

## 序

平成 11 年度の東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・理学部物理学の年次報告をお届け致します。

本年度は石原教授、釜江教授、神部教授の三人の教授が定年退官されました。石原教授、釜江教授、神部教授はそれぞれ原子核実験、高エネルギー実験、流体物理学の各分野ですぐれた業績をあげられ、世界的にも指導的な立場にあります。物理学教室においてはご専門の研究や教育の他に、教室の運営に関しても多大な貢献をされてこられました。3 人の先生方に深く感謝するとともに、今後のますますの発展を祈念したいと存じます。一方、この年度は素粒子物理学国際センターから駒宮幸男教授が、総合文化研究科から小形正男助教授が、電子技術総合研究所から酒井広文助教授が着任されました。駒宮教授のご専門は素粒子物理学実験であります。また小形助教授のご専門は電子論を中心とする物性の基礎理論であり、酒井助教授の御専門は量子光学と原子分子物理学の実験です。若い優秀なスタッフが加わることにより、物理学教室における研究教育のますますの発展が期待されています。

本年度、江橋節郎名誉教授が筋肉収縮制御機構に関する業績に対して、第十五回国際生物学賞を受賞されました。また堀田凱樹名誉教授は、生物物理学における優れた業績に対して、平成 11 年度の紫綬褒章を受賞されました。また塚田捷教授は走査プローブ顕微鏡の基礎に関する業績によって表面科学会学会賞を、大野圭司助手は井上研究奨励賞を、藤貴夫助手 日本光学会奨励賞をそれぞれ受賞されました。

理化学研究所との協力講座が物理学専攻に開設されることが決った（平成 12 年 4 月からスタートしました。）ことを除いて、本年度は組織上の大きな変化はありません。しかし、ごく最近、国立大学の独立法人化への方針決定が文部省から出されたこともあり、法人化を巡るさまざまな動きが慌ただしさを加えております。大学として、専攻・学科として、どのようなシステムが理想的であり、一方、独立法人化の枠組みの中でどこまでが許容されるのか？比較的短期間で制度の検討がすすみ、これをもとに大きな動きが始まることとなるでしょう。物理学専攻・物理学科としては、基礎研究の領域でこれまでの自由で高度な研究教育活動を可能としてきた環境を守りぬき、さらに一層の改良がなされるように努力を傾けねばならないと思っています。

研究面ではこの年次報告の中で記述されていますように、本年度も極めて活発な研究が進められました。このような優れた先端的な研究に参加することは、大学院学生にとって物理学の専門的能力を身につける最良の教育機会であることは言うまでもありません。一方、物理学科では学部学生の授業にたいしても、全教官は大きな努力を傾けて取り組んでいます。しかし、前期課程教育、あるいはそれ以前の初等中等教育の制度改革などいろいろな教育的社会的背景の変化によって、物理学科進学生の学力分布が以前に比べてばらつきが多くなったように感ぜられます。これからはこのような事態への対応も、きめこまかく配慮する必要が生じてきているように思います。平成 12 年度の新学期からは、授業時間を現在の 2 時間から 90 分に短縮し、授業のコマ数を増加させることを実行に移します。90 分授業はほとんど全学の標準になっていますし、授業のコマ数を増やすことで選択科目に多様性をもたせ、個々の学生に応じた柔軟なカリキュラムを組むことも可能となるでしょう。また物理学専攻や物理学科の情報をホームページによって、学生にきめこまかく伝えるような改良も行いつつあります。

本物理学専攻の大きな使命は、物理学のそれぞれの分野で卓越した研究を推進し、物理学を中心とする基礎科学の発展に大きく寄与することであるのは言うまでもありません。専門分野において活発な研究を推進し価値ある成果を達成することは、人類の知的財産に貢献する意味で重要です。しかし一方では、こうした研究成果やその意義を一般社会へ情報発信し国民の理解を得ておくことも、これまで以上に強く求められるようになってきていると思います。物理学的な素養をもった人材の育成は、高度な科学技術社会の発展をささえる上で重要です。そのような優秀な人材は、第 1 線の研究を成し遂げた体験の中から得られることも、指摘すべきでありましょう。上に述べた法人化問題の社会的背景とも関連しますが、多額の国費を要する基礎科学の推進がなぜ必要であるのか、一般の国民にも十分な説得力をもって語られる努力がより必要になっ

---

てくるのだと思います。

20世紀は物理学の飛躍的な発展期であり、その黄金時代であったことは否定し得ないことでありましょう。それでは21世紀における物理学は、どのような方向を模索すべきなのでしょう？物理学を基礎として生み出された様々な科学技術は、現代社会の形成に大きな影響をもたらし、これを人類がかって経験したことのないすさまじい速度で変えつつあります。その事例は枚挙にいとまがありませんが、情報革命といわれる社会現象は中でもこれが端的に現れているものの一つです。一方では、21世紀以降に人類が直面するであろう危機は、環境問題、エネルギー問題、人口問題をはじめあまりにも大きいといわなければなりません。21世紀に向けてこうした社会的背景のもとに進むべき物理学の新しい課題を、改めて考えてみる時期なのかもしれません。物理学教室としては専門分野の狭い枠組に埋没するのではなく、分野間の交流を活発にし分野を横断する新しい研究領域の開拓を含め、グローバルな視野と社会との接点の広がりにも努力して行きたいと思っています。

この年次報告は高瀬教授の大変なご努力によって、編集作成されたものです。この場を借りて同教授のご尽力に深く感謝したいと存じます。

2000年5月16日

物理学専攻長  
塚田捷

# 目次

<b>I</b>	<b>研究室別 1999 年度 研究活動報告</b>	<b>ix</b>
<b>1</b>	<b>原子核・素粒子理論</b>	<b>1</b>
1.1	原子核理論研究室 (大塚)	1
1.1.1	原子核構造	1
1.1.2	中間エネルギー核物理	3
1.2	素粒子論研究室 (藤川・江口・柳田・松尾)	6
1.2.1	超弦理論	6
1.2.2	量子重力	7
1.2.3	高エネルギー現象論	7
1.2.4	場の理論	8
<b>2</b>	<b>原子核・素粒子実験</b>	<b>13</b>
2.1	原子核実験研究室 (石原、酒井、早野研究室)	13
2.1.1	分解反応による中性子ハロー核の研究 (石原研)	13
2.1.2	中性子過剰核の殻構造研究 (石原研)	14
2.1.3	中間エネルギー領域の入射核破碎反応 (石原研)	15
2.1.4	中性子過剰核の融合反応 (石原研)	16
2.1.5	天体核反応 - ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ 反応断面積 (石原研)	17
2.1.6	偏極中性子ビームを用いた研究 (酒井研)	18
2.1.7	偏極重陽子-陽子弾性散乱の高精度測定と三体力 (酒井研)	19
2.1.8	${}^{26}\text{Mg}({}^3\text{He}, t){}^{26}\text{Al}^*(1^+)$ 反応のスピンの反転確率測定による ${}^3\text{He}-n$ 有効相互作用の研究 (酒井研)	19
2.1.9	${}^{11}\text{Be}$ 原子核のスピンのアイソスピン励起の研究 (酒井研)	21
2.1.10	${}^{12}\text{C}(\bar{p}, \bar{n}){}^{12}\text{N}$ 反応によるスピンの反転双極子巨大共鳴の研究 (酒井研)	21
2.1.11	高温・低磁場での偏極陽子固体標的の開発 (酒井研)	22
2.1.12	CERN の反陽子減速器 (AD) における反陽子ヘリウム原子の分光 (早野研)	22
2.1.13	反陽子ヘリウム原子のカスケード過程の解明 (早野研)	23
2.1.14	CERN-AD における反水素生成実験 -ATHENA-(早野研)	23
2.1.15	反陽子ヘリウム原子の超微細構造の理論計算 (早野研)	23
2.1.16	ハイパー核の $\gamma$ 線分光 (早野研)	24
2.1.17	有限密度下での中間子の質量変化の研究 (早野研)	24
2.1.18	超低速反陽子ビーム源としてのペニングトラップの開発 (早野研)	24
2.1.19	PHENIX:RHIC における高エネルギー重イオン実験 (早野研)	25
2.2	釜江研究室	32
2.2.1	硬 X 線検出器 (HXD) の開発	32
2.2.2	X 線観測衛星による高エネルギー天体の研究	32
2.2.3	「あすか」衛星による North Polar Spur の観測	32
2.2.4	次期天体ガンマ線観測衛星 (GLAST) の準備研究	33
2.2.5	将来に向けた検出器の開発	33
2.2.6	計算機による音声認識システムの開発	34
2.3	折戸研究室	36
2.3.1	高エネルギー電子・陽電子衝突装置 LEP による実験	36
2.3.2	線型電子・陽電子衝突装置 JLC (Japan Linear Collider) 計画	36
2.3.3	気球搭載型超伝導スペクトロメータによる宇宙粒子線の観測	36
2.3.4	$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索実験の検討	39

2.4	駒宮 研究室	43
2.4.1	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	43
2.4.2	電子・陽電子リニアコライダー JLC 計画	45
2.4.3	気球搭載超伝導スペクトロメータによる宇宙線 $\mu/e$ 粒子の観測	45
2.4.4	粒子検出器の研究開発	46
2.5	蓑輪 研究室	49
2.5.1	ボロメーターを用いた暗黒物質の直接検出実験	49
2.5.2	アクシオンヘリオスコープ実験	50
2.6	相原研究室	52
2.6.1	$B \rightarrow J/\psi$ inclusive decays の観測	52
2.6.2	$B \rightarrow J/\psi K_s$ 事象の検出	52
2.6.3	$B^\pm \rightarrow J\psi K^\pm$ 崩壊を用いた CP 非保存解析のテスト	52
2.6.4	$B \rightarrow J/\psi K^*$ 事象の検出	53
2.6.5	チャーム中間子と B 中間子の寿命の測定	53
2.6.6	B 中間子の稀な崩壊モードの探索	53
2.6.7	Belle シリコンバーテックス検出器のアラインメントと位置測定精度	53
2.6.8	集積回路の耐放射線化	53
2.6.9	シリコンストリップセンサーの改良	54
2.6.10	Belle 次世代 SVD の設計	54
<b>3</b>	<b>物性理論</b>	<b>56</b>
3.1	和達研究室	56
3.1.1	ボース・アインシュタイン凝縮	56
3.1.2	自由落下する流体フィラメントの運動	56
3.1.3	非平衡統計力学	56
3.1.4	非線形波動論	57
3.1.5	ソリトンセルオートマトン	57
3.1.6	1 次元強相関電子系	57
3.1.7	量子多体系	57
3.1.8	スピン系	58
3.2	塚田研究室	62
3.2.1	固体表面および吸着系の電子状態	62
3.2.2	走査プローブ顕微鏡と電子放射の理論	62
3.2.3	計算物性物理	63
3.2.4	ナノ構造の物理	64
3.3	青木研究室	68
3.3.1	超伝導	68
3.3.2	強磁性	69
3.3.3	分数量子ホール効果	69
3.3.4	その他	70
3.4	小形研究室	74
3.4.1	高温超伝導体のモデルハミルトニアンと、その基底状態	74
3.4.2	d 波超伝導体における磁束周辺、表面近傍、不純物近傍の電子状態	74
3.4.3	朝永・ラッティンジャー液体理論	75
3.4.4	スピン・ギャップ系	75
3.4.5	p 波超伝導体	75
3.4.6	低次元有機物質に関する理論	75
<b>4</b>	<b>物性実験</b>	<b>78</b>
4.1	壽榮松研究室	78
4.1.1	ナノチューブの電子構造および電気的性質の研究	78
4.1.2	金属内包フラーレン結晶における X 線照射誘起による構造相転移	79
4.1.3	フラーレン希土類化合物における巨大磁気抵抗	79
4.2	長澤研究室	82
4.2.1	半導体結晶の励起子系の関わる線形、非線形光学現象の分光学的研究	82

4.2.2	半導体の電気伝導と光との相互作用に関する研究	83
4.3	樽茶研究室	86
4.3.1	人工原子の電子相関の研究	86
4.3.2	人工二原子分子の電子状態の研究	87
4.3.3	一次元電子系の電子間相互作用の研究	87
4.3.4	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	88
4.4	藤森研究室	91
4.4.1	超伝導、金属-絶縁体転移	91
4.4.2	遍歴磁性体	92
4.4.3	低次元物質	93
4.4.4	近藤格子、重い電子系、高熱電能物質	93
4.5	長谷川研究室	98
4.5.1	表面電子輸送	98
4.5.2	表面超構造と相転移	99
4.5.3	表面電子励起	99
4.5.4	原子層・分子層の成長	100
4.5.5	表面質量輸送	100
4.6	福山研究室	104
4.6.1	2次元および3次元の固体 <sup>3</sup> Heの核磁性と原子のトンネル運動の研究	104
4.6.2	超低温走査プローブ顕微鏡の開発	106
4.6.3	異方的超伝導/超流動体の研究	107
4.6.4	相転移の物理	107
<b>5</b>	<b>一般物理理論</b>	<b>110</b>
5.1	神部研究室	110
5.1.1	乱流の研究	110
5.1.2	渦輪と衝撃波の相互作用	110
5.1.3	数理流体力学	110
5.1.4	微分幾何学的手法による力学系の安定性解析	111
5.1.5	柱状物体の抵抗と渦放出	111
5.1.6	渦と波の相互作用	111
5.2	宇宙理論研究室(佐藤・須藤)	113
5.2.1	初期宇宙論・相対論	113
5.2.2	観測的宇宙論	115
5.2.3	超新星・高密度天体	118
5.2.4	その他	119
<b>6</b>	<b>一般物理実験</b>	<b>123</b>
6.1	小林研究室	123
6.1.1	超短パルスレーザーの開発	123
6.1.2	サブ5fs実時間分光	123
6.1.3	新しい分光装置の開発	124
6.1.4	量子光学・量子情報	126
6.1.5	量子光生物学	126
6.2	牧島研究室	131
6.2.1	「あすか」GIS装置の運用と較正	131
6.2.2	「あすか」による宇宙X線の観測	131
6.2.3	硬X線検出器(HXD)の開発	132
6.2.4	ASTRO-E衛星の打ち上げ失敗	133
6.2.5	新しい線検出器の開発	134
6.3	高瀬研究室	137
6.3.1	TST-2装置の建設と実験	137
6.3.2	JFT-2Mにおける共同研究	138
6.3.3	LHD装置における共同研究	139
6.3.4	CHS装置における共同研究	139

6.3.5	マイクロ波計測の開発	140
6.3.6	NSTX 装置における共同研究	140
6.4	坪野研究室	144
6.4.1	レーザー干渉計を用いた重力波の検出	144
6.4.2	宇宙空間重力波検出実験	145
6.4.3	相対論の基礎実験	146
6.4.4	熱雑音の研究	146
6.4.5	精密計測の研究	147
6.5	山本研究室	151
6.5.1	観測装置の開発・改善	151
6.5.2	星間分子雲の観測的研究	152
6.5.3	実験室分子分光	155
6.6	酒井広文 研究室	157
6.6.1	配向した分子を用いた高効率多価分子イオンの生成	157
6.6.2	2 次元イオンイメージング装置の開発	158
6.6.3	中性分子の配列制御に関する数値シミュレーション	158
<b>7</b>	<b>生物物理</b>	<b>160</b>
7.1	若林研究室	160
7.1.1	ナノ構造解析のための電子顕微鏡法と画像解析法の開発	160
7.1.2	ホログラフィック像再構成法とクライオ電子顕微鏡法を用いた分子モーター構造研究	160
7.1.3	タンパク質工学及び生化学的手法を用いたモータータンパク質の研究	161
7.1.4	原子レベルでの構造研究 (X 線結晶解析・電子顕微鏡法)	163
7.1.5	電子顕微鏡法を使ったタンパク質の構造研究	163
7.1.6	計算機を使ったモータータンパク質の構造機能連関の研究	164
7.2	桑島研究室	166
7.2.1	タンパク質工学を用いたタンパク質のフォールディング研究	166
7.2.2	細胞内でのタンパク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	167
7.2.3	新しい高速反応測定法を利用したタンパク質のフォールディング研究	168
7.3	能瀬研究室	172
7.3.1	神経配線形成の分子機構	172
7.3.2	シナプス形成の分子機構	174
<b>8</b>	<b>技術部門</b>	<b>176</b>
8.1	技術部門	176
8.1.1	実験装置試作室	176

## II Summary of group activities in 1999 177

1	Theoretical Nuclear Physics Group	179
2	Theoretical Particle and High Energy Physics Group	180
3	Ishihara Group	183
4	Sakai (Hideyuki) Group	184
5	Hayano Group	185
6	Kamae Group	186
7	Orito group	187
8	Komamiya group	188
9	Minowa Group	189
10	Aihara Group	190
11	Wadati Group	191
12	Tsukada Group	192
13	Aoki Group	193
14	Ogata Group	194
15	Suematsu Group	195
16	Nagasawa Group	196

17	Tarucha Group . . . . .	197
18	Fujimori Group . . . . .	198
19	Hasegawa Group . . . . .	199
20	Fukuyama Group . . . . .	200
21	Kambe Group . . . . .	201
22	Theoretical Astrophysics Group . . . . .	202
23	Kobayashi Group . . . . .	204
24	Makishima Group . . . . .	205
25	Takase Group . . . . .	206
26	Tsubono Group . . . . .	207
27	Yamamoto Group . . . . .	208
28	Sakai (Hirofumi) Group . . . . .	209
29	Wakabayashi Group . . . . .	210
30	Kuwajima Group . . . . .	211
31	Nose Group . . . . .	212

### III 1998 年度 物理学教室全般に関する報告 213

<b>1</b>	<b>学部講義概要</b>	<b>215</b>
1.1	2 年生 冬学期 . . . . .	215
1.1.1	物理数学 I : 松尾 泰 . . . . .	215
1.1.2	物理実験学 : 坪野 公夫 . . . . .	215
1.1.3	解析力学・量子論 : 塚田 捷 . . . . .	215
1.1.4	電磁気学 : 相原 博昭 . . . . .	216
1.2	3 年生 夏学期 . . . . .	217
1.2.1	統計力学 I : 和達 三樹 . . . . .	217
1.2.2	物理数学 II : 大塚 孝治 . . . . .	217
1.2.3	量子力学 I : 江口 徹 . . . . .	217
1.2.4	現代実験物理学 I : 長谷川修司、福山寛、桑島邦博 . . . . .	218
1.2.5	電磁波物理学 : 山本 智 . . . . .	218
1.2.6	流体力学 : 神部 勉 . . . . .	219
1.3	3 年生 冬学期 . . . . .	220
1.3.1	現代実験物理学 II (前半) : 牧島 一夫 . . . . .	220
1.3.2	現代実験物理学 II (後半) : 駒宮 幸男 . . . . .	220
1.3.3	量子力学 II : 藤川 和男 . . . . .	220
1.3.4	生物物理学 : 若林健之、桑島邦博、能瀬聡直 . . . . .	220
1.3.5	光学 : 長澤 信方 . . . . .	221
1.3.6	統計力学 II : 小形正男 . . . . .	221
1.4	4 年生 夏学期 . . . . .	222
1.4.1	固体物理 I : 青木 秀夫 . . . . .	222
1.4.2	原子核物理学 : 酒井 英行 . . . . .	222
1.4.3	一般相対論 : 須藤 靖 . . . . .	222
1.4.4	プラズマ物理学 : 高瀬 雄一 . . . . .	223
1.4.5	場の量子論 : 柳田 勉 . . . . .	223
1.4.6	量子光学 : 小林 孝嘉 . . . . .	223
1.5	4 年生 冬学期 . . . . .	225
1.5.1	宇宙物理学 : 佐藤 勝彦 . . . . .	225
1.5.2	素粒子物理学 : 蓑輪 眞 . . . . .	225
1.5.3	固体物理学 II : 樽茶 清悟、壽榮松 宏仁 . . . . .	225
1.5.4	物性物理学特論 : 塚田捷、長谷川修司、小森文夫 . . . . .	225
<b>2</b>	<b>各賞受賞者紹介</b>	<b>227</b>
2.1	江橋節郎名誉教授 : 国際生物学賞受賞 . . . . .	227
2.2	堀田凱樹名誉教授 : 紫綬褒章 . . . . .	227

---

2.3	塚田捷教授：表面科学会学会賞 . . . . .	227
2.4	大野圭司助手（樽茶研究室）：井上研究奨励賞 . . . . .	227
2.5	藤貴夫助手（小林研究室）：日本光学会奨励賞 . . . . .	227
<b>3</b>	<b>人事異動</b>	<b>228</b>
<b>4</b>	<b>役務分担</b>	<b>229</b>
<b>5</b>	<b>教室談話会</b>	<b>230</b>

I

**研究室別 1999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）

### 原子核理論研究室の概要

原子核研究室では、原子核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「中間エネルギー」と呼んでいる分野で、核子以外の自由度を原子核構造に取り入れたり、素粒子物理との境界領域に多体問題の要素を盛り込んだりする研究を指す。「核構造」は主に大塚孝治教授・水崎助手及び大学院学生らにより行なわれた。昨年度まで「中間エネルギー」を担当してきた矢崎統一教授は定年退官したが、今年度も研究活動は続けられた。以下に先ずそれぞれの分野での研究内容の概要を述べ、後で各々のテーマについて個別に説明する。

### 原子核構造

原子核構造と言われる分野には色々な問題が含まれるが、我々の研究室では

- 1) 確率的な手法による多体問題の解法
- 2) 不安定核の構造と反応
- 3) 多体問題の代数的方法による解明

の3つのテーマを主に追求している。1番目のものは我々が提唱・発展させてきたモンテカルロ殻模型を中心に展開しており、下に述べられているように最近大型の並列計算機も得て大いに進展しつつある。2番目のものは、原子核物理学の中で近年最も急速に進歩している分野である。これまでに不安定核の理論的研究には様々に取り組んできたが、最近では複素ガウス基底の方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、新しい方法論を開発して進めている。また、1番目の方法を応用しての研究も行っている。3番目については、最近実験で見つかるようになってきた  $2^+$  mixed symmetry 状態との関連で様々な進展があった。

### 中間エネルギー核物理

原子核物理の中で中間エネルギー核物理とよばれる分野には、通常の原子核構造・低エネルギー原子核

反応に含まれない原子核に関する問題からハドロンの内部構造や非摂動領域の量子色力学まで、非常に広い範囲が含まれている。この分野は原子核の構成要素である核子自身の構造や核子間に働く核力の起源など、原子核物理の基礎となる部分を探求し、強い相互作用の理論を確立するとともに、原子核をより深いレベルで理解することを目的としている。

### 1.1.1 原子核構造

#### 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単純化された模型による理解と殻模型を基礎とした方法に分かれる。後者の立場では、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第一原理的な記述が可能である。従って、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あまりにも模型的な仮定が入り過ぎており、直接対角化による解法は計算機による制約を強く受けている。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て適用範囲の狭さが大きな難点である。我々のグループが数年来提唱・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。昨年度から理化学研究所との共同研究により、独自の大規模並列計算機の運転を行っている。このように、量子モンテカルロ対角化法によるモンテカルロ殻模型による核構造の解明を今後も系統的に進める。具体的な成果は下に示されている通りであるが、質量数が30前後での不安定原子核の構造とそこでの魔法数の消失や変貌、pf殻原子核での球形の状態と大変形及び「超変形」した状態の共存、さらに同じく pf殻原子核での広範な領域に渡る有効相互作用の決定、質量数が130前後の原子核に於ける非軸対称変形の微視的記述、などの研究が行なわれている。

[1, 6, 9, 11, 14, 20, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36]

#### 代数的方法による多体問題

集団運動状態を代数的方法で研究した。陽子と中性子が必ずしもコヒーレントに運動しない mixed-

symmetry state に関して、それらの間での電磁的遷移が初めて観測されて、それについて議論した。また、 $O(6)$  群の扱いについても研究した。[2, 3, 22]

### N = Z 原子核の構造

陽子数 (Z) と中性子数 (N) が等しい  $N=Z$  原子核はアイソスピンがゼロになれるという構造に起因して様々な特徴がある。それをケルン大学の実験グループと共同して調べた。 $N=Z=23$  の場合の  $V$  原子核の研究成果は論文になり、状態のスピン同定に関して既存の実験データの間違いを先ず理論計算で見つけ、それを実験で確認するという珍しいことをしたり、アイソスピンが  $T=0$  の状態と  $T=1$  の状態のエネルギーのずれを見出した。さらに  $N=Z=25$  の場合についても論文をまとめて投稿中である。この場合は 1000 万次元を越す行列対角化を含む超大型の数値計算になっている。[4, 5]

### $^{56}\text{Ni}$ の large deformed band

$A \sim 60$  領域にみられる超変形バンドのひとつで最近見つかった  $^{56}\text{Ni}$  の large deformed band を殻模型の立場から研究した。pf 模型空間でうまく再現できることがわかった。[14, 37]

### 偶数分母の分数量子ホール効果

偶数分母をもつ分数量子ホール系、特に  $\nu = 1/2$  を研究し、ゼロ磁場のフリー系との対応を調べた。本研究は、青木研との共同研究である。[5]

### pf 殻原子核に対する殻模型有効相互作用の構築

pf 殻原子核の性質を十分に広い質量数領域で正しく記述する殻模型有効相互作用の現象論的な構築を試みた。具体的には 91 核種、635 のエネルギー準位の実験データに殻模型計算値をフィットすることにより、4 つの 1 粒子エネルギーと 195 個の 2 体行列要素を決定した。殻模型計算は QMCD 法の小次元近似に経験的補正を加えて行い、フィット計算は線形結合法により不定なパラメータを除去して実行した。得られた GF40A 相互作用は  $N/Z=28$  閉殻近傍のシステムティクスや  $N=Z$  奇奇核のアイソスピン構造を正しく記述した。[40]

### 時間依存ハートリーフォック法による中性子過剰核の反応

昨年度に引き続き、3次元の時間依存ハートリーフォック法 (TDHF) により、中性子スキンをもつ中性子過剰不安定核と安定核との反応を調べた。 $^{28}\text{O}$  の反応で

は、中性子スキンは融合反応よりもむしろ核子移行反応に大きな影響を与えるものと考えられる。そこで、より重い中性子過剰核  $^{60}\text{Ca}$  の反応について調べたところ、反応に関わる安定核により結果に違いが見られた。例えば、 $^{60}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  反応では、 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$  反応に比べて核子移行の断面積が非常に大きくなるのに対し、融合断面積に大きな差は見られない。これは  $^{16,28}\text{O}$  の場合と同様である。一方、 $^{60}\text{Ca}+^{16}\text{O}$  反応では、核子移行の断面積の増大よりも、むしろ融合断面積の増大がより顕著であった。これは、核子移行反応ではエネルギー的に適当なチャネルが存在しないため、中性子スキンの存在が核子移行反応の増大に直接繋がらないものと考えられる。また、 $^{60}\text{Ca}$  のように比較的重い中性子スキン核では、中性子スキンとコアとの束縛が  $^{28}\text{O}$  のように軽い核と比較して強いため、融合断面積の増大に繋がるとも考えられる。

### モンテカルロ殻模型による $N=20$ 領域不安定核の構造

$N = 20$  領域の不安定核の構造をモンテカルロ殻模型に基づいて研究した。

この領域の不安定核では  $N = 20$  の魔法数が消滅していることが知られており、理論、実験の双方からの研究が現在盛んに行われている。偶々核のイラスト状態の研究は完成し、今年度は主に非イラスト状態や奇核の構造の研究を行った。Mg の偶々核では広い範囲で基底状態と大きく変形の異なる  $0_2^+$  状態が低励起状態として見られ、変形共存が起きることを指摘した。また  $^{31}\text{Na}$  のイラスト状態の計算を行い、その結果、基底状態のスピンと磁気能率を再現し、さらに負パリティ状態を含むエネルギー準位や電磁遷移行列要素を予言した。[6, 21, 22, 38, 41, 42, 43, 44, 55]

### 殻模型による中重核の非軸対称状態の研究

従来、中重核領域における殻模型による微視的な核構造の研究は困難であったが、モンテカルロ的手法により可能となっている。ここで、固有状態を一般化されたクーパー対基底の線型結合によって記述するモンテカルロ殻模型法を開発し  $^{132}\text{Xe}$  を中心とする非軸対称状態をもつ原子核を研究した。[39, 45, 46, 47]

### 複数のガウス一粒子基底による軽い核の構造

一粒子の波動関数をガウシアンによって表した基底を複数用いて波動関数を表現する方法で軽い核の構造を研究した。特に Li の核子数 6 ~ 9 のアイソトープの基底状態について計算を行ない、 $^8\text{Li}$  を除く核については電気四重極モーメント・磁気双極子モーメントをよく再現することが出来た。[19, 50, 51, 52]

変換された調和振動子関数によるゆるく束縛された状態

殻模型での一粒子波動関数として、スケール変換した調和振動子型波動関数を用いた計算を行った。このスケール変換により、波動関数の形を核子間の相互作用を取り入れながら変えることができ、また、ゆるく束縛された系では波動関数の半径の大きなところでの振舞いもよく再現できる。sd 殻での計算で、鏡映核での波動関数の形や配位の違いを調べた。[23, 54]

### 一般 2 体力による粒子数保存 HFB 計算

平均場近似の一つである HFB 計算では、粒子数が良い量子数ではなくなってしまう、問題にしている粒子数状態へ射影する必要がある。ところが、この射影計算は複雑なので簡単な相互作用でしか実現できなかった。そこで我々は 2 体力を 1 体力の 2 乗の形に変形することにより、一般の 2 体力を用いた粒子数保存 HFB 計算が可能であることを示唆する結果を得た。[24]

### 1.1.2 中間エネルギー核物理

光円錐上での南部 Jona-Lasinio 模型とパイオンの構造関数

量子色力学の有効模型である南部 Jona-Lasinio 模型を光円錐上で定式化した。光円錐上での正則化の方法を定め、物理量に関しては通常の同時刻の量子化の理論と対等であることを形式的に証明した。パイオンの構造関数を計算することによって、横運動量の cut-off 形式が有力であることを指摘した。[7]

有限密度におけるクォーク・ダイクォーク模型

南部 Jona-Lasinio (NJL) 模型における Faddeev の方法の枠組で核子一個を作り、それに基づき多核子系の状態方程式を self consistent な平均場近似を利用しながら作り上げた。但し、平均場は、複合粒子であるシグマ、オメガ中間子によって作られたものとして記述した。通常の NJL 模型に八体フェルミ相互作用を加え、得られた核物質の状態の安定性について調べた。[8]

NJL 模型における核子の構造関数および静的性質に対する axial vector diquark の役割

NJL 模型の枠組みで、相対論的 Faddeev 方程式を使って、核子の構造関数および静的性質について計算した。ここでは、scalar diquark ( $0^+, T = 0$ ) だ

けではなく、axial vector diquark ( $1^+, T = 1$ ) の自由度も取り入れている。核子中の valence quark 分布の flavor 依存性が axial vector diquark によって弱められることがわかった。また、核子の静的性質として、核子のスピンに対するクォークのスピン寄与、axial coupling constant、磁気能率に対する axial vector diquark による影響を定量的に評価した。[8, 15, 16, 17, 18, 27, 48, 49]

DGL 模型を用いた SD 方程式、および BS 方程式の数値的解法

DGL 模型に対する SD 方程式、および BS 方程式を中間子チャンネルについて数値的に解いて、その波動関数から  $\pi$  中間子の質量と崩壊定数を求めた。解く際に用いたカットオフを十分大きく取ると質量、崩壊定数ともある値に収束することが示せた。また BS 方程式を解く際の波動関数の truncation の仕方に質量はほとんど依存しないが崩壊定数は依存してしまうことが分かった。[53]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Honma, J. Phys. G : Monte Carlo shell-model calculations, Nucl. Part. Phys. **25**, 699-715 (1999).
- [2] A. Gelberg, F. Iachello, T. Otsuka and R.V. Jolos : Generation of Irreducible Representations in the O(6) limit of the IBM, Prog. Theor. Phys. **101**, 1261-1269 (1999).
- [3] N. Pietralla, C. Fransen, D. Belic, P. von Brentano, C. Friessner, U. Kneissel, A. Linnermann, A. Nord, H.H. Pitz, T. Otsuka, I. Schneider, V. Werner and I. Wiedenhoever : Transition Rates between Mixed Symmetry States: First Measurement in  $^{94}\text{Mo}$ , Phys. Rev. Lett. **83**, 1303 (1999).
- [4] B. Friessner, N. Pietralla, A. Schmidt, I. Schneider, Y. Utsuno, T. Otsuka, and P. von Brentano : Low spin structure of the N=Z odd-odd nucleus  $^{46}_{23}\text{V}_{23}$ , Phys. Rev. **C60**, 011304-1 - 011304-5 (1999).
- [5] Masaru Onoda, Takahiro Mizusaki, Takaharu Otsuka, and Hideo Aoki : Excitation spectrum and effective mass of the even-fraction quantum Hall liquid, Phys. Rev. Lett. **84** issue 17, 3942-3945 (1999).
- [6] Y. Utsuno, T. Otsuka, T. Mizusaki, and M. Honma : Varying shell gap and deformation in N~20 unstable nuclei studied by the Monte Carlo shell model, Phys. Rev. **C60**, 054315 (1999).
- [7] W. Bentz, T. Hama, T. Matsuki, K. Yazaki : NJL model on the light cone and pion structure function, Nucl. Phys. **A651**, 143 (1999).
- [8] H. Mineo, W. Bentz and K. Yazaki : Quark distributions in the nucleon based on a relativistic three-body approach to the Nambu- Jona-Lasinio model, Phys. Rev. **C60**, 065201, (1999).

## (会議抄録)

- [9] T. Otsuka, T. Mizusaki, Y. Utsuno and M. Honma : Monte Carlo shell model calculations for medium-mass nuclei, in Proc. of the Int. Conf. "Nuclear Structure 98", AIP Conference Proceedings, ed. C. Baktash (American Institute of Physics, 1999), 418, 41-55.
- [10] P. von Brantano, N. Pietralla, C. Fransen, C. Friessner, A. Gade, A. Gelberg, R.-D. Herzberg, U. Kneissl, H. Meise, T. Otsuka, H.H. Pitz, V. Werner and I. Wiedenhoever : Low Energy Q-Phonon Excitations in Nuclei, in Proc. of the Int. Conf. "Nuclear Structure 98", ed. C. Baktash, AIP Conference Proceedings (American Institute of Physics, 1999), 418, 449-463.
- [11] T. Otsuka, N. Shimizu, S. Haruyama, M. Honma, T. Mizusaki, A. Taketani, Y. Utsuno and Y. Watanabe : Monte Carlo Shell Model calculations for Atomic Nuclei and their Parallel Computing, in "Computational Physics and Related Topics" (Proc. of the 5th Int. Conf. on Computational Physics), ed. Y. Hiwatari, Y. Oyanagi, Y. Okabe and H. Takayama, Prog. Theor. Phys., 138, 24-27, 2000.
- [12] Yasushi Watanabe, Noritaka Shimizu, Seigo Haruyama, Michio Honma, Takahiro Mizusaki, Atsushi Taketani, Yutaka Utsuno, and Takaharu Otsuka : A workstation farm optimized for Monte Carlo Shell Model calculations : Alphleet, in "Computational Physics and Related Topics" (Proc. of the 5th Int. Conf. on Computational Physics), ed. Y. Hiwatari, Y. Oyanagi, Y. Okabe and H. Takayama, Prog. Theor. Phys., 138, 43-44, 2000.
- [13] T. Otsuka, Y. Utsuno, N. Shimizu, T. Mizusaki, M. Honma and T. Sebe : Nuclear mass and correlations in the ground state studied by the Monte Carlo Shell Model, RIKEN Review, ed. N. Tajima and S. Yamaji, (Proc. of RIKEN symposium "Models and Theories of the Nuclear Mass"), 26, 58-59 (2000).
- [14] T. Mizusaki, T. Otsuka, M. Honma and B.A. Brown : Doubly-deformed bands in doubly-magic  $^{56}\text{Ni}$  in the Proceedings of the Int. Conf. on achievement and perspectives in nuclear structure, 10-18, July, 1999, Crete, Greece. Physica Scripta. To be published.
- [15] W. Bentz, H. Mineo, N. Ishii, H. Asami and K. Yazaki : Structure of the nucleon on a relativistic 3-body approach to the NJL model. PANIC99, Jun. 1999, Uppsala, Sweden. Nucl. Phys. **A663** & **A664** (2000) 679c.
- [16] W. Bentz, H. Mineo, N. Ishii, H. Asami and K. Yazaki : Structure of the nucleon on a relativistic 3-body approach to the NJL model. Asia Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics, Aug. 1999, Noda/Kashiwa, Japan. Few Body Physics Supplement (2000), to be publ.
- [17] W. Bentz, H. Mineo and K. Yazaki : Structure functions of the nucleon based on a relativistic Faddeev approach in the NJL model. Circum-Pacific RIKEN Symposium on High Energy Spin Physics, Nov. 1999, RIKEN, Japan. RIKEN report (2000), to be publ.
- [18] H. Mineo W. Bentz and K. Yazaki : Nucleon structure functions based on the relativistic Faddeev approach in the NJL model. Few Body Problems in Physics, Mar. 2000, Taipei, Taiwan. Nucl. Phys. A (2000), to be publ.
- [19] 春山征吾、大塚孝治、水崎高浩、Kalman Varga : 複数のガウス-粒子基底による軽い不安定核の研究、素粒子論研究 基研研究会「不安定核の構造と反応」報告書 E48 ページ

## (国内雑誌)

- [20] 大塚孝治: 量子多体系を解く画期的方法、科学、69巻、945-952 ページ、岩波書店、1999年。
- [21] 宇都野穰、大塚孝治、水崎高浩、本間道雄 :  $N = 20$  領域不安定核の変形共存基研研究会「不安定核の構造と反応」報告書、素粒子論研究、印刷中。

## (学位論文)

- [22] Y. Utsuno : Structure of unstable nuclei around  $N = 20$ , 博士論文.
- [23] R. Fujimoto : Loosely bound state studied by Transformed Harmonic Oscillator basis, 修士論文.
- [24] R. Tanaka : Number-conserved HFB calculation with general two-body interaction, 修士論文.

