合
 - 4.6 共有結合からイオン結合へ
 - 4.7 イオン結合の静電エネルギー
 - 4.8 イオン半径と配位数
 - 4.9 水素結合
- 5. 分子の結合と電子状態
 - 5.1 水素分子イオン
 - 5.2 水素分子(1)：ハイトラー-ロンドンの理論
 - 5.3 水素分子(2)：分子軌道法
 - 5.4 Hartree-Fock 法と CI 法
 - 5.5 単純化した LCAO-MO 方による分子の取り扱い
- 6. 固体の電子状態
 - 6.1 プロッホの定理
 - 6.2 強束縛近似
 - 6.3 エネルギーバンドと電子数
 - 6.4 自由電子ガス
 - 6.5 弱い周期ポテンシャル中の電子
- 7. バンド構造と物性
 - 7.1 バンド構造と電子の運動
 - 7.2 有効質量
 - 7.3 正孔
 - 7.4 電気伝導
 - 7.5 電子気体の比熱
 - 7.6 電子気体の熱伝導
 - 7.7 交流電気伝導率
 - 7.8 半導体

1.4.4 場の量子論：柳田勉

1. Relativistic Quantum Theory

- 1.1 Relativistic Quantum Mechanics
- 1.2 Dirac Equation
- 1.3 Lorentz Covariance
- 1.4 Solutions to the Dirac Equation
- 1.5 Hole Theory

2. Quantum Field Theory

- 2.1 Canonical Quantization of Fields
- 2.2 Real Spinless Fields
- 2.3 Meaning of Field Quantization
- 2.4 Dirac Fields
- 2.5 Electromagnetic Field

1.4.5 量子光学：小林孝嘉

1. 輻射場と物質との相互作用

- 1.1 輻射場と二準位系との相互作用
輻射場。種々の輻射。プランク分布。黒体輻射。双極子近似。遷移双極子。吸収。自然放出。誘導放出。Einstein の A 係数、B 係数。自然寿命。自然幅。
- 1.2 密度行列
密度行列。純粋状態、混合状態。遷移確率。Fermi の黄金律。Rabi 周波数。量子力学的 Liouville 方程式。巨視的分極の摂動論的表示。縦緩和時間。横緩和時間。均一広がり。自然幅。不均一広がり。Doppler 広がり。結晶場広がり。線形電気感受率。吸収係数。屈折率。Kramers-Kronig の関係式。
- 1.3 半古典論の破綻
自然放出。ラムシフト。

1.4.6 一般相対論 : 佐藤勝彦

- 1. 特殊相対論
 - 1.1 マイケルソン・モーレイの実験
 - 1.2 ローレンツ変換と物理法則の共変形式
 - 1.3 相対論における時間
- 2. 等価原理
- 3. リーマン幾何学
 - 3.1 一般座標変換とスカラー、ベクトル、テンソル
 - 3.2 共変微分
 - 3.3 曲率
- 4. 物理法則の一般共変形式
 - 4.1 電磁相互作用の共変形式
 - 4.2 エネルギー・モーメントテンソル

2. 輻射場の量子論

自由な場の量子化。光子数演算子。位相演算子とその問題点。光子数固有状態。コヒーレント状態。スクイズ状態。

3. レーザー

レーザーの発振機構。共振器。増幅媒質。レーザー共振器中の物質と輻射場の相互作用。レート方程式。種々のレーザー。

4. 非線形光学

非線形電気感受率。光高調波。二光子吸収。四光波混合。フォトンエコー。

5. 量子光学の最近のトピックス

4.3 アインシュタイン方程式

5. 相対論的宇宙論

- 5.1 フリードマン宇宙モデル
- 5.2 宇宙論的観測と標準ビッグバンモデル
- 5.3 インフレーションと宇宙の創生論

6. シュワルツシルドの球対称真空解

- 6.1 シュワルツシルド解
- 6.2 粒子の運動
- 6.3 光の折れ曲がりと重力レンズ

7. 高密度天体

- 7.1 一般相対論的星の重力平衡 TOV 方程式

8. ブラックホール、ホワイトホール、ワームホール

1.5 4年生 冬学期

1.5.1 化学物理学 : 内田 慎一

- 1. 化学物理学とは何か?
 - 1.1 凝縮系の普遍的性質と個別的性質
- 2. 統計熱力学の命題
 - 2.1 熱平衡と相
 - 2.2 エントロピー
- 3. 気相・液相と相関
 - 3.1 相関と圧縮率
 - 3.2 気相 - 液相転移
- 4. 液相 - 固相転移
 - 4.1 対称性の破れ
 - 4.2 秩序パラメーター
- 5. 対称性の破れ
 - 5.1 剛性
 - 5.2 低エネルギー集団励起
- 6. 様々な凝縮系と対称性の破れ
 - 6.1 原子・分子の系
 - 6.2 電子系
 - 6.3 スピン系
 - 6.4 ボーズ系
- 7. 個別的性質を理解するための固体物理学
 - 7.1 原子・分子から凝縮固体へ
 - 7.2 More is different

- 8. 周期表の理解
- 8.1 金属と絶縁体

- 8.2 Si は何故半導体なのか？

1.5.2 物理学特別講義 I : 江口 徹

- 1. 場の量子化
 - 1.1 ネーターの定理
 - 1.2 伝搬関数
 - 1.3 スピノル場の量子化
 - 1.4 ウィックの定理
- 2. 共変的摂動論
 - 2.1 相互作用表示

- 2.2 相互作用を持つ場の量子化
- 2.3 ダイソンの公式
- 2.4 ファインマン グラフ
- 3. ゲージ理論
 - 3.1 ヤン・ミルズ理論
 - 3.2 対称性の自発的破れ

1.5.3 物理学特別講義 II : 桑島 邦博

- 1. 生体高分子溶液の熱力学・統計力学
 - 1.1 Gibbs 自由エネルギーと化学ポテンシャル
 - 1.2 化学平衡
 - 1.3 分配関数
- 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 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 α ヘリックスのキャッピング相互作用
 - 6.3 β 構造転移
- 7. 蛋白質のアンフォールディング転移
 - 7.1 アンフォールディング転移
 - 7.2 蛋白質の熱転移
- 8. 化学反応速度論
 - 8.1 反応速度式
 - 8.2 Arrhenius の式と活性化エネルギー
 - 8.2 遷移状態説
- 9. 蛋白質のフォールディング
 - 9.1 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
 - 9.2 値解析法
- 10. 酵素反応速度論

1.5.4 物性物理学特論 : 塚田捷、長谷川修司、小森文夫

- 1. 概論
 - 1.1 表面科学とは
 - 1.2 表面科学の歴史
 - 1.3 表面科学とナノテクノロジー
- 2. 表面電子状態
 - 2.1 表面のバンド構造と表面状態
 - 2.2 表面状態と表面構造

- 3. 第一原理計算法
 - 3.1 局所密度汎関数法
 - 3.2 第一原理分子動力学法
- 4. 走査プローブ顕微鏡
 - 4.1 走査トンネル顕微鏡の理論
 - 4.2 原子間力顕微鏡の理論
 - 4.3 走査トンネル顕微鏡の原理

- 4.4 表面原子構造観察
- 4.5 局所電子状態測定
- 4.6 表面バンドの観測
- 4.7 表面電子定在波
- 5. 原子細線と分子架橋
- 5.1 原子細線系の物理
- 5.2 分子架橋系の話題
- 6. 表面超構造と原子配列の解析
- 6.1 表面超構造
- 6.2 回折法
- 6.3 顕微鏡法
- 6.4 動的過程
- 7. 表面電子状態の解析
- 7.1 表面電子状態
- 7.2 (逆)光電子分光法

1.5.5 宇宙物理学：牧島一夫

- 1. 重力
- 1.1 Newton の重力の法則
- 1.2 ブラックホール
- 1.3 自己重力系
- 1.4 運動方程式と状態方程式
- 2. 電磁放射
- 2.1 黒体放射
- 2.2 黒体放射の概念の応用
- 2.3 光子ガスの熱力学
- 3. 星の物理学
- 3.1 星の熱力学
- 3.2 星のパラメータスケールリング
- 3.3 星の内部の熱核融合