## &lt; 学術講演 &gt;

## (国際会議)

## 一般講演

- [25] T. Otsuka, N. Shimizu, S. Haruyama, M. Honma, T. Mizusaki, A. Taketani, Y. Utsuno and Y. Watanabe : Monte Carlo Shell Model calculations for Atomic Nuclei and their Parallel Computing, 5th Int. Conf. on Computational Physics (ICCP5), Oct. 11-13, 1999, Kanazawa, Japan.
- [26] Yasushi Watanabe, Noritaka Shimizu, Seigo Haruyama, Michio Honma, Takahiro Mizusaki, Atsushi Taketani, Yutaka Utsuno, and Takaharu Otsuka : A workstation farm optimized for Monte Carlo Shell Model calculations : Alphleet, The 5th International Conference on Computational Physics (Kanazawa, 1999.9)
- [27] H. Mineo, W. Bentz and K. Yazaki : 16th International Conference on Few Body Problems in Physics (FB XVI), National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 6 March 2000.

## 招待講演

- [28] T. Otsuka : Monte Carlo shell model, GANIL colloque, May 17-21, 1999, Seignosse, France.
- [29] T. Otsuka : Monte Carlo Shell Model calculations, Int. Conf. "50 Years of the Nuclear Shell Model" June 3-5, 1999, Heidelberg, Germany.
- [30] T. Otsuka : Nuclear mass and correlations in the ground state studied by the Monte Carlo Shell Model, RIKEN symposium "Models and Theories of the Nuclear Mass", July 19-23, 1999, RIKEN, Wako, Japan.
- [31] T. Otsuka : Nuclear Shell Model, Int. Summer School on Subatomic Physics, July 25-29, 1999, Peking Univ., Beijing, China.
- [32] T. Otsuka : Monte Carlo Shell Model calculations for Atomic Nuclei, Int. Conference "Recent progress in many body theories X" Sept. 10-15, 1999, Univ. Washington, Seattle, U.S.A.
- [33] T. Otsuka : Quantum Monte Carlo Diagonalization method and its application to Nuclear Shell Model, Workshop on "Frontiers in Fermion Quantum Monte Carlo Methods" Sept. 22-25, 1999, Inst. for Nuclear Theory, Univ. Washington, Seattle, U.S.A.
- [34] T. Otsuka : Collective Excitations of Nuclei in the Monte-Carlo Shell Model, Int. Symposium "Quasi-particle and Phonon Excitations in Nuclei", Dec. 4-7, 1999, RIKEN, Japan.
- [35] T. Otsuka : Monte Carlo Shell Model, Int. Symposium "ADVANCES IN NUCLEAR PHYSICS" Dec. 8-9, 1999, Bucharest, Romania.
- [36] T. Otsuka : Tokyo-Riken shell-model project, RIKEN symposium "Shell Model 2000", March 5-8, 2000, RIKEN, Japan.
- [37] T. Mizusaki, T. Otsuka, M. Honma and B.A. Brown : Normal and superdeformed bands in  $^{56}\text{Ni}$ , RIKEN symposium "Shell Model 2000", March 5-8, 2000, RIKEN, Japan.
- [38] Y. Utsuno, T. Otsuka, T. Mizusaki, and M. Honma : Monte Carlo shell model calculation for unstable nuclei around  $N = 20$ , RIKEN symposium "Shell Model 2000", March 5-8, 2000, RIKEN, Japan.
- [39] N. Shimizu, T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Honma : Collective excitations of nuclei in the Monte-Carlo shell model, RIKEN symposium "Shell Model 2000", March 5-8, 2000, RIKEN, Japan.
- [40] M. Honma, B. A. Brown, T. Mizusaki and T. Otsuka : Full pf-shell calculations with a new effective interaction, RIKEN symposium "Shell Model 2000", March 5-8, 2000, RIKEN, Japan.
- を考えるワークショップ及び科研費特定領域「ストレンジネスを含む原子核」総括班研究会(理研、和光、1999年9月).
- [42] 宇都野穰、大塚孝治、水崎高浩、本間道雄 : sd-pf 殻模型計算による不安定核の構造 (III)、日本物理学会 1999 年秋の分科会 (島根大学、島根、1999 年 9 月).
- [43] 宇都野穰、大塚孝治、水崎高浩、本間道雄 :  $N = 20$  領域不安定核の変形共存、基研研究会「不安定核の構造と反応」(京都大学基礎物理学研究所、京都、1999 年 11 月).
- [44] 宇都野穰、大塚孝治、水崎高浩、本間道雄 : sd-pf 殻模型計算による不安定核の構造 (IV)、日本物理学会 2000 年春の分科会 (近畿大学、東大阪、2000 年 4 月).
- [45] 清水則孝、大塚孝治、水崎高浩、本間道雄 : MCSM による重い核の非軸対称状態、日本物理学会 秋の分科会 (島根大学、1999 年 10 月).
- [46] 清水則孝、大塚孝治、水崎高浩、本間道雄 : MCSM による重い核の非軸対称状態 2、日本物理学会 第 54 回年会 (近畿大学、東大阪、2000 年 3 月).
- [47] 清水 則孝、大塚 孝治、水崎 高浩、本間 道雄 : 殻模型計算による重い核の非軸対称状態、第 172 回基礎科学セミナーガンマ線核分光と短寿命核のフロンティア (原子力研究所、1999 年 12 月).
- [48] 峯尾 浩文、ベンツ ウォルフガング、矢崎 統一 : Axial vector diquark をとりいれた核子の構造関数、日本物理学会秋の分科会、(島根大学、島根、1999 年 9 月).
- [49] 峯尾 浩文、ベンツ ウォルフガング、矢崎 統一 : 核子の構造関数および静的性質に対する Axial vector diquark の役割、日本物理学会春の分科会 (近畿大学、東大阪、2000 年 3 月).
- [50] 春山征吾、大塚孝治、水崎高浩、Kalman Varga : 複数のガウス-粒子基底による軽い不安定核の研究、日本物理学会 1999 年秋の分科会 (島根大学、島根、1999 年 9 月).
- [51] 春山征吾、大塚孝治、水崎高浩、Kalman Varga : 複数のガウス-粒子基底による Li アイソトープの研究、基研研究会「不安定核の構造と反応」(京都大学基礎物理学研究所、京都、1999 年 11 月).
- [52] 春山征吾、大塚孝治、水崎高浩、Kalman Varga : 複数のガウス-粒子基底による Li アイソトープの研究、日本物理学会 2000 年春の分科会 (近畿大学、東大阪、2000 年 4 月).
- [53] 池田 貴 : 双対ギンツブルグ・ランダウ理論におけるパイ中間子の性質、日本物理学会 1999 年秋の分科会 (島根大学、島根、1999 年 9 月).
- [54] 藤本林太郎、大塚孝治、S.Pittel、鈴木俊夫 : 変換された調和振動子基底によるゆるく束縛された状態、日本物理学会 2000 年春の分科会 (近畿大学、東大阪、2000 年 4 月).

(国内会議)

一般講演

- [41] 宇都野穰、大塚孝治、水崎高浩、本間道雄 :  $N = 20$  領域における魔法数の破れと変形、RI ビームの物理

(セミナー)

- [55] 宇都野穰: 殻模型計算による  $N = 20$  領域の不安定核の構造、(東工大、目黒、1999 年 7 月).

## 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 超弦理論

#### ブレーン ダイナミクスとマトリックス理論

細道は、ブレーンと呼ばれる高次元膜の複雑な束縛状態について超重力理論の立場から解析を行い、すれ違う2種類の異なるブレーンが新たなブレーンをつくるいわゆる brane creation についての解釈を与えた [35]。浜中は修士論文において以下のレビューを行った。前半では、ADHM(N) 構成法における双対性を題材に、その背景や利点について、(3,4次元)時空上の場の理論の立場、および D-brane 上に誘起された場の理論の立場から考察した。後半では、双対性の立証に重要な役割を果たすモジュライ空間の計量の導出法 (hyperkähler quotient, Legendre 変換など) について、シンプレクティック幾何学の基礎からまとめた [50]。高柳は、orbifold における D-brane を共形場理論的手法を用いて解析することによって、ALE 空間において二つの D-brane の交差によって string creation が起こることを示し、またこの結果が四次元  $N=2$  ゲージ理論のベータ関数とホログラフィーの関係で結ばれていることを確かめた [34]。近年、曲がった時空の上での D-brane の理論が活発になされている。しかし、実際知られているのは coset space の上や超重力理論の場との線形の結合などのみである。一方、超時空形式では抽象的であるが、厳密に超対称的な D-brane の作用が知られている。そこで、濫佐は supermembrane の超重力理論の場との線形の結合を知るために 1 次元超時空の構造を調べ、特に "Gauge completion" の方法を使い、知られていなかった、反交換座標の 2 次の成分のいくつかを求めた [12], [9]。上杉は修士論文において M 理論の基本的物体とされる membrane の理論および M 理論を構成的に定義する Matrix model の近年の進展について review した [57]。

#### 非 BPS 状態とタキオン凝縮

弦理論の研究の新しい方向性として、幾つかの弦理論に含まれるタキオン場を、場の理論におけるヒッグス粒子のように扱い、弦理論の正しい真空の決定に使えるのではないかと希望が出ている。松尾はこのアイデアを bosonic 弦に適用し、その理論

が 26 次元で持っていた  $SO(2^{13})$  という対称性がタキオンの凝縮により 10 次元で  $SO(10)$  に落ちるのではないかと予測を提案した。[11] またこのアイデアをより具体化に記述するひとつの方法として時空をある固定した半径にコンパクト化しタキオンを質量ゼロの粒子にし、共形場理論の変形理論をもちいてタキオン凝縮を記述する方法を研究し、タキオン凝縮が Orbifold 模型との双対性と関連することを指摘した [45]。高柳は、修士論文において超弦理論における非 BPS 状態に関する最近の発展について Review した [56]。

#### 非可換幾何

D-brane 上の有効理論は、その上に一定の電磁場が存在する時には、非可換幾何上のゲージ理論で記述されることが知られているが、実は、この物理系は、背景場として電磁場を持たせた可換な空間上の理論と等価であることが予想されている。寺嶋 (靖) は、超弦理論中の D-brane 上の有効理論に対して、この等価性を微分の二次の項まで残す近似で示し、また、この等価性で許される、最も一般的な形をした微分項を同じ程度の近似で構成した [33]。さらに寺嶋 (靖) は、大阪大学の川祐司氏と共に、場の再定義の具体的な形等を仮定しないで、この等価性により、どこまで作用が縛られるかを議論し、ボソンの弦理論中の D-brane に対しては、仮定されていた場の再定義に修正が必要なことを示した [38]。また、寺嶋 (靖) は、この等価性から、 $U(1)$  Dirac-Born-Infeld 作用に背景として電磁場を持たせた作用には、ゲージ群が  $U(1)$  であるにも関わらず、インスタントン解があるだろう事が示唆されるが、具体的にインスタントン解を構成し、それが、ある種の BPS bound を飽和することを示した [26]。そこで、寺嶋 (靖) は、超空間と超場を使った枠組みを非可換幾何上の場の理論に適用することを考え、実際に超場を使って非可換幾何上の超対称な場の理論を構成することに成功した [37]。川野と高橋は、弦理論の反対称テンソル場である  $B$  場が背景場になっているような空間上のウィッテンの開弦の場の理論を与えた。また、この低エネルギー理論が非可換空間上のゲージ理論になることを確かめた。さらに、この理論のプレ幾何学的なヴァージョンがこの背景場に依存しないことを示した [30]。

#### 弦の場の理論

現在考えられている開いた弦の場の理論においてはソリトン (D ブレイン) が存在する場合には取り扱いが難しくなることが知られている。また超対称性を持つような拡張も困難であることが知られている。松尾は藤と共同で行列模型による弦の記述を開いた弦の場合に拡張し、その分配関数が離散化された lightcone ゲージで予測される分配関数の表式に一致することを確認した。この方法では弦の相互作用 vertex と D-brane の記述を平行して行うことが可能である。

## AdS/CFT 対応

菅原は、 $AdS_3 \times S^2$  上の supergravity の dual  $N = (0, 4)$  SCFT を、 $Sym^N(M^4)$  ( $M^4 = T^4$ ,  $K3$ ) 上の  $N = (4, 4)$  non-linear  $\sigma$  model の quiver projection として定義し、BPS state のスペクトラムの詳細な解析を行った。そして supergravity のスペクトラムと consistent な結果を得ることに成功した [3]。細道、菅原は、Matrix string theory の観点から、 $AdS_3$  上の multi-string system を解析し、とりわけ short string sector と long string sector の統一的取り扱いと、その問題に対して世界面上の electric flux が果たす役割について論じた [10]。菅原は、世界面上  $N = 2$  の SUSY を持つような一般的な  $AdS_3$  background 上で定義された superstring theory の topological twisting について、holographic duality の観点から研究し、特に boundary に作用する space-time の位相的共形代数を完全に構成した [22]。川野と奥山は、アンチ-ドジッター空間上の湯川理論におけるフェルミオン場を含んだ 4 点相関関数を求めた。マルダセナ予想である  $AdS/CFT$  対応から、この関数が強結合領域での共形場理論のフェルミオンを含んだ 4 点関数に対応することを利用して、そのオペレータ積展開からこの共形場理論のスペクトラムを求めた [13]。細道は、3 次元反ドジッター空間上の重力理論および弦理論の解析を行い、Maldacena の  $AdS/CFT$  対応の予言について調べた成果を学位論文にまとめた [49]。疋田は、修士論文において  $AdS_3/CFT_2$  対応を古典論的、弦理論的両方の立場から review した [51]。

## カラビ・ヤウ多様体上のコンパクト化

今年度、江口は秦泉寺(東大数理)と共に、CY/LG 対応を調べ、対象空間がカラビ・ヤウ多様体以外の一般の複素多様体である場合にも、これがスピン多様体であれば CY/LG 対応に相当する関係が成り立つことを示した。特に、オイラー数、シグネチャー、楕円ジーナスなどの位相不変量が、双方の理論で計算したとき完全に一致する [25]。江口と菅原は、孤立した特異点を持つカラビ・ヤウ多様体上を伝搬する弦理論の振幅に関して、モジュラー不変な分配関数を組織的に構成した。これらの分配関数はカラビ・ヤウ多様体が  $A-D-E$  型の特異点を持つのに対応して、 $A-D-E$  型の分類を持つ [36]。Gepner モデルは超弦理論の 4 次元へのコンパクト化を記述しており、その分配関数は  $A-D-E$  分類されている。 $A$ -型の Gepner モデルに対する boundary state は知られていたが、那珂と野崎は  $A-D-E$  に拡張した boundary state を構成した。また、boundary state が持つ D-ブレインの RR-チャージを決定した [31]。

## 1.2.2 量子重力

寺嶋(容)は、ブラックホールのエントロピーを地平線の内側と外側の状態のエンタングルメントに付随するエントロピーで理解することを試みた。エン

タングルメントとは、古くは EPR パラドックスから最近の量子計算機、量子暗号、量子テレポーテーションなどにも用いられるものであり、2つの系の量子的な相関をあらわすものである。その結果、地平線が量子効果によって Planck 長さのオーダーで揺らいでいると仮定すれば、それによって生じる有効的なエンタングルメントのエントロピーで説明できることを示した [32]。橋本は、ホーキング・テュロック・インスタントンやヴィレンキン・インスタントンに見られる、ホーキング・テュロック特異性をカルーツァ・クライン的に調べ、特異性を 5 次元時空の‘ポルト’と見なせることができ、それにより作用への寄与を計算できることを示した。現在研究が進行中である。

## 1.2.3 高エネルギー現象論

### 超対称素粒子論

単純な超対称標準模型は、実験的には小さな割合でしか起こらない過程である FCNC (Flavor-Changing Neutral Current) が非常に大きな割合で起こると予言してしまう。井澤、野村(泰)、柳田は超対称性を破る場と標準模型の場が高次元で異なる ( $3+1$ ) 次元部分空間に局在化しているために、上記の問題が回避される模型を構築した [19]。この模型では  $\mu$  項と呼ばれるヒッグス粒子の超対称質量が、現象論的に望ましい値をとることが示される。黒澤、野村(泰)は KEK の久野と共同で、FCNC の問題が 1、2 世代の超対称粒子の質量が大きいため解決される可能性について調べた [40]。そこでは、従来の模型に存在する強い相互作用が破れる困難を解決する機構が提案され、実際にその機構を用いれば FCNC の問題が解決されることが示された。

### 超対称大統一理論

超対称大統一理論は、標準模型をこえる理論として最も有望な候補であると考えられている。井澤、黒澤、野村(泰)、柳田は大統一のスケールが超弦理論に存在するアノーマラスな  $U(1)$  ゲージ対称性の破れのスケールにより自然に説明される模型を構築した [5]。また、黒澤、野村(泰)、鈴木は一般に大統一理論に存在する問題である、三重項と二重項のヒッグス質量の問題を解決する  $SO(10) \times SO(6)$  模型を調べ、この模型がゲージノの質量を観測することにより低エネルギーで検証され得ることを示した [18]。

### 素粒子論的宇宙論

井澤、柳田は、動的なインフレーションのもとで、ディラトンなどのモジュライが存在する状況において有効となる真空の選択機構を提案した [8]。近年の宇宙論的観測は、非常に小さいが 0 ではない宇宙定

数が存在することを示唆している。野村、渡利、柳田は、自発的に破れたゲージ場のインスタントン効果が生成するアキソン場のポテンシャルエネルギーが、大きさとして自然にこの小さな宇宙定数を与える可能性のあることを示した [27]。鈴木は、修士論文において超対称性の破れのゲージ伝達モデルについて review し、特にこのモデルに存在する安定な gravitino に伴う宇宙論的問題を研究した [55]。浅賀、柳田は、川崎 (宇宙線研) とともに、熱的インフレーションのもとでは質量  $10^{12}$ – $10^{14}$  GeV を持つ非常に重い粒子が宇宙の暗黒物質になりうる事を指摘した [7]。更に、浅賀は、川崎 (宇宙線研) とともに超弦理論の予言するディラトン、モジュライ粒子の引き起こす宇宙論的困難が熱的インフレーションによって解決されることを示した [15]。浅賀は、川崎 (宇宙線研)、山口 (佐藤研) との共同研究で新しいインフレーションモデルの持つ初期値問題が超重力理論の枠内では自然に解決されることを示した [16]。浅賀、浜口、柳田は、川崎 (宇宙線研) とともに、重い右巻ニュートリノの崩壊によるレプトン数生成を媒介したバリオン数生成機構について考察した。その結果、宇宙のバリオン数を説明するために必要な重い右巻ニュートリノがインフレーションを引き起こすスカラー粒子の崩壊により生成されることを示した [17, 20]。

## レプトンフレーバー物理

野村 (大) は 昨年度までの研究で、最近の太陽、大気ニュートリノ振動の実験結果を考慮に入れた上で、 $\mu \rightarrow e\gamma$  や  $\tau \rightarrow \mu\gamma$  などのレプトンフレーバー数を破る稀過程に関して詳細に調べてきたが、今年度もいくつかの研究会 [74, 89] でこれらの成果を発表した。また、これらの結果を拡張して、JLC などの将来の電子陽電子型加速器実験でレプトンフレーバー数を破る過程がどの程度まで観測可能か議論した [89, 92]。スーパーカミオカンデ実験においてえられた 2 世代–3 世代ニュートリノ間の大混合と言う知見は、デモクラティック質量行列という現象論的アイディアによって理解することができる。渡利と柳田は、谷本 (愛媛大) と共同して、このデモクラティック質量行列が、あるフレーバー対称性とその破れの結果として現れうることを示した [6]。佐藤丈は、長基線振動実験において地球の物質密度の揺らぎに伴う確率振幅の不定性を小池氏 (東大宇宙線研) とともに議論した。これにより、そのような不定性も影響のある部分は充分解析的に扱えることを示した。[1]

## 1.2.4 場の理論

### 超対称ゲージ理論

4 次元における  $N = 2$  超対称ゲージ理論の Coulomb 相の構造は、Seiberg-Witten 幾何と呼ばれるある種の複素多様体によって支配されていることが知られている。羽柴と寺嶋は、ゲージ群として  $E_6$  または

$E_7$  を持ち、基本表現に属する物質場を伴う、 $N = 2$  超対称ゲージ理論の Seiberg-Witten 幾何を求めた [23]。羽柴はさらに上記の結果を、Seiberg-Witten 幾何についてのレビューも含め、博士論文 [48] にまとめた。渡利は、超対称ゲージ理論におけるインスタントン効果について修士論文においてまとめた [58]。

### 格子ゲージ理論

藤川は、最近の格子ゲージ理論における発展で基本的な役割を果たしている、Overlap Dirac 演算子の物理的な意味と構成を明らかにした [2][4]。山田と石橋は、菊川 (名大)、野口 (京大) とともに、格子上においてカイラル対称性をもっていると考えられているオーバーラップディラックオペレーターを持つ格子 QCD の理論で、クォーク自己エネルギー、真空偏極の 1 ループ計算を行い、この理論のカイラルな性質や繰り込み可能性を確かめた [28]。石橋は、修士論文において、最近の格子上でのカイラル対称性の研究の進展について review した [53]。

### その他

藤川と寺嶋は、ゲージ理論の量子化でこれまでに知られていたものとは異なる経路積分の定式化 (Zwanziger とか Jona-Lasinio によるもの) と通常の Faddeev-Popov の定式化の同等性を示し、その応用を簡単に議論した [29]。井沢は、非線形リー代数に基づく非線形ゲージ理論とゲージ理論などの変形理論との関連を明らかにし、高次元への拡張を行った [24]。佐藤丈は、有限温度下の場の理論に於いて、有効ポテンシャルを計算する我々が提案した新しい方法 (擬質量の方法) を用いて、 $O(N)$  スカラー理論に於ける有効ポテンシャルを小暮氏 (東大宇宙線研) とともに計算した。これにより  $O(N)$  対称性の有るスカラー理論の臨界指数を定量的にしてみせた。[14]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] M. Koike and J. Sato : “Effects of Matter Density Fluctuation in Long Baseline Neutrino Oscillation Experiments”, Mod. Phys. Lett. A14:1297-1302, 1999.
- [2] K. Fujikawa: “A continuum limit of the chiral Jacobian in lattice gauge theory”, Nucl.Phys. B546 (1999)480-494.
- [3] “ $N = (0, 4)$  Quiver  $SCFT_2$  and Supergravity on  $AdS_3 \times S^2$ ”, Y. Sugawara: JHEP 9906(1999)035
- [4] K. Fujikawa: “Relation  $\text{Tr}\gamma_5 = 0$  and the index theorem in lattice gauge theory”, Phys. Rev. D60 (1999) 074505.
- [5] K.I. Izawa, K. Kurosawa, Y. Nomura and T. Yanagida: “Grand Unification Scale Generation

- through the Anomalous U(1) Breaking”, Phys. Rev. **D60** (1999) 115016.
- [6] M. Tanimoto, T. Watari and T. Yanagida, “Democratic mass matrices from broken  $O(3)(L) \times O(3)(R)$  flavor symmetry,” Phys. Lett. **B461**, 345 (1999) hep-ph/9904338.
- [7] T. Asaka, M. Kawasaki and T. Yanagida: “Super-heavy dark matter and thermal inflation”, Phys. Rev. **D60**, 103518 (1999) hep-ph/9904438.
- [8] K.-I. Izawa and T. Yanagida: “Dynamical Inflation and Vacuum Selection”, Prog. Theor. Phys. 103 (2000).
- [9] Shibusu Yuuichirou: “A configuration of 11-dimensional curved superspace as backgrounds for supermembrane”, Mod. Phys. Lett. A14 (1999) 2767-2782
- [10] “Multi-Strings on  $AdS_3 \times S^3$  from Matrix String Theory”, K. Hosomichi and Y. Sugawara: JHEP 9907(1999)027
- [11] Y. Matsuo: “Fate of unoriented bosonic string after tachyon condensation”, UT-838, hep-th/9905044.
- [12] Shibusu Yuuichirou: “11-dimensional curved backgrounds for supermembrane in superspace”, hep-th/9905071
- [13] T. Kawano and K. Okuyama: “Spinor Exchange In  $AdS_{D+1}$ ,” Nucl. Phys. **B565**, 427 (1999), hep-th/9905130.
- [14] K. Ogure and J. Sato : “Critical Exponents of the  $O(N)$  Scalar Model at Temperatures below the Critical Value using the Auxiliary Mass Method”, Prog. Theor. Phys. 102:209-213, 1999.
- [15] T. Asaka and M. Kawasaki: “Cosmological moduli problem and thermal inflation models”, Phys. Rev. **D60**, 123509 (1999) hep-ph/9905467.
- [16] T. Asaka, M. Kawasaki and M. Yamaguchi: “Initial condition for new inflation in supergravity”, Phys. Rev. **D61**, 027303 (2000) hep-ph/9906365.
- [17] T. Asaka, K. Hamaguchi, M. Kawasaki and T. Yanagida: “Leptogenesis in inflaton decay”, Phys. Lett. **B464**, 12 (1999) hep-ph/9906366.
- [18] K. Kurosawa, Y. Nomura and K. Suzuki: “A Relation on Gaugino Masses in a Supersymmetric  $SO(10)_{GUT} \times SO(6)_H$  Unified Model”, Phys. Rev. **D60** (1999) 117701.
- [19] K.I. Izawa, Y. Nomura and T. Yanagida: “Cosmological Constants as Messenger between Branes”, Prog. Theor. Phys. **102** (1999) 1181.
- [20] T. Asaka, K. Hamaguchi, M. Kawasaki and T. Yanagida: “Leptogenesis in inflationary universe,” Phys. Rev. **D61**, 083512 (2000) hep-ph/9907559.
- [21] T. Kanazawa, M. Kawasaki, N. Sugiyama and T. Yanagida: “Double Inflation in Supergravity”, Phys. Rev. **D61** (2000) 023517.
- [22] “Topological String on  $AdS_3 \times \mathcal{N}$ ”, Y. Sugawara: UT-859, hep-th/9909146, to be published in Nucl. Phys. B
- [23] J. Hashiba and S. Terashima: “Geometry and  $N = 2$  Exceptional Gauge Theories”, JHEP **9909** (1999) 020.
- [24] K.-I. Izawa: “On Nonlinear Gauge Theory from a Deformation Theory Perspective”, Prog. Theor. Phys. 103 (2000) 225-228.
- [25] T. Eguchi and M. Jinzenji: “Generalization of Calabi-Yau/Landau-Ginzburg Correspondence”, JHEP **02** (2000) 028, hep-th/9911220.
- [26] S. Terashima: “U(1) instanton in Born-Infeld action and noncommutative gauge theory,” Phys. Lett. **B477** (2000) 292
- [27] Y. Nomura, T. Watari and T. Yanagida, “Mass generation for an ultralight axion,” Phys. Rev. **D61**, 105007 (2000) hep-ph/9911324.
- [28] M. Ishibashi, Y. Kikukawa, T. Noguchi and A. Yamada: “One-loop analyses of lattice QCD with the overlap Dirac operator”, hep-lat/9911037. (to appear Nucl. Phys. B)
- [29] K. Fujikawa and H. Terashima: “Note on the gauge fixing in gauge theory”, Nucl. Phys. B (in press). hep-th/9912253.
- [30] T. Kawano and T. Takahashi: “Open String Field Theory On Noncommutative Space,” UT-870, hep-th/9912274
- [31] M. Naka and M. Nozaki: “Boundary states in Gepner models”, hep-th/0001037.
- [32] H. Terashima: “Entanglement Entropy of the Black Hole Horizon”, Phys. Rev. **D61** (2000) 104016.
- [33] S. Terashima: “On the equivalence between noncommutative and ordinary gauge theories,” JHEP **02** (2000) 029
- [34] T. Takayanagi: “String Creation and Monodromy from Fractional D-branes on ALE spaces”, JHEP **0002**(2000)040.
- [35] K. Hosomichi, “On Branes Ending on Branes in Supergravity”, hep-th/0002069 .
- [36] T. Eguchi and Y. Sugawara: “Modular Invariance in Superstring on Calabi-Yau  $n$ -fold with  $A-D-E$  Singularity”, UT-875, hep-th/0002100 to be published in Nucl. Phys. B
- [37] S. Terashima: “A note on superfields and noncommutative geometry,” hep-th/0002119.
- [38] Y. Okawa and S. Terashima: “Constraints on effective Lagrangian of D-branes from noncommutative gauge theory,” hep-th/0002194.
- [39] T. Kanazawa, M. Kawasaki, and T. Yanagida: “Double Inflation in Supergravity and the Primordial Black Hole Formation”, hep-ph/0002236.

- [40] J. Hisano, K. Kurosawa and Y. Nomura: “Natural Effective Supersymmetry”, hep-ph/0002286.

(会議抄録)

- [41] T. Eguchi: “Seiberg-Witten Theory and S-Duality”, in the Proceedings of Cargese meeting on “Strings, Branes and Dualities”, Eds. L.Baulieu et al. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [42] T. Eguchi: “Seiberg-Witten Theory and S-Duality”, in “Duality and Supersymmetric Theories”, Eds. D. Olive and P. West, Cambridge Univ. Press, 1999.
- [43] T. Eguchi: “World-sheet Instantons and Virasoro algebra”, in “Integrability: The Seiberg Witten and Witham Equations”, to appear in Gordon and Breach Publishing.
- [44] K. Fujikawa: “Fluctuation-dissipation theorem and quantum decoherence”, in Proceedings of ISQM-Tokyo '98, “Quantum Coherence and Decoherence”, edited by Y.A.Ono and K. Fujikawa (Elsevier, Netherlands,1999)pp.315-318.
- [45] Y. Matsuo: “Tachyon condensation and boundary states in bosonic string theory”, hep-th/0001044.
- [46] Y. Nomura: “Decoupling Solution to the Supersymmetric Flavor Problem without Color Instability”, To be published in Proc. of International Symposium on Supersymmetry, Supergravity and Superstring (SSS99), Seoul, Korea, 1999, hep-ph/9909281.
- [47] Y. Nomura: “Neutrino Mass in Supersymmetric Grand Unified Theories”, To be published in Proc. of Workshop on Neutrino Oscillations and their Origin, Fuji-Yoshida, Japan, 2000.

(学位論文)

- [48] J. Hashiba: “Geometry and  $N = 2$  Supersymmetric Gauge Theories”.
- [49] Kazuo Hosomichi, “String Theory on  $AdS_3$  and CFT on the Boundary”.

(修士論文)

- [50] 浜中 真志:「D-brane 力学の幾何学的側面と超弦理論の双対性」
- [51] 足田 泰章:「ブラックホールエントロピーと AdS/CFT 対応」
- [52] 小西 由紀子:「インスタントン・モジュライ空間と超対称性」
- [53] 石橋 真人:「格子上的カイラル対称性」
- [54] 徐 福実:「超対称性理論における R 対称性とそのゲージ化について」
- [55] 鈴木 功至郎:「超対称性の破れのゲージ伝達モデルとその現象論」
- [56] 高柳 匡:「超弦理論における非 BPS 状態」
- [57] 上杉 忠興:「超膜理論と行列模型」

- [58] 渡利 泰山:「超対称ゲージ理論におけるインスタントン効果」

(著書)

- [59] T. Eguchi: “String Duality”, (English translation by M. Naka), to appear in the Bulletin of American Mathematical Society.
- [60] Y.A.Ono and K. Fujikawa, ed.: “Quantum Coherence and Decoherence”, (Elsevier, Netherlands, 1999).

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [61] T. Asaka: “Leptogenesis in Inflationary Universe”, The 4th RESCEU International Symposium on “The Birth and Evolution of the Universe”, Tokyo, Japan, 1999.
- [62] Y. Nomura: “Decoupling Solution to the Supersymmetric Flavor Problem without Color Instability”, 7th International Conference on Supersymmetries in Physics (SUSY 99), Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois, June 1999.
- [63] Y. Nomura: “Decoupling Solution to the Supersymmetric Flavor Problem without Color Instability”, International Symposium on Supersymmetry, Supergravity and Superstring (SSS 99), Seoul National University, Seoul, Korea, June 1999.
- [64] T. Asaka: “Leptogenesis in Inflationary Universe”, Desy Theory Workshop 1999, “ $\nu$ 'EWS” From The Universe”, Hamburg, Germany, 1999.
- [65] T. Asaka: “Leptogenesis in Inflationary Universe”, PASCOS99, 7th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology California, USA, 1999.

招待講演

- [66] K. Fujikawa: “The Gribov Problem and BRST Formalism”, RIKEN-BNL Workshop on Gauge Invariant Variables in Gauge Theories, Brookhaven National Laboratory, May 25-28, 1999.
- [67] Y. Matsuo: “Lecture on Hilbert scheme and integrable system”, APCTP, Korea, May 1999.
- [68] K. Fujikawa: “Implications of  $\text{Tr}\gamma_5 = 0$  in Lattice Gauge Theory”, Chiral '99: Workshop on Chiral Gauge Theories, National Taiwan University, Taipei, September 13-18, 1999.
- [69] T. Eguchi: “Exact Solution of 5-Dimensional Gauge Theory”, String Theory and Black Holes, Shanghai, China, September 1999.
- [70] K. Fujikawa: “Regularization and Anomalies in Gauge Theory” NATA Advanced Research Workshop “Lattice Fermions and Structure of the Vacuum”, Joint Institute of Nuclear Research at Dubna, October 5-9, 1999.