1.5.6 固体物理学 II：岡本 徹

- 1. 格子振動と比熱
- 1.1 結晶中の格子振動
- 1.2 格子振動の量子化
- 1.3 格子比熱
- 1.4 Debye 近似
- 2. 金属中の伝導電子
- 2.1 自由電子モデル
- 2.2 伝導電子の比熱
- 2.3 Boltzmann 方程式と電気伝導

- 7.3 トンネル分光法
- 7.4 光電子分光によるバンド分散測定
- 7.5 光電子分光による原子結合状態の観測
- 7.6 レーザー光を用いた電子分光測定
- 7.7 電子エネルギー損失分光
- 8. 表面電子輸送
- 8.1 表面空間電荷層の 2 次元電子系
- 8.2 表面電子バンドの 2、1 次元電子系
- 8.3 原子マニピュレーション
- 9. 表面超薄膜磁性
- 9.1 強磁性相転移
- 9.2 スピン分解光電子分光測定
- 9.3 磁気カー効果測定
- 9.4 近藤効果
- 9.5 磁性超薄膜成長
- 3.4 宇宙と重元素：元素合成の 3 つの現場
- 4. 星の進化と終末
- 4.1 星の進化
- 4.2 星の終末
- 4.3 電子縮退した星：白色わい星
- 4.4 核子が縮退した星：中性子星
- 5. ビッグバン宇宙論
- 5.1 膨張宇宙の記述
- 5.2 膨張宇宙の力学と宇宙論パラメータ
- 5.3 宇宙の始まり
- 5.4 創成直後の宇宙と素粒子
- 5.5 軽元素の合成
- 5.6 宇宙の「晴れ上がり」
- 5.7 観測的宇宙論
- 5.8 新しい標準宇宙像
- 2.4 散乱機構
- 2.5 熱電効果
- 2.6 熱伝導と Wiedemann-Franz 則
- 3. 半導体における電気伝導
- 3.1 半導体と不純物ドーピング
- 3.2 バンド構造と有効質量
- 3.3 正孔、Hall 効果
- 3.4 半導体デバイス
ダイオード、トランジスター、レーザー

-
- 4. 低次元電子系の量子現象
 - 4.1 量子ホール効果
 - 4.2 メゾクコピック伝導
 - 5. 磁性
 - 5.1 磁性の起源
 - 5.2 局在モーメントの常磁性
 - 5.3 交換相互作用
 - 5.4 Heisenberg 模型
 - 5.5 分子場近似、スピン波
 - 5.6 伝導電子の強磁性
 - 5.7 磁気異方性と磁化曲線
 - 5.8 磁性デバイス
 - 6. 超伝導と超流動
 - 6.1 超伝導、Meissner 効果
 - 6.2 London 方程式
 - 6.3 BCS 理論
 - 6.4 磁束の量子化
 - 6.5 臨界磁場
 - 6.4 磁束の量子化
 - 6.5 Josephson 効果
 - 6.6 銅酸化物超伝導体など
 - 6.7 液体ヘリウムの超流動

2 各賞受賞者紹介

2.1 西島和彦先名誉教授：平成 15 年度 文化勲章

本学名誉教授の西島和彦先生が平成 15 年度の文化勲章を受章されました。西島先生は 1926 年東京のご出身で本学物理教室を卒業後、大阪市立大学、米国イリノイ大学で教鞭をとられました。その後、1966 年に東京大学理学部物理学教室教授となられ 1986 年に京都大学基礎物理学研究所に所長としてお移りになるまで本学の研究・教育に尽力されました。1979-82 年には理学部長をお勤めになられています。

今回受章の対象となった「西島・ゲルマン」の法則は、1950 年代に奇妙な粒子と呼ばれた K, Lambda, Sigma 粒子などの一群の粒子の振る舞いを、奇妙さ(ストレンジネス)と呼ばれる量子数を導入することにより説明したお仕事で、あまりにも有名です。西島・ゲルマンの法則によれば、素粒子の持つストレンジネスを S、バリオン数を B、アイソスピンの第三成分を I_3 とし電荷を Q とするとこれらの量の間には $Q = e(I_3 + S/2 + B/2)$ の関係が成立します。ストレンジネスの概念は現在では素粒子のフレーバーとして一般化され、カラーと共に素粒子のもつ最も基本的な量子数として、現代の素粒子物理学の中心的な概念を形成しています。西島先生はストレンジネスの導入のほかに、場の理論における束縛状態の記述や分散理論を用いた場の理論の再構成、さらに繰り込み群を用いたゲージ理論の分析などにも優れた業績を残されています。

また、先生は明快な教科書を書かれることでもよく知られており、以前ベンジャミンから出版された「Fundamental Particles」や「Particles and Fields」は院生の間で広く用いられました。日本語の教科書としては「場の量子論」(紀伊国屋書店)などがあります。

西島先生は 1989 年に学士院会員となられ、1993 年には文化功労者に選出されておられます。

2.2 小柴昌俊名誉教授：勲一等旭日大綬章

小柴昌俊名誉教授は、平成 15 年度の勲一等旭日大綬章を受章されました。

小柴名誉教授は、昭和 26 年東京大学理学部物理学科を卒業、昭和 28 年米国ロチェスター大学に留学、昭和 31 年同大学院より博士号を受けられた後、ロチェスター大学物理学教室研究員、シカゴ大学物理学教室研究員を経て、昭和 38 年 3 月に東京大学原子核研究所助教授に任ぜられ、昭和 38 年 11 月に理学部物理学教室に移られました。昭和 45 年には教授となられ、昭和 49 年には、理学部附属高エネルギー実験施設長、昭和 59 年には、理学部附属素粒子物理国際センター長を歴任されました。昭和 48 年には大学院理学系研究科物理学課程主任として専門課程の運営にも尽くされました。同氏はまた、日本学術会議原子核特別委員会委員等も努められ、科学行政、研究教育の運営の面でも尽力されました。

小柴名誉教授は、宇宙線分野で先駆的、独創的な研究を行なわれて来ましたが、なかでも、宇宙線の成分の構成及びエネルギースペクトラムから宇宙線の超新星起源を指摘、大型原子核乾板による国際協同実験の責任者として、宇宙線による素粒子相互作用を研究、また、 μ 粒子束の初めての組織的研究などの世界的に優れた業績を挙げて来られました。

素粒子物理学分野においては、昭和 49 年当時に、その重要性が十分認識されていなかった、電子・陽電子衝突による素粒子実験の重要性に着目し、理学部附属高エネルギー実験施設の設立に尽力されました。この結果、ドイツ国立電子シンクロトロン研究所における国際協同実験 D A S P 及び J A D E によって、新粒子 Pc の発見やグルーオンの発見、統一ゲージ理論の検証などの重要な結果を得ることが出来ました。この業績により昭和 60 年ドイツ連邦共和国より、ドイツ大功労十字章を授与されました。更に、スイスの欧州原子核研究機構(CERN)における、国際協同実験 O P A L を発足されることに尽力されました。

昭和 53 年には、陽子崩壊、磁気モノポール探索などの研究を行なうため、大型水チェレンコフ検出器による実験を提案され、昭和 58 年神岡鉱山において Kamiokande 実験を開始されました。陽子崩壊やモノポールが発見されなかったことから、大統一理論に厳しい制限をつけることとなりました。又、太陽からのニュートリノが理論の予言よりも少ないことを観測されました。

昭和 62 年 2 月には、Kamiokande 実験において超新星 S N 1987 A からニュートリノを世界で初めて観測され。これによりニュートリノ天文学という新しい学問分野を切り開かれました。この業績によって昭和 62 年には 12 月には仁科記念賞、昭和 63 年 1 月には朝日賞、11 月には文化功労者に任ぜられ、平成 6 年には学士院賞を、平成 9 年 11 月には文化功労賞を、平成 12 年には Wolf 賞(イスラエル)を授賞さ