- [71] Y. Matsuo: “Tachyon condensation and boundary states in bosonic string theory”, International Workshop on Frontier of Theoretical Physics (Beijing), November 1999.
- [72] Y. Sugawara: “Topological String on  $AdS_3 \times \mathcal{N}$ ”, International Workshop on Frontier of Theoretical Physics, - a general view of theoretical physics at the crossing of centuries -, ITP, Beijing, 11/2-11/5.
- [73] K. Fujikawa: “Chiral Anomaly and Index Theorem in Continuum and Lattice Theories”, The Third International Symposium on “Frontiers of Fundamental Physics”, Birla Science Centre at Hyderabad, December 17-22, 1999.
- [74] D. Nomura: “Neutrino oscillations and lepton flavor violation”, workshop on “Neutrino oscillations and their origin”, Fujiyoshida, Japan, February 11-13, 2000.
- [75] Y. Nomura: “Neutrino Mass in Supersymmetric Grand Unified Theories”, Workshop on Neutrino Oscillations and their Origin, Fuji-Yoshida, Japan, February 2000.
- [76] K. Fujikawa: “Brief History and Formulation of Anomalies in Quantum Field Theory”, Millennium International Conference on Fundamental Sciences: Mathematics and Theoretical Physics, Sheraton Towers, Singapore, March 13-17, 2000.
- (国内会議)
- 一般講演
- [77] 野村 泰紀: “Mediation of Supersymmetry Breaking to the Standard Model Sector”, 「素粒子物理学の新展開」, 京都大学基礎物理学研究所, 1999年7月
- [78] Y. Matsuo: “Tachyon condensation and bosonic string theory”, YITP, Kyoto University, July 1999.
- [79] 菅原祐二: 「Topological String on  $AdS_3 \times S^3$ 」基研99年度前期研究会「場の量子論と弦理論の新しい展開」7月27日(火) - 7月30日(金)
- [80] 寺嶋 靖治: 「 $N = 2$  Superconformal Field Theory with ADE global symmetry on a D3-brane probe」, 場の量子論と弦理論の新しい展開, 京都大学基礎物理学研究所, 1999年7月
- [81] 細道 和夫: “Review on Attractors (I)”, Summer Institute '99, 山梨県富士吉田市, 1999年8月.
- [82] 菅原祐二: 「Topological String on  $AdS_3 \times \mathcal{N}$ 」日本物理学会1999年度分科会9月23日-26日
- [83] 浜口幸一: “インフラトンの崩壊によるレプトン数生成”, 日本物理学会, 島根大学, 1999年9月.
- [84] 羽柴 次郎: “Geometry and  $N = 2$  Supersymmetric Gauge Theories”, 日本物理学会, 島根大学, 1999年9月.
- [85] 細道 和夫: “Multi-Strings on  $AdS_3 \times S^3$  from Matrix String Theory”, 日本物理学会, 島根大, 1999年9月.
- [86] 黒澤 毅一: “Relation on Gaugino Masses in a Supersymmetric  $SO(10)_{GUT} \times SO(6)_H$  Unified Model”, 日本物理学会, 島根大学, 1999年9月
- [87] 野村 泰紀: “Decoupling Solution to the Supersymmetric Flavor Problem without Color Instability”, 日本物理学会, 島根大学, 1999年9月
- [88] 寺嶋 靖治: 「D3 ブレイン上の ADE 型大域的対称性を持つ  $N=2$  超共形場の理論」, 日本物理学会, 島根大学, 1999年9月
- [89] 野村大輔: “Probing lepton flavor violation at future experiments”, 京都大学基礎物理学研究所 研究会「ニュートリノ振動をめぐる理論的諸問題」, 2000年2月28日-3月1日.
- [90] 寺嶋 靖治: 「 $U(1)$  インスタントンと非可換ゲージ理論」, 日本物理学会, 近畿大学, 2000年3月
- [91] 黒澤 毅一: “Decoupling Solution to the Supersymmetric Flavor Problem and Two-loop Finite Corrections”, 日本物理学会, 近畿大学, 2000年3月
- [92] 野村大輔: “Probing left-handed slepton flavor mixing at future lepton colliders”, 日本物理学会 2000年春の分科会, 近畿大学 2000年3月30日-4月2日.
- 招待講演
- [93] 菅原祐二: 「Multi-Strings on  $AdS_3 \times S^3$  from Matrix String Theory」 「場の量子論の展望」5月16日(日), 17日(月) 大阪大学
- [94] T. Eguchi: “Generalization of Seiberg-Witten Solution”, SI99, 河口湖, 1999年8月.
- [95] 寺嶋 靖治: “4次元  $N = 2$  超対称ゲージ理論の Seiberg-Witten 幾何におけるゲージ群の表現”, Summer Institute '99, 日経連人材開発センター富士研修所, 1999年8月
- [96] Y. Matsuo: “Tachyon condensation and boundary state”, Developments in Superstring and M-theory YITP, Kyoto University, October 1999.
- [97] 川野 輝彦: “Noncommutative Geometry In String Theory,” 京都大学物理第二教室集中講義, 1999年10月.
- [98] 菅原祐二: “Topological String on  $AdS_3 \times \mathcal{N}$ ” Workshop on “Developments in Superstring and M-theory”, 10/27(Wed) - 10/29(Fri), YITP,
- [99] Y. Matsuo: “弦理論のソリトンと対称性”, 東京工業大学集中講義, December 1999.
- [100] 高橋 智彦: “弦の場の理論と非可換空間”, 非可換幾何学と弦理論, 京都大学基礎物理学研究所, 2000年2月.
- [101] 寺嶋 靖治: “Instantons in the  $U(1)$  Born-Infeld Theory and Noncommutative Gauge Theory”, 非可換幾何学と弦理論, 京都大学基礎物理学研究所, 2000年2月.
- [102] T. Eguchi: “Trigonometric Generalization of Seiberg-Witten Theory”, 特定研究総括研究会, 東京, 2000年2月.

- [103] T. Eguchi: “String Propagation on Singular Calabi-Yau Manifold”, KEK 研究会, 2000 年 3 月.
- [104] 川野 輝彦: “Noncommutative Geometry In String Theory,” 特別講演、日本物理学会 2000 年春の分科会、近畿大学 2000 年 3 月 30 日-4 月 2 日.

めに、鉛原子核中に深く束縛された、パイ中間子原子を生成させる実験をドイツ、ダルムシュタットの GSI 研究所で、1996 年以來おこなってきた。

## 2 原子核・素粒子実験

### 2.1 原子核実験研究室(石原、酒井、早野研究室)

原子核実験研究室は、石原研究室、酒井研究室、早野研究室の三研究室から構成され、密接に連絡を取りながら、原子核物理学を中心とし、原子物理学、素粒子物理学などとの境界分野も含めた領域において、実験的研究を行なっている。

石原研究室では、天然に存在する安定核よりも中性子数や陽子数が極めて多い不安定原子核の物理的性質を探る実験的研究を行っている。こうした原子核の中には、安定核に見られない特異な現象が見出されている。そのなかでも我々は、中性子ハロー構造、中性子過剰核での殻構造の変化、中性子過剰核の核融合反応の研究を行っている。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、主として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行っている。RIPS は、高エネルギー重イオンビームを利用した不安定核ビーム発生装置であり、そのビーム強度は世界最強で、同分野での最先端の研究が実現している。

天体核反応の研究の一部は東京大学原子核科学研究センターの SF サイクロトロンと、そこに付設されている運動量分析装置を用いて行っている。

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を中心に実験的研究をしている。実験装置として、偏極イオン源、偏極標的、散乱後の中性子や重陽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。

大阪大学核物理研究センターにて建設を進めている偏極中性子ビーム施設がほぼ完成し、本実験に向けての準備を進めている。

早野研究室では、ジュネーブにある CERN 研究所において稼働を始めた反陽子減速器 (AD) を利用した反陽子を含むエキゾチック原子の研究-ASACUSA プロジェクト (Atomic Spectroscopy and Collisions Using Slow Antiprotons)- を中心課題に据えている。また AD において大量の反水素を生成し、その性質を精密に調べるにより CPT 不変性の検証を目指した ATHENA プロジェクトにも参加している。

さらに核物質中での中間子の質量変化を調べるた

#### 2.1.1 分解反応による中性子ハロー核の研究(石原研)

中性子ドリップライン近傍核では、中性子束縛エネルギーが小さくなるため、トンネル効果によって中性子密度分布が通常の原子核半径を大きく越えて浸みだすことがある。中性子ハローとよばれるこの構造は安定核にはない原子核の新しい形態で、それに付随する特異な現象が注目されている。当研究室ではこれまでに、分解反応を用いて  $^{11}\text{Be}$  や  $^{19}\text{C}$  のハロー構造を解明してきた。分解反応を核構造を解明するプローブとして用いる場合には、反応機構は単純な一次の摂動論で扱ってきた。本年度は、この反応機構自身の詳細な研究を行なうことを目的とし、構造が比較的詳細に分かっている一中性子ハロー核である  $^{11}\text{Be}$  の分解反応の精密測定を行なった。

分解反応はクーロン力に依るものと核力に依るものに分類できる。クーロン分解反応の測定は、我々がこれまでに  $^{11}\text{Be}$  や  $^{19}\text{C}$  について行っており、その励起スペクトルは相対エネルギー数 100 keV に巨大なピークを持つ特徴的な分布をとることが分かった。一次の摂動理論に基づく仮想光子法用いると、このピークはハロー中性子の空間的な広がりを反映した連続状態への励起(直接分解反応)の結果として出現するものとして説明できる。このように励起スペクトルの大まかな形状は理解できたものの、より詳細な反応機構については、弱束縛されたハロー中性子の影響など未知の部分が多い。

以前当グループで行なった  $^{11}\text{Be}$  のクーロン分解反応実験において観測した  $^{10}\text{Be}$  と中性子の運動量の縦方向成分のシフトは、標的核の近傍で分解した入射核が、長距離力であるクーロン力によって再加速を受けた効果として理解される。この再加速効果は分解が起こる時間スケールを反映しており、ハロー核のクーロン分解の反応メカニズムを理解する上で有力な物理量である。本実験は縦方向に加えて横方向の運動量シフトを測定し、再加速の効果を定量的に明らかにすることを目標としている。

また、仮想光子法では取り入れられない高次の効果については、理論的にも多くのモデルが存在し、正否が問われている。高次の効果は断面積そのものよりも角分布や分解後の中性子と  $^{10}\text{Be}$  の角相関などにより敏感に反映するが、この様な微量を詳細に議論する事ができるような高精度の測定はこれまでに行なわれていなかった。そこで今回の測定では、統計誤差と系統誤差の減少させるよう注意をはらい、高次の効果を含むハロー核の分解反応機構の解明を可能とするデータの取得を目指した。

一方、核力による分解反応の研究を行なうために、 $Z$  の小さい標的を用いた反応の測定を行なった。クーロン分解反応では、強いクーロン場のために、直接分解反応に遷移強度が集中してしまうが、核力による

分解反応では、共鳴状態を経由した分解反応が観測できる。E2 遷移に対応する遷移強度から、 $^{11}\text{Be}$  の変形度についての定量的な情報を引き出すことができる。さらに、核力による分解反応では、ハロー中性子の回折に起因する分解反応 (Diffractional Dissociation) の観測が期待できる。直感的には、コアから遠くはなれたハロー中性子のみが不透明な球によって散乱し、その結果分解したものととして、この反応をとらえることができる。分解した中性子の角度分布は、古典的波動における回折パターンに類似することが予想される。これは中性子が極めて緩く束縛された中性子ハロー核に起こり得る特有の現象であると期待している。

また、再加速効果の中性子分離エネルギー依存性を調べるために、 $^{15}\text{C}$  のクーロン分解反応も同時に測定した。 $^{15}\text{C}$  は  $s_{1/2}$  一中性子状態を主要な配位とする点で  $^{11}\text{Be}$  と類似しているが、一中性子分離エネルギーが約 1.2 MeV と  $^{11}\text{Be}$  のそれ (約 0.50 MeV) よりも大きい。両者を比較することで再加速効果の中性子分離エネルギー依存性に対する知見を得る事ができると期待される。また、クーロン分解反応メカニズムの入射エネルギーに対する依存性を調べるために、核子当たり 74 MeV と 51 MeV の 2 種類の入射エネルギーでの測定を行った。

実験は RIPS で供給される  $^{11}\text{Be}$  や  $^{15}\text{C}$  ビームを用いて行なった。得られたビームをクーロン分解測定の場合には鉛標的で核力分解測定の場合には炭素標的で非束縛状態に励起させ、分解後放出される荷電粒子と中性子を同時測定した。荷電粒子は電磁石スペクトロメータによって、また中性子はプラスチックシンチレータホドスコープによってそれぞれ運動量を測定し、不変質量法により励起状態の励起エネルギーを求めた。

$^{11}\text{Be}$  の測定では前実験と比較し、鉛標的で 10 倍、炭素標的で 30 倍の統計量でデータを収集し、系統誤差も  $\sim 20\%$  から  $\sim 5\%$  に向上している。

### 2.1.2 中性子過剰核の殻構造研究 (石原研)

魔法数は原子核が殻構造をとることの現れであり、安定線近傍核の構造研究の基本である。ところが最近の研究で、 $^{11}\text{Li}$  ( $N=8$ ) や  $^{32}\text{Mg}$  ( $N=20$ ) などの中性子過剰な原子核では、中性子数が魔法数をとるにもかかわらず閉殻構造が消失していることが明らかになりつつある。これは、安定線から離れると殻構造が変質する可能性を示すものとして注目されている。当研究室では中性子数が魔法数である 8 や 20 に近い値を持つ不安定核の励起準位に対し、その励起エネルギー、スピン・パリティ、電磁遷移強度を決定し、 $N=8, 20$  魔法数の中性子過剰領域での振る舞いを研究している。原子核の励起状態のうち、原子核の回転や振動運動に対応する  $2^+$ 、 $4^+$  準位や、Major Shell を超える励起に対応する  $1^-$  状態は、その励起エネルギーや基底状態とを結ぶ行列要素が、基底状態の閉殻構造の度合を強く反映するため、魔法数の研究のよいプローブとなる。本年度の研究では、 $^{12}\text{Be}$  のクーロン励起、陽子非弾性散乱に加えて

$^{34}\text{Mg}$  の入射核破砕反応を用いた研究を行なった。

### $^{12}\text{Be}$ の非弾性散乱 (石原研)

$^{12}\text{Be}$  は中性子数が魔法数 8 であるが、 $\beta$  崩壊強度や、 $^{12}\text{Be}$  とその近傍核  $^{11}\text{Be}$ 、 $^{11}\text{Li}$  の励起準位様式から、閉殻構造が破れている可能性が指摘されていた。本研究では、 $^{12}\text{Be}$  での殻構造の変化を調べるために  $^{12}\text{Be}$  の陽子非弾性散乱とクーロン励起実験を行なった。

実験は不安定核ビームライン (RIPS) で行なった。二次ビームとして供給される  $^{12}\text{Be}$  ビームを陽子、鉛の標的で励起し、脱励起時に放出される  $\gamma$  線の強度から非弾性散乱断面積を求める、粒子- $\gamma$  線同時測定法を用いている。陽子標的の場合は陽子非弾性散乱が、鉛標的の場合はクーロン励起が測定できる。

陽子非弾性散乱では核力により励起された  $2^+$  準位からの線が測定された。 $2^+$  励起状態は集団的回転(または振動)運動に対応し、 $^{12}\text{Be}$  が中性子閉殻核であれば、そうでない  $^{10}\text{Be}$  に比べて遷移強度が抑制されるはずである。ところが、本研究で測定された遷移強度は変形度  $\beta_2 \sim 0.7$  に対応する、 $^{10}\text{Be}$  にほぼ匹敵する大きな値であり、 $^{12}\text{Be}$  に大きな四重極変形(振動)があることが分かった。

またクーロン励起では、 $^{12}\text{Be}$  の第 2 励起状態が強く励起された。 $Z$  の小さな原子核のクーロン励起では、電気双極子励起が選択的に励起される事から、この準位のスピンパリティが  $1^-$  であることが分かる。この  $1^-$  状態は価中性子の  $p$ -shell、 $sd$ -shell 間の遷移に対応し、その小さな励起エネルギーは両 shell 間のエネルギー差が小さいことを示している。また、遷移強度は、 $B(E1) = 0.051 \pm 0.013 e^2 \text{fm}^2$  と極めて強い値が得られた。これは、2 つの価中性子の波動関数に  $p$ -shell、 $sd$ -shell の成分が強く混合し、コヒーレントに足し合わされていることで説明できる。これら 2 つの結果はともに  $p$ -shell と  $sd$ -shell 間の Shell Gap が減少していることを示しており、 $^{12}\text{Be}$  において  $N=8$  の魔法数が消失していると言える。

### $^{34}\text{Mg}$ の $\gamma$ 線分光 (石原研)

原子核の低励起準位の性質は、基底状態の構造を端的に反映しているため、低励起準位の準位様式の決定は核構造研究の有力な手法である。この観点から、前節で述べたように、中性子過剰核においても中間エネルギーの中性子過剰核ビームを用いたクーロン励起実験などが行われてきており、多くの重要な成果を得てきた。一方で、中間エネルギーでは多重クーロン励起の断面積は非常に小さいため、第一励起状態以外の状態を観測するのは困難であるという問題があった。この問題を克服する手法として最近、安定核  $^{36}\text{S}$  の入射核破砕反応で  $^{32}\text{Mg}$  の励起状態を生成し、その直後に放出される脱励起の  $\gamma$  線を検出する、という測定が行なわれた。その結果、 $^{32}\text{Mg}$  の励起状態が 2 つ観測されたが、これは、入射核破砕反応によって第一励起状態よりも高い励起状態まで観

測できることを示すものである。本研究では、この手法の発展として、入射核として、安定核ではなく中性子過剰核を用いる事により、さらに安定線から遠い核にまで到達できる手法を開発した。その結果、これまでにビーム強度が弱いために測定ができないとされていた  $^{34}\text{Mg}$  の励起状態の励起エネルギーを測定することに成功した。

この方法では、最終的に目的とする核種に近い核を入射ビームに選べば、大きな生成断面積が得られるため、安定線から遠くはなれた原子核の研究をする上で優れた方法である。確かに、不安定核ビームは安定核ビームほど強い強度では得られないが、それは大きな生成断面積によって補償される。また、標的周辺でのプロンプト  $\gamma$  線測定のためには  $\gamma$  線の放出頻度を抑制するためにビーム強度、標的厚を制限しなければならない。そのため、強いビーム強度を必要とする中性子過剰核の測定時に大きな制限となった。これに対して、不安定核ビームでは、ビーム強度が弱いため、厚い標的を用いても  $\gamma$  線測定の支障とならない。

本研究では、入射ビームとして不安定核  $^{36}\text{Si}$  を用いて、 $^{34}\text{Mg}$  を生成し、その励起状態からの  $\gamma$  線ラインを2つ観測した(図 2.1 a)。エネルギーはそれぞれ

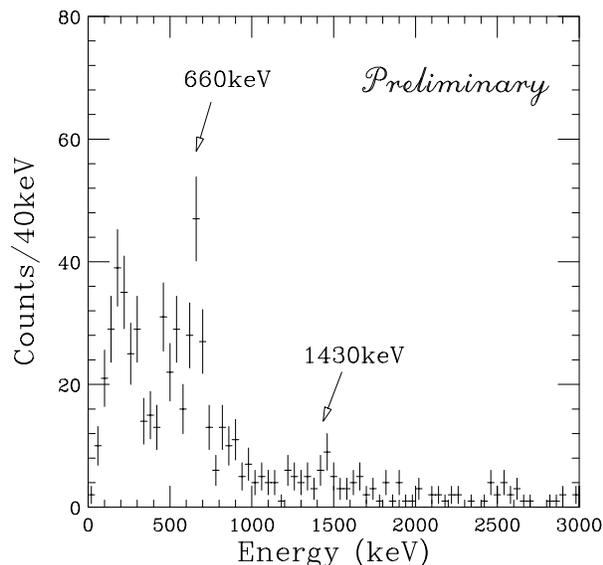


図 2.1 a:  $^{34}\text{Mg}$  と同時計測する  $\gamma$  線のエネルギースペクトル。エネルギー 660(10) keV と 1430(10) keV の2本の  $\gamma$  線は  $^{34}\text{Mg}$  が放出したものと同一した。

660(10) keV と 1430(10) keV であった。エネルギーが低く強度が強い前者を第1励起状態 ( $J^\pi = 2^+$ ) からの脱励起の  $\gamma$  線であるとすると、そのエネルギーはどの近傍核と比較して非常に低く、 $^{34}\text{Mg}$  が大きく変形していることが示唆される。また、 $^{34}\text{Mg}$  が大きく変形していると予言しているモンテカルロ殻模型に基づく計算で予測されているエネルギー (620 keV)

と非常によくあっている。また、もう1つの  $\gamma$  線が  $J^\pi = 4^+$  の状態から  $J^\pi = 2^+$  状態への遷移に対応しているとすると、その励起状態のエネルギー比は3.2で、変形核にみられる回転帯の比率3.3に近い値が得られている。

さらに、クーロン励起の手法を用いて、 $^{34}\text{Mg}$  の E2 遷移強度を測定する実験を行った。測定された E2 遷移強度は  $B(E2) = 601 \pm 147 e^2\text{fm}^4$  と非常に大きな値を示し、従来の予測に反して、 $^{34}\text{Mg}$  が  $^{32}\text{Mg}$  よりもさらに大きな集団運動性を持つことが分かった。

### 2.1.3 中間エネルギー領域の入射核破碎反応 (石原研)

不安定原子核ビーム生成に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碎反応でできた破砕片を分離装置で分ける方法が使われ、特にサイクロトロンで加速される中間エネルギー (数十~数百 A MeV) 重イオンビームは強度が強く、中性子過剰核の研究にかけがえのない手段を提供している。ところが中間エネルギーでの重イオン核反応では入射核様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て未知な性質が多く、その研究は陽子と中性子の比が極端に異なるドリップライン近傍核を対象とする実験の設計のためにも特に重要である。そこで、中間エネルギー領域における入射核破碎反応実験を理化学研究所の不安定核ビームライン (RIPS) で行なった。実験は 90 A MeV の  $^{40}\text{Ar}$  ビームを厚さ 95 mg/cm<sup>2</sup> の  $^9\text{Be}$  標的にあて、安定線から遠く離れた核種まで広範囲 ( $3 \leq Z \leq 18, 2 \leq A/Z \leq 3$ ) な破砕片の 0°方向の運動量分布を測定した。測定した運動量分布を非対称な Gaussian-like 関数で Fit し、運動量ピーク  $P_0$ 、高運動量側の幅  $\sigma_H$ 、低運動量側の幅  $\sigma_L$  の系統的データを得た。生成断面積は横方向運動量分布の幅を Deflection 効果を示すパラメータ  $\sigma_D$  を 195 MeV/c と仮定して導出し、破砕片運動量分布を積分することで得られた。

実験の結果、運動量ピーク  $P_0$  は破砕片核子数について放物線型の減速を示していた。これを説明するため入射核の二体崩壊モデル (Splitting Model) を押し進め、分割エネルギー  $\Delta E$  が

$$\Delta E = \varepsilon A_f (A_p - A_f) / (A_p - 1)$$

と表されることを示し、破砕片の減速を計算する一般的な式を導いた。よく知られた Goldhaber の式で再現される高運動量側の幅  $\sigma_H$  とは全く異なり、低運動量側の幅  $\sigma_L$  は入射核から剥ぎとられた核子数  $\Delta A$  に比例して増大し、 $\Delta A=0$  でも  $\sigma_L \neq 0$  であった。この  $\sigma_L$  は核子移行反応に関係していると考えられている。

不安定原子核ビームを用いる実験を設計する上で重要な生成断面積を予測する半経験的なコードとしてよく使われるものに EPAX がある。EPAX では破砕片の生成断面積は  $\sigma(A, Z) = Y(A) \cdot W(Z, A)$  のように Mass Yield  $Y(A)$  と荷電分布  $W(Z, A)$  の積で

求まる。さらに荷電分布は次式、

$$W(Z, A) = n \cdot \exp(-R|Z_{prob} - Z|^U)$$

で与えられ、 $Z_{prob}$  と  $U$  パラメータが重要である。破砕片の質量数  $A$  を固定した時、最も生成されやすい核の荷電数 (Most Probable Charge) が  $Z_{prob}$  で、そこから  $Z$  が増減するに従って減少する断面積の減り方の傾きが  $U$  である。本実験の結果と EPAX コードの予想を比べた結果、中性子が極めて過剰な核の断面積に大きなずれが系統的に起こることが分かった。これは  $U$  パラメータが適当な値でないことに起因する。そこで、Mass Yield と  $Z_{prob}$  が十分にあっていであることを確認したのち、 $U$  パラメータの値を改めて決定した。既存の EPAX の中性子過剰核側の  $U$  パラメータはすべてにおいて定数であるとされていた。しかし、これまで収量が少ないため取り込まれていなかった中性子過剰核のデータが得られたことで  $U$  パラメータの精度が向上し、破砕片質量とターゲット核種 (Be と Ta) の関数として議論できるようになった (図 2.1 b)。

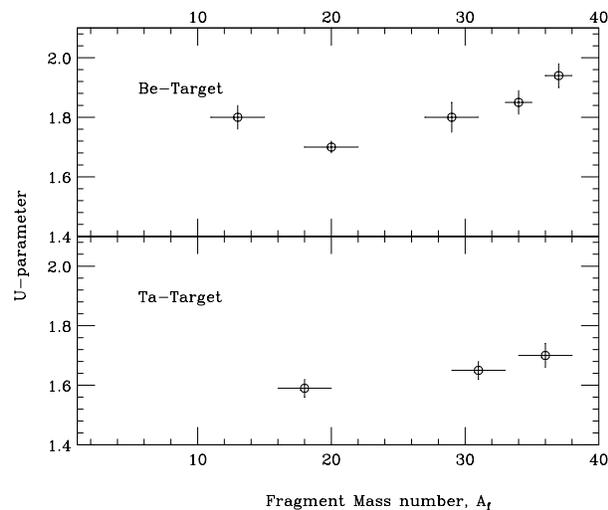


図 2.1 b: 入射核破砕反応断面積の半経験的公式 EPAX で用いられる  $U$  パラメータ。上が Be 標的で、下が Ta 標的で得られた結果である。点線は、オリジナルの EPAX で用いられている値である。点は今回の実験結果をもとにして、破砕片の質量数ごとに求めたものである。破砕片の質量数に対して強い依存性を持つことが分かる。

#### 2.1.4 中性子過剰核の融合反応 (石原研)

我々は、中性子過剰核の特異な構造が核融合反応に及ぼす効果を探索するため、中性子過剰核のクーロン障壁近傍における核融合反応断面積の測定を行っ

ている。本年度は、MUSIC 型検出器を用いて測定した He 同位体  $^4,6,8\text{He}$  のクーロン障壁近傍での核融合反応のデータ解析を行った。

$\beta$  安定線から著しく離れた中性子過剰核のクーロン障壁近傍での核融合反応では、通常安定核を用いた核融合反応に比べて特殊な核構造を反映して断面積が著しく増大すると期待されており、超重元素生成に新しい手段を提供するものとしてその断面積の大きさに関心が持たれている。クーロン障壁近傍での核融合反応の機構を理解する上では原子核の多体効果が重要であるが、中性子過剰核では特に多核子移行反応が大きく関与すると考えられる。

本研究では、中性子スキンを持つと報告されている  $^6,8\text{He}$  の核融合反応断面積の測定実験を昨年度を行い、本年度はデータの解析を進めている。実験では理化学研究所の不安定核ビームライン (RIPS) により生成される  $^4,6,8\text{He}$  二次ビームをクーロン障壁近傍まで減速させ、我々のグループで開発した MUSIC 型トラッキング・チェンバーに入射させて核融合反応を測定した。本測定器は、荷電粒子に対してビーム軸方向の電離損失のサンプリングを行うとともに、電離電子のドリフト時間測定と水平方向の位置測定により粒子の 3 次元飛跡を得る事ができる。検出ガスはそれ自体標的としても機能し、本研究では  $^{40}\text{Ar}$  を用いた。収集されたデータには、弾性散乱などの核融合反応以外の事象が含まれており、現在の解析では反応事象の弁別を行っている。図 2.1 c に示されるように、エネルギー損失の変化により核融合事象と弾性散乱事象を区別することができる。

また、これと並行して本年度は中性子ハロ核  $^{11}\text{Be}$  と  $^{209}\text{Bi}$  の核融合反応の断面積測定を行った。核融合反応により生じる蒸発残留核から放出される  $\alpha$  粒子を半導体検出器で観測する事により、核融合事象を同定する。同様の測定を我々のグループで過去に行っているが、本測定は、 $3n$  蒸発残留核からの  $\alpha$  粒子の検出と、入射ビームのエネルギー分布の最適化によるクーロン障壁以下での統計精度の向上により、前回のデータを補完するものとなっている。

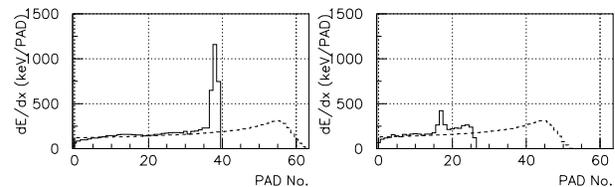


図 2.1 c: MUSIC 検出器で測定した He アイソトープビームのエネルギー損失。横軸のパッド番号はビーム軸方向の位置に対応する。点線は核反応を起こさなかった時に予想されるブランクカーブの計算値。核反応を起こした場合にはこの線からずれるが、その形状は起きた反応の種類により異なる。左図は核融合反応を、右図は弾性散乱を起こした場合である。

### 2.1.5 天体核反応 – ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ 反応断面積 (石原研)

太陽中では、主要燃焼過程である  $p$ - $p$  チェーンの一部として、 ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$  という核反応が 20 keV 程度の相対エネルギーでおきている。この反応の断面積は、高エネルギー太陽ニュートリノの生成率を支配するため、太陽ニュートリノ問題と密接な関係を持つ重要な量である。この断面積を実験で直接決定する試みがこれまでも多くなされてきたが、1) 放射性の  ${}^7\text{Be}$  標的を使用する必要があること、2) 低エネルギーの陽子ビームを用いた反応であるため、断面積がクーロン障壁のために非常に小さいこと、3) 厚い標的を使わず、統計的に不利になること、などの点から、非常に困難であった。実際、直接測定の実験からは、相対エネルギーで 150 keV 以上での値が得られているに留まっており、それ以上の相対エネルギー領域でも実験によって断面積の絶対値に 2 倍程度の開きがあった。

そこで我々は、 ${}^7\text{Be}$  の陽子捕獲反応断面積をより低い相対エネルギーで、より精度良く求めるあらたな手法として、 ${}^8\text{B}$  のクーロン分解反応測定実験と、 ${}^7\text{Be}$  の陽子移行反応の測定実験に取り組んでいる。

#### ${}^8\text{B}$ のクーロン分解反応

第一の方法は、 ${}^8\text{B}$  のクーロン分解反応測定である。 ${}^8\text{B}$  のクーロン分解反応 ( ${}^{208}\text{Pb}({}^8\text{B}, p){}^7\text{Be}$ ) は仮想光子の吸収過程と解釈することができ、その断面積は  ${}^8\text{B}(\gamma,p){}^7\text{Be}$  と関係付けられる。さらに、詳細釣合の関係を用いるとその逆反応である陽子捕獲反応の断面積を導出することができる。この方法は、1) クーロン分解のメカニズムから断面積が 3~4 桁程度増大すること (半古典的には仮想光子数として解釈される)、2) 高エネルギー反応を使えるため、詳細釣合の関係からも断面積がやはり 3~4 桁増大すること、また、3) 検出効率の点でも有利であること、などから統計的に非常に有利である。ただし、順反応にはほとんど含まれない E2 遷移の寄与が、クーロン分解反応では増加する (今回の条件では、E2 遷移の寄与は E1 遷移の 10% 前後と見積もられている) という問題点もあるなど、本来の逆反応である光吸収反応とクーロン励起反応との相違点も発生する。

我々は不安定核ビームライン (RIPS) で生成した  ${}^8\text{B}$  ビームを用いて、この実験に取り組んできており、これまでの測定では、相対エネルギー 250keV 以上での結果を得ている。これらの測定での最大の困難はバックグラウンドイベント (以前は  $S/N \sim 1/5$ ) であり、太陽温度に近いより低いエネルギーでの測定のためには、バックグラウンドイベントを減らす事が重要であった。そこで、バックグラウンドイベントを減らし、分解エネルギーの精度を向上させるために、標的から検出器までの、分解片が通過する約 5m の飛程をすべて真空槽に収納したセットアップでの実験を 97 年度に行った。

昨年度から今年度にかけてこの実験データの解析をすすめたところ、バックグラウンドをほとんど含ま

ない測定結果が得られ、100 keV の領域まで測定点を得た。最新の理論による外挿の結果、 ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$  反応の断面積はゼロエネルギーにおける天文学的光学因子に換算して、 $19.1 \pm 1.0 \text{ eV}\cdot\text{b}$  と見積もられた。図 2.1 d は、この結果を過去に行なわれたクーロン分解反応と直接測定の結果とともに示したものである。今回得た値は、大きなバックグラウンドを抱えていた我々自身の過去のクーロン分解反応測定と一致しており、また過去の直接測定との比較では、比較的小さな値を示している一群の測定を支持している (図 2.1 d)。

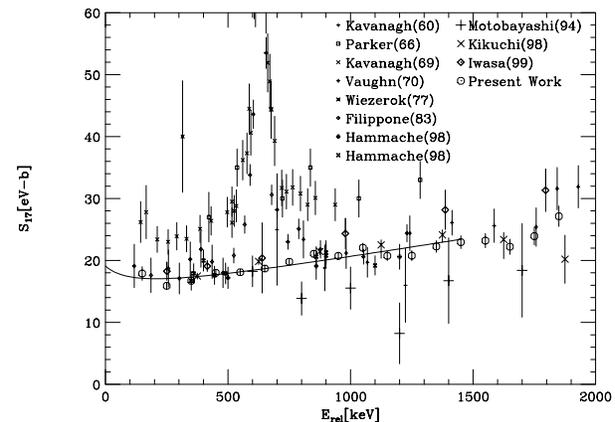


図 2.1 d: 現在までに報告されている  ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$  反応の天文学的光学因子 ( $S_{17}$ )。今回の結果 (丸印) は、E2 遷移に対応する成分の補正は行っていない値である。実線は Jennings らによる E1 の依存性を用いたフィットの結果。

クーロン分解反応で得られたこの値を  ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$  反応の断面積として解釈する際には、正しくは E2 遷移の寄与をこの値から差し引かねばならない。分解片の角度相関を調べた結果、この寄与はおよそ 10~20% と見積もられた。これは我々の過去のクーロン分解測定において別の解析方法により得られた値より有意に大きく、実験、理論両面において今後さらに深く追究されることが望ましい。

#### ${}^7\text{Be}(d,n){}^8\text{B}$ 反応 (石原研)

二番目の方法は陽子移行反応断面積から陽子捕獲反応断面積を求める方法である。太陽温度における  ${}^7\text{Be}$  の陽子捕獲反応は原子核外縁部で起ると考えられ、その反応断面積は捕獲された陽子の  ${}^8\text{B}$  中での波動関数の外縁部での振幅 (ANC: Asymptotic Normalization Constant) から導出することができる。ANC を求めるために、やはり原子核外縁部で起こる、低エネルギー ( $E = 10 \sim 20 \text{ MeV}$ ) での陽子移行反応 ( ${}^7\text{Be}(d,n){}^8\text{B}$ ) の前方角微分散断面積を利用するのが、この方法の原理である。この方法は、工

エネルギーを核子当たり数 MeV 程度と比較的高くできるため、断面積が大きくなる上に、厚い標的を使用できるという利点を持つ。実験は不安定核ビームライン (RIPS) で生成した  $^7\text{Be}$  ビームを用いて行った。データは現在解析中である。

これと同時に、ANC を用いたアプローチの妥当性を確認する研究も行っている。 $^{12}\text{C}$  の中性子移行反応  $^{12}\text{C}(d, p)^{13}\text{C}$  に上記の方法を適用すると、 $^{12}\text{C}$  の中性子捕獲反応の断面積が導出される。 $^{12}\text{C}$  の中性子捕獲反応の断面積は精度良く測定されているため、両者を比較することで、ここで用いた方法の妥当性が評価できる。

我々は、 $^{12}\text{C}(d, p)^{13}\text{C}$  反応のこれまでに測定例のない超前方 ( $< 2^\circ$ ) の微分散乱断面積測定を行なった。実験は東京大学原子核科学研究センターの SF サイクロトロンを用いて、12 MeV の入射エネルギーで行った。測定した断面積から ANC を  $3.65 \pm 0.35 \text{ [fm}^{-1}\text{]}$  と決定した。この値は  $^{12}\text{C}(n, \gamma)^{13}\text{C}$  ( $E_n \simeq 10 \text{ keV}$ ) 反応の直接測定から求めた値 ( $3.4 \pm 0.4 \text{ [fm}^{-1}\text{]}$ ) と誤差の範囲内で一致する。また、歪曲波ボルン近似計算から、反応が確かに原子核の外縁部で生じている事を確認すると同時に、ANC を導出する際の光学ポテンシャル依存性、束縛ポテンシャル依存性が 6% 以下であることを確認した。

この結果は、 $^7\text{Be}(d, n)^8\text{B}$  反応の断面積を、ANC を通じて  $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$  反応の断面積に関係付ける方法の信頼性を示すものである。またこの手法は他の天体核反応にも適用可能なので、元素合成経路の解明を一層進めることができると期待できる。

### 2.1.6 偏極中性子ビームを用いた研究 (酒井研)

大阪大学核物理研究センターにおいて、偏極中性子ビームを用いた  $(n, p)$  測定施設を建設した。この施設を利用して、 $\beta_+$  側のガモフテラー遷移強度の精密測定、および中性子-重陽子弾性散乱による三体力研究の実験準備が進行中である。

#### ガモフテラー遷移強度のクエンチング機構の研究

原子核の構造が核子以外の自由度、とりわけクォーク自由度の影響を受けるかどうかは、原子核物理の基本的な研究課題である。特にガモフテラー型遷移強度の和則値からの減少 (クエンチング) と呼ばれる現象には、核子の励起状態であるデルタ粒子が関与しているといわれており、多くの研究がなされている。

和則値は  $\beta_-$  側反応の遷移強度と  $\beta_+$  側の遷移強度の差で表される。我々のグループは  $\beta_-$  側反応である  $^{90}\text{Zr}(p, n)^{90}\text{Nb}$  反応の精密測定を行い、ガモフテラー型遷移強度のクエンチング量が高々 10% 程度と、従来言われていた値 (50%) よりも小さいことを明らかにした。しかしながら、クォーク自由度の関与の割合を数%の精度で決定するためには、 $\beta_+$  側の

$^{90}\text{Zr}(n, p)^{90}\text{Y}$  反応の遷移強度についても高精度の測定を行なう必要がある。

そこで、我々は大阪大学核物理研究センターにおいて  $(n, p)$  反応測定施設を建設し (図 2.1 e)、中性子-陽子弾性散乱を用いたテスト実験を行った。エネルギーのそろった 300 MeV の偏極中性子ビームは  $^7\text{Li}(p, n)$  反応によって生成する。この中性子ビームをポリエチレン ( $\text{CH}_2$ ) 標的に照射し、出射陽子を大口径スペクトロメータで測定した。得られた励起エネルギースペクトルを図 2.1 f に示す。エネルギー分解能は半値全幅で 2.5 MeV であり、使用した標的厚中でのエネルギー損失によって決まっている。得られた中性子-陽子散乱の微分散乱断面積は、他の実験施設で得られている値とよく一致し、微分散乱断面積の絶対値測定が可能であることが確認できた。

平成 12 年度には、スペクトロメータ入口に MWDC 検出器を加える改良を行なった後、 $^{90}\text{Zr}(n, p)^{90}\text{Y}$  反応の微分散乱断面積と偏極分解能の本測定を行う予定である。

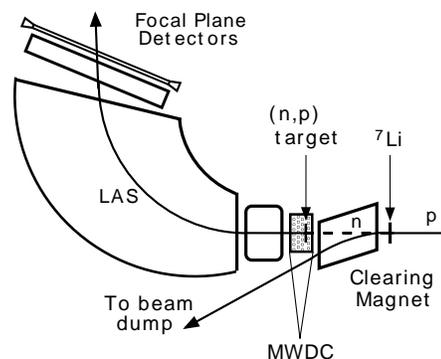


図 2.1 e: An illustration of the  $(n, p)$  facility. Polarized neutron beams are produced by the  $^7\text{Li}(p, n)$  reaction. The momentum of emitted protons is analyzed by the large acceptance spectrometer (LAS).

#### 中性子-重陽子散乱測定用の重陽子化ポリエチレン標的の製作

近年、核子三体系における三体力の研究が世界的な注目を集めている。中間エネルギー領域における偏極重陽子-陽子弾性散乱の精密測定から、三体力の発現を裏付ける重要な成果が出ている (次節参照)。しかし比較を行っている三体力を含むファデーエフ理論計算では、主に計算の困難さからクーロン力を取り入れることができていない。我々は、クーロン力による不定性を除去するため、クーロン力を含まない三体系散乱である偏極中性子-重陽子弾性散乱の断面積および偏極分解能の測定を計画している。実験

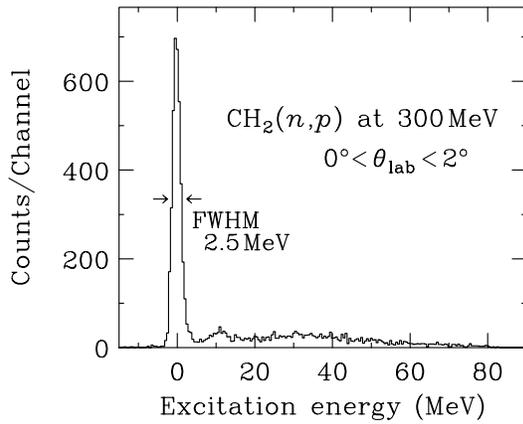


図 2.1 f: A spectrum measured by the  $\text{CH}_2(n,p)$  reaction.

には前節で説明されている  $(n,p)$  測定施設を用いる。この実験の標的として用いるための、重陽子化ポリエチレン ( $\text{CD}_2$ ) の製作を行なった。

標的として用いるためには、 $\text{CD}_2$  粉末を融解し、均一な厚さでディスク状に固めることが必要である。 $\text{CD}_2$  は、熱伝導度が悪く融解しづらい、溶媒に溶けにくいなど、成形を困難とする性質があることに加えて、重合過程の制御がポリエチレン ( $\text{CH}_2$ ) より難しく、製品により物性値 (融点、粘度など) が大きく異なるという困難さがある。また、温度を上げすぎると茶色く変色してしまう性質がある。これらの困難を克服するため、我々は油回転ポンプに繋ぐフランジのついた SUS 製の治具を製作した。 $\text{CD}_2$  粉末を治具中に入れて窒素を充填した状態で加熱し、目標温度に達したら気泡の発生を防ぐため真空に引きながら、ピストンで  $100 \text{ kgf/cm}^2$  の圧力で押しつける。この状態で 60 時間加熱した後、冷まして固化させる。成形後の標的を取り出し易くするために、治具の内面にはテフロン加工を施している。この方法で  $0.3\sim 4.0 \text{ mm}$  厚の標的製作に成功した。製作したディスクの大きさは  $47\times 37 \text{ mm}^2$  程度で、標的とする中心部  $30\times 20 \text{ mm}^2$  で厚さの一様性として  $\pm 20 \mu\text{m}$  が得られた。これらの諸量は本実験の要請を十分に満たすものである。

### 2.1.7 偏極重陽子-陽子弾性散乱の高精度測定と三体力 (酒井研)

原子核の持つ様々な性質は、核を構成する核子間の相互作用の問題に帰着する。この核子間相互作用を調べる上で、少数核子系の束縛状態や散乱状態の研究が長年に渡り行われて来た。特に三核子以上の系では、二核子間力のみでは表すことのできない三体力の効果が現れることが理論的にも予言されており、核物理の重要なテーマの一つとなっている。二核子間力のみからなる三体系は、ファデーエフ理論

を用いることで厳密に記述することができるが、近年の理論と計算技術の進歩により、三体力のモデルを入れたファデーエフ計算が中間エネルギー領域においても可能になってきた。我々は、中間エネルギー領域における重陽子-陽子弾性散乱の高精度測定を行い、これらの理論計算との比較により、三体力の効果を調べる研究を行った。

実験は、理化学研究所のリングサイクロトロン施設で行なった。140, 200, 270 MeV の偏極重陽子ビームを用い、広い散乱角度範囲 ( $\theta_{\text{c.m.}} = 10^\circ - 180^\circ$ ) に渡って微分断面積および偏極分解能 ( $A_y, A_{yy}, A_{xx}, A_{xz}$ ) を測定した。微分断面積については、統計誤差 1.3% 以下、系統誤差 2% (標的厚およびビーム電荷量の不定性) と、従来にはない高精度なデータを取得した。

重陽子エネルギー 270 MeV での測定結果を図 2.1 g に示す。曲線は最も現実的な 5 種類の二体力を用いたファデーエフ計算で、細線は三体力を入れない場合、太線はツーソンメルボルン型の三体力を入れた場合の計算である。クーロン力は取り入れられていない。微分断面積については、三体力を含まない計算結果が、最小値をとる角度範囲で実験値を大きく下回っている。一方で、三体力を加えた計算結果は、微分散乱断面積を見事に再現することが分かった。前方角度での実験値は完全には再現していないが、前方角ではクーロン力の効果が無視できないためであると考えられている。これに対して、偏極分解能については、理論値が実験値を必ずしも再現しているとは言えない。このことから、現在取り扱っている三体力のスピン依存部分に問題のある事が示唆される。

次に我々は、三体力の中のスピン・スピン相互作用に敏感な観測量として偏極移行量の測定を行った。偏極重陽子ビームのエネルギーは 270 MeV、測定量は偏極移行係数  $K'_{xx}, K'_{yy}, K'_{xz}$  および偏極能  $P^{y'}$  である。放出陽子の偏極度を測定するため、重陽子偏極度計として開発された DPOL を用いた。

得られた結果を図 2.1 h に示す。図の曲線の定義は図 2.1 g と同じである。 $K'_{yy}$  と  $K'_{xz}$  では、三体力を入れた計算が実験値を比較的良好に再現している。しかし  $K'_{xx}$  ではむしろ三体力を入れない計算が実験値を再現しており、 $P^{y'}$  では両者とも実験値を再現していない。現在の三体力モデルでは、スピンに依存する相互作用の記述にまだ問題があることが示される結果となった。

### 2.1.8 $^{26}\text{Mg}(^3\text{He}, t)^{26}\text{Al}^*(1^+)$ 反応のスピン反転確率測定による $^3\text{He}-n$ 有効相互作用の研究 (酒井研)

核子の複合体である原子核同志の反応を記述するには、入射核・標的核の全ての核子間の相互作用を考慮しなければならない。このような核-核反応が核子間相互作用で正しく記述できるかどうかは興味深い問題である。別の手法として、例えば  $(^3\text{He}, t)$  反

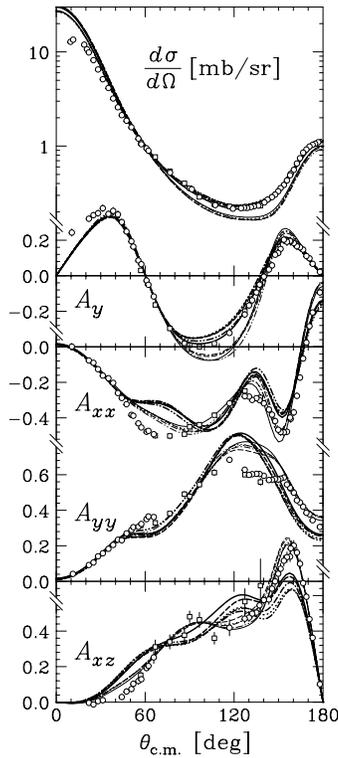


図 2.1 g: Cross sections and analyzing powers  $A_y$ ,  $A_{xx}$ ,  $A_{yy}$  and  $A_{xz}$  for the  $d$ - $p$  elastic scattering at 270 MeV with statistical errors. Thin (thick) lines are results of the Faddeev calculations without (with) Tucson Melbourne three body force using  $NN$  forces of CD Bonn (solid), AV18 (dashed), Nijmegen I (dotted), Nijmegen II (dot-dashed) and Nijmegen 93 (dot-dot-dashed).

応の場合では、三核子からなる  ${}^3\text{He}$  原子核を一つの粒子として扱い、 ${}^3\text{He}$  と標的核内核子との有効相互作用によって記述するという方法がある。

我々は後者の手法を用い、 $({}^3\text{He}, t)$  反応の特にスピン依存項を研究することを試みた。この項に敏感な測定量としてスピン反転確率がある。 $({}^3\text{He}, t)$  反応のスピン反転確率測定は通常の方法では困難であるが、我々はポーアの定理を利用し  $\gamma$  崩壊の同時測定を用いて 177 MeV での  ${}^{26}\text{Mg}({}^3\text{He}, t){}^{26}\text{Al}^*(1^+; 1.058\text{MeV})$  反応のスピン反転確率の測定に成功した。詳しくは昨年度の年時報告に記載している。本年度は、同反応と弾性散乱の微分散乱断面積を測定し、スピン反転確率と合わせて実験結果の解析を行なった。

結果を図 2.1 i に示す。曲線は歪曲波ボルン近似 (DWBA) による計算である。同計算の入力には van der Werf らによって求められた  ${}^3\text{He}$ - $n$  有効相互作用を用いている。この有効相互作用はスピン-スピン力とテンソル力で構成されており、 $({}^3\text{He}, t)$  反応の微分

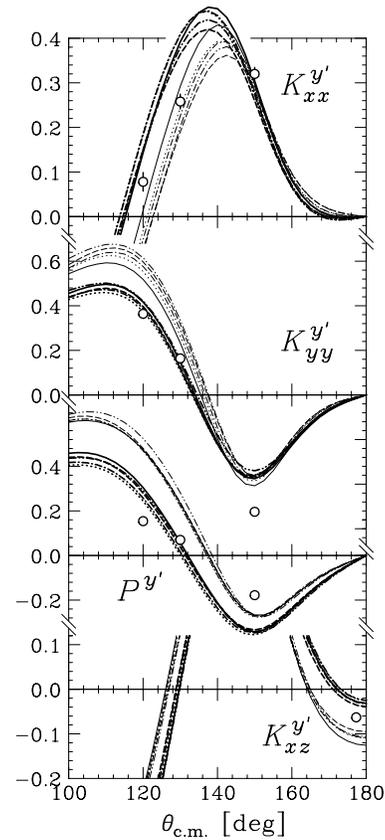


図 2.1 h: Polarization transfer coefficients  $K_{xx}^{y'}$ ,  $K_{yy}^{y'}$ ,  $K_{xz}^{y'}$  and induced polarization  $P^{y'}$  for the  $d$ - $p$  elastic scattering at 270 MeV with statistical errors. The definition of the curves is the same as Fig. 2.1 g.

散乱断面積の測定データを基に、エネルギー依存のパラメータを決めている。計算結果は実験値、特にスピン反転確率を再現していない。

この理由として、まず第一にエネルギー領域の違いが考えられる。使用した有効相互作用は入射エネルギー 66–90 MeV の領域の実験データから求められたものであり、我々が行った 177 MeV の実験には適していない可能性がある。ただし、パラメータの値を変えた計算の試行では、スピン反転確率と微分散乱断面積の両方を再現する解は見つかっていない。他に、同有効相互作用ではスピン軌道力が無視されていること、各項が一つのレンジの湯川型で記述されていることから、過度に単純化されていることが原因である可能性がある。また、 ${}^3\text{He}$  原子核が点粒子であるとする仮定に原因がある可能性もある。これらの可能性をふくめて、実験結果を再現する有効相互作用の検討を進める。

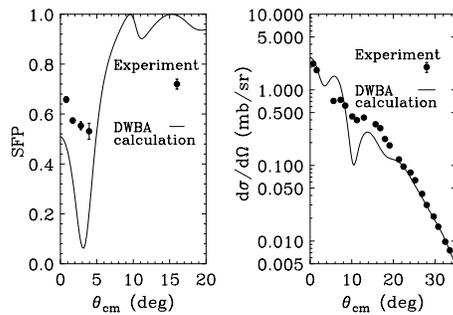


図 2.1 i: Measured spin-flip probabilities (left panel) and differential cross sections (right panel) for the  $^{26}\text{Mg}(^3\text{He}, t)^{26}\text{Al}^*(1^+)$  reaction at 177 MeV. Solid lines show the results of DWBA calculations.

### 2.1.9 $^{11}\text{Be}$ 原子核のスピン・アイソスピン励起の研究 (酒井研)

$(d, ^2\text{He})$  反応による  $^{11}\text{Be}$  原子核のスピン・アイソスピン励起の測定結果について詳細な解析を行った。 $^{11}\text{Be}$  原子核は、 $^{10}\text{Be}$  原子核に中性子一つが弱く結合して大きな半径をもつ、中性子ハローと呼ばれる構造をしていると考えられている。このような原子核では、巨大双極子遷移の強度の増大や励起エネルギー分布の低エネルギーへのシフトといったような、中性子ハローによる効果が存在することが予想されている。従って、巨大双極子遷移の測定結果と殻模型などの理論計算との比較から、中性子ハローが原子核の構造に与える影響を調べることができると期待される。

実験は理化学研究所にて行った。270 MeV の偏極重陽子ビームを用い、スペクトログラフ SMART の第一焦点面にて散乱粒子の  $^2\text{He}$  を測定した。微分散乱断面積、ならびにベクトル、テンソル偏極分解能  $A_y, A_{yy}, A_{xx}$  を 0 度から 13 度の散乱角度範囲で得ることができた。図 2.1 j(a) に、散乱角 0-2 度における微分散乱断面積の励起エネルギー分布を示す。

各励起状態の微分散乱断面積の角度分布と DWBA 計算との比較から、遷移した軌道角運動量を同定した。図 2.1 j(b)、(c) はそれぞれ、得られたガモフテラー (GT) 遷移強度、スピン反転巨大双極子 (SFD) 遷移強度と、殻模型計算との比較をである。理論計算は、PSDMK2 型相互作用ならびに、Cohen-Kurath (CK) 型相互作用を用いて行った。双極子遷移強度は Hoshino らの計算<sup>1)</sup>を用いた。ガモフテラー遷移では中性子ハローの影響はみられず、CK 型相互作用で実験値を再現することができた。一方、双極子遷移では、中性子ハローによる低励起エネルギーへのシフトが確認された。双極子遷移強度の大きさは、理論計算によると中性子ハローの効果を入れた方が 20%ほど大きくなり、実験値により近づくという結果が得られた。この結果から、中性子ハローの双極子遷移への影響が確認され、殻模型計算との比較が

ら中性子ハローの波動関数に関する情報が得られた。  
1) T. Hoshino *et al.*, Nucl. Phys. **A523**, 228 (1991).

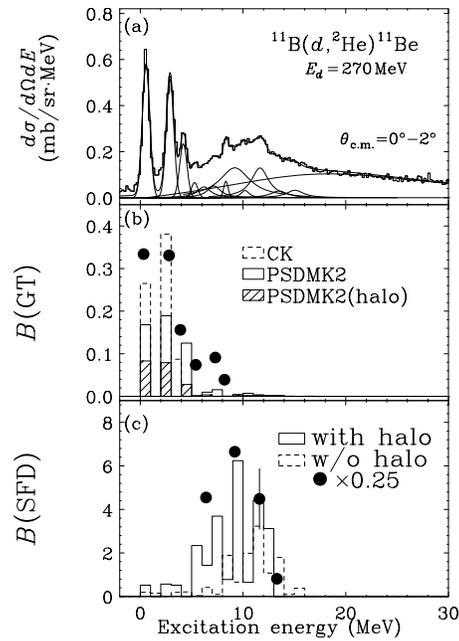


図 2.1 j: (a) Spectrum of the differential cross section at  $\theta_{\text{c.m.}} = 0^\circ\text{--}2^\circ$ . Solid lines are results of peak fitting. (b)  $B(\text{GT})$  for  $^{11}\text{Be}$  nucleus. The histograms are the calculations with the PSDMK2 interaction with (shaded) and without (solid) the halo effect, and with the CK interaction (dashed). (c)  $B(\text{SFD})$  for  $^{11}\text{Be}$  nucleus. The solid (dashed) histogram is the calculation with (without) the halo effect.

### 2.1.10 $^{12}\text{C}(\bar{p}, \bar{n})^{12}\text{N}$ 反応によるスピン反転双極子巨大共鳴の研究 (酒井研)

原子核物理学の重要な研究課題の一つに、原子核の集団運動によって引き起こされる巨大共鳴がある。巨大共鳴は共鳴状態を励起するオペレータ ( $\tau, \sigma\tau$  等) と励起状態への遷移量子数 ( $\Delta J, \Delta L, \Delta S, \Delta T$ ) で特徴づけられる。この中で、スピン反転双極子巨大共鳴 (SDR) はオペレータ ( $rY_1\sigma\tau$ )、遷移量子数  $\Delta L=1, \Delta S=1, \Delta T=1$  を持ち、 $0^+$  核からの励起状態としては  $J^\pi = 0^-, 1^-, 2^-$  の三通りが考えられる。この  $J$  による分離は困難な場合が多い。

$^{12}\text{N}$  の励起状態では Yang や Anderson らによる  $(p, n)$  反応の研究などから 4 MeV 付近の共鳴状態は  $2^-$  と  $4^-$  の二つから、7 MeV 付近の共鳴状態は  $1^-$  から主に構成されると考えられて来た。しかし、

近年 Okamura らによる  $^{12}\text{C}(d, ^2\text{He})$  反応による研究から、鏡像核  $^{12}\text{B}$  の対応する励起状態の主成分が  $2^-$  であることが報告された。この後 Ichihara らによる  $^{12}\text{C}(^{13}\text{C}, ^{13}\text{N})$  反応では  $2^-$  成分が、Inomata らによる崩壊粒子との核相関測定からは  $1^-$  成分が主であることが報告されており、結果は混沌としている。我々は  $^{12}\text{C}(p, n)$  反応の散乱角  $0^\circ$  での偏極移行量の完全セットの測定により、 $^{12}\text{N}$  核の励起状態の  $J^\pi$  分離を試みた。

実験は大阪大学核物理研究センターの中性子実験施設を用いて行った。歪曲波の影響がもっとも小さいと考えられる  $300\text{ MeV}$  での偏極陽子ビームを  $^{12}\text{C}$  標的に照射し、 $0^\circ$  に放出される中性子を中性子偏極度計 NPOL2 によって検出してエネルギーと偏極度を測定した。

$0^\circ$  での  $(p, n)$  反応の偏極移行量には次の二つの関係式が成り立つ。

1.  $\Sigma \equiv \{3 - (2D_{NN} + D_{LL})\}/4$  はスピン反転 ( $\Delta S=1$ ) 励起の場合 1 に、スピン非反転 ( $\Delta S=0$ ) の場合 0 になる。
2. 平面波インパルス近似のもとで、 $(1 + D_{LL})/2$  は自然パリティ遷移の場合  $+D_{NN}$  に、非自然パリティ遷移の場合  $-D_{NN}$  に等しくなる。

$0^\circ$  の寄与は小さいと考えられるので、 $7\text{ MeV}$  の励起状態が  $1^- (\Delta S=0)$ ,  $1^- (\Delta S=1)$ ,  $2^- (\Delta S=1)$  の三つからなると仮定して、上記の二つの関係式から分離を試みた。結果はそれぞれ  $0.08$ ,  $0.17$ ,  $0.75$  となった。このことから、 $^{12}\text{N}$  核の  $7\text{ MeV}$  の励起状態の主成分が SDR の  $2^-$  であることが結論付けられた。

### 2.1.11 高温・低磁場での偏極陽子固体標的の開発 (酒井研)

自然界に安定に存在しない不安定核のなかには、中性子ハローや、中性子スキンに代表される特殊な構造を持つものがみつかっており、多くの関心を集めている。偏極陽子標的と逆運動学を用いて不安定核-陽子散乱の偏極分解能等のスピン依存量を測定することにより、不安定核の構造や性質などの情報を引き出すことができると期待される。

一般的な偏極陽子固体標的は、動的核偏極法によって陽子を偏極する。これは、熱平衡状態での電子偏極をマイクロ波の照射によって陽子に移す方法である。この方法では高い電子の偏極を得るために極低温および高磁場が必要であり、また標的中の局所磁場の影響を克服するためにも高磁場が必要である。しかし我々が目的とする実験では、低い運動量をもった反跳陽子のエネルギーや角度の分布を精度良く測定することが必要であるため、高磁場は適さない。そこで我々は、新しい動的核偏極法である Integrated Solid Effect (ISE) 法を用いることにした。 $3\text{ kG}$ 、 $77\text{ K}$  の条件下で  $30\%$  以上の陽子偏極をえることを目標としている。

標的にはペンタセン ( $\text{C}_{22}\text{H}_{14}$ ) をドーブしたナフタレン ( $\text{C}_{10}\text{H}_8$ ) および p-タフェニール ( $\text{C}_{18}\text{H}_{14}$ ) の単

結晶を用いる。ナフタレンまたは p-タフェニールを、ゾーンメルティング法による純化した後、ペンタセンを混ぜ、ブリッチマン法によって単結晶化させて標的とする。標的中のペンタセン分子をパルスレーザーで励起すると、高い重項状態からの脱励起の過程で約  $2\%$  ほどが三重項状態に遷移する。この遷移過程で、ペンタセン分子の  $\pi$  電子が、温度や磁場に依らず電子偏極する。この電子偏極を ISE 法によって陽子に移す。ISE 法では、ポンピングレーザーのパルス幅の間にマイクロ波を照射しながら、局所磁場の領域で外磁場の掃引を行なう。実験装置の概図を図 2.1 k に示す。

現在ホスト化合物の純化、ナフタレンの単結晶化には成功しており、ペンタセンをドーブした状態での単結晶生成を試みている。磁石とレーザーシステムは既に使用可能であり、マイクロ波装置と ISE 法を行なう実験装置の調整を進めている。

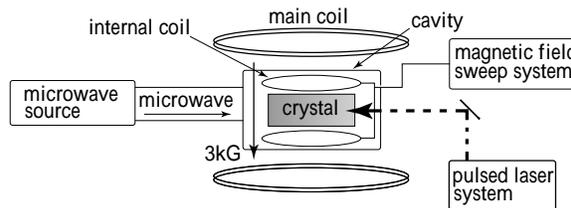


図 2.1 k: The outline of the polarized proton target system.

### 2.1.12 CERN の反陽子減速器 (AD) における反陽子ヘリウム原子の分光 (早野研)

我々は、1993年から1996年まで、CERNの低速反陽子リング (LEAR) から得られる反陽子ビームを用いて、反陽子ヘリウム原子のレーザー共鳴実験を行ってきた。LEARは、1996年末に閉鎖されたが、今年度は、3年間の準備期間を経て、1999年12月に稼働を始めたCERNの反陽子減速器 (AD) から取り出される低速の反陽子ビームを用いた反陽子ヘリウム原子の分光実験の準備を進めた。反陽子をヘリウム中に止めると数%の確率でヘリウム原子核、反陽子、電子からなる三体系が作られる。:  $\text{He}^{++} - \bar{p} - e^-$  (短く書くと  $\bar{p}\text{He}^+$ )。これが反陽子ヘリウム原子である。反陽子は、高い励起状態 (主量子数  $N \approx 38$ ) に束縛され数マイクロ秒の間、ヘリウム原子核の中の核子との対消滅をのがれ、準安定状態を形成する。準位間のエネルギー差に対応する特定の波長のレーザー光パルス照射すると準安定準位から短寿命準位への遷移が誘起される。この時、反陽子の対消滅が起こりパイ中間子が放出される。このパイ中間子の放出を測定すれば、レーザー光パルスの照射されたタイミングに数ナノ秒のシャープな放出ピークが

観測される。12月の実験では、既に知られている波長 597.259 nm のレーザー共鳴を再確認することができた(図 2.11)。2000年の夏からは、より高精度のレーザー共鳴の観測とマイクロ波分光実験を始める予定である。

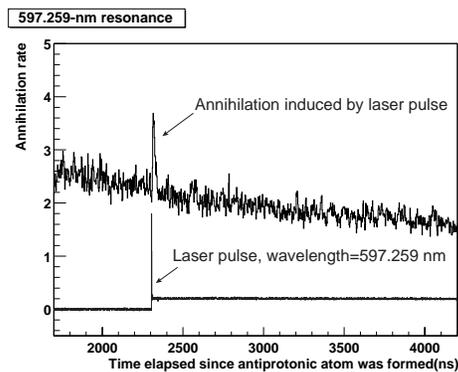


図 2.11: First time spectrum of delayed annihilation of antiprotons at the AD. The spike is the re-observation of a laser resonance previously discovered at LEAR.

### 2.1.13 反陽子ヘリウム原子のカスケード過程の解明 (早野研)

負の電荷を持った重たい粒子(反陽子  $\bar{p}$  や  $\pi^-$  中間子、 $K^-$  中間子、 $\mu^-$  等)を水素や鉛等、あらゆる媒質中に止めると、通常の原子を取り巻く電子と置換して、エグゾチック原子( $\bar{p}p$ 、 $\pi\text{He}$  等)が生成する。こうしたエグゾチック原子の大きさ(つまり、捕獲された  $\bar{p}$  や  $\pi^-$  の原子軌道の空間的な広がり)は、置換反応する前の水素原子や鉛原子と同程度だと信じられてきた。例えば反陽子ヘリウム原子( $\bar{p}\text{He}^+$ )の場合は、主量子数  $n \sim 38$  の軌道がこの条件に対応する。しかし、今までこれらの事柄を実験的に検証する手段がなかった。

本研究では、反陽子ヘリウム原子が生成時に、どのような結合エネルギーと角運動量をもっているかをレーザー分光法によって系統的に調べた。その結果、多くの原子が確かに主量子数  $n = 37-40$  付近に局在している事を解明した。今後は、新型の大強度紫外線レーザーや赤外線レーザー装置を用いて、主量子数  $n = 28$  程度の深く束縛されたエネルギー準位や、 $n \geq 42$  の高励起状態を探索する予定である。この研究は、堀正樹の博士論文としてまとめられた。

### 2.1.14 CERN-AD における反水素生成実験

#### —ATHENA—(早野研)

CPT 対称性の精密検証は現代物理学の基本課題の一つである。我々は新たに建設された CERN の反陽子減速施設 AD において反水素を用いた CPT 対称性検証へ向けた研究を開始した(AD-1:ATHENA 実験)。これまで既に、CERN - LEAR および、Fermilab において高速の反水素が生成されているが、これらはほぼ生成と同時に消滅しており、精密な測定を行うことはできなかった。我々は、まず大量の反水素を超低速で生成することを第一の目標としている。

このために、AD からの 100 MeV/c の反陽子をペニングトラップで捕獲し、電子冷却をほどこす。これとは別に陽電子を捕獲・蓄積し、これらを再結合トラップに導くことによって反水素を合成する。生成された中性の反水素はトラップポテンシャルを感じないため、トラップ壁に衝突し、そこで反陽子および陽電子がほぼ同時に消滅する。反陽子消滅によるパイオン軌跡をシリコンバックス検出器でトラックし、陽電子消滅の back-to-back 511 keV ガンマ線を位置に敏感な CsI 結晶で検出することにより、反水素生成事象を再構築する。

1999年12月には、ADからの初めてのテストビームを用いたテスト実験を行った。反陽子ビームをPPACでモニターし反陽子消滅の信号をシンチレーターで検出することによって、反陽子がトラップ磁石内まで注入されたことを確認した。今後、検出・データ収集・解析系およびトラップ制御系の開発改良を進め、2000年度のビームタイムではまず大量の反陽子トラップし、トラップ条件を最適化するための実験を行う予定である。

### 2.1.15 反陽子ヘリウム原子の超微細構造の理論計算 (早野研)

反陽子ヘリウム原子の超微細構造の精密分光から、これまでに 0.3% の精度で決定されている反陽子の磁気モーメントを改善するために、超微細構造の理論計算をおこなった。

理論計算は次の手順に従っておこなった。

(i) 量子電磁気学に基づいて、反陽子ヘリウム原子の内部構造を記述する相対論的ハミルトニアンを定義する。

Foldy-Wouthuysen 変換を通じてハミルトニアンを非相対論化する。ここで導出されるスピン依存相互作用項を、超微細構造を記述する演算子として定義する。

(ii) 非断熱組替えチャンネル法に基づいて波動関数を作成し、超微細構造を計算する。(iii) 超微細構造を正確に計算するためには、電子と反陽子間の相関効果を正確に波動関数に取り入れなければならない。そこで、相関効果の寄与を議論し、波動関数を改良する。

そして、必要な計算精度を達成するまで (ii) と (iii) を繰り返す。

現在、100 ppm の理論精度を達成している。従って反陽子の磁気モーメントを 1 桁改良することができる。更に 1 桁理論精度を改良すれば、反陽子の内部電磁構造を議論できる可能性がある。

### 2.1.16 ハイパー核の $\gamma$ 線分光 (早野研)

原子核内に核子以外のバリオン ( $\Lambda, \Sigma, \Xi$  等) が結合しているような系をハイパー核と呼ぶ。ハイパー核研究は通常の原子核におけるそれと比べて大きく遅れているのが現状であるが、 $\gamma$  線分光実験はゲルマニウム検出器を使用することにより極めて高いエネルギー分解能が得られることからこの現状を打破する突破口として期待されている。しかしながら、実験的な困難から、これまでのところハイパー核からの  $\gamma$  線が同定された例はわずかに 5 例を数えるのみであり、そのいずれもがエネルギー分解能においておとる NaI 検出器によってなされたものであった。

我々は、特別なエレクトロニクスを用いることによって、ゲルマニウム検出器がハイパー核実験のために使用できることを確認し、ハイパー核実験では世界で初めてとなる 14 台のゲルマニウム検出器と BGO アンチコンプトンサプレッサーからなる本格的なゲルマニウム検出器システム (Hyperball) を建設した。ハイパーボールを用いた最初の実験として、我々は KEK-PS において  ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$  の  $\gamma$  線分光実験を、また、BNL-AGS においては、 ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$  の  $\gamma$  線分光実験を行った。

今年度は KEK の実験の解析を終了し、その結果は谷田聖の博士論文にまとめられた。この実験においては、 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$  からの  $\gamma$  線を 2 本観測し、それぞれ  $M1(3/2^+ \rightarrow 1/2^+)$  および  $E2(5/2^+ \rightarrow 1/2^+)$  遷移によるものと同定した。これはゲルマニウム検出器を用いてハイパー核の  $\gamma$  線を観測・同定した世界で初めての例である。前者の  $\gamma$  線のエネルギーは、 $691.7 \pm 0.6 \pm 1.0$  keV と決定され、これにより  $\Lambda N$  間に働くスピン-スピン相互作用の強さが確立した。また、後者の  $\gamma$  線のエネルギーは  $2050.1 \pm 0.4 \pm 0.7$  keV と得られた。このエネルギーの決定精度はハイパー核の実験における世界最高記録を 1 桁以上更新している。さらに、このピークの形から、 $E2(5/2^+ \rightarrow 1/2^+)$  遷移の換算遷移確率が  $B(E2) = 3.6 \pm 0.5^{+0.5}_{-0.4} e^2\text{fm}^4$  と得られた。これによって、 $\Lambda$  粒子の存在によって  ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$  が  ${}^6\text{Li}$  よりも縮む効果 ( $\Lambda$  の “glue-like role”) が実験的に検証された。

### 2.1.17 有限密度下での中間子の質量変化の研究 (早野研)

核物質中に於ける中間子の質量変化の問題は現代の核物理に於ける主要な関心事の一つである。中間子と原子核の束縛系はこれを実験的に研究する為の優れたアプローチと考えられる。パイ中間子原子は、

中間子と原子核の束縛系で生成が基本的且つもっとも重要な系として、永く研究が行なわれて来た。しかし従来のパイ中間子を標的中に打ち込む手法では、核物質中でのパイ中間子の質量変化の確たる証拠は得られていなかった。

1996 年我々は世界で初めて  ${}^{208}\text{Pb}(d, {}^3\text{He})$  核子ピックアップ反応を用いた新しい手法で、鉛原子核中に深く束縛されたパイ中間子原子を生成することに成功し、その生成スペクトルの解析からパイ中間子の質量が原子核中では約  $20\text{MeV}/c^2$  程重くなっている事を突き止めた。

これに続いて 1998 年暮れに我々は、 ${}^{206}\text{Pb}(d, {}^3\text{He})$  反応を用いた、より高精度な実験と詳細な解析を行ない、前回に比べて約 3 倍の精度でパイ中間子の核物質中に於ける質量を決定した。

引き続き、我々は、中間子の原子核中での質量変化を同様の手法を用いて研究する予定である。

### 2.1.18 超低速反陽子ビーム源としてのペニングトラップの開発 (早野研)

将来、反水素 ( $\bar{\text{H}}$ ) やプロトニウム ( $\bar{p}p$ ) 等の反陽子原子を大量に生成して、これらの原子の分光をおこなうには、10 eV 程度のエネルギーをもった大強度の単色反陽子ビームが不可欠であり、現在、ペニングトラップを用いて、このような反陽子ビーム源の開発を進めている。

ペニングトラップは直径 30 mm、全長 400 mm で、多数の円筒型電極を並べた構造をしており、円筒電極の中心軸方向に一樣な強磁場と深さ 10 ~ 100 V の調和振動子型の静電ポテンシャルによって荷電粒子 (電子、反陽子、等) を長時間閉じ込めることができる。また閉じ込められた荷電粒子はトラップからビーム状に引き出すことが可能である。

ペニングトラップに入射される高エネルギー ( $\sim 15$  keV) の反陽子は電子冷却法によって環境温度 ( $< 0.1\text{eV}$ ) まで冷却されるので、反陽子と相互作用する電子 (プラズマ) の状態を知ることが重要である。これまでに閉じ込められた電子数 ( $5 \times 10^6 \sim 3 \times 10^8$ ) と電子温度 (0.4 ~ 3 eV) の非破壊測定、及び電子密度の操作が可能であることが確認された。また、 $10^{6-7}$  個の  $\text{H}^-$  イオン ( $\sim 100\text{eV}$ ) を反陽子の代わりにトラップに入射し、電子冷却によって  $\text{H}^-$  イオンが冷却されることも確認した。その際、 $\text{H}^-$  イオンと電子の相互作用により電子温度が上昇するのも非破壊測定で確認されている。

今後は引き出されるビームの特性を評価するための実験と 50 keV の陽子を用いて減速材の最適化をする実験を行う予定である。

## 2.1.19 PHENIX:RHICにおける高エネルギー重イオン実験 (早野研)

米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の重イオン衝突型加速器 RHIC での大型実験 PHENIX では、2000年初夏の実験開始に向けて最終的な準備が進められている。この実験の目的は、通常のハドロン物質からクォーク・グルーオン・プラズマへの相転移を検出することである。

東大グループが担当しているリングイメージチェレンコフカウンター (RICH) は、一昨年一台目が完成したのに続いて、昨年度二台目が完成し、実験室にインストールされた。RICH の建設はこれで終了となる。

RICH の読み出し回路は、昨年度前半にプロトタイプテストが終了し、後半には本番用の製作が行なわれた。読み出し回路は BNL に送られ、実験装置にインストールされた。現在、PHENIX のデータ収集システムを用いての最終的なテストを進めている。

### <受賞>

- [1] 伊藤健靖、原子核談話会新人賞、原子核談話会・核物理委員会、1999年9月24日。
- [2] 鳥居寛之、原子核談話会新人賞、原子核談話会・核物理委員会、1999年9月24日。

### <報文>

#### (原著論文)

- [3] T. Wakasa, H. Sakai, K. Hatanaka, H. Okamura, H. Otsu, S. Fujita, T. Nonaka, T. Uesaka, Y. Satou, T. Ohnishi, G. Yokoyama, S. Ishida, N. Sakamoto, M.B. Greenfield, M. Ichimura, and K. Kawahigashi: Polarization transfer and spin response functions in quasielastic ( $\vec{p}, \vec{n}$ ) reactions at 346 MeV, Phys. Rev. C **59** (1999) 3177–3195.
- [4] A. Tamii, H. Akimune, I. Daito, Y. Fujita, M. Fujiwara, K. Hatanaka, K. Hosono, F. Ihara, T. Inomata, T. Ishikawa, M. Itoh, M. Kawabata, T. Kawabata, M. Nakamura, T. Noro, E. Obayashi, H. Sakaguchi, H. Takeda, T. Taki, H. Toyokawa, H.P. Yoshida, M. Yoshimura, and M. Yosoi: Polarization Transfer Observables for Proton Inelastic Scattering from  $^{12}\text{C}$  at  $0^\circ$ , Phys. Lett. B **459** (1999) 61–66.
- [5] T. Uesaka, H. Sakai, H. Okamura, T. Ohnishi, Y. Satou, S. Ishida, N. Sakamoto, H. Otsu, T. Wakasa, K. Itoh, K. Sekiguchi, and T. Wakui: Polarization Correlation Coefficient for the  $^3\text{He}(\vec{d}, p)^4\text{He}$  Reaction, Phys. Lett. B **467** (1999) 199–204.
- [6] T. Suzuki and H. Sakai: The Landau-Migdal parameters,  $g'_{NN}$  and  $g'_{N\Delta}$ , Phys. Lett. B **455** (1999) 25–29.
- [7] A. Krasznahorkay, M. Fujiwara, P. van Aarle, H. Akimune, I. Daito, H. Fujimura, Y. Fujita, M.N. Harakeh, T. Inomata, J. Jänecke,

S. Nakayama, A. Tamii, M. Tanaka, H. Toyokawa, W. Uijen, and M. Yosoi: Excitation of Isovector Spin-Dipole Resonance and Neutron Skin of Nuclei, Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 3216–3219.