れました。平成14年12月にはノーベル物理学賞を授賞されました。

東京大学を退官され東海大学に移られてからも、Kamiokandeの次期計画であるSuper-Kamiokande実験の立ち上げに尽力されました。このSuper-Kamiokande実験は平成10年、大気ニュートリノの観測からニュートリノに質量があることを世界で初めて発見しております。

以上のように、小柴名誉教授は本学を中心として研究・教育に尽力され学問上数々の業績を挙げられてこられ、門下から多くの人材を輩出させ、研究者の組織化、研究プロジェクトの遂行のために大きな貢献をされてきました。

これらの業績によって、平成15年度の勲一等旭日大綬章を受章されました。

2.3 柳田教授：フンボルト賞

柳田勉教授が、「ニュートリノの質量を予言したシーソー機構と宇宙のバリオン非対称性の研究」により2003年のフンボルト賞を受賞された。

2.4 小林孝嘉教授：日本分光学会賞学術賞

小林孝嘉教授が「極限的超短パルス光の発生とそれを用いた遷移状態分光法の確立」により平成14年度日本分光学会賞学術賞を受賞された。1997年まで10fs (fs=10⁻¹⁵s)以下のパルス幅を持つ光パルスは、800nm付近の近赤外域に限られていたが、小林教授らは非同軸(ノンコリニア)配置のパラメトリックを用いて、1998年初めて10fsを切る可視光パルスを発生し、1999年には4.7fs、2001年には3.9fsと世界最短パルス幅可視・近赤外光パルス発生に成功した。更に最近、パルス絶対位相揺らぎが自動的にキャンセルする過程を考案し、低繰返し増幅器からの出力の自動位相ロック法を考案し、実験で実証した。この方法が、絶対位相に敏感な高強度レーザー励起軟エックス線発生に与える影響は極めて大きい。また一方超短パルスを超高速分光学的研究にも適用して、その有用性を自ら示しこれらの業績を高く評価された。

2.5 相原博昭教授：第20回井上学術賞

相原氏が代表者の一人を務めている Belle グループは B 中間子系ではじめて CP 非保存を発見することに成功した。この業績は素粒子物理における小林益川理論をはじめ実験的に検証したもので学術的意義は極めて高い。相原研グループは測定の要となるシリコンバレー検出器の建設、B 中間子崩壊時間を高い精度で決定するプログラムや理論との対比から非対称性を求める高度なフィッティングツールの開発、そしてデータ解析という一連の研究経過において中心的役割を果たした。これらの仕事における相原氏のリーダーシップが高く評価された。

2.6 松田巖助手(長谷川研究室): 日本表面科学会平成15年度奨励賞

松田巖助手が、「半導体表面上金属超薄膜の量子井戸状態の研究」(表面科学 23 巻、(2002) 509-518 ページ)の論文に対して、日本表面科学会平成15年度奨励賞を受賞した。この賞は、日本表面科学会誌に掲載された原著論文の第一著者が40歳未満であり、その論文が注目され、将来表面科学への貢献が大いに期待されると認められるものに贈られる。この論文では、5~30原子層厚さの銀の超薄膜の電子状態を角度分解光電子分光法によって詳細に調べ、そこに閉じ込められた電子が量子井戸状態を作っていることを明瞭に示した。また、サブバンドの面内分散の異常や下地基板結晶の電子状態との相互作用の影響など、新規な現象を報告しており、新たな関心を引き起こしたことが評価された。

2.7 中平 武 博士(相原研究室): 第5回高エネルギー物理学若手奨励賞

中平氏の博士論文“Study of CP Asymmetry in the Neutral B Meson Decays to Two Charged Pions”は、中性B中間子が2つの荷電パイ中間子 $\pi^+\pi^-$ に崩壊する反応の時間発展を精密に測定することによって、この反応においてもCP対称性が大きく破れている証拠を世界ではじめて示したものである。 $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ は、CP非対称の出現が期待される崩壊モードの一つであるが、分岐比が 10^{-6} と $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ と比べて2桁小さく、かつグルーオンを含むプロセスからの寄与もあり、これまでCP非対称かどうか決定することができなかった。中平氏は、実験における系統誤差の綿密な評価、モンテカルロ法を取り入れた統計精度の検討などにおいて、徹底的かつ緻密な解析を行ない、高い評価を受けた。