- [8] K. Krueger, C. Allgower, T. Kasprzyk, H. Spinka, D. Underwood, A. Yokosawa, G. Bunce, H. Huang, Y. Makdisi, T. Roser, M. Syphers, N.I. Belikov, A.A. Derevschikov, Yu.A. Matulenko, L.V. Nogach, S.B. Nurushev, A.I. Pavlinov, A.N. Vasiliev, M. Bai, S.Y. Lee, Y. Goto, N. Hayashi, T. Ichihara, M. Okamura, N. Saito, H. En'yo, K. Imai, Y. Kondo, Y. Nakada, M. Nakamura, H.D. Sato, H. Okamura, H. Sakai, T. Wakasa, V. Baturine, A. Ogawa, V. Ghazikhanian, G. Igo, S. Trentalange, and C. Whitten: Large Analyzing Power in Inclusive  $\pi^\pm$  Production at High  $x_F$  with a 22-GeV/c Polarized Proton Beam, Phys. Lett. B **459** (1999) 412–416.
- [9] Y. Fujita, H. Akimune, I. Daito, H. Fujimura, M. Fujiwara, M.N. Harakeh, T. Inomata, J. Jänecke, K. Katori, A. Tamii, M. Tanaka, H. Ueno, and M. Yosoi: Mirror-Symmetry Structure of  $A=27$ ,  $T=1/2$  Nuclei Studied Through Strong, Weak, and Electromagnetic Interactions, Phys. Rev. C **59** (1999) 90–100.
- [10] S. Nakayama, H. Akimune, Y. Arimoto, I. Daito, H. Fujimura, Y. Fujita, M. Fujiwara, K. Fushimi, H. Kohri, N. Koori, K. Takahisa, T. Takeuchi, A. Tamii, M. Tanaka, T. Yamagata, Y. Yamamoto, K. Yonehara, and H. Yoshida: Isovector Electric Monopole Resonance in  $^{60}\text{Ni}$ , Phys. Rev. Lett. **83** (1999) 690–693.
- [11] S. Nakayama, H. Akimune, I. Daito, H. Fujimura, Y. Fujita, M. Fujiwara, K. Fushimi, T. Inomata, K. Ishibashi, H. Kohri, N. Koori, K. Takahisa, A. Tamii, M. Tanaka, H. Toyokawa, and T. Yamagata: Gamow-Teller transitions in the ( $^7\text{Li}, ^7\text{Be}$ ) reaction at 65A MeV, Phys. Rev. C **60** (1999) 047303-01–04.
- [12] H. Ueno, Y. Fujita, H. Fujita, T. Shinada, Y. Kanzaki, M. Yosoi, A. Tamii, K. Takahisa, F. Ihara, H. Kohri, T. Yamagata, and K. Katori: ( $^6\text{Li}, ^6\text{He}$ ) reaction at 100 MeV/nucleon as a probe of spin-excitation strengths, Phys. Lett. B **465** (1999) 67–73.
- [13] M. Tanifuji, S. Ishikawa, Y. Iseri, T. Uesaka, N. Sakamoto, Y. Satou, K. Itoh, H. Sakai, A. Tamii, T. Ohnishi, K. Sekiguchi, K. Yako, S. Sakoda, H. Okamura, K. Suda, and T. Wakasa: Reaction Mechanism and Characteristics of  $T_{20}$  in  $d+^3\text{He}$  Backward Elastic Scattering at Intermediate Energies, Phys. Rev. C **61** (2000) 024602-01–08.
- [14] R. Bieber, W. Glöckle, J. Golak, M.N. Harakeh, D. Hüber, H. Huisman, N. Kalantar-Nayestanaki, H. Kamada, J.G. Messchendorp, A. Nogga, H. Sakai, N. Sakamoto, M. Seip, M. Volkerts,

- S.Y. van der Werf, and H. Witala: Three-Nucleon Force and the  $A_y$  Puzzle in Intermediate Energy  $\vec{p}+d$  and  $\vec{d}+p$  Elastic Scattering, *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 606–609.
- [15] R.S. Hayano, S. Hirenzaki, A. Gillitzer: Formation of  $\eta/\omega$ -mesic nuclei using the recoilless ( $d, {}^3\text{He}$ ) reaction, *Eur. Phys. J. A* **6** (1999) 99–105.
- [16] N. Yamanaka: Multiconfigurational Hartree-Fock calculations of the hyperfine structure constants for the  $1s^2 2s {}^2S$  and  $1s^2 2p {}^2P$  states of  ${}^7\text{Li}$  and  ${}^9\text{Be}^+$ , *J. Phys. Soc. Jpn.*, **68**, No.8 (1999) 2561–2569.
- [17] N. Yamanaka: Calculations of mass polarization for the  $1s^2 2s {}^2S$  and  $1s^2 2p {}^2P$  states in Li-like ions, *J. Phys. B.* **32** (1999) 1597–1605.
- [18] N. Yamanaka and A. Ichimura: Transverse Nuclear Polarization in Hydrogen-Like Ions, *Phys. Scr.*, **T80**, (1999) 488–490
- [19] L. Ahle, Y. Akiba, K. Ashktorab, M.D. Baker, D. Beavis, H.C. Britt, J. Chang, C. Chasman, Z. Chen, C.Y. Chi, Y.Y. Chu, V. Cianciolo, B.A. Cole, H.J. Crawford, J.B. Cumming, R. Debbe, J.C. Dunlop, W. Eldredge, J. Engelage, S.Y. Fung, E. Garcia, S. Gushue, H. Hamagaki, L.F. Hansen, R.S. Hayano, G. Heintzelman, E. Judd, J. Kang, E.J. Kim, A. Kumagai, K. Kurita, J.H. Lee, J. Luke, Y. Miake, A. Mignerey, B. Moskowitz, M. Moulson, C. Muentz, S. Nagamiya, M.N. Nambodiri, C.A. Ogilvie, J. Olness, L.P. Remsberg, H. Sako, T.C. Sangster, R. Seto, J. Shea, K. Shigaki, R. Soltz, S.G. Steadman, G.S.F. Stephans, M.J. Tannenbaum, J.H. Thomas, S. Ueno-Hayashi, F. Videbaek, F. Wang, Y. Wu, H. Xiang, G.H. Xu, K. Yagi, H. Yao, W.A. Zajc, F. Zhu (E802 Collaboration): Simultaneous multiplicity and forward energy characterization of particle spectra in Au+Au collisions at 11.6A GeV/c *Phys. Rev. C* **59** (1999) 2173–2188.
- [20] L. Ahle, Y. Akiba, K. Ashktorab, M. Baker, D. Beavis, P. Beery, H.C. Britt, B. Budick, J. Chang, C. Chasman, Z. Chen, C.Y. Chi, Y.Y. Chu, V. Cianciolo, B.A. Cole, J.J. Costales, H.J. Crawford, J.B. Cumming, R. Debbe, J.C. Dunlop, W. Eldredge, J. Engelage, S.Y. Fung, J. Gaardhoje, M. Gonin, S. Gushue, H. Hamagaki, A. Hansen, L. Hansen, O. Hansen, R.S. Hayano, S. Hayashi, G. Heintzelman, S. Homma, E. Judd, H. Kaneko, J. Kang, S. Kaufman, W.L. Kehoe, A. Kumagai, K. Kurita, R.J. Ledoux, M.J. LeVine, J. Luke, Y. Miake, D.P. Morrison, R.J. Morse, B. Moskowitz, M. Moulson, S. Nagamiya, M.N. Nambodiri, T.K. Nayak, C.A. Ogilvie, J. Olness, C.G. Parsons, L.P. Remsberg, D. Roehrich, P. Rothschild, H. Sako, H. Sakurai, T.C. Sangster, R. Seto, K. Shigaki, R. Soltz, P. Stankus, S.G. Steadman, G.S.F. Stephans, T.W. Sung, Y. Tanaka, M.J. Tannenbaum, J.H. Thomas, S.R. Tonse, S. Ueno-Hayashi, J.H. van-Dijk, F. Videbaek, O. Vossnack, V. Vutsadakis, F. Wang, Y. Wang, H.E. Wegner, D. Woodruff, Y. Wu, G.H. Xu, K. Yagi, X. Yang, D. Zachary, W.A. Zajc, F. Zhu, Q. Zhu (E802 Collaboration): Centrality dependence of kaon yields in Si + A and Au + Au collisions at relativistic energies, *Phys. Rev. C* **60** (1999) 044904-1–11.
- [21] R. Schmidt, F.J. Hartmann, B. Ketzer, T. von Egidy, T. Czosnyka, J. Jastrzebski, M. Kisielinski, P. Lubinski, P. Napiorkowski, L. Pienkowski, A. Trzcinska, B. Klos, B. Smolanczuk, S. Wycech, W. Poschl, K. Gulda, W. Kurcewicz, E. Widmann: Composition of the nuclear periphery from antiproton absorption using short-lived residual nuclei, *Phys. Rev. C* **60** (1999) 054309-1–9.
- [22] L. Ahle, Y. Akiba, K. Ashktorab, M.D. Baker, D. Beavis, H.C. Britt, J. Chang, C. Chasman, Z. Chen, C.Y. Chi, Y.Y. Chu, V. Cianciolo, B.A. Cole, H.J. Crawford, J.B. Cumming, R. Debbe, J.C. Dunlop, W. Eldredge, J. Engelage, S.Y. Fung, E. Garcia, S. Gushue, H. Hamagaki, L.F. Hansen, R.S. Hayano, G. Heintzelman, E. Judd, J. Kang, E.J. Kim, A. Kumagai, K. Kurita, J.H. Lee, J. Luke, Y. Miake, A. Mignerey, B. Moskowitz, M. Moulson, C. Muentz, S. Nagamiya, M.N. Nambodiri, C.A. Ogilvie, J. Olness, L.P. Remsberg, H. Sako, T.C. Sangster, R. Seto, J. Shea, K. Shigaki, R. Soltz, S.G. Steadman, G.S.F. Stephans, M.J. Tannenbaum, J.H. Thomas, S. Ueno-Hayashi, F. Videbaek, F. Wang, Y. Wu, H. Xiang, G.H. Xu, K. Yagi, H. Yao, W.A. Zajc, F. Zhu (E802 Collaboration): Proton and deuteron production in Au plus Au reactions at 11.6A GeV/c, *Phys. Rev. C* **60** (1999) 064901-1–16
- (会議抄録)
- [23] H. Sakai, T. Wakasa, H. Okamura, T. Nonaka, T. Ohnishi, K. Yako, K. Sekiguchi, S. Fujita, Y. Satou, H. Otsu, T. Uesaka, S. Ishida, N. Sakamoto, M.B. Greenfield, and K. Hatanaka: Gamow-Teller Strength in the Continuum and Quenching Problem, *Nucl. Phys.* **A649** (1999) 251c–259c.
- [24] Y. Satou, S. Ishida, H. Sakai, H. Okamura, H. Otsu, N. Sakamoto, T. Uesaka, T. Wakasa, T. Ohnishi, T. Nonaka, G. Yokoyama, T. Ichihara, T. Niizeki, and N. Nishimori: Study of Isoscalar Spin Strength via the  ${}^{12}\text{C}(\vec{d}, \vec{d}')$  Reaction, *Nucl. Phys.* **A649** (1999) 275c–278c.
- [25] T. Wakasa, H. Sakai, K. Hatanaka, H. Okamura, H. Otsu, S. Fujita, T. Nonaka, T. Uesaka, Y. Satou, T. Ohnishi, G. Yokoyama, S. Ishida, N. Sakamoto, M.B. Greenfield, M. Ichimura, and K. Kawahigashi: Polarization transfer and spin response functions in quasi-elastic ( $\vec{p}, \vec{n}$ ) reactions at 346 MeV, *Proc. Int. Symp. on Nuclear Responses and Medium Effects* (Universal Academy Press, Tokyo, 1999) pp. 45–51.

- [26] T. Suzuki, H. Sakai, and T. Tatsumi: The Landau-Migdal Parameters,  $g'_{NN}$  and  $g'_{N\Delta}$  and Pion Condensations, *ibid*, pp. 77–85.
- [27] A. Krasznahorkay, M. Fujiwara, P. van Aarle, H. Akimune, I. Daito, H. Fujimura, Y. Fujita, M.N. Harakeh, T. Inomata, J. Jänecke, S. Nakayama, A. Tamii, M. Tanaka, H. Toyokawa, W. Uijen, and M. Yosoi: Excitation of Isovector Spin-Dipole Resonance and Neutron Skin of Nuclei, *ibid*, pp. 91–96.
- [28] A. Tamii, H. Akimune, I. Daito, Y. Fujita, M. Fujiwara, K. Hatanaka, K. Hosono, F. Ihara, T. Inomata, T. Ishikawa, M. Itoh, M. Kawabata, T. Kawabata, M. Nakamura, T. Noro, E. Obayashi, H. Sakaguchi, H. Takeda, T. Taki, H. Toyokawa, H.P. Yoshida, M. Yoshimura, and M. Yosoi: Effective Interaction Observed by  $^{12}\text{C}(\bar{p}, \bar{p}')\text{Reactions at } 0^\circ$ , *ibid*, pp. 114–118.
- [29] K. Yako, H. Sakai, H. Okamura, A. Tamii, T. Wakasa, H. Otsu, T. Nonaka, T. Ohnishi, S. Fukusaka, K. Sekiguchi, and K. Hatanaka: Study of Effective  $NN$  Interaction in Nuclei via the  $^{28}\text{Si}(\bar{p}, \bar{n})^{28}\text{P}(6^-)$  Reaction at 295 MeV, *ibid*, pp. 135–139.
- [30] T. Taki, H. Sakaguchi, M. Yosoi, H. Takeda, A. Tamii, M. Itoh, T. Kawabata, T. Noro, H. Akimune, M. Yoshimura, T. Inomata, I. Daito, H. Yoshida, and E. Obayashi: Medium effects observed in proton elastic scattering from  $^{58}\text{Ni}$  at intermediate energies, *ibid*, pp. 150–159.
- [31] M. Yoshimura, M. Nakamura, H. Akimune, I. Daito, H. Itoh, M. Kawabata, T. Noro, H. Sakaguchi, H. Takeda, A. Tamii, K. Yonehara, H.P. Yoshida, and M. Yosoi: Elastic Proton Scattering from  $^4\text{He}$  at 300 MeV, *ibid*, pp. 160–164.
- [32] T. Noro, H. Akimune, H. Akiyoshi, I. Daito, H. Fujimura, K. Hatanaka, F. Ihara, T. Ishikawa, M. Itoh, M. Kawabata, T. Kawabata, Y. Maeda, N. Matsuoka, S. Morinobu, M. Nakamura, E. Obayashi, A. Okihana, K. Sagara, H. Sakaguchi, H. Takeda, T. Taki, A. Tamii, K. Tamura, H. Yamazaki, H. Yoshida, M. Yoshimura, and M. Yosoi: Nuclear Medium Effect Studied by Means of  $(p, 2p)$  Reactions, *ibid*, pp. 167–175.
- [33] K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Okamura, N. Sakamoto, A. Tamii, T. Uesaka, T. Wakasa, Y. Satou, T. Ohnishi, K. Yako, S. Fukusaka, S. Sakoda, K. Suda, H. Kato, Y. Maeda, K. Itoh, and T. Nizeki: Measurement of the cross sections and the vector and tensor analyzing powers for  $d-p$  elastic scattering at  $E_d=270$  MeV, *ibid*, pp. 193–197.
- [34] H. Sakai, T. Wakasa, H. Okamura, H. Otsu, T. Uesaka, N. Sakamoto, Y. Satou, and K. Hatanaka: Gamow-Teller strength in the continuum and quenching problem, *Nucl. Phys.* **A654** (1999) 731c-734c.
- [35] T. Uesaka, H. Sakai, H. Okamura, A. Tamii, Y. Satou, T. Ohnishi, N. Sakamoto, K. Itoh, K. Sekiguchi, K. Yako, S. Sakoda, K. Suda, and T. Wakasa:  $^3\bar{\text{He}}(\bar{d}, p)^4\text{He}$  Reaction at Intermediate energies, *Proc. RCNP Workshop on Spin Polarized Nuclear Fusions*, (RCNP, Japan, 1999) pp. 200–206.
- [36] F.J. Hartmann, T. Czosnyka, K. Gulda, J. Jastrzebski, B. Ketzer, M. Kisielinski, B. Klos, J. Kulpa, W. Kurcewicz, P. Lubinski, P. Napiorkowski, L. Pienkowski, R. Schmidt, R. Smolanczuk, A. Trzcinska, T. von Egidy, E. Widmann, S. Wycech: Antiprotonic atoms as a tool to study the nuclear periphery, contribution to the *fifth Biennial Conference on Low Energy Antiproton Physics (LEAP98)*, Villasimius, Cagliari, September 7–12, 1998, *Nucl. Phys.* **A655**, (1999) 289c-294c.
- [37] Y. Akiba, R. Begay, J. Burward-Hoy, R. Chappell, D. Crook, K. Ebisu, M.S. Emery, J. Ferrera, A.D. Frawley, H. Hamagaki, H. Hara, R.S. Hayano, T.K. Hemmick, M. Hibino, R. Hutter, M. Kennedy, J. Kikuchi, T. Matsumoto, C.G. Moscone, Y. Nagasaka, S. Nishimura, K. Oyama, T. Sakaguchi, S. Salomone, K. Shigaki, Y. Tanaka, J.W. Walker, A.L. Wintenberg, G.R. Young: Ring imaging Cherenkov detector of PHENIX experiment at RHIC, *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A* **433** (1999) 143–148.
- [38] E. Widmann: Antiprotonic atom formation and spectroscopy- ASACUSA experiment at CERN-AD, Invited talk presented at the *fifth Biennial Conference on Low Energy Antiproton Physics (LEAP98)*, Villasimius, Cagliari, September 7–12, 1998, *Nucl. Phys.* **A655**, (1999) 353c-362c.
- [39] R. Schmidt, T. Czosnyka, K. Gulda, F.J. Hartmann, J. Jastrzebski, B. Ketzer, B. Klos, J. Kulpa, W. Kurcewicz, P. Lubinski, P. Napiorkowski, L. Pienkowski, R. Smolanczuk, A. Trzcinska, T. von-Egidy, E. Widmann, S. Wycech: Determination of the proton and neutron densities at the nuclear periphery with antiprotonic X-rays and  $\bar{p}$ -nucleus reactions, Contribution to the *Monte Verita Workshop on Exotic Atoms, Molecules and Muon Catalyzed Fusion (EXAT'98)*, Ascona, July 19 - 24, 1998, *Hyperfine Interactions* **118**, (1999) 67–72.
- [40] S.N. Nakamura, K. Bartlett, G.A. Beer, G.R. Gill, R.S. Hayano, T.M. Ito, M. Iwasaki, L. Lee, G. Mason, A. Olin, H. Outa, M. Salomon, R. Seki, T. Taniguchi, T.P. Terada, G. Trayling, Y. Yamashita, S. Yen: Observation of kaonic hydrogen atom X-ray, *ibid*, pp.45–51.
- [41] C. Petrascu, S. Bianco, A.M. Bragadireanu, F.L. Fabbri, C. Guaraldo, M. Iliescu, T.M. Ito, V. Lucherini, M. Bregant, E. Milotti, A. Vacchi, E. Zavattini, M. Augsburg, D. Chatellard,

- P. Knowles, F. Mulhauser, L.A. Schaller, L. Schellenberg, H. Schneuwly, J.P. Egger, D. Varidel, W.H. Breunlich, M. Cargnelli, B. Gartner, R. King, R.S. Hayano, M. Hori, T. Ishikawa, T. Ishiwatari, M. Iwasaki, Y. Akaishi, G. Beer, A.C. Sanderson, R. Seki: Disentangling the K-complex of kaonic hydrogen with DEAR, *ibid*, pp.53–57.
- [42] G.M. Marshall, T.A. Porcelli, A. Adamczak, J.M. Bailey, G.A. Beer, M.P. Faifman, M.C. Fujiwara, T.M. Huber, R. Jacot-Guillarmod, P. Kammel, S.K. Kim, P.E. Knowles, A.R. Kunselman, M. Maier, V.E. Markushin, G.R. Mason, F. Mulhauser, A. Olin, C. Petitjean, J. Zmeskal: Resonant formation measurements of dt mu via time of flight, *ibid*, pp.89–101.
- [43] M.C. Fujiwara, A. Adamczak, J.M. Bailey, G.A. Beer, J.L. Beveridge, M.P. Faifman, T.M. Huber, R. Jacot-Guillarmod, P. Kammel, S.K. Kim, P.E. Knowles, A.R. Kunselman, M. Maier, V.E. Markushin, G.M. Marshall, C.J. Martoff, G.R. Mason, F. Mulhauser, A. Olin, C. Petitjean, T.A. Porcelli, J. Wozniak, J. Zmeskal: Time-of-flight spectroscopy of muonic tritium, *ibid*, pp.151–157.
- [44] T.M. Huber, A. Adamczak, J.M. Bailey, G.A. Beer, J.L. Beveridge, B.P. Ellerbusch, M.C. Fujiwara, R. Jacot-Guillarmod, P. Kammel, P.E. Knowles, A.R. Kunselman, G.J. Lindquist, M. Maier, V.E. Markushin, G.M. Marshall, C.J. Martoff, G.R. Mason, F. Mulhauser, A. Olin, C. Petitjean, T.A. Porcelli, J. Wozniak, J. Zmeskal: Time-of-flight studies of emission of mu t from frozen hydrogen films, *ibid*, pp.159–161.
- [45] A. Olin, A. Adamczak, G.A. Beer, V.M. Bystritsky, M. Filipowicz, M.C. Fujiwara, T.M. Huber, R. Jacot-Guillarmod, P. Kammel, S.K. Kim, P.E. Knowles, A.R. Kunselman, M. Maier, V.E. Markushin, G.M. Marshall, F. Mulhauser, C. Petitjean, T.A. Porcelli, V.A. Stolupin, J. Wozniak, J. Zmeskal: Study of mu-catalyzed fusion in H-D mixtures, *ibid*, pp.163–170.
- [46] E. Widmann: Measurement of the hyperfine structure of antiprotonic helium, Contribution to the *Monte Verita Workshop on Exotic Atoms, Molecules and Muon Catalyzed Fusion (EXAT'98)*, Ascona, July 19 - 24, 1998. *Hyperfine Interactions* **119**, (1999) 195–200.
- [47] F. Mulhauser, A. Adamczak, G.A. Beer, V.M. Bystritsky, M. Filipowicz, M.C. Fujiwara, T.M. Huber, R. Jacot-Guillarmod, P. Kammel, S.K. Kim, P. Knowles, A.R. Kunselman, M. Maier, V.E. Markushin, G.M. Marshall, A. Olin, C. Petitjean, T.A. Porcelli, V.A. Stolupin, J. Wozniak, J. Zmeskal: Scattering of muonic hydrogen atoms, *ibid*, pp.35–44.
- [48] J. Wozniak, A. Adamczak, G.A. Beer, V.M. Bystritsky, M. Filipowicz, M.C. Fujiwara, T.M. Huber, R. Jacot-Guillarmod, P. Kammel, S.K. Kim, P.E. Knowles, A.R. Kunselman, M. Maier, V.E. Markushin, G.M. Marshall, F. Mulhauser, A. Olin, C. Petitjean, T.A. Porcelli, V.A. Stolupin, J. Zmeskal: New effects in low energy scattering of p mu atoms, *ibid*, pp.63–69.
- [49] C. Guaraldo, S. Bianco, A.M. Bragadireanu, F.L. Fabbri, M. Iliescu, T.M. Ito, V. Lucherini, C. Petrascu, M. Bregant, E. Milotti, A. Vacchi, E. Zavattini, M. Augsburg, D. Chatellard, P. Knowles, F. Mulhauser, L.A. Schaller, L. Schellenberg, H. Schneuwly, J.P. Egger, D. Varidel, W.H. Breunlich, M. Cargnelli, B. Gartner, R. King, B. Lauss, J. Zmeskal, T. Ponta, S.N. Nakamura, T. Koike, R.S. Hayano, M. Hori, T. Ishikawa, T. Ishiwatari, M. Iwasaki, Y. Akaishi, G. Beer, A.C. Sanderson, R. Seki: The DEAR case, *ibid*, pp.253–261.
- [50] S. Bianco, A.M. Bragadireanu, F.L. Fabbri, C. Guaraldo, M. Iliescu, T.M. Ito, V. Lucherini, C. Petrascu, M. Bregant, E. Milotti, A. Vacchi, E. Zavattini, M. Augsburg, D. Chatellard, P. Knowles, F. Mulhauser, L.A. Schaller, L. Schellenberg, H. Schneuwly, J.P. Egger, D. Varidel, W.H. Breunlich, M. Cargnelli, B. Gartner, R. King, B. Lauss, J. Marton, J. Zmeskal, T. Ponta, S.N. Nakamura, T. Koike, R.S. Hayano, M. Hori, T. Ishikawa, T. Ishiwatari, M. Iwasaki, Y. Akaishi, G. Beer, A.C. Sanderson, R. Seki: The DEAR case, *RIVISTA-DEL-NUOVO-CIMENTO* **22** (11) (1999) 1–45.
- [51] H. Geissel, H. Gilg, A. Gillitzer, R.S. Hayano, S. Hirenzaki, K. Itahashi, M. Iwasaki, P. Kienle, M. Münch, G. Münzenberg, W. Schott, K. Suzuki, D. Tomono, H. Weick, T. Yamazaki, T. Yoneyama: Observation of well-resolved  $1s$  and  $2p \pi^-$  states in Pb by high resolution ( $d, ^3\text{He}$ ) spectroscopy, *15th International Conference on Particles and Nuclei (PANIC'99)* Uppsala, Sweden, 10–16 June, 1999, *Nucl. Phys.* **A663&664** (2000) 206c–209c.
- [52] R.S. Hayano, J. Eades, T. von Egidy, F.J. Hartmann, M. Hori, D. Horvath, T. Ishikawa, B. Ketzer, M. Kumakura, C. Maierl, N. Morita, R. Pohl, I. Sugai, H.A. Torii, E. Widmann, T. Yamazaki: Laser spectroscopy of antiprotonic helium and stringent constraint on the antiproton charge and mass, *ibid*, pp.955c–958c.
- (国内雑誌)
- [53] 山中 信弘: 原子構造に対する原子核の有限質量、有限体積および分極の効果, *原子核研究* **44**, No.3 (1999) 29–32.
- [54] 浜垣秀樹・早野龍五: 高エネルギー重イオン衝突実験の目指す物理, *日本物理学会誌* **第54巻第12号** (1999) 961–968.
- (学位論文)
- [55] 大西哲哉: Study of Spin–Isospin Excitations in Neutron Rich Light Nuclei via the ( $d, ^2\text{He}$ ) reaction (博士論文).

- [56] 谷田聖: Gamma-ray Spectroscopy of  ${}^7\text{Li}$  (博士論文).
- [57] 堀正樹: Cascade of metastable antiprotonic helium atoms (博士論文).
- [58] 今井伸明: Study of an Indirect Method to Determine the Astrophysical  $S$ -Factors via  $(d,p)$  Reactions (修士論文).
- [59] 迫田誠太郎: Study of the  ${}^3\text{He} - n$  effective interaction deduced from the spin-flip probability for the  ${}^{26}\text{Mg}({}^3\text{He},t){}^{26}\text{Al}^*(1^+;1.058\text{ MeV})$  reaction at 177 MeV (修士論文).
- [60] 福坂将一: 300 MeV における  ${}^{12}\text{C}(\bar{p},\bar{n}){}^{12}\text{N}$  反応のスピ一反転双極子巨大共鳴 (修士論文).
- [61] 坂口淳: Application of microwave techniques to antiprotonic helium spectroscopy (修士論文).
- [62] 鈴木謙: Study of mesic nuclei using recoilless nuclear reactions (修士論文).
- < 学術講演 >  
(国際会議)
- 一般講演
- [63] H. Ogawa, K. Sakai, T. Suzuki, M. Nagakura, H. Miyoshi, K. Asahi, K. Yogo, A. Goto, T. Suga, T. Honda, A. Yoshimi, H. Ueno, H. Imai, Y.X. Watanabe, K. Yoneda, N. Fukuda, N. Aoi, Y. Kobayashi, W.-D. Schmidt-Ott, G. Neyens, S. Teughels, A. Yoshida, T. Kubo, and M. Ishihara: Electric quadrupole moment of  ${}^{17}\text{B}$  and magnetic moment of  ${}^{15}\text{C}$  measured with polarized radioactive beams, Shell Model 2000, RIKEN, March 5–8, 2000.
- [64] T. Minemura, *et al.*: Coulomb Dissociation of  ${}^{12}\text{N}$  and  ${}^{13}\text{O}$ , Origin of matter and Evolution of Galaxies 2000, Tanashi, Tokyo, Japan, Jan. 19-21, 2000
- [65] M. Serata, *et al.*: Coulomb Dissociation of  ${}^{13}\text{N}$  and  ${}^{14}\text{O}$ , *ibid.*
- [66] K. Yamada, *et al.*: Coulomb Excitation of  ${}^{15}\text{O}$ , *ibid.*
- [67] Y. Yamamoto, S. Kubono, H. Nakada, S. Michimasa, N. Imai and T. Teranishi: The Role of  ${}^{18}\text{Ne}(2p, \gamma){}^{20}\text{Mg}$  process in Nucleosynthesis, *ibid.*
- [68] T. Ohnishi, H. Sakai, H. Okamura, S. Ishida, H. Otsu, N. Sakamoto, T. Uesaka, T. Wakasa, Y. Satou, S. Fujita, and T. Nonaka: Measurement of deuteron elastic scattering at  $E_d=270$  MeV and a comparison with sudden approximation, 1st Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics, Noda/Kashiwa, Japan, August 23–28, 1999.
- [69] K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Okamura, N. Sakamoto, A. Tamii, T. Uesaka, T. Wakasa, Y. Satou, T. Ohnishi, K. Yako, S. Fukusaka, S. Sakoda, K. Suda, H. Kato, Y. Maeda, K. Itoh, and T. Niizeki: Measurement of cross section and vector and tensor analyzing powers for  $d$ - $p$  elastic scattering at  $E_d=270$  MeV, *ibid.*
- [70] T. Uesaka, H. Sakai, A. Tamii, H. Okamura, Y. Satou, T. Ohnishi, N. Sakamoto, T. Wakasa, K. Itoh, K. Sekiguchi, K. Yako, S. Sakoda, and K. Suda:  ${}^3\text{He}(\bar{d}, p){}^4\text{He}$  Reaction at Intermediate Energies, *ibid.*
- [71] T. Uesaka, H. Sakai, A. Tamii, H. Okamura, Y. Satou, T. Ohnishi, S. Ishida, N. Sakamoto, T. Wakasa, K. Itoh, K. Sekiguchi, K. Yako, S. Sakoda, K. Suda, T. Wakui, S. Yamamoto, M. Kurokawa, T. Motobayashi, S. Shimoura, S. Takeuchi, M. Serata, Y. Yanagisawa, T. Gomi, H. Futakami, M. Iwasaki, N. Imai, S. Kubono, T. Teranishi, H. Akiyoshi, and Y. Yano: Nuclear Physics Experiments with Polarized  ${}^3\text{He}$  Target at RIKEN, Int. Workshop on Polarized Sources and Targets, Erlangen, Germany, September, 1999.
- [72] T. Noro *et al.*: Spin observables in quasifree scattering - Study of medium effects on the  $NN$  interactions and hadrons in nuclei -, RCNP-TMU Symposium on Spins in Nuclear and Hadronic Reactions, Hachioji, Japan, October 26–28, 1999.
- [73] T. Wakasa *et al.*: Spin-isospin modes in quasielastic region, *ibid.*
- [74] H. Takeda *et al.*: Neutron density distributions observed by proton elastic scattering, *ibid.*
- [75] A. Tamii, T. Ishikawa, M. Itoh, T. Kawabata, M. Nakamura, H. Sakaguchi, H. Takeda, T. Taki, M. Yosoi, M. Fujiwara, K. Hatanaka, F. Ihara, K. Ishibashi, T. Inomata, T. Noro, H. Yoshida, M. Yoshimura, H. Akimune, I. Daito, Y. Fujita, H. Toyokawa, K. Hosono, and M. Kawabata: Nuclear reaction studied by  $(\bar{p}, \bar{p}')$  reactions at  $0^\circ$ , *ibid.*
- [76] H. Okamura, S. Ishida, N. Sakamoto, H. Otsu, T. Uesaka, T. Wakasa, H. Sakai, T. Niizeki, H. Toyokawa, Y. Tajima, H. Ohnuma, M. Yosoi, K. Hatanaka, and T. Ichihara: Breakup of the deuteron at intermediate energies, *ibid.*
- [77] T. Uesaka, H. Sakai, A. Tamii, H. Okamura, Y. Satou, T. Ohnishi, N. Sakamoto, T. Wakasa, K. Itoh, K. Sekiguchi, K. Yako, S. Sakoda, and K. Suda:  ${}^3\text{He}(\bar{d}, p){}^4\text{He}$  reaction at intermediate energies, *ibid.*
- [78] T. Uesaka, H. Sakai, A. Tamii, H. Okamura, Y. Satou, T. Ohnishi, N. Sakamoto, T. Wakasa, K. Itoh, K. Sekiguchi, K. Yako, S. Sakoda, K. Suda, J. Nishikawa, H. Kato, M. Hatano, and Y. Maeda:  ${}^3\text{He}(\bar{d}, p){}^4\text{He}$  reaction at intermediate energies, 16th International Conference on Few-Body Problems in Physics, Taipei, Taiwan, March 6–10, 2000.
- [79] K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Okamura, N. Sakamoto, A. Tamii, T. Uesaka, T. Wakasa, Y. Satou, T. Ohnishi, K. Yako, S. Fukusaka, S. Sakoda, K. Suda, H. Kato, Y. Maeda, M. Hatano, J. Nishikawa, K. Itoh, and T. Niizeki: Measurement of cross sections and analyzing powers for  $d$ - $p$  elastics scattering at intermediate energies, *ibid.*

[80] K. Yako, H. Sakai, A. Tamii, K. Sekiguchi, S. Sakoda, Y. Maeda, M. Hatano, H. Kato, H. Okamura, K. Suda, K. Hatanaka, T. Wakasa, J. Kamiya, D. Hirooka, and M.B. Greenfield: dir The RCNP ( $n, p$ ) facility, *ibid.*

#### 招待講演

- [81] H. Sakai: Study of few nucleon system at RIKEN – Precise measurements of  $dp$  scattering at  $E_d=270$  MeV, Symposium on Current Topics in the Field of Light Nuclei, Cracow, Poland, June 21–25, 1999.
- [82] H. Sakai, K. Sekiguchi, H. Kato, A. Tamii, T. Ohnishi, K. Yako, S. Sakoda, Y. Maeda, M. Hatano, N. Sakamoto, T. Uesaka, Y. Satou, H. Okamura, K. Suda, and T. Wakasa: Precise Measurement of  $dp$  elastic scattering at 270 MeV, 1st Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics, Noda/Kashiwa, Japan, August 23–28, 1999.
- [83] H. Sakai: Charge exchange reactions - review, Workshop on Spin and Isospin Excitations in Nuclei, Gent, Belgium, November 15–16, 1999.
- [84] H. Sakai, K. Sekiguchi, H. Kato, A. Tamii, T. Ohnishi, K. Yako, S. Sakoda, Y. Maeda, M. Hatano, N. Sakamoto, T. Uesaka, Y. Satou, H. Okamura, K. Suda, and T. Wakasa: Polarization transfer measurements for  $dp$  scattering at 270 MeV, 16th International Conference on Few-Body Problems in Physics, Taipei, Taiwan, March 6–10, 2000.
- [85] R.S. Hayano: High energy heavy ion physics at RHIC/PHENIX, Invited talk at "PARTON'99, Parton physics and hadronization in heavy ion collisions" (May 4–7, 1999, Budapest, Hungary).
- [86] R.S. Hayano: "Laser Spectroscopy of Antiprotonic Helium and Stringent Constraints on the Antiproton Charge and Mass", Invited contribution at "International Conference on Particle and Nuclei (PANIC99)" (June 10–16, 1999, Uppsala, Sweden).
- [87] R.S. Hayano: Production and spectroscopy of Protonium, Invited talk at "International Workshop on Atomic Collisions and Atomic Spectroscopy with Slow Antiprotons" (July 19–21, 1999, Tsurumi, Japan).
- [88] R.S. Hayano: Precision Spectroscopy of Anti-Atoms, Invited talk at "International Workshop on LOW ENERGY POSITRON AND POSITRONIUM PHYSICS" (July 28–31, 1999, KEK, Japan).
- [89] R.S. Hayano: Antiprotonic Helium - a window into antiworld - Invited talk at Asia Pacific Few Body Conference (Aug. 23–28, 1999, Noda-Kashiwa, Japan).
- [90] R.S. Hayano: Experimental Studies of Deeply Bound Meson Nucleus States, Invited talk at "International Conference on Quark Nuclear Physics" (Feb. 21–25, 2000, Adelaide, Australia).