2.8 山口英斉博士（早野研究室）東京大学総長賞

自然界において陽子と反陽子は同じ質量と正反対な電荷を持つと考えられるが、それがどこまで正確に成り立つかという問題について、山口英斉博士は欧州合同素粒子原子核研究機構（CERN）で反陽子ヘリウム原子（反陽子・電子・ヘリウム原子核の三体からなる原子）を生成・測定する装置の建設に貢献し、その装置により、反陽子ヘリウム原子の持つエネルギーをレーザー分光法で精密に測定した。測定結果と理論との比較により、1億分の1という、従来の測定精度を約2桁も改善し、なおかつ現時点で最も高い精度で、陽子と反陽子の質量に差が見られないことを実験的に検証した。さらに、その成果は Phys. Rev. Lett. 91, 123401 (2003) に掲載された。

2.9 藤原真琴博士（早野研究室）原子核談話会新人賞

藤原真琴博士は、CERN の ATHENA 実験の中心メンバーとして、電磁トラップ中で反陽子と陽電子を混合する方法により、世界ではじめて反水素原子の大量生成に成功した。特に、生成された反水素原子の消滅事象の空間分布を解析し、電磁トラップの中心で作られた反水素が、トラップの壁まで到達して消滅していることを明確に示したことは、反水素生成の決定的証拠として評価が高い (Nature 419, 456–459 (2002), Phys. Rev. Lett. 92, 065005 (2004))。

2.10 関口仁子博士（酒井（英）研）：第20回井上研究奨励賞

関口仁子博士の博士論文 "Search for Three Nucleon Force Effects via d - p Elastic Scattering" 「重陽子-陽子弾性散乱による三核子力効果の検証」は、中間エネルギーのスピンの偏極重陽子ビームと陽子の弾性散乱を従来に無い高い精度で測定した結果を報告したものである。その結果を精密な Faddeev 理論計算と比較することで、明快に三核子力の効果を見出した。さらに測定の難しいスピン依存観測の測定にも成功し、これが種々の三核子力モデルの区別に有効であることも示唆した。関口博士は、この一連の研究により、原子核における三核子力の確立と解明に大きな貢献をなし、その業績が高く評価された。

3 人事異動

[物理教室に來られた方々]

島野 亮	助教授	2004年3月1日	配置換(工学部)
田上 勝規	助手	2003年5月1日	採用
矢向 謙太郎	助手	2003年6月1日	採用
マーカム ダミアン	助手	2004年2月16日	採用
田中 春美	第2事務分室	2003年4月1日	配置換(医学付属病院)
荒木 克也	物理事務室	2003年4月1日	配置換(教養学部)
熊谷 志おり	物理図書室	2003年4月1日	採用
高野 由美子	第3事務分室	2003年6月16日	採用
小幡 寿美	第1事務分室	2003年6月18日	採用
安藤 千恵子	第1事務分室	2003年7月1日	採用
岩井 桂	第1事務分室	2003年7月1日	採用
原 尚子	物理事務室	2003年9月16日	採用
富岡 暢子	物理図書室	2003年12月1日	採用
山田 洋美	物理事務室	2004年1月1日	採用

[物理教室から移られた方々]

塚田 捷	教授	2004年3月31日	定年退職
藤川 和男	教授	2004年3月31日	定年退職
民井 淳	助手	2003年5月31日	転出(大阪大学)
樽茶 清悟	教授	2004年4月1日	配置換(工学系研究科)
大野 圭司	助手	2004年4月1日	配置換(工学系研究科)
平野 桂子	第2事務分室	2003年4月30日	辞職
田村 俱子	物理事務室	2004年3月31日	定年退職
岡村 由美子	物理事務室	2003年6月15日	辞職(学生部)
石山 伯子	第3事務分室	2003年6月30日	辞職
山田 はるひ	物理図書室	2003年11月9日	辞職
和島 修子	第3事務分室	2004年1月14日	辞職
山田 洋美	物理事務室	2004年3月25日	辞職
久保 忠明	物理事務室	2004年4月1日	出向(宇宙航空研究開発機構)
並木 葉介	物理事務室	2004年4月1日	配置換(農学生命科学研究科)