[91] R.S. Hayano: High-precision laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms Invited talk at "16th International Conference on Few-Body Problems in Physics" (March 6–10, 2000, Taipei, Taiwan).

#### (国内会議)

#### 一般講演

- [92] 米田健一郎、他: 不安定核  $^{36}\text{Si}$  の入射核破砕反応を用いた中性子過剰核の核分光、日本物理学会分科会 (島根大学、1999年9月).
- [93] 五味朋子、他:  $^{36}\text{Si}$  の入射核破砕反応における励起した不安定核の生成率、同上.
- [94] 山田一成、他: クーロン励起による  $^{15}\text{O}$  核の励起状態の E1 遷移強度の測定、同上.
- [95] 柳沢善行、他:  $^{56}\text{Ni}$  核のクーロン励起、同上.
- [96] 武内聡、他:  $^{14}\text{Be}$  の荷電交換反応、同上.
- [97] 世良田真来、他:  $^{14}\text{O}$  のクーロン分解反応による  $^{13}\text{N}+p \rightarrow ^{14}\text{O}+\gamma$  過程の反応率の測定、同上.
- [98] 峯村俊行、他:  $^{13}\text{O}$  のクーロン分解反応、同上.
- [99] 今井伸明、他: ANC 法の有効性、低エネルギー短寿命核の物理 (KEK 田無、3月10-12日).
- [100] 小川博嗣、他: 中性子過剰核  $^{15}\text{C}$ 、 $^{17}\text{B}$  の電磁気モーメント、同上.
- [101] 岩崎弘典、他: 中性子過剰核  $^{34}\text{Mg}$  のクーロン励起、日本物理学会分科会 (近畿大学、2000年3月).
- [102] 福田直樹、他:  $^{11}\text{Be}$  のクーロン分解反応、同上.
- [103] 今井伸明、他: 核子移行反応を用いた天体内核子捕獲反応率決定法の研究、同上.
- [104] 小川博嗣、他: 中性子過剰核  $^{15}\text{C}$  の磁気モーメントの測定、同上.
- [105] 鈴木孝幸、他: 中性子ハロー核  $^{17}\text{B}$  の電気四重極モーメントの測定、同上.
- [106] 道正新一郎、他:  $(p, t)$  反応による  $^{21}\text{Na}(p, \gamma)^{22}\text{Mg}$  天体核反応の研究、同上.
- [107] 上坂友洋:  $^3\bar{\text{He}}(\vec{d}, p)^4\text{He}$  Reaction at Intermediate energies、スピン核融合ワークショップ (Polusion 99)、大阪大学核物理研究センター、1999年8月2日~4日.
- [108] 民井淳: Planning of development of a polarized proton target using dynamic nuclear polarization on aromatic crystal スピン核融合ワークショップ (Polusion 99)、大阪大学核物理研究センター、同上.
- [109] 須田健嗣、他:  $^{12}\text{C}(d, \alpha)$  反応を用いた中間エネルギー重陽子ビーム偏極度の絶対値較正、日本物理学会秋の分科会 (島根大学、1999年9月23日~26日).
- [110] 山本純子、他: 電子スピン共鳴法による  $^3\text{He}$  偏極度の絶対値較正、同上.
- [111] 上野秀樹、他: 入射エネルギー 100 MeV/u における ( $^6\text{Li}, ^6\text{Be}$ ) 荷電交換反応、同上.
- [112] 加藤裕充、他: 偏極重陽子・陽子散乱における偏極移行量測定、日本物理学会年会 (近畿大学、2000年3月30日~4月2日).

- [113] 関口仁子、他：中間エネルギー領域における重陽子-陽子弾性散乱の微分断面積、及び偏極分解能の測定、同上。
- [114] 波田野道夫、他：Integrated Solid Effect による高温低磁場での偏極陽子固体ターゲットの開発、同上。
- [115] 前田幸重、他：RCNP における  $(n, p)$  実験施設の建設、同上。
- [116] 若狭智嗣、他：準弾性散乱の偏極移行係数及びスピン応答関数の運動量依存性の研究、同上。
- [117] 迫田誠太郎、他： $^{26}\text{Mg}(^3\text{He}, t)^{26}\text{Al}(1^+)$  反応におけるスピン反転確率を用いた有効相互作用の研究、同上。
- [118] 竹田浩之、他：中間エネルギー陽子弾性散乱による中性子密度分布の抽出、同上。
- [119] 神谷潤一郎、他： $^{12,13}\text{C}(\bar{p}, \pi^-)$  反応のエネルギー依存性の研究、同上。
- [120] 中山信太郎、他：Soft dipole resonance in  $^6\text{He}$ 、同上。
- [121] 市岡利康、他：超低速反陽子実験のための荷電粒子蓄積トラップの開発、日本物理学会分科会 (岩手大学、1999 年 9 月)。
- [122] 大山健、他：PHENIX RICH 検出器用 FEE の総合性能評価、日本物理学会分科会 (島根大学、1999 年 9 月)。
- [123] 浜垣秀樹、他：PHENIX RICH 検出器用 FEE の Analog 回路特性、日本物理学会分科会 (島根大学、1999 年 9 月)。
- [124] 米山哲、他：中間子の鉛原子核による深い束縛状態の探索実験 (VI)、日本物理学会分科会 (島根大学、1999 年 9 月)。
- [125] 鈴木謙、他：、中間子の原子核による束縛状態の探索実験、日本物理学会分科会 (島根大学、1999 年 9 月)。
- [126] 早野龍五：High-precision Spectroscopy of Antiprotonic Atoms, 「反陽子を用いた反物質科学」(熱海、2000 年 2 月)。
- [127] 市岡利康、他：超低速反陽子実験のための荷電粒子蓄積トラップの開発 II、日本物理学会分科会 (関西大学、2000 年 3 月)。
- [128] 船越亮、他：CERN ATHENA プロジェクトにおける反水素生成にむけて、日本物理学会分科会 (関西大学、2000 年 3 月)。
- [129] 山口英斉、他：AD 加速器における反陽子ヘリウム原子のマイクロ波分光、日本物理学会分科会 (関西大学、2000 年 3 月)。
- [130] 坂口淳、他：反陽子ヘリウム原子の超微細構造間遷移のスペクトル計算、日本物理学会分科会 (関西大学、2000 年 3 月)。
- [131] 木野康志、他：準安定反陽子ヘリウム原子クーロン三体系の相対論補正、日本物理学会分科会 (近畿大学、2000 年 3 月)。

(セミナー)

[133] R.S. Hayano: Antiprotonic Helium –a window into antiworld– (October 29, Paul Scherrer Institut, Switzerland).

[134] R.S. Hayano: Antiprotonic Helium –a window into antiworld– (Nov. 22, Saclay, France).

## 招待講演

- [132] 早野龍五: Spectroscopy of Exotic Atoms, ”原子衝突セミナー” (May 15, 1999, 上智大).

## 2.2 釜江研究室

釜江研究室では、高エネルギー実験の経験を生かして宇宙 X 線 線検出器の開発を行なっている。昨年度に引き続き本年度も、次期 X 線観測衛星 ASTRO-E に搭載される硬 X 線検出器の開発に集中した。また、X 線天文衛星「あすか」のデータに対して、特に大規模データ解析を行なって、宇宙の高エネルギー現象を研究している。さらに、アメリカの次世代高エネルギー MeV/GeV ガンマ線観測衛星 GLAST の検出部に使われるシリコンストリップの開発も広島大学とともに行なっている。本年度で釜江は退官し [25]、釜江および助手ともども広島大学に移動になり、広島大学で活動を続けることになった。



図 2.2 a: 衛星に組み込まれる HXD-S (上)。この中に、フォスフィスカウンター 16 本、アンタイカウンター 20 本が収納されている。下は振動試験中の Astro-E 衛星。

### 2.2.1 硬 X 線検出器 (HXD) の開発

我々は 1987 年から気球実験を通して開発を行ってきた経験を基に、2000 年 2 月に打ち上げた日本の次期 X 線観測衛星 ASTRO-E に搭載される低バック

グラウンド硬 X 線 線検出器 (HXD) の開発を 5 年間行ってきた。HXD は、10–500keV のエネルギー領域でこれまででない感度を目標としている。開発は、本物理学科の牧島研、宇宙研、理研、大阪大、明星電気、富士通、クリアパルスとともに進めており、特に牧島研とは全面的な共同作業を行なっている。HXD はセンサー部、アナログエレキ (AE) およびデジタルエレキ (DE) で構成される。本年度は、FM 品の製作、HXD センサー部およびアナログ回路部の振動・熱真空試験、長期ランニング試験、キャリアブレーション [2][3][11][12]、を行なったうえで、衛星全体での動作試験・環境試験に参加した。我々の研究室は、主にセンサーのシンチレータ部、AE/DE、構造設計、レスポンス構築を担当している。詳細は、牧島研のところで書かれてあることと同じであるので、そちらを参照されたい。なお釜江は、AstroE-HXD や後述の GLAST に関連して開発された検出器技術を集大成し、レビューとしてまとめた [5]。

### 2.2.2 X 線観測衛星による高エネルギー天体の研究

日本の「あすか」衛星を用いて高エネルギー天体を精力的に観測し、解析を行なっている。本研究室はこれまで「あすか」の運用と軌道上での装置の較正に参加し、また大規模データ解析システムを構築してきた。本年度も引き続いて牧島研とともに観測を行ない、新たな結果を得た。また、他の X 線衛星へも積極的に観測提案を行なった。

### 2.2.3 「あすか」衛星による North Polar Spur の観測

North Polar Spur (NPS) は、視直径  $110^\circ$  の巨大なリング構造として観測される Loop I スーパーバブルの一部で、 $l=30^\circ$  に沿って電波や軟 X 線の放射が特に強い領域である。また Loop I バブルは、この方向で我々の太陽系を含むいわゆる Local Hot Bubble (LHB) と衝突して高密度の  $H_I$  リングを形成していることが観測事実として知られている。我々は「あすか」衛星を用いて、 $b=15^\circ$  の線に沿って NPS を銀経方向に横断するスキャン観測 ( $l=20^\circ\sim 32^\circ$ ) を行なった。その結果、全ての観測領域から  $6\sim 7\times 10^6 K$  の希薄なプラズマからの熱的な放射を検出し、また、銀経方向の構造として  $l=29^\circ$  付近をピークとした電子密度の構造があることを見出した。これは ROSAT 衛星によって  $b=24, 34, 44^\circ$  の各銀緯線上で検出されていたショックフロントに相当すると考えられ、Loop I の中心から 150pc 程度の位置であることもコンシステントであることから、NPS が我々に最も近い SNR のショックフロントであり、それを接線方向に見ていることはほぼ確実となった。一方、スペクトルフィッティングから得られた電子の温度・密度は、ともに  $b=24^\circ$  における ROSAT の値よりおよそ 2 倍程度高く、また、一温度モデルでフィットした場合には、銀

経方向の温度構造はほとんど見られなかった [22]。

#### 「あすか」衛星による銀河団からの非熱的放射の観測

昨年、銀河群から非熱的放射と思われる X 線を検出し、銀河団銀河群での粒子加速の兆候を捉えたが、本年度も「あすか」で観測したすべての銀河群についてサーベイし、いくつかの銀河群から非熱的放射らしきものを検出した。また、少数の近傍銀河群を長時間観測することによって、放射の空間分布や詳細なスペクトルを調べた [9][26][27]。

#### 「あすか」衛星による銀河団の系統的研究

「あすか」衛星は、これまで 300 個近い銀河団・楕円銀河を観測している。「あすか」のデータは、これまでの X 線データに比べてバックグラウンドが低いこと、光子統計が良いこと、などが優れているため、非常に良い銀河団サンプルを与えてくれる。我々は、これまで開発してきた大量データ処理システムを用いて、すべての銀河団のデータを解析し、楕円銀河を含めた銀河団の統計的性質を調べることによって、銀河団の進化の情報を得て、宇宙構造形成に迫る試みを行なっている。特にこの研究は低温銀河団銀河群を豊富に含んでいることが特徴で、これまでの解析の結果、低温銀河団銀河群のガスの温度、X 線光度、質量の関係が高温銀河団の関係とよくつながることがわかってきた。また、これらのデータをもとに、温度、X 線光度、ガスの空間分布をまとめた「あすか」銀河団カタログを作成する計画を進めている [6][11][13][15][21]。

#### 「あすか」および BeppoSAX 衛星による近傍銀河 M51 の研究

イタリアの BeppoSAX 衛星に対する我々の観測提案により、近傍銀河 M51 が BeppoSAX で観測された。M51 は、中心に弱い活動銀河核を含んでいる可能性が指摘されていたが、X 線でなかなかはっきりした兆候が検出されていなかった。BeppoSAX の観測では、硬 X 線検出器によって強く吸収された明るい硬 X 線成分が検出されたため、濃い物質に隠された弱い活動銀河核がある可能性が高まった。これは、近傍銀河の中には濃い物質に隠された巨大質量ブラックホールを含むものが存在することを示している。

#### 他衛星への観測提案

1999 年に Chandra (アメリカ)、Newton (ヨーロッパ) の大型 X 線観測衛星が運用し始めた。これらの衛星に対して、我々は積極的に観測提案を行なって一部が採択された。観測が待たれるところである。また、イタリアの X 線衛星で現在稼働中の BeppoSAX

への観測提案も採択された。

### 2.2.4 次期天体ガンマ線観測衛星 (GLAST) の準備研究

MeV から GeV 領域を観測するアメリカの次期高エネルギーガンマ線観測衛星 GLAST の検出器の開発に参加している。具体的には、線が対生成した電子陽電子の飛跡を追って線の到来方向を測定するトラック部を用いられるシリコンストリップの開発を広島大学とともに行なっている。本年度は、世界ではじめて、6 インチのウェハ - 上でシリコンストリップ検出器を製作し、その性能を検証した。その後、300 枚の検出器を製作し、カリフォルニア大学サンタクルーズ校とスタンフォード線形加速器センターで 16 層のタワーとして組み上げ、CsI(Tl) からなる電磁シャワーカロリメーターと組み合わせ、20GeV までのガンマ線と陽子線でテストをした。

検出器は、95mm×95mm という大きな面積にもかかわらず、低いリーク電流 (数 nA/cm<sup>2</sup>) と高い耐圧を示している。テスト結果は現在解析中であるが、QL 解析では問題ない性能が得られて、当初目標にしていた GLAST の性能を大幅に上回る見込みが出てきた。

GLAST は、NASA の最終選考で、正式に GLAST ミッションの主要検出器として認められ、プロジェクトがスタートし、釜江が検出器開発リーダーとなった。GLAST は、1990 年代に活躍した CGRO 衛星搭載 EGRET の成果を大幅に上ると期待されており、検出される天体数も数十倍の 1 万個くらいになると思われており、MeV/GeV 領域の宇宙観測が飛躍的に進歩するだろう。観測に関しては、これまでの若い回転パルサー、活動銀河核 BLAZER などに加えて、超新星残骸や銀河団での粒子加速の解明、銀河系内の物質分布の測定、線と遠赤外線との対消滅を利用した宇宙遠方の星生成活動の測定など多彩にわたる。また、素粒子理論の方から、Planck scale の現象により、光速がゆらぐ可能性が指摘されている。これが正しいとすれば、ガンマ線バーストの中に発見される短いスパイクを使って、光速を 10<sup>-19</sup> 程度の精度で測定できることを意味する [4][16][17]。

### 2.2.5 将来に向けた検出器の開発

#### 天体観測用シリコンストリップ検出器の開発

GLAST で開発を行なってきたシリコンストリップを応用して、多重コンプトン検出器あるいは位置検出型硬 X 線検出器としてシリコンストリップを用いる試みを進めている。これは、広島大学、相原研、宇宙研とともに開発を進めている。本年度は 0.5mm 厚のものを開発し、ノイズを測定し、1mm 厚の開発に向けたデータを取得した。また、多チャンネル読み出し回路の開発も行なっている。シリコンストリップは、浜松ホトニクスで作ってもらっている。

## GSO を用いた検出器の開発

AstroE-HXD のために新しい無機シンチレータ結晶 GSO(Ce) を開発してきたが、それを延長する形で、将来計画に向けた開発を行なった。具体的には、GSO にドーブする Ce の割合をいろいろ変化させてみて、光量がどのように変化するかを調べている。GSO の線のエネルギー分解能は、標準的に使われている NaI(Tl) を越えており、リニアリティは NaI と違って良いこと、阻止能が大きいこと、などが特徴であり、今後多くの場所で使われると思われる。GSO は信越化学(材料)と日立化成(結晶化)と共同で開発を行なっている。

この GSO の性能を生かすため、GSO を光電子増倍管よりも量子効率が高いシリコンフォトダイオードで読み出す試みを進めており、1MeV 以上で光電子増倍管で読み出すよりも優れた性能を示すため、将来の MeV 領域の検出器になる可能性がある。本年度は、フォトダイオードに光ができるだけ入るように電極構造を工夫したり、フォトダイオードと GSO をアレイ化してエネルギー分解能を良くする試みを行なった。シリコンダイオードは浜松ホトニクスと共同で開発を行なっている。

この他、浜松ホトニクスの量子効率が普通より高い光電子増倍管やメタルパッケージの小型位置感度型光電子増倍管と GSO を組み合わせて 100keV 付近を狙った低線検出器の開発も試みている。

## 2.2.6 計算機による音声認識システムの開発

視覚に障害があっても、計算機を高度に利用できるシステムを開発している。この Voice Windows 計画は、Windows Scripting Host や VBScript などで、Windows98 を使いこなすための utility、音声多重化を可能にする音声エンジン(文章を読みながら、キーボードエコーを聞くなど)、異なる window を区別するための立体 sound の機能を備えている。またその中には、Windows98 上の Mule を音声で使える”Voice Meadow”を含んでいる。

本年度は、オブジェクト化したスクリプト言語で、Windows98 の機能をフルに使いこなすプログラムの試供版を作り、筑波技術短期大学の視覚に障害をもつ学生さんに使ってもらった [18][19][20][23][24]。今後、広く公開できるレベルまで完成させたい。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Kokubun, M., Fukazawa, Y., Idesawa, E., Kataoka, J., Kamae, T. et al.: “Activation of the ASTRO-E Hard X-ray Detector in Low Earth Orbit”, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1999, NS-46, 371
- [2] Nakazawa, K., Kamae, T., Makishima, K., Takahashi, T., Murakami, T., Tashiro, M., Fukazawa Y. et al.: “Fabrication of the ASTRO-E Hard X-ray Detector”, 1999, SPIE 3765, 148

- [3] Tanihata, C., Kataoka, J., Murakami, T., Ota, N., Ozawa, H. et al.: “Preflight Performance of the Astro-E Hard X-ray Detector”, 1999, SPIE 3765, 645
- [4] Kamae, T., Thompson, D.J., Watanabe, K.; ”Next Generation Large Area Gamma-ray Telescope”, COSPAR 1999, eds. K. Makishima and T. Takahashi
- [5] Kamae, T.: ”Developments in semiconductor detector technology and new applications - symposium summary”, Nucl. Instr. And Methods In Phys. Res. A, 1999, 436 (1-2), 297-303
- [6] Hwang, U., Mushotzky, R.F., Burns, J.O., Fukazawa, Y., and White, R.A.: “Mass and Metallicity of Five X-Ray-bright Galaxy Groups”, 1999, ApJ 516, 604
- [7] Kikuchi, K., Furusho, T., Ezawa, H., Yamasaki, N.Y., Ohashi, T., Fukazawa, Y., and Ikebe, Y.: “ASCA measurements of metallicity and temperature distributions in three clusters : A 4059, MKW 3s, and 2A 0335+096.”, 1999, PASJ 51, 301
- [8] Ikebe, Y., Makishima, K., Fukazawa, Y. et al.: “Two-Phase Intracluster Medium in the Centaurus Cluster of Galaxies”, 1999, ApJ 525, 58
- [9] Fukazawa Y.: “ASCA observations of nonthermal emissions from groups of galaxies.”, 1999, Astron. Nachr. 320, 197
- [10] Matsuzaki, K., Sekimoto, Y., Kamae, T. et al.: “Hard X-ray emission from giant molecular clouds NGC 6334 and M17”, 1999, Astron. Nachr. 320, 323
- [11] Matsumoto, Y., Nakazawa, K., Kamae, T. et al.: “Angular response of the Hard X-ray Detector (HXD) onboard ASTRO-E”, 1999, Astron. Nachr. 320, 376
- [12] Terada, Y., Tashiro, M., Takahashi, T., Fukazawa, Y. et al.: “The digital data processing system of the ASTRO-E hard X-ray detector”, 1999, Astron. Nachr. 320, 377
- [13] Fukazawa, Y., Makishima, K., Tamura, T., Nakazawa, K., Ezawa, H., Ikebe, Y., Kikuchi, K., and Ohashi, T.: “Statistical Properties of Metal Abundances of the Intracluster Medium at the Cluster Center Region”, 2000, MNRAS 313, 21
- [14] Kikuchi, K., Itoh, C., Kushino, A., Furusho, T., Matsushita, K., Yamasaki, N.Y., Ohashi, T., Fukazawa, Y. et al.: “Detection of an X-Ray Hot Region in the Virgo Cluster of Galaxies with ASCA”, 2000, ApJ 531, L95
- [15] Matsumoto, H., Tsuru, T., Fukazawa, Y., Hattori, M., Davis, D.S.: “Gas, iron, and gravitational mass in galaxy clusters : the general lack of cluster evolution at  $z < 1.0$ .”, 2000, PASJ 52, 153
- [16] 釜江常好、大杉節: 「極限状態の宇宙をガンマ線で探る」, 日本物理学会誌 1999, 54, 605-613

## (出版物)

- [17] Michelson et al.: "Response to NASA AO 99-055-03 "GLAST Large Area Telescope"", Nov. 1999, Stanford University

## (会議抄録)

- [18] 本多博彦、釜江常好、渡辺隆行、小出富夫、宇野伸一郎、栗原亨、田島佐和子: "視覚障害者のための Voice-Windows システムの開発", 教育システム情報学会、第 24 回全国大会 (1999 年 8 月 6,7 日、兵庫県)、p.203.
- [19] T. Kamae, T. Watanabe, T. Koide, H. Honda, S. Uno, T. Kurihara, and S. Tajima: "Voice Windows: A Voice-Based Platform for the visually Disabled", 情報処理学会研究会、(1999 年 8 月 20 日、大阪大学)、ヒューマンインターフェイス 84-16 及び情報メディア 35-16、p.91.
- [20] 渡辺隆行、釜江常好、小出富夫、本多博彦、宇野伸一郎、栗原亨、田島佐和子: "視覚障害者のための高機能情報処理システム Voice Meadow", 情報処理学会第 59 回全国大会 (1999 年 9 月 28-30 日、岩手県立大学) 講演論文集 pp.4-25~4-26.

## &lt; 学術講演 &gt;

## (国際会議)

## 一般講演

- [21] Fukazawa Y.; "X-ray Measurements of Metal Abundances of Hot Gas in Clusters of Galaxies", OMEG2000, January, 2000

## (国内会議)

## 一般講演

- [22] 国分紀秀、釜江常好、深沢泰司 他「あすか」による North Polar Spur の観測」日本天文学会 秋の年会 1999 年 11 月 7-9 日 (福岡)
- [23] 釜江常好、渡辺隆行、小出富夫、宇野伸一郎、栗原亨、本多博彦、田島佐和子: "視覚障害者のための Voice Windows システムによるインターネットの高度利用", 情報処理学会 第 59 回全国大会 (1999 年 9 月 28-30 日、岩手県立大学) 特別セッション講演
- [24] T. Kamae, T. Watanabe, F. Koide, T. Kurihara, H. Honda, S. Uno, S. Tajima: "Voice Windows - Voicified Script-based Win98 Platform for the Visually Disabled", インターラクシオン 2000 (東京工業大学, 2000 年 2 月 29 日, 3 月 1 日).
- [25] 釜江常好: 「加速器実験からガンマ天体観測への転進」, 東京大学理学部物理学科 最終講義 2000 年 2 月 18 日

## (セミナー)

- [26] 深沢泰司「銀河群の X 線観測」立教大学 宇宙素粒子理論セミナー 1999 年 10 月 9 日
- [27] 深沢泰司「X 線による銀河団の観測 ~最近のトピックから~」東京大学理学部天文学教室 Galaxy セミナー 2000 年 3 月 23 日

## 2.3 折戸研究室

### 2.3.1 高エネルギー電子・陽電子衝突装置 LEP による実験

世界最高エネルギーの  $e^+e^-$  衝突型加速器 LEP を用いて、素粒子の構造と相互作用を調べ、未知の素粒子現象を探る研究を、素粒子物理国際研究センターと共同で行なっている (OPAL 国際共同実験)。

1989 年に重心系エネルギー 90 GeV 近辺で実験を開始して以来、弱い相互作用を媒介するゲージ粒子である  $Z^0$  粒子の観測を通して、「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。

今年度は、加速器の調整が順調に行なわれた為、衝突エネルギーを前人未踏の 202 GeV まで増強すると同時に、昨年度を大きく上回る積算ルミノシティ  $225\text{pb}^{-1}$  相当のデータを、91%を越える高い効率で収集することができた。この大量のデータを用いて、以下の主要な研究成果が得られた [3]-[40]。

#### W $^\pm$ 粒子の精密測定による統一ゲージ理論の検証

W $^\pm$  粒子は、 $Z^0$  粒子と並んで「弱い力」を伝達するゲージ粒子である。今年度に観測された約 4000 例の W $^+W^-$  対生成事象を含めて行なった質量の直接測定結果 ( $M_W = 80.446 \pm 0.051 \pm 0.039$  GeV) と、LEP で精密測定された  $Z^0$  粒子の種々の観測量を合わせて、統一ゲージ理論の整合性を極めて高い精度で検証した。

#### ヒッグス粒子の探索

粒子質量の起源を探ることは、現在の素粒子物理学における最重要課題である。ヒッグス粒子は、真空に凝縮していると考えられるスカラー場の直接の証拠となるものであり、その存否及び質量値は今後の素粒子物理の方向を定める重要な情報となる。電子・陽電子衝突ではヒッグス粒子を極めて明確に検出できると考えられる。現在、標準理論的なヒッグス粒子探索においては LEP の 4 実験を併せて質量下限値 110 GeV を得ている。

#### 超対称性粒子の探索

LEP に於けるゲージ理論の精密検証の結果、超対称性による力の大統一の可能性が示唆された。この超対称性は、重力まで統一する理論として最も有望視されているものであり、LEP で発見が可能な領域の近くに、多くの新粒子の存在を予言している。これらの新粒子の兆候は発見されなかったが、超対称性理論のパラメータ、特に、宇宙の暗黒物質の有力な候補である中性のニュートラリーノの質量について強い制限を与えることができた。

2000 年度には、更に衝突エネルギーを上げるため、電磁力オリメータシステムの保守点検の体制強化と、測定器の運転とデータ解析の準備を進めている。

### 2.3.2 線型電子・陽電子衝突装置 JLC (Japan Linear Collider) 計画

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、更に、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い。

この認識に立って、当研究室は 1992 年に LEP の先のエネルギーフロンティアを開く 300~500 GeV の直線型  $e^+e^-$  衝突装置が、「軽いヒッグス粒子の検出とその性質の精密測定」及び「超対称性粒子の探索」を通じて、21 世紀の素粒子物理学の方向を決定する可能性が高いことを指摘し、JLC の早期建設を提案した。今年度も JLC に於ける物理及び測定器の検討を継続し、その実現に向けて全国の研究者と共に努力を重ねた。

### 2.3.3 気球搭載型超伝導スペクトロメータによる宇宙粒子線の観測

宇宙線反陽子等の観測を通して、「宇宙における素粒子現象」を探求する実験を、高エネルギー加速器研究機構・神戸大学・宇宙科学研究所・米国航空宇宙局 (NASA) と国際共同で行なっている。

加速器技術で培った最先端の技術を駆使して設計・製作された BESS 測定器は、超伝導ソレノイド・飛跡検出器・高性能粒子識別装置・並列処理型高速データ収集システムで構成され、同種の測定器では世界最大級の大面積立体角を有し、0.2~150 GeV の広いエネルギー領域を同時に高精度で測定できるという、これまでの飛翔体観測器に無い特長を備えている。この特長を生かして、「陽子・ヘリウム・電子等の各種宇宙粒子線」の絶対流束及びスペクトラムを精密に測定すると同時に、「反陽子・反ヘリウム等の反粒子」を極微量まで探索している。

宇宙線中の反陽子は、その大部分が宇宙線陽子と星間物質の衝突によって二次的に生成されると考えられている。この様な衝突反応を起源とする反陽子のスペクトラムは、2 GeV 付近にピークを持つ特徴的な形をしていると予想される。特に、1 GeV 以下の低エネルギー領域の流束は、相対論的な運動学により生成が制限される。

一方、「宇宙初期に作られた原始ブラックホールの Hawking 輻射」、あるいは「暗黒物質の候補である超対称性粒子の対消滅」などといった宇宙論的・素粒子物理学的に興味ある現象が仮に存在したとすると、低エネルギーの反陽子を生成すると考えられている。従って、低エネルギー反陽子はこれらの未知現象の兆候を探索するのに絶好の場所であるが、その期待される流束は微少で検出は困難であった。

しかしながら我々は、大面積かつ高感度な BESS 測定器を用いて、1993,94 年度に質量の同定という確実な方法で 8 例の反陽子を検出することに成功し、低エ

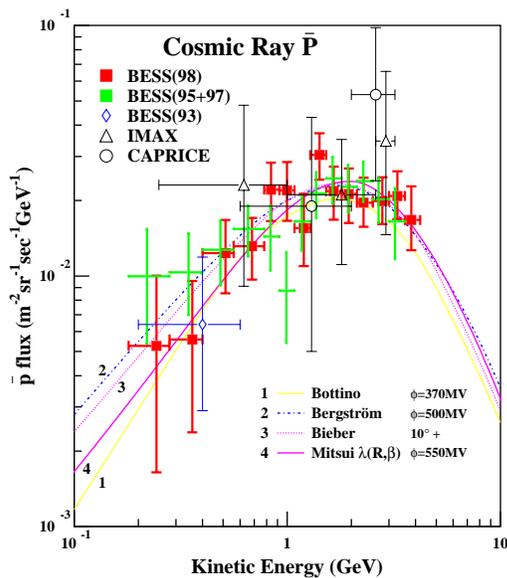


図 2.3 a: 宇宙線反陽子のエネルギースペクトラム

エネルギー反陽子の存在を世界で初めて確認した。'95年度には飛行時間分解能の向上により 0.2~1.4 GeV のエネルギー領域で 43 例の反陽子を明瞭に観測した。

'97 年から '98 年に至る間、エアロジェルチェレンコフカウンターの搭載等、更なる改良を加え、'97 年には 0.2~3.5 GeV のエネルギー領域に、'98 年には更に広い 0.2~4.5 GeV の領域に、各々約 420 例の反陽子の観測に成功した。

'98 年までに得られたデータの詳細な解析により、これまでの実験と比較して圧倒的に優れた精度で反陽子のスペクトラムを得た。その結果、「衝突起源の反陽子」から期待される 2 GeV 付近の特徴的なピークを世界で初めて検出した (図 2.3 a)。

#### (1) 低エネルギー反陽子の起源の探求

測定された反陽子スペクトラムを検証すると、1 GeV 以下の低エネルギー領域では、予想される「衝突起源の反陽子」の曲線に比べて、若干の過剰を示しているようにも見る事ができる。これは、あるいは、前述の「原始ブラックホールの Hawking 輻射」等の未知過程からの低エネルギー反陽子の存在を示唆しているのかも知れない。

一般に太陽系に入射した宇宙線は、太陽風などの影響を受けるが、その影響は低エネルギーの宇宙線ほど大きい。従って、今後予想される太陽活動の活発化に伴う、スペクトラムの変化を利用することで、観測された低エネルギー側の若干の過剰が、未知過程の兆候であるのか、或は「衝突起源の反陽子」の曲線を計算する際に用いた宇宙線伝搬モデルに変更を加えるものであるのか、決定できる可能性がある。

従って我々は、太陽が活動の極大期に向かう今年度のスペクトラムを測定し、極小期からの変化を観測

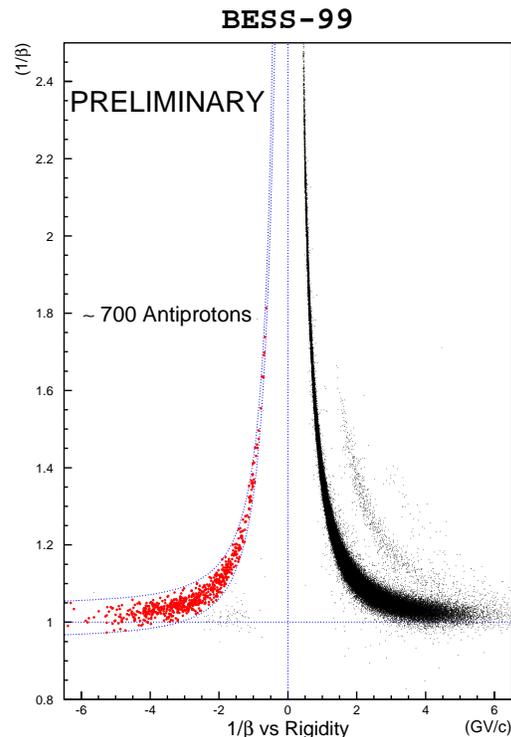


図 2.3 b: 反陽子の識別 ('99 年データ)