4 役務分担

役務	担当教官	技官・事務官・事務補佐員
専攻長・学科長	酒井（英）	久保、並木、佐々木
幹事	江口、牧島	久保、並木、佐々木
専攻主任	大塚	佐々木、河島、小原
理系委員（専攻副主任）	坪野	
常置委員	蓑輪、初田	
教務係	蓑和（理学部教務委員）	佐々木、河島、小原
	蓑輪、山本、小形、松尾（大学院）	
学生実験	相原、能瀬、福山	櫻村
就職係	長谷川、（大学院他部局：杉野）	横山
奨学金	柳田、相原（大学院）	井上
会計係	相原、内田	久保、並木、荒木
号館関係	1号館：砂糖、山本、4号館長：樽茶 旧1号館運営委員：坪野	久保
部屋割	櫻井	久保
技術部門（統括）	坪野	大塚（茂）
試作室	坪野	
研究材料・回路	酒井（広）	
低温	岡本	
電顕	長谷川	
計算機・ネットワーク	相原	加倉井
図書係	桑島（理図書委員）、青木（副）、長谷川、松尾	森田、山田、熊谷
複写係	高瀬	並木
談話会	藤川、初田、佐野、青木、小林、岡本	江本
年次報告	岡本	横山
記録係	常行、酒井（広）、（村尾）	
物品供用官	早野	久保
環境安全	内田	
放射線管理	櫻井	
事務分室	第1：早野、第2：須藤、第3：樽茶	久保
理交会	村尾	久保
教職員親睦会	早野	
建物	山本、樽茶	久保
進学指導担当	駒宮	
ホームページ	須藤、初田、蓑輪 岡本、酒井（広）、駒宮	並木

5 教室談話会

< 2003 年 >

- 4月11日(金) 物理学教室・仁科記念財団共催講演会
M. J. G. Veltman 氏
Very Elementary Particle Physics
- 4月25日(金) 相原博昭氏
BファクトリーにおけるCP非保存の発見
- 5月9日(金) 内田慎一氏
高温超伝導研究の現状と展望
- 5月23日(金) 甘利俊一氏(理化学研究所脳科学総合研究センター)
「神経多様体の情報幾何」
- 6月13日(金) Rashid Sunyaev 氏(マックスプランク天体物理学研究所)
Disk Accretion onto Neutron Stars : The Boundary Layer and Ways to Distinguish
Black Holes from Neutron Stars
- 6月27日(金) 柳田敏雄氏(大阪大学大学院医学系研究科)
1分子ナノバイオサイエンス:熱ゆらぎを利用する生物機械
- 7月4日(金) 佐々木真人氏(東大宇宙線研究所)
超高エネルギー宇宙観測の現状と展望
- 7月18日(金) 蔵本由紀氏(京都大学大学院理学研究科)
非線形振動場における協力現象
- 10月17日(金) 倉本義夫氏(東北大学大学院理学研究科)
「固体内電子の多重極モーメントと隠れた秩序」
- 10月24日(金) Gustav Gerber 氏(University of Wuerzburg)
Adaptive Quantum Control of Gas-Phase and Liquid-Phase Femtochemistry」
- 11月28日(金) 物理学教室・仁科記念財団共催講演会
鈴木厚人氏(東北大学大学院理学研究科)
「素粒子、地球、太陽の奥底をニュートリノで駆けめぐる」
- 12月12日(金) 中野貴志氏(大阪大学核物理研究センター)
ペンタクォーク粒子の発見
- 12月19日(金) 中山恒義氏(北海道大学大学院工学研究科)
凝縮系物理学とフラクタル

12月22日(金) P. Steinhardt 氏 (プリンストン大学)
The Endless Universe

< 2004年 >

2月6日(金) 塚田捷氏 (最終講義)
「表面・界面・ナノ構造と計算物理」
藤川和男氏 最終講義
「対称性の原理と量子論の原理」