すべく、今年度の飛翔実験に臨んだ。

今年度の飛翔実験は 7 月カナダ・リンレークにおいて実施され、NASA の大型気球により高度約 37km の高空に上げられた BESS 測定器は、約 34 時間の飛行中完全に動作した。このデータにより約 700 例の反陽子を明瞭に検出し、現在、スペクトラムの太陽活動極小期からの変化を見出すべく解析を進めている (図 2.3 b)。

#### (2) 反陽子ビームによる反陽子検出効率の直接測定

1995 年には 43 例であった反陽子事象は、'97 年から '99 年のフライトで約 1600 例へと飛躍的に増加し、BESS 実験における反陽子エネルギースペクトラムの測定は今や精密測定となっている。従って、系統誤差の主要因となっている反陽子検出効率の不定性を改善することが、非常に重要かつ急務である。

この状況を踏まえて、KEK-PS 東カウンターホール K2 ビームラインにおいて、反陽子ビームによる BESS 測定器のビームテストを行なった。このビームテストのポイントは、BESS 測定器に入射する粒子を確実に識別することであり、そのために 30ps の時間分解能をもつトリガーカウンタ、位置測定用のドリフトチェンバー、反陽子識別用小型エアロジェル・カウンタをビームラインに設置した。これにより、0.6~1.67 GeV の運動量領域の反陽子・陽子・ $\pi$  粒子・ヘリウムなどを入射し、大量のデータを取得した。

結果は解析中であるが、反陽子の検出効率を各エネルギーに対して直接かつ精密に求め、系統誤差を5%まで下げることができると期待される。

### (3) 山頂高度における宇宙線観測

1998年6月、スーパーカミオカンデ実験はニュートリノ振動が起こっている確実な証拠を世界で初めて発表した。この解析には大気ニュートリノの絶対流束の理論計算値が使われているが、大気シャワーの発展の様子が正確に理解されていないために不定性を持っている。

そこで我々は、大気シャワー問題の解決を目標に、宇宙線研究所附属乗鞍観測所(標高2700m, 気圧720mb)に於いて宇宙線の観測を行なった。この実験は、BESS測定器の特徴である、大面積・大立体角を持ち、広いエネルギー領域を同時に高精度で測定でき、かつ運搬可能であるという点を最大限に生かしたものである。実験は1999年9月に行なわれ5日間で $2 \times 10^7$ イベントを観測した。

結果は解析中であるが、山頂高度での反陽子を実質世界で初めて、しかも約200例も精密に測定するなどの成果を既にあげている。

なお、この実験は宇宙線研究所の共同利用研究に採択されたものである。

### (4) 宇宙起源反ヘリウムの探索

現在我々の知る宇宙が物質優勢であるのは、ビッグバン直後に起きた物質・反物質の対称性の破れの結果として解釈されている。しかし、もしこの破れが局部的に起こったと考えれば、宇宙が物質と反物質の領域に分かれたドメイン構造をしている可能性もあり得ると指摘されている。反ヘリウムは通常の宇宙線と星間ガス等との衝突反応で作られる確率は極めて低く、もし一例でも観測されれば、初期宇宙にその起源を求めざるを得ない。また反ヘリウムは負の電荷をもっているため、実験的に極めて明確に粒子識別可能である。

今年度に行なわれた飛翔実験のデータを解析し、その中に反ヘリウムイベントを探したが、一例も見つけることは出来なかった。これにより、98年までのデータも含めて $\overline{\text{He}}/\text{He}$ 比の上限 $9 \times 10^{-7}$ を得た。これは現在世界で最も感度の高い上限である。これにより、我々の銀河およびその周辺の宇宙が物質のみからできていることの最も直接的な証拠を得た(図2.3c)。

### (5) 低エネルギー陽子のスペクトラム測定

陽子・ヘリウム等の一次宇宙線の絶対流束は、宇宙線の基礎データであるにもかかわらず、BESS実験以前の測定値には40%近くの食い違いがあったが、BESS実験は、これらを0.2~150 GeVの広い領域に渡って精度よく測定することを可能にした。

しかし、太陽系内の宇宙線は太陽活動の影響を受けるため、より精密な議論のためには、太陽活動の影響を正確に理解する必要があり、中でも、影響を受け易い低エネルギー陽子の大气頂上での流束の測定が

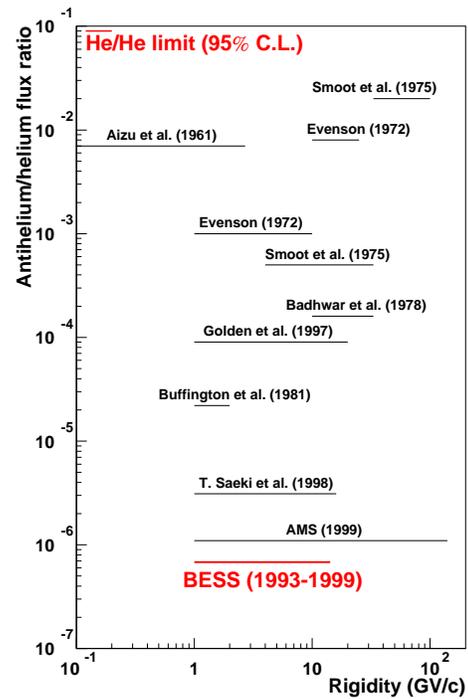


図 2.3 c: ヘリウムに対する反ヘリウムの流束比

求められる。ところが、宇宙線陽子が大気圏内に入射すると、大気中の原子核と様々に相互作用し、その流束は複雑に変化する。我々の上空での測定も当然、約 $5\text{g}/\text{cm}^2$ の残留大気の影響を受け、特に低エネルギー領域で変化は顕著になる。

この大気の影響を正しく理解し、大気頂上での流束をより高い精度で決定するため、今年度は、地上から上空まで測定器が上昇する最中に、低エネルギーの陽子を選択的に採取した。これにより、低エネルギー陽子の各大気深度での流束変化を、連続的かつ従来の約30倍の統計精度で測定することに成功した。

結果は解析中であるが、双方の影響をモデル化し、総合的な知見が得られることが期待される。

### (6) 宇宙線 $e/\mu$ 粒子の観測

陽子・ヘリウムなどの一次宇宙線のエネルギースペクトラムはBESS実験などにより、近年精密に測定されるようになったが、大気ニュートリノの絶対強度の理論的な推定には、ハドロン相互作用や大気構造などによる不確定性が依然として残っており、地上から上空に至る各高度での大気 $e/\mu$ 粒子の精密な測定は、大気ニュートリノの理論計算において絶対強度の不確定さを改善するために重要なデータである。

今年度は宇宙線中の $e^\pm$ と $\mu^\pm$ 成分を識別するため、シャワーカウンターを新たに開発し、BESSに搭載した。シャワーカウンターは、電磁シャワーを発生させる鉛と、その二次粒子を観測するアクリルチェレンコフカウンターで構成されており、 $e^\pm$ と $\mu^\pm$ がアクリルで発生させる光量の違いを利用して $e/\mu$ の識

別を行なう。

結果は現在解析中であるが、地上・上昇中・上空のデータに乗鞍山頂での結果を加え、大気シャワー問題の解決を図っていく予定である。

### (7) 中重原子核の観測, ストレンジ・マターの探索

宇宙線中の多電荷原子核である、ベリリウム・ホウ素・炭素・鉄などの原子核成分の絶対流束や同位体比を求めることは、宇宙線の伝搬モデルを決定する上で重要である。また、宇宙初期のハドロン相転移の名残として「ストレンジ・マター」が存在し得ることが指摘されており、電荷  $Z \sim \mathcal{O}(10)$  の粒子として宇宙線中に観測できる可能性がある。

今年度は、これら多電荷粒子に対する測定精度の向上を目的とした測定器を新たに開発し、BESS に搭載した。測定器は2層構造で、プラスチックシンチレータとアクリルチェレンコフカウンターで構成されており、チェレンコフカウンターはシャワーカウンターと兼用になっている。また、1 イベント当たりの許容データ量を拡大する等データ収集系を改良し、多電荷粒子の検出効率を改善した。これにより、BESS 実験において実質初めて多電荷粒子の測定を行なった。

解析は現在進行中であるが、電荷  $3 < Z < 26$  の広範囲に渡って主要宇宙線原子核の絶対流束を求めることができるという見通しを得た。また、チェレンコフカウンターを用いてホウ素や窒素の同位体比を求める方法を得た。ストレンジ・マターに関しては、'99 年度のデータ中には、候補となるイベントを見つけることはできなかった。

### (8) BESS-TeV 計画

大気ニュートリノの理論計算における不定性を更に改善するには、一次宇宙線の絶対流束を 500 GeV 付近まで精密に測定する必要がある。現在の BESS の運動量測定精度は 100 GeV の粒子に対して約 50% であり、また、100 GeV 以上の宇宙線については、今までの測定結果には不定性がある。

そこで測定可能領域を 1TeV 付近まで拡大した測定器を新たに開発し、2001 年度に実験を行なうことを計画している。今年度は、BESS 測定器の最外層に搭載する新しい飛跡検出器の開発、及びデータ収集系エレクトロニクスの改良などを行なった (図 2.3 d)。

#### 2.3.4 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索実験の検討

LEP のデータは超対称性と大統一を導入することによって、現在の統一ゲージ理論の枠組みを用いて  $10^{17} \sim 10^{19}$  という遙かに高いエネルギーまで素粒子の相互作用を記述できるという驚くべき可能性を示唆している。この「超対称性大統一」の大筋がもし正しければレプトンフレーバー保存を破る  $\mu$  粒子の希崩壊  $\mu \rightarrow e\gamma$  が  $\mu$  の通常崩壊 ( $\mu \rightarrow e\nu\bar{\nu}$ ) の  $10^{-12} \sim 10^{-13}$  程度、即ちこれまでの実験で得られた上限の数十分の 1 から数百分の 1 という非常に稀な確率で起こる可能性が高いことが指摘されている。

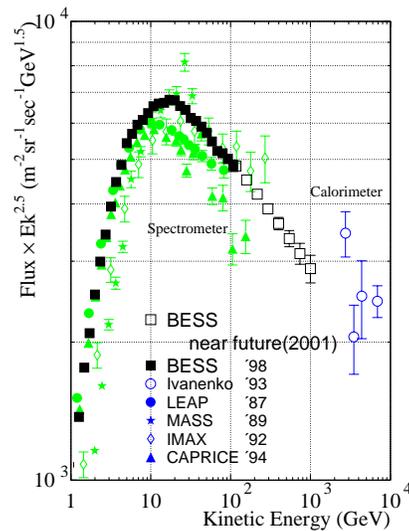


図 2.3 d: BESS-TeV 計画で期待される陽子スペクトラム

またスーパーカミオカンデにより報告されたニュートリノ振動は、ニュートリノが極微の質量を持ち、ニュートリノのレプトンフレーバー保存の破れが存在することを意味する。この起源は超高エネルギーの素粒子現象にあるものと思われるが、ニュートリノ振動の発見を越えてその起源を解明するにはレプトンフレーバー保存を破る他の過程である  $\mu \rightarrow e\gamma$  からの情報が鍵になる。

当研究室では 95 年からこれに注目し、スイス国立 PSI 研究所の、 $3 \times 10^8 \text{sec}^{-1}$  という世界最強の  $\mu^+$  ビームを使った新しい  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  探索実験の可能性を検討してきた。昨年 7 月、これまでの R&D に基づき PSI 研究所に実験の提案書を提出して受理され、東京大学、早稲田大学、高エネルギー加速器研究機構、ロシア Budker 研究所、PSI 研究所の国際共同実験として正式にプロジェクトがスタートした。現在、2003 年の実験開始に向けて各測定器の R&D と詳細設計を進めている。

$\gamma$  線検出器として、約  $1 \text{m}^3$  の液体 Xenon からのシンチレーション光を約 1000 個の光電子増倍管で捉える測定器を新たに考案し、昨年度より R&D を行なっている。本年度は、32 本の光電子増倍管を使ったプロトタイプを液体 Xe 中で作動させ、各種  $\gamma$  線源を使って時間分解能を測定した。320keV $\sim$ 1.8MeV の低エネルギー領域で得られた時間分解能はシミュレーションから予測される値とよく一致しており、52.8MeV の  $\gamma$  線に対して要求されている 50psec の時間分解能が得られることを確認した。

また、 $e^+$  のタイミング測定用カウンタのプロトタイプを製作し、高エネルギー加速器研究機構の陽子シンクロトロンを用いて性能評価を行った。0.5 GeV/c の陽子に対して 21 psec の時間分解能が得られ、 $\gamma$  線検出器とともに、アクシデンタル等のバックグラウンドを克服して、 $10^{-14}$  までの  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  探索に十分な

## 性能を持つことを示した.

&lt; 報文 &gt;

(原著論文)

- [1] S. Orito, T. Maeno, H. Matsunaga, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, M. Imori, M. Ishino, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, M. Motoki, J. Nishimura, M. Nozaki, J. Ormes, T. Saeki, T. Sanuki, M. Sasaki, E.S. Seo, Y. Shikaze, T. Sonoda, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, I. Ueda, N. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida and K. Yoshimura : Precision Measurement of Cosmic-Ray Antiproton Spectrum, *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 1078-1081
- [2] Y. Ajima, K. Anraku, T. Haga, Y. Higashi, H. Honda, M. Imori, S. Inaba, N. Kimura, M. Kobayashi, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, H. Matsunaga, M. Motoki, M. Nozaki, Y. Nishihara, J. Nishimura, S. Orito, M. Otaba, T. Saeki, T. Sanuki, M. Sasaki, K. Shimamura, J. Suzuki, K. Suzuki, N. Takimi, K. Tanaka, T. Tsunoda, I. Ueda, T. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto, H. Yamaoka, T. Yoshida and K. Yoshimura : A Superconducting Solenoidal Spectrometer for a Balloon-Borne Experiment, *Nucl. Instr. and Methods* **A443** (2000) 71-100
- [3] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Acoplanar Lepton Pair Events in  $e^+e^-$  Collisions at  $\sqrt{s}=161,172$  and 183 GeV, *Eur. Phys. J.* **C12** (2000) 551-565
- [4] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the Average Polarization of b Baryons in Hadronic  $Z^0$  Decay, *Phys. Lett.* **B444** (1998) 539-554
- [5] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Chargino and Neutralino Production at  $\sqrt{s}=181-184$  GeV at LEP, *Eur. Phys. J.* **C8** (1999) 255-272
- [6] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : A Measurement of  $R_b$  using a Double Tagging Method, *Eur. Phys. J.* **C8** (1999) 217-239
- [7] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Anomalous Photonic Events with Missing Energy in  $e^+e^-$  Collisions at  $\sqrt{s}=130,136$  and 183 GeV, *Eur. Phys. J.* **C8** (1999) 23-40
- [8] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the Semileptonic Branching Ratio of Charm Hadrons produced in  $Z^0 \rightarrow cc$  Decays, *Eur. Phys. J.* **C8** (1999) 573-584
- [9] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. :  $W^+W^-$  production and triple gauge boson couplings at LEP energies up to 183 GeV, *Eur. Phys. J.* **C8** (1999) 191-215
- [10] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Higgs Bosons in  $e^+e^-$  Collisions at 183 GeV, *Eur. Phys. J.* **C7** (1999) 407-435
- [11] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Bose-Einstein Correlations in  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  at 172 and 183 GeV, *Eur. Phys. J.* **C8** (1999) 559-571
- [12] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Baryon and Lepton Number Violating  $Z^0$  Decays, *Phys. Lett.* **B447** (1999) 157-166
- [13] The OPAL collaboration G. Abbiendi et al. : A Measurement of the  $\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu}$  Branching Ratio, *Phys. Lett.* **B447** (1999) 134-146
- [14] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : A Measurement of the Product Branching Ratio  $f(b \rightarrow \Lambda_b) \cdot BR(\Lambda_b \rightarrow \Lambda_X)$  in  $Z^0$  Decays, *Eur. Phys. J.* **C9** (1999) 1-9
- [15] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the  $B^+$  and  $B_0$  Lifetimes and Search for CP(T) Violation using Reconstructed Secondary Vertices, *Eur. Phys. J.* **C12** (2000) 609-626
- [16] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Colour reconnection studies in  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  at  $\sqrt{s}=183$  GeV, *Phys. Lett.* **B453** (1999) 153-168
- [17] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the W Mass and Width in  $e^+e^-$  Collisions at 183 GeV, *Phys. Lett.* **B453** (1999) 138-152
- [18] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Searches for R-Parity Violating Decays of Gauginos at 183 GeV at LEP, *Eur. Phys. J.* **C11** (1999) 619-642
- [19] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Intermittency and Correlations in Hadronic  $Z^0$  Decays, *Eur. Phys. J.* **C11** (1999) 239-250
- [20] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurements of the QED Structure of the Photon, *Eur. Phys. J.* **C11** (1999) 409-425
- [21] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Experimental Properties of Gluon and Quark Jets from a Point Source, *Eur. Phys. J.* **C11** (1999) 217-238
- [22] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Scalar Top and Scalar Bottom Quarks at  $E_{CM}=189$  GeV at LEP, *Phys. Lett.* **B456** (1999) 95-106
- [23] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for R-parity Violating Decays of Scalar Fermions at LEP, *Eur. Phys. J.* **C12** (2000) 1-24
- [24] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Test of the Flavour Independence of  $\alpha_s$  Using Next-to-leading Order Calculations for Heavy Quarks, *Eur. Phys. J.* **C11** (1999) 643-659
- [25] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurements of inclusive semileptonic branching fractions of b hadrons in  $Z^0$  decays, *Eur. Phys. J.* **C13** (2000) 225-240

- [26] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Higgs Boson and Other Massive States Decaying into Two Photons in  $e^+e^-$  Collisions at 189 GeV, Phys. Lett. **B464** (1999) 311-322
- [27] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : A Study of  $B_s^0$  Meson Oscillation Using Hadronic  $Z^0$  Decays Containing Leptons, Eur. Phys. J. **C11** (1999) 587-598
- [28] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Multi-photon production in  $e^+e^-$  collisions at  $\sqrt{s}=189$  GeV, Phys. Lett. **B465** (1999) 303-314
- [29] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the Production Rate of Charm Quark Pairs from Gluons in Hadronic  $Z^0$  Decays, Eur. Phys. J. **C13** (2000) 1-13
- [30] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Neutral Higgs Bosons in  $e^+e^-$  Collisions at  $\sqrt{s}\sim 189$  GeV, Eur. Phys. J. **C12** (2000) 567-586
- [31] 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 GeV at LEP, Accepted by Eur. Phys. J. **C**
- [32] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for pair-produced leptoquarks in  $e^+e^-$  interactions at  $\sqrt{s}=183$  GeV, Eur. Phys. J. **C13** (2000) 15-27
- [33] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : A Study of Three-Prong Tau Decays with Charged Kaons, Eur. Phys. J. **C13** (2000) 197-212
- [34] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Anomalous Production of Acoplanar Dilepton Events in  $e^+e^-$  collisions at  $\sqrt{s} = 183$  and 189 GeV, Accepted by Eur. Phys. J. **C**
- [35] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Chargino and neutralino Production at  $\sqrt{s}=189$  GeV at LEP, Accepted by Eur. Phys. J. **C**
- [36] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the  $W^+W^-$  gamma Cross-section and First Direct Limits on Anomalous Electroweak Quartic Gauge Couplings, Phys. Lett. **B471** (1999) 293-307
- [37] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Tau decays with Neutral Kaons, Eur. Phys. J. **C13** (2000) 213-223
- [38] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Unstable Heavy and Excited Leptons at LEP2, Accepted by Eur. Phys. J. **C**
- [39] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Z Boson Pair Production in  $e^+e^-$  Collisions at  $\sqrt{s} = 183$  and 189 GeV, Phys. Lett. **B476** (2000) 256-272
- [40] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for New Physics in Rare B Decays, Phys. Lett. **B476** (2000) 233-242
- (会議抄録)
- [41] J.Z. Wang, E.S. Seo, K. Anraku, M. Fujikawa, M. Imori, T. Maeno, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, H. Matsunaga, J. Mitchell, A. Moiseev, M. Motoki, J. Nishimura, M. Nozaki, S. Orito, J. Ormes, T. Saeki, T. Sanuki, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, I. Ueda, N. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida and K. Yoshimura : Measurement of Cosmic-Ray H and He Isotopes in a Series of Annual Balloon Flights, Proc. 26th Intl. Cosmic Ray Conf. (Utah) **3** (1999) 37-40
- [42] K. Yoshimura, T. Maeno, S. Orito, H. Matsunaga, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, M. Imori, M. Ishino, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, M. Motoki, J. Nishimura, M. Nozaki, J. Ormes, T. Saeki, T. Sanuki, M. Sasaki, E.S. Seo, Y. Shikaze, T. Sonoda, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, I. Ueda, J.Z. Wang, N. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto and T. Yoshida : Measurement of Cosmic-Ray Antiproton Spectrum in the Energy Range 0.18 to 3.56 GeV at Solar Minimum, Proc. 26th Intl. Cosmic Ray Conf. (Utah) **3** (1999) 81-84
- [43] M. Nozaki, M. Sasaki, T. Saeki, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, M. Imori, M. Ishino, T. Maeno, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, H. Matsunaga, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, M. Motoki, J. Nishimura, S. Orito, J. Ormes, T. Sanuki, E.S. Seo, Y. Shikaze, T. Sonoda, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, I. Ueda, J.Z. Wang, N. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida and K. Yoshimura : A Search for Antihelium down to  $10^{-6}$  Relative to Helium, Proc. 26th Intl. Cosmic Ray Conf. (Utah) **3** (1999) 85-88
- [44] T. Sanuki, M. Motoki, H. Matsumoto, E.S. Seo, J.Z. Wang, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, M. Imori, M. Ishino, T. Maeno, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsunaga, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, J. Nishimura, M. Nozaki, S. Orito, J. Ormes, T. Saeki, M. Sasaki, Y. Shikaze, T. Sonoda, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, I. Ueda, N. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida and K. Yoshimura : A Precise Measurement of Cosmic-Ray Proton Spectrum with BESS Spectrometer, Proc. 26th Intl. Cosmic Ray Conf. (Utah) **3** (1999) 93-96
- (学位論文)
- [45] T.Maeno : "Precision Measurement of Cosmic-Ray Antiproton Spectrum", 2000年3月, (博士論文)
- [46] 泉康介 : 「BESS測定器による低エネルギー領域における宇宙線陽子流束の測定」, 2000年3月, (修士論文)
- [47] 福家英之 : 「BESS実験による宇宙線ストレンジ・マターの探索」, 2000年3月, (修士論文)

< 学術講演 >

## (国際会議)

## 一般講演

- [48] BESS Collaboration, J.Z. Wang : “Measurement of Cosmic-Ray H and He Isotopes in a Series of Annual Balloon Flights”, Proc. 26th Intl. Cosmic Ray Conf. (Aug. 1999) Utah
- [49] BESS Collaboration, K. Yoshimura : “Measurement of Cosmic-Ray Antiproton Spectrum in the Energy Range 0.18 to 3.56 GeV at Solar Minimum”, Proc. 26th Intl. Cosmic Ray Conf. (Aug. 1999) Utah
- [50] BESS Collaboration, M. Nozaki : “A Search for Antihelium down to  $10^{-6}$  Relative to Helium”, Proc. 26th Intl. Cosmic Ray Conf. (Aug. 1999) Utah
- [51] BESS Collaboration, T. Sanuki : “A Precise Measurement of Cosmic-Ray Proton Spectrum with BESS Spectrometer”, Proc. 26th Intl. Cosmic Ray Conf. (Aug. 1999) Utah
- [52] K. Yoshimura : “Recent result of the BESS experiment”, The 4th RESCEU International Symposium on “The Birth and Evolution of the Universe” (Nov. 1999) Tokyo
- [62] T.Sanuki : “Primary Cosmic Ray Flux”, Workshop of “Neutrino Oscillations and Their Origin” (Feb. 2000) Fuji-Yoshida
- [63] M.Motoki : “A Precise Measurement of the Flux of Atmospheric Muons”, Workshop of “Neutrino Oscillations and Their Origin” (Feb. 2000) Fuji-Yoshida
- [64] 前野忠嗣 : 「気球搭載型超電導スペクトロメータ (BESS) による宇宙起源反陽子流束の精密測定」, 日本物理学会 (2000年3月) 近畿大学
- [65] 佐々木誠 : 「超電導スペクトロメータを用いた宇宙粒子線観測気球実験 - 宇宙起源反ヘリウムの探索 ('93-'99)」, 日本物理学会 (2000年3月) 近畿大学
- [66] 灰野禎一 : 「BESS による TeV 領域一次宇宙線強度精密測定のための測定器の開発」, 日本物理学会 (2000年3月) 近畿大学
- [67] 藤川元治 : 「BESS 測定器を用いた山頂高度での宇宙線観測」, 日本物理学会 (2000年3月) 近畿大学
- [68] 山本康史 : 「BESS 搭載型シャワーカウンターによる宇宙線ミュオンの観測」, 日本物理学会 (2000年3月) 近畿大学
- [69] 福家英之 : 「BESS 実験による宇宙線ストレンジ・マターの探索」, 日本物理学会 (2000年3月) 近畿大学

## (国内会議)

## 一般講演

- [53] 大和一洋 : 「超伝導スペクトロメータを用いた宇宙粒子線観測気球実験における環境モニターシステムの開発」, 日本物理学会 (1999年9月) 島根大学
- [54] 佐貫智行 : 「超伝導スペクトロメータを用いた宇宙粒子線観測気球実験 - 陽子流束測定結果」, 日本物理学会 (1999年9月) 島根大学
- [55] 松本浩 : 「超伝導スペクトロメータを用いた宇宙粒子線観測気球実験 - ヘリウム流束測定結果」, 日本物理学会 (1999年9月) 島根大学
- [56] 浅岡陽一 : 「反陽子ビームによる BESS 測定器反陽子検出効率の直接測定」, 日本物理学会 (1999年9月) 島根大学
- [57] 安部航 : 「BESS99 実験経過報告」, 日本物理学会 (1999年9月) 島根大学
- [58] 吉村浩司 : 「乗鞍観測所における超伝導スペクトロメータを用いた宇宙線観測実験」, 宇宙線研究所共同利用研究発表会 (1999年12月) 宇宙線研究所
- [59] 志風義明 : 「超伝導スペクトロメータによる気球実験 (BESS) - BESS-99 実験経過 -」, 大気球シンポジウム (1999年12月) 宇宙科学研究所
- [60] 山本康史 : 「超伝導スペクトロメータによる気球実験 (BESS) - シャワーカウンターの性能評価 -」, 大気球シンポジウム (1999年12月) 宇宙科学研究所
- [61] 元木正和 : 「超伝導スペクトロメータによる気球実験 (BESS) - 実験結果 -」, 大気球シンポジウム (1999年12月) 宇宙科学研究所
- [70] 浅岡陽一 : 「BESS におけるチェレンコフ光を用いた宇宙線粒子識別」, 日本物理学会 (1999年9月) 島根大学
- [71] 吉田哲也 : 「BESS 実験の最近の成果と将来展望」, 日本物理学会 (2000年3月) 近畿大学

## 招待講演

- [70] 浅岡陽一 : 「BESS におけるチェレンコフ光を用いた宇宙線粒子識別」, 日本物理学会 (1999年9月) 島根大学
- [71] 吉田哲也 : 「BESS 実験の最近の成果と将来展望」, 日本物理学会 (2000年3月) 近畿大学

## (セミナー)

- [72] 吉田哲也 : 「気球搭載型超伝導スペクトロメータによる宇宙起源反粒子の探索」, 青山学院大学理工学部物理学科コロキウム (1999年11月) 青山学院大学

## 2.4 駒宮 研究室

当研究室は、2000 年度から本格的な活動を開始する若い研究室である。素粒子物理学の重要な問題を実験的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に於ける加速器実験に加え、飛翔体を利用した宇宙線観測実験や、新型の粒子検出器の開発研究を行う。本質的な物理に根ざした興味ある研究テーマ、斬新な実験手法を積極的に開拓して行きたい。

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

世界最高エネルギーの電子・陽電子衝突型加速器 ( $e^+e^-$  コライダー) LEP を用いて、国際協同実験 OPAL を素粒子物理国際研究センターと共同で行っている。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。

電子と陽電子は、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、電子と陽電子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 (例えば図 2.4 a 参照)。従って、エネルギーフロンティア (世界最高エネルギー) での電子・陽電子 ( $e^+e^-$ ) 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。

1989 年に重心系エネルギー 90 GeV 近辺で実験を開始して以来、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。

1999 年度は、加速器の調整が順調に行なわれた為、衝突エネルギーを 202 GeV まで増強すると同時に、衝突頻度を前年よりも更に上げ、積算ルミノシティ  $225 \text{ pb}^{-1}$  相当のデータを収集した。この大量のデータを用いて、以下の主要な研究成果が得られた。

#### 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、現在の素粒子の「標準理論」で唯一未発見のヒッグス粒子の役割である。真空は実は「無」ではなく濃密なヒッグス粒子の場が凝縮しており、本来質量の無い素粒子がこのヒッグス粒子の場と相互作用することによって、いわば「抵抗」を受けて光の速度では走れなくなり、質量が生ずると考えられる。このヒッグス粒子がど

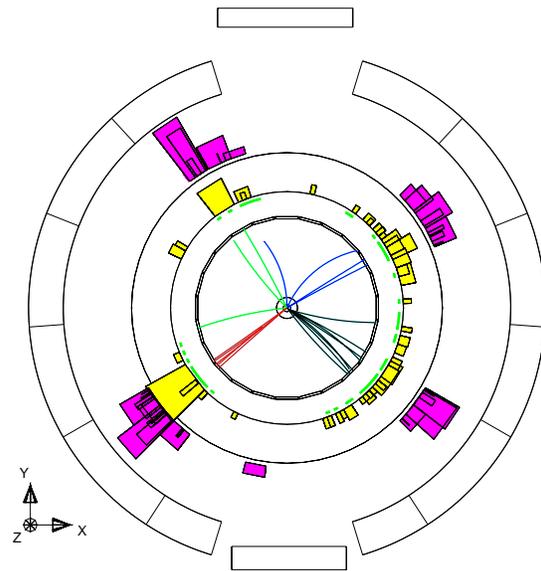


図 2.4 a: 電子・陽電子衝突で対生成した W ボソンがそれぞれクォーク対に崩壊し、4 つのクォークになった事象。OPAL 測定器により観測された。4 つのクォークは、図の中心から外へ向かう 4 本の粒子の束 (ジェット) として観測される。電子・陽電子衝突反応では、この様に素過程を直接的に観測できる。

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問題である。電子・陽電子衝突では、ヒッグス粒子は極めて明確に検出できると考えられる。1999 年度までのデータ解析からは、標準理論で予言されるヒッグス粒子の生成の兆候はまだ見えていないが、ヒッグス粒子質量の下限は Z ボソンの質量 91.17 GeV をはるかに超えて 102 GeV まで上がった。

ミニマル超対称性理論は質量が 130 GeV 以下に電氣的に中性なヒッグス粒子が必ず存在すると予言している。特に、2 つのヒッグス 2 重項の真空期待値の比が小さいと、最も軽いヒッグス粒子の質量がさらに軽くなる。1999 年度は真空期待値の比が 2 程度以下の領域でヒッグス粒子の存在を棄却した。残る領域は真空期待値の比が大きい領域であり、ヒッグス粒子をパラメータ領域の角に追い詰めてきたといえる (図 2.4 b 参照)。

#### 超対称性粒子の探索

現在、超対称性理論は「標準理論」を越える学説の内でも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一種類でも発見されれば、重力をも含めた究極の

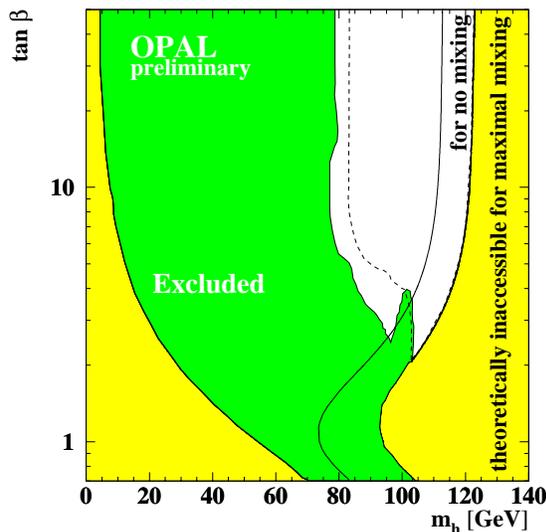


図 2.4 b: OPAL 実験が得た超対称性粒子ヒッグス質量の棄却領域 (濃い灰色の領域)。縦軸は超対称性理論に必要な 2 種類のヒッグス粒子の真空期待値 ( $v_1, v_2$ ) の比 ( $\tan\beta = v_2/v_1$ )。薄い灰色の領域は理論的に棄却されている領域。スカラートップの混合によって理論的に棄却される領域が変わる。点線は OPAL が得たルミノシティから予想される棄却領域。実際の棄却領域が予想よりも狭いのは事象数が標準理論で期待された数よりも多いためである。

統一理論への大きな方向が定まる。LEP-II ではこの超対称性パートナーのうちでも、質量が軽いと期待される強い相互作用をしない粒子群の発見が期待される。超対称性大統一理論を仮定すると、LEP-II の実験が、現在最も広い探索可能領域を持つ。1999 年度までのデータからは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、チャージーノ・スカラートップ等も今までの探索領域から約 10 GeV 近く更に高い質量まで探ることができた。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粒子 (ニュートラリーノ) に対して質量の下限值 31.6 GeV を得ている (図 2.4 c 参照)。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。

### W ボソンの物理

W ボソンは、Z ボソンと並んで「弱い力」を伝達するゲージ粒子である。W ボソンの対生成が可能な  $e^+e^-$  コライダーは LEP-II だけである。LEP-I での Z ボソンの質量などの高精度測定から、W ボソンの質量は「標準理論」を仮定すると 30 MeV の精度で間接的に決定することができる。LEP-II においては  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  の過程で対生成された W ボソン

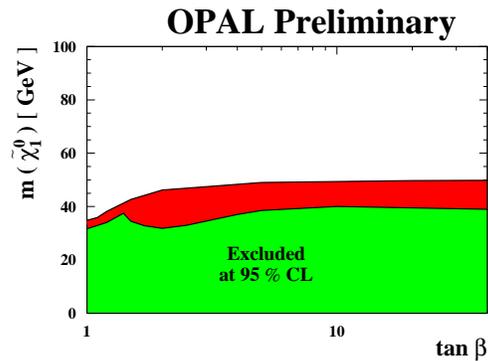


図 2.4 c: OPAL 実験の超対称性粒子群の探索の結果得た最も軽いニュートラリーノ ( $\tilde{\chi}_1^0$ ) の質量の下限值。横軸は超対称性理論に必要な 2 種類のヒッグス粒子の真空期待値の比 ( $\tan\beta = v_2/v_1$ )。薄い灰色の領域はスカラーレプトンの質量に依らない棄却領域。スカラーレプトンの質量が重い場合は濃い灰色の領域も棄却される。暗黒物質の最有力候補の素粒子である  $\tilde{\chi}_1^0$  の質量を、スカラーレプトンの質量に依らずに、31.6 GeV まで棄却することが出来た。

の質量をこの 30 MeV に匹敵する精度で直接測定することによって、LEP-I での精密測定とは独立な統一ゲージ理論の高い精度での検証ができ、ヒッグス粒子の質量の予言が可能となる。また、W ボソンのゲージ結合を測定することによって、「標準理論」を越える様々な理論に対してその可能性を探り厳しい制限を付けることができる。W ボソンの質量とその性質の測定は、取得データ量とともに向上している。1999 年度前半のデータから OPAL 単独では、W ボソンの質量は  $80.446 \pm 0.051 \pm 0.039$  GeV (二つの誤差はそれぞれ統計誤差と系統誤差)、と測定されている。W ボソンのゲージ結合の測定も行なっており、過去の実験や現在走っている他の加速器を用いた実験と比較しても、更に高い精度で統一ゲージ理論の検証を行っている。

### 電子やクォークの内部構造の探索

更に LEP-II では、電子・陽電子衝突の様々な基本的過程の精密測定を行ない、「標準理論」を高精度で検証するとともに、その僅かな破れを見つけ出そうとしている。その一つの例として電子・陽電子が消滅してクォーク・反クォークが生成された事象の生成断面積の衝突エネルギー依存を図 2.4 d に示す。今まで内部構造のない素粒子であると考えられている電子などにもし構造があれば、高いエネルギーでの衝突ではその内部を構成する粒子同士の衝突になり、散乱反応が「素粒子」の場合とは異なって観測される。測定値は「標準理論」の予言値と良く合っている。この結果から、電子やクォークなどのサイズに制限が付き、電子やクォークのサイズは  $0.2 \sim 1.0 \times 10^{-17}$  cm

以下であることが分かった (適用する理論によってサイズの上限が異なる).

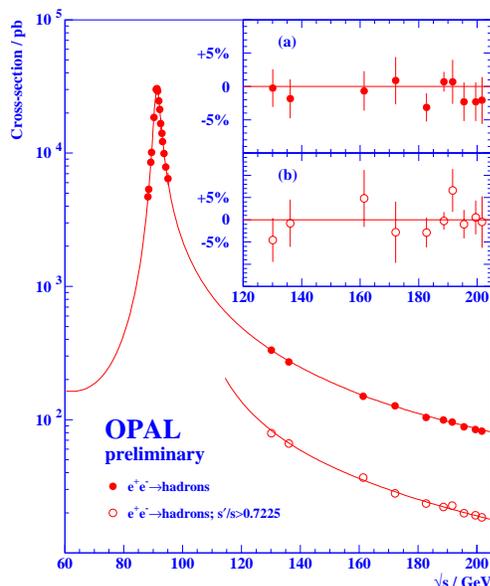


図 2.4 d: OPAL 測定器により測定された電子・陽電子衝突で対生成したクォーク対 ( $q\bar{q}$ ) の生成断面積を衝突エネルギーの対生成したクォーク対 ( $q\bar{q}$ ) の生成断面積を衝突エネルギーの関数としてプロットした。黒丸が生成断面積の測定値。白丸はこの中で  $e^+e^- \rightarrow Z\gamma \rightarrow q\bar{q}\gamma$  を除いた生成断面積の測定値。2組のカーブは「標準理論」の予言を示す。右上のプロットは測定値の「標準理論」の予言値からのずれを示す。測定誤差の範囲で測定値と「標準理論」の予言値が良く一致している事が分る。

2000 年度には、LEP の重心エネルギーは、約 205 GeV の最高エネルギーに達する見込みである。この最高エネルギーで得られる大量の W 粒子対生成事象等の観測を通して、標準理論を更に精度良く検証しその破れを探すと同時に、大統一理論などの更に大きな枠組の可能性を検証する。また、ヒッグス粒子は 110 GeV 近辺まで直接探索可能になり、超対称性理論の示唆する軽いヒッグス粒子発見の可能性がある。超対称性粒子などの探索領域も更に広がる。更に、W ボソンの質量の測定では、系統誤差の研究が進みつつある。又 LEP の 4 実験のデータを統合することによって統計誤差を半分にすることができる。従って、2-3 年の解析の後には W ボソン質量の測定精度はゴールである 30 MeV に近付くと考えられる。

## 2.4.2 電子・陽電子リニアコライダー JLC 計画

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。単位時間あたりにシンクロトロン放射によって失われるエネルギーは粒子の持つエネルギーの 4 乗に比例し加速器の曲率半径の 2 乗に反比例する。供給電力を一定に保ちながら、衝突エネルギーを倍にするためには半径を 4 倍にする必要があり、もはやこのような円形の  $e^+e^-$  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、米国などで盛んに行なわれている。日本はいち早く  $e^+e^-$  リニアコライダー高エネルギー物理の次期基幹計画として取り上げた。既に主加速器の殆んどのコラボレーションは衝突エネルギー 500 GeV のコライダーの仕様を満たすところまで技術開発が進んだ。

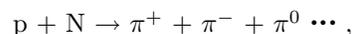
一方、LEP のデータは電弱統一ゲージ理論の正しさを圧倒的な精度で検証したのみならず、更に、強い相互作用をも統一する大統一理論、及び超対称性の正しさを示唆している。もしこれが正しいとすれば、理論は 130 GeV 以下の質量を持った軽いヒッグス粒子の存在を予言しており、また超対称性粒子があまり高くないエネルギーに存在する可能性が高い。電子・陽電子衝突過程はその単純さ故に、新粒子の発見が容易なだけでなく、ひとたび粒子が発見されればその性質の詳細を解明することができる。LEP-II の先のエネルギーフロンティアを開く 300 ~ 500 GeV の  $e^+e^-$  リニアコライダーが、「軽いヒッグス粒子の検出とその性質の精密測定」及び「超対称性粒子の探索」を通じて、21 世紀の素粒子物理学の方向を決定する可能性が高い。本年度も JLC に於ける物理及び測定器の検討を行ない、その実現に向けて全国の研究者と共に努力を重ねた。

## 2.4.3 気球搭載超伝導スペクトロメータによる宇宙線 $\mu/e$ 粒子の観測

宇宙線反陽子等の観測を通して、「宇宙における素粒子現象」を探求する実験を、高エネルギー加速器研究機構・神戸大学・宇宙科学研究所・米国航空宇宙局 (NASA) と国際共同で行っている。

加速器実験技術で培った最先端の技術を駆使して設計・製作された BESS 測定器 (図 2.4 e) は、超伝導ソレノイド・飛跡検出器・高性能粒子識別装置・並列処理型高速データ収集システムで構成され、大面積立体角を有し、0.2 ~ 120 GeV の広いエネルギー領域を同時に高精度に測定できるという、これまでの飛翔体観測器にない特長を備えている。この特長を生かして、「陽子・ヘリウム・電子等の、各種宇宙粒子線」の絶対流束及びスペクトラムを精密に測定すると同時に、「反陽子・反ヘリウム等の反粒子」を極微量まで探索している。

宇宙から地球に降り注ぐ一次宇宙線 (主に陽子 p) が大気突入し、大気中の原子核 (N) と衝突すると、以下のような反応過程が進行する。



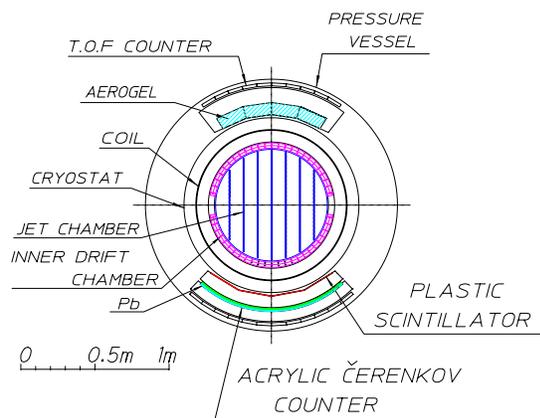
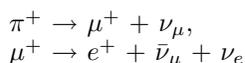


図 2.4 e: 1999 年夏の飛行実験に用いた BESS 測定器の断面図。



こうして生成される  $\mu^\pm$ ,  $e^\pm$  成分を宇宙線の大半を占める陽子やヘリウムの中から識別し、それぞれの流束を精度良く求めることを目指して、新たに電磁シャワーカウンターを開発した [31]。この電磁シャワーカウンターによって、BESS 測定器の  $\mu/e$  粒子識別能力を 100 倍程度にまで向上させることができる。電磁シャワーカウンターは、電磁シャワーを成長させる鉛と、その成長の様子を読み出すためのアクリル製チェレンコフカウンターで構成されている。図 2.4 e に示すように、電磁シャワーカウンターは超伝導電磁石の下に設置された。

BESS 測定器は、科学観測用の大型気球によって、大気最上層 (高度 37km, 200 分の 1 気圧) まで上昇する。ロケットで打ち上げられる人工衛星等と異なり、上昇中も観測が可能である。また、上昇速度も比較遅いので、上昇中に観測できる宇宙線事象の数も多い。この特徴を利用して、地上 (1 気圧) から高度 37km (1/200 気圧) に至る宇宙線の絶対流束の「高度依存性」を詳細に観測し、上に書いた大気中で宇宙線が引き起こす反応過程を、さらには「大気シャワーモデル」を検証する。

また、この反応過程が示すように、 $\mu$  粒子の生成・消滅に伴って、ニュートリノ (スーパー神岡実験で観測されている大気ニュートリノ) が生成される。大気ニュートリノ現象を詳細に解析するために必要不可欠な、高精度の大気ニュートリノ流束計算には、大気中の  $\mu$  粒子の絶対流速を正確に測定することが必須である。したがって、 $\mu$  粒子の各高度毎の絶対流束を測定することにより、大気ニュートリノの絶対強度に関する情報を得ることができる。

1999 年の夏に、カナダ北部で気球飛行実験に成功し、電磁シャワーカウンターを用いた観測を行った。その結果の例を図 2.4 f に示した。 $\mu$  粒子は鉛中에서도ほとんど相互作用を起こさずに通過するのに対し、電子・陽電子は鉛中で電磁シャワーを起こして複数の電子・陽電子対を生成する。この結果、電子は  $\mu$  粒

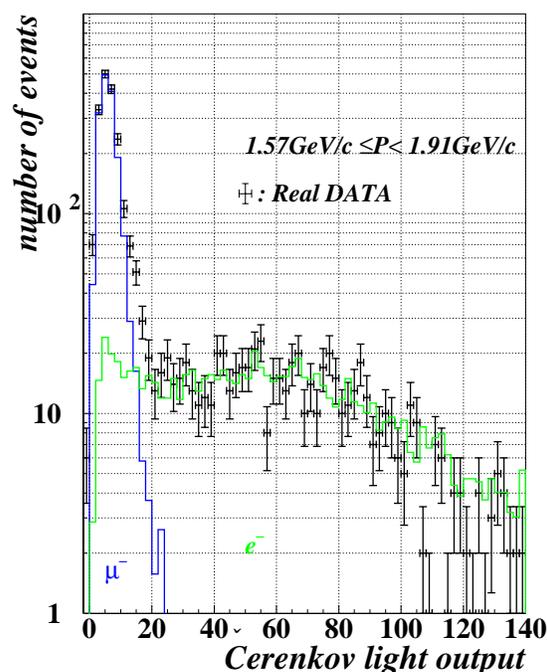


図 2.4 f: 電磁シャワーカウンターに入射した電子・ $\mu$  粒子の光量分布。ヒストグラムはシミュレーションによる予測分布、データ点は飛行実験で得られた分布を示す。

子に比べて、大きなチェレンコフ光を発生させることになる。この光量の違いを利用して電子・陽電子と  $\mu$  粒子を識別出来ることが分かる。

地上から高度 37km に至る、宇宙線  $\mu$  粒子の解析は、現在も進行中である。

#### 2.4.4 粒子検出器の研究開発

当研究室では、実際の実験に用いることの出来る粒子検出器の研究開発を行なっている。1999 年度は特に、 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  探索実験用の測定器の一部の開発を行なった。スイス国立 PSI 研究所の、 $3 \times 10^8 \text{ sec}^{-1}$  という世界最強の  $\mu^+$  ビームを使った新しい  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  探索実験では、 $\gamma$  のエネルギー及び放出角、 $e^+$  の運動量測定の分解能を上げ、 $e^+$  と  $\gamma$  が逆方向に正しいエネルギー・運動量を持って放出されたことを押えてバックグラウンドを画的に落す。これに加えて  $e^+$  と  $\gamma$  の同時放出を測定するために  $\gamma$  はカロリメーターで放出時間を定め、 $e^+$  はプラスチック・シンチレータを用いたタイミングカウンターによって時間を定める。このタイミングカウンター試作器の時間分解能を KEK におけるビームテストにおいて測定した。1 GeV/c の  $\pi^+$  のビームを用いたテストでは、時間分解能 52 ps を記録した。シンチレータに実際  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  からの  $e^+$  が入ると 1 GeV/c の  $\pi^+$  よりも光量が多く出るので、スイスでの本実験でも十分な性能を発揮できるタイミングカウンターが製作可能であると結論される。

&lt; 報文 &gt;

(原著論文)

- [1] The LEP Working Group for Higgs Boson Searches ALEPH, DELPHI, L3, and OPAL: Limits on Higgs Boson Masses from Combining the Data of the four LEP experiments at energies upto 183 GeV, CERN-EP/99-060.
- [2] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Total Hadronic Cross-Section of Photon-Photon Interactions at LEP, CERN-EP/99-076.
- [3] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Measurements of inclusive semileptonic branching fractions of b hadrons in  $Z^0$  decays, Eur. Phys. J. C **13** (2000) 225-240.
- [4] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: A Study of Spin Alignment  $\rho(770)^{+-}$  and  $\omega(782)$  Mesons in Hadronic  $Z^0$  Decays, CERN-EP/99-082.
- [5] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Search for Higgs Boson and Other Massive States Decaying into Two Photons in  $e^+e^-$  Collisions at 189 GeV, Phys. Lett. B **464** (1999) 311-322.
- [6] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: A Study of  $B_s^0$  Meson Oscillation Using Hadronic  $Z^0$  Decays Containing Leptons, Eur. Phys. J. C **11** (1999) 587-598.
- [7] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Multi-photon production in  $e^+e^-$  collisions at  $\sqrt{s} = 189$  GeV, Phys. Lett. B **465** (1999) 303-314.
- [8] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Measurement of the Production Rate of Charm Quark Pairs from Gluons in Hadronic  $Z^0$  Decays, Eur. Phys. J. C **13** (2000) 1-13.
- [9] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Search for Neutral Higgs Bosons in  $e^+e^-$  Collisions at  $\sqrt{s} = 189$  GeV, Eur. Phys. J. C **12** (2000) 567-586.
- [10] 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 GeV at LEP, CERN-EP/99-097, Accepted by Eur. Phys. J. C.
- [11] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Search for pair-produced leptoquarks in  $e^+e^-$  interactions at  $\sqrt{s}=183$  GeV, Eur. Phys. J. C **13** (2000) 15-27.
- [12] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: A Study of Three-Prong Tau Decays with Charged Kaons, Eur. Phys. J. C **13** (2000) 197-212.
- [13] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Precision Luminosity for  $Z^0$  Lineshape Measurements with a Silicon-Tungsten Calorimeter, CERN-EP/99-136.
- [14] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Search for Anomalous Production of Acoplanar Dilepton Events in  $e^+e^-$  collisions at  $\sqrt{s} = 183$  and 189 GeV, CERN-EP/99-122, Accepted by Eur. Phys. J. C.
- [15] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Search for Chargino and neutralino Production at  $\sqrt{s}=189$  GeV at LEP, CERN-EP/99-123, Accepted by Eur. Phys. J. C.
- [16] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Measurement of the  $W^+W^-$  gamma Cross-section and First Direct Limits on Anomalous Electroweak Quartic Gauge Couplings, Phys. Lett. B **471** (1999) 293-307.
- [17] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Tau decays with Neutral Kaons, Eur. Phys. J. C **13** (2000) 213-223.
- [18] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Inclusive Production of  $D^*$  Mesons in Photon-Photon Collisions at  $\sqrt{s}_{ee}=183$  and 189 GeV and a First Measurement of  $F_{2c}^\gamma$ , CERN-EP/99-157.
- [19] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Bose-Einstein correlations in  $K^{+-}K^{+-}$  pairs from  $Z^0$  decays into two hadronic jets, CERN-EP/99-163.
- [20] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Leading Particle Production in Light Flavour Jets, CERN-EP/99-164.
- [21] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Measurements of  $R_b$ ,  $A_{FB}^b$ , and  $A_{FB}^c$  in  $e^+e^-$  Collisions at 130-189 GeV, CERN-EP/99-170.
- [22] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Search for Unstable Heavy and Excited Leptons at LEP2, CERN-EP/99-169, Accepted by Eur. Phys. J. C.
- [23] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: QCD Analyses and Determinations of  $\alpha_s$  in  $e^+e^-$  Annihilation at Energies between 35 and 189 GeV, CERN-EP/99-175.
- [24] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Search for New Physics in Rare B Decays, Phys. Lett. B **476** (2000) 233-242.
- [25] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: QCD Studies with  $e^+e^-$  Annihilation Data at 172-189 GeV, CERN-EP/99-178.
- [26] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Z Boson Pair Production in  $e^+e^-$  Collisions at  $\sqrt{s} = 183$  and 189 GeV, Phys. Lett. B **476** (2000) 256-272.
- [27] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Transverse and Longitudinal Bose-Einstein Correlations in Hadronic  $Z^0$  Decays, CERN-EP/2000-004.
- [28] The LEP Collaborations ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, LEP Electroweak Working Group, and the

SLD Heavy Flavour and Electroweak Groups: A Combination of Preliminary Electroweak Measurements and Constraints on the Standard Model, CERN-EP-2000-016 annual report.

- [29] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al.: Measurement of  $V_{cb}$  using  $B_0 \rightarrow D^* + l\nu$  decays, CERN-EP-2000-032.

(会議抄録)

- [30] 山本康史他、大気球シンポジウム (平成 11 年度) 21

(学位論文)

- [31] 山本康史: 「気球搭載用シャワーカウンターの開発」, 2000 年 3 月, (修士論文)  
 [32] 矢萩幸一: 「 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊探索実験用  $e^+$  タイミングカウンター試作器の時間分解能測定」, 2000 年 3 月, (修士論文)

(国際会議)

招待講演

- [33] S. Komamiya: “Experimental Overview for  $e^+e^-$  Linear Colliders in the Near Future”, The 4th International Workshop on Physics and Experiments with Future Linear  $e^+e^-$  Colliders, (May 1999) Sitges, Spain  
 [34] S. Komamiya: “Summary of JLC detector towards the design”, The 2nd ACFA JLC Physics and Detector Workshop, (Nov. 1999) Seoul, Korea

(国内会議)

招待講演

- [35] 駒宮 幸男: 「Recent results from LEP 2」KEK 理論研究会「素粒子物理の現状と展望」, KEK、2000 年 2 月

(セミナー)

- [36] 駒宮 幸男: 「高エネルギー  $e^+e^-$  衝突実験の歴史、現状、展望」, 東京大学物理学専攻談話会, 東京大学, 平成 11 年 11 月 19 日  
 [37] 駒宮 幸男: 「高エネルギー  $e^+e^-$  衝突実験の歴史、現状、展望」, お茶の水女子大学物理学セミナー, お茶の水女子大学, 平成 11 年 12 月 14 日

## 2.5 衰輪 研究室

衰輪 研究室では、大型加速器を使わずに素粒子の実験的研究を行なっている。

### 2.5.1 ボロメーターを用いた暗黒物質の直接検出実験

我々の宇宙には通常物質の10倍以上の光らない物質があることを示唆する観測的および理論的根拠が数多くある。この物質は暗黒物質（ダークマター）と呼ばれており、その正体は素粒子の超対称性理論の予言する粒子ニュートラリーノである可能性が高い。

暗黒物質ニュートラリーノが通常の原子核と弾性散乱を行なうと原子核は10 keV程度の反跳エネルギーを受ける。我々はこの反応を利用し暗黒物質ニュートラリーノを直接検出するために、ボロメーターを開発し、実験を行なっている。本研究は筑波大学大塚洋一教授と共同で行なっている。

ボロメーターは10 mK程度に冷却した吸収体とそれに取り付けられた高感度抵抗温度計（サーミスター）からなる極低温熱量計型検出器である。10 keV程度のエネルギーによる吸収体の温度上昇をサーミスターにより電気信号に変換するというのがボロメーターを用いたニュートラリーノ検出の原理である。

原子核 $^{19}\text{F}$ はそのスピン構造から、スピンの依存した相互作用を行なうニュートラリーノに対し非常に大きな弾性散乱断面積を持つと考えられており、 $^{19}\text{F}$ （自然存在比100%）を含んだ検出器は暗黒物質ニュートラリーノの探索には非常に有利である。我々はこの観点から20 gのフッ化リチウム $\text{LiF}$ の単結晶を吸収体としたボロメーターを完成させ、検出器の大質量化のために、8個並べて用いている。

本年は、それまで千葉県富津市鋸山のトンネル内に設置してあったボロメータを、宇宙線の強度が桁程少ない宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設の地下実験室へ移設した。鋸山内での希釈冷凍機の運転のために、空気から液体窒素を製造する装置を導入し、既に使用しているヘリウム再凝縮装置とあわせて寒剤の補給なしに長期運転のできる体制を整えた。

また、神岡鋸山内は空気中の放射性ラドンガス濃度が高いことが知られているので、希釈冷凍機近傍にラドンが入り込まないようにするためのガスバッグを設置した。ガスバッグの中にはラドン濃度の低い上記液体窒素製造機からの蒸発ガスを流している。このように、神岡において低放射線バックグラウンド実験を行なう上で空気中のラドンガスのモニタが必須であるので、そのために静電捕集型ラドン検出器（図2.5 a）を製作して蒸発ガスの常時モニタを行なっている。このモニタは、市販の安価な「ステンレス製バケツ」を利用している。

このラドン濃度の測定値をもとに電子・ガンマ線シミュレーションコード（EGS）を使って検出器への影響を調べ、検出器周辺のラドンガスの放射能による測定への影響は無視できるレベルに押え込むことができることを確認した。

実験中には希釈冷凍機の各部の温度や圧力などの運転状況が本郷構内よりインターネット経由で実時間監視ができるが、神岡・東京間の移動中などでも運転状況がわかるように、携帯電話でも監視ができるようになっている。

2000年のはじめより神岡での最初の測定が開始された。これまでは宇宙線の影響などで見ることができなかった検出器近傍の物質中のウラン・トリウム系列やカリウムの自然放射能をまず調べることに全力を注いでいる。この自然放射能についても起源を特定してできる限り完全に取り除くことにしている。



図 2.5 a: Radon gas monitor

ところで、われわれの実験はスピンの依存した相互作用を行なうニュートラリーノに対して大きな感度を持つように設計されているが、それにはたいしてスピンの依存しない相互作用を行なうニュートラリーノの探索実験もいくつかのグループにより行なわれている。このスピンの依存しない相互作用を行なうニュートラリーノの検出には、普通に使われている $\text{NaI(Tl)}$ などのシンチレーション検出器やゲルマニウム検出器を用いることができるので、比較的感度を上げやすいという特徴がある。どちらの種類のニュートラリーノが暗黒物質としてふさわしいかについては、素粒子論・宇宙論的には決めることは難しいとされている。

2、3年前からイタリアのローマ大学を中心とする暗黒物質探索の国際共同実験グループ DAMA が、このようなシンチレーション検出器を用いて暗黒物質ニュートラリーノによると考えられる検出率の季節変動をとらえたと称する報告をしている。理論的に予想される季節変動の大きさはわずか3%程度と小さいので、検出器の雑音などの経年変化などによるものではないかと、この結果を疑問視する声もあった。

ところが、2000年のはじめにアメリカのカリフォルニア大学バークレー校とスタンフォード大学を中

心とするグループ (CDMS グループ) の、やはりスピんに依存しない相互作用を行なうニュートラリーノに適したゲルマニウムボロメータ検出器による実験の結果が報告され、DAMA グループの主張するようなニュートラリーノは観測されなかったことを明らかにした。この論争がどのように決着するかは今のところ予測できないが、いずれにせよ彼らの実験とは相補的な我々の実験の感度を高めた結果を早く出してゆくことが重要であると考えている。

## 2.5.2 アクシオンヘリオスコープ実験

QCD における強い  $CP$  問題はアクシオン模型を導入する事によって解決されるが、それに伴って擬南部 Goldstone 粒子であるアクシオンが生じる。仮にこのアクシオンが存在した場合、太陽からも放出されていると考えられる。われわれの実験は、太陽から放出されている太陽アクシオンを地上で光子 (X 線) に変換し検出する事を目的としたものである。このための装置が図 2.5 b に示すアクシオンヘリオスコープである。本研究は高エネルギー加速器研究機構の山本 明教授と共同で行なっている。



図 2.5 b: Axion helioscope

アクシオンを光子に変換するためにはアクシオンの進行方向に対して垂直な向きに磁場をかければ良い。このためわれわれのヘリオスコープでは 4 T、2.3 m のレーストラック形超伝導磁石を太陽の方向に向けて追尾するという手法をとっている。そして、磁石の開口部の後方に置かれた X 線検出器 (PIN フォトダイオード) によってアクシオン起源の X 線を観測する。

これまでの観測において、 $m_a < 0.03 \text{ eV}$  の領域での他グループによる実験に比べて 4.5 倍強い制限を与えることができたが、第二回目の観測として磁場を印加した領域を極低温高密度の He ガスで満たして、axion 質量  $0.3 \text{ eV}$  以下の領域に感度を持つ観測をおこなう予定である。変換領域にガスを導入する事によって光子に見かけ上の質量を持たせるというものである。変換用の管の検出器側には、アクシオ

ンが変換されてできる  $3 \sim 10 \text{ keV}$  の低エネルギー X 線が透過できるようにベリリウムでできた X 線窓があり、それを通して PIN フォトダイオード (浜松フォトニクス製 S3590-06、 $11 \text{ mm} \times 11 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ) で X 線を検出する。

これまでのところ、バッファーガス管 (断面  $18 \text{ mm} \times 88 \text{ mm}$  長さ  $2300 \text{ mm}$  でステンレス製) およびその周辺部に細かな真空もれが見つかり、場所の特定と修理にかなりの時間が費やされたが、現在は問題は解決している。

また、実装状態で PIN フォトダイオードのエネルギー較正を行なう必要があるため、そのための回転式  $^{55}\text{Fe}$  線源ホルダーが開発された。この装置により、冷却状態で真空容器内に設置されている PIN フォトダイオードにたいして、必要な時だけ較正用の X 線をあてることができ、それ以外の時は遮蔽容器に線源が格納されるようになった。この操作は真空容器の外部からおこなうことができるようになっている。



図 2.5 c: PIN photodiodes Hamamatsu S3590-06 assembled with head amplifiers

X 線検出器に関しては、冷却時の熱収縮によって PIN フォトダイオードが割れるという現象、および冷凍機の振動によるマイクロフォニック雑音をひろいやすいという問題があったが、PIN フォトダイオードを熱膨張率の小さなインバーの上に貼りつけて、全体を基台の上にネジで固定するという方法をとることによりこれらの問題はほぼ解決したと考えている。図 2.5 c に PIN フォトダイオード 4 枚のモジュールを示す。ヘッドアンプ部はエポキシ樹脂で固めてある。

これらの改造によって、ヘリウムガスを充填した第2次測定への準備がほぼ完了した。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] W. Ootani, M. Minowa, K. Miuchi, Y. Inoue, T. Watanabe, M. Yoshida, Y. Ito and Y. Ootuka: First Results from Dark Matter Search Experiment in the Nokogiriyama Underground Cell  
Phys. Lett. B461 (1999) 371–375.
- [2] T. Watanabe, H. Sekiya, K. Takahisa, M. Tanikawa and Y. Ito: Development of low background CdZnTe detectors for detection of double beta decays of  $^{64}\text{Zn}$   
Nucl. Instr. and Meth. A436 (1999) 155–159.
- [3] W. Ootani, M. Minowa, K. Miuchi, T. Watanabe, Y. Ito, A. Takeda, Y. Inoue and Y. Ootuka: Tokyo dark matter search experiment with lithium fluoride bolometer  
Nucl. Instr. and Meth. A436 (1999) 233–237.

(会議抄録)

- [4] M. Minowa, S. Moriyama, Y. Inoue, T. Namba, Y. Takasu and A. Yamamoto: The Tokyo axion helioscope experiment  
Proceedings of the Second International Workshop on the Identification of Dark Matter, Eds. N. J. C. Spooner and V. Kudryavtsev (World Scientific) (1999) pp.447–453.
- [5] W. Ootani, M. Minowa, K. Miuchi, T. Watanabe, Y. Ito, Y. Inoue and Y. Ootuka: Search for particle dark matter with LiF bolometer  
Proceedings of the Second International Workshop on the Identification of Dark Matter, Eds. N. J. C. Spooner and V. Kudryavtsev (World Scientific) (1999) pp.371–376.

(国内雑誌)

- [6] 身内賢太郎・蓑輪 眞: 暗黒物質検出のための複合型ボロメータとNTDサーミスタ, 「放射線」Vol. 26, No. 1, pp. 23–33, JAN. 2000年.

(学位論文)

- [7] 竹田 敦: ボロメータの高感度化に用いるラドンモニタの開発, 2000年2月(修士論文).

< 学術講演 >

(国内会議)

一般講演

- [8] 井上慶純: 太陽アクシオン検出実験日本物理学会秋の分科会、島根大学 1999年9月23日.
- [9] 難波俊雄: 宇宙天体からのアクシオンとその地上での観測、日本物理学会秋の分科会、島根大学 1999年9月25日.

- [10] 竹田 敦: 暗黒物質探索実験に用いるボロメータの高感度化、日本物理学会秋の分科会、島根大学 1999年9月25日.
- [11] 身内賢太郎: ボロメータによる暗黒物質の探索、宇宙線研究所共同利用研究発表会、東京大学宇宙線研究所(田無) 1999年12月16日.
- [12] 身内賢太郎: LiF ボロメータによる暗黒物質探索実験 in 神岡、第6回素粒子物理国際センターシンポジウム、長野県白馬村 2000年2月22日.
- [13] 難波俊雄: 太陽アクシオン検出実験、日本物理学会春の分科会、近畿大学 2000年4月1日.
- [14] 竹田 敦: 暗黒物質探索実験のバックグラウンド低減に用いる Rn 検出器の開発、日本物理学会春の分科会、近畿大学 2000年4月2日.
- [15] 身内賢太郎: 神岡地下実験室に於ける暗黒物質探索実験 I、日本物理学会春の分科会、近畿大学 2000年4月2日.
- [16] 関谷洋之: 暗黒物質探索用ボロメータの結晶周囲環境のシミュレーション、日本物理学会春の分科会、近畿大学 2000年4月2日.

## 2.6 相原研究室

当研究室は、高エネルギー加速器研究機構のBファクトリー加速器を使った、粒子・反粒子間対称性の破れの研究と、半導体荷電粒子検出器の開発を中心とした研究活動を行っている。

素粒子の弱い相互作用においては、荷電共役（粒子の持つ電荷の反転  $+ \leftrightarrow -$ 、のことで、 $C$ と表す）空間反転（Parity,  $P$ ）、そして $C$ と $P$ を組み合わせた $CP$ のいずれの対称性も保存されない。このうち $C$ と $P$ の破れについては、その起源が解明されているが、粒子・反粒子の非対称性である $CP$ 非対称性については、未だ結論が出ていない。 $CP$ 対称性の破れの起源が、素粒子物理学の「標準理論」の重要な構成要素である小林・益川理論で説明できるのか、あるいは、他の理論の導入を必要とするのかは、現代素粒子物理学の大きな課題の一つである。

$CP$ 非保存の実験的研究は、 $CP$ 対称性のわずかな破れが、1964年に中性 $K$ 中間子の崩壊過程で発見されて以来、他の粒子の崩壊過程では観測されていない。小林・益川理論は、 $CP$ の破れが $B$ 中間子（例えば、ボトムクォークと反ダウンクォークから成る粒子）の崩壊においては、 $K$ 中間子の100倍の大きさで起こると予言する。当研究室では、このBファクトリーを使って $CP$ の破れの検出することを現在の主研究テーマとしている。

### 2.6.1 $B \rightarrow J/\psi$ inclusive decays の観測

Bファクトリーにおける Belle 実験グループは、1999年6月より実験を開始し、年末までに約  $0.25\text{fb}^{-1}$  のデータを収集した。この実験の初期データから得られた結果は、検出器がほぼ設計どおりの性能を発揮していることを示している [16, 20]。

図 2.6 a は、 $\Upsilon(4S)$  において、我々の測定器で観測された電子・陽電子ペアとミュオン・反ミュオンペアの不変質量分布である。約 83 個の  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  事象と約 133 個  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  事象がある。

### 2.6.2 $B \rightarrow J/\psi K_s$ 事象の検出

中性 $B$ 中間子は、反中性 $B$ 中間子とその状態を混合する。このとき、 $B$ と反 $B$ の両方から到達しうる $CP$ 変換の固有状態への崩壊を考えると、二つの振幅の間で量子力学的干渉が起こり、 $B$ と反 $B$ のその状態への部分崩壊幅が等しくなくなる。これが $B$ 中間子系での $CP$ の破れである。この測定に実験、理論双方の観点から最適な崩壊モードは、 $B^0$ と $\bar{B}^0$ どちらもが崩壊できる $CP$ 偶の終状態  $J/\psi K_s$  である。上記の  $J/\psi$  データのうち、さらに、 $K_s$  中間子を含む事象として約 5 個検出されている。そのうちのひとつが、図 2.6 b に示す事象で、電子・陽電子対から  $J/\psi$  が、 $\pi^+\pi^-$  から  $K_s$  中間子が同定されている。

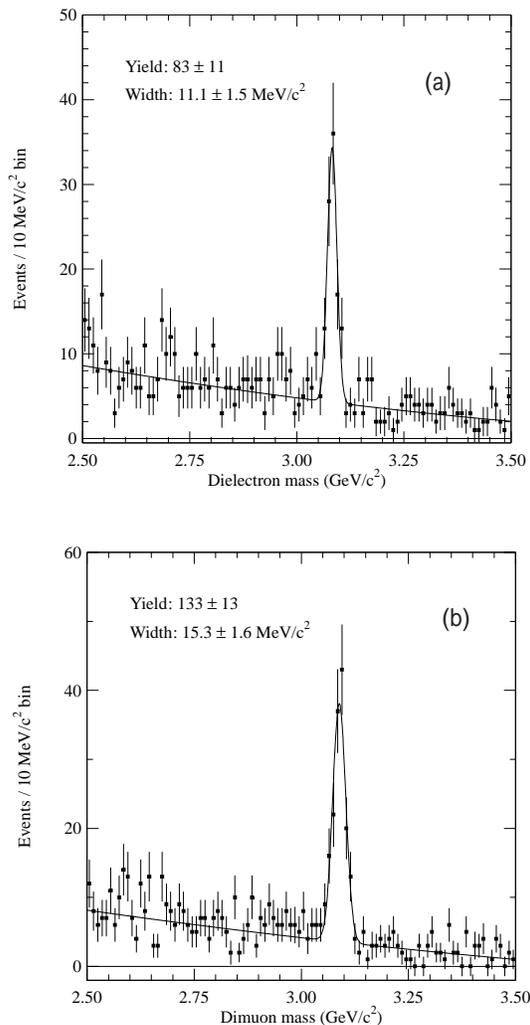


図 2.6 a: 電子・陽電子ペア (a) と  $\mu^+\mu^-$  (b) ペアの不変質量分布

### 2.6.3 $B^\pm \rightarrow J\psi K^\pm$ 崩壊を用いた $CP$ 非保存解析のテスト

$CP$ 非保存の解析には主に  $B^0 \rightarrow J\psi K_S$  崩壊を用いるが、 $B^\pm \rightarrow J\psi K^\pm$  崩壊を用いて事前に  $CP$ 非保存の解析全体を検証した。 $B^\pm \rightarrow J\psi K^\pm$  崩壊は、崩壊率が大きく再構成効率も良いので、比較的少ない統計量でもデータを用いた検証ができる。その上この崩壊においては  $CP$ が保存されるので、解析に含まれる非対称性がないことを検証するのに適している。我々は、実際のデータを使用し全ての解析を一通り行い、解析に統計上有意な非対称性が存在しないことを確認した。

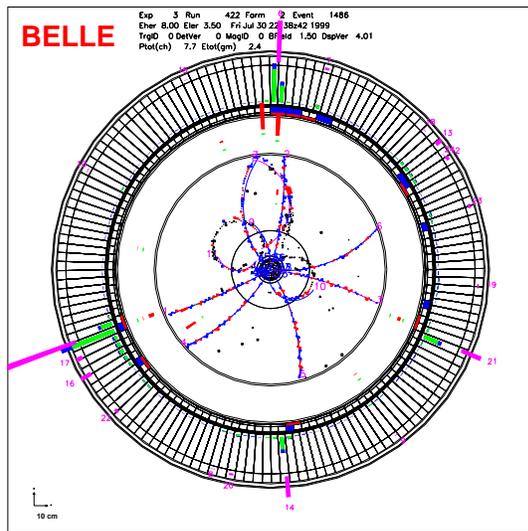


図 2.6 b: Belle 実験で検出された  $B \rightarrow J/\psi K_s$  事象の例

#### 2.6.4 $B \rightarrow J/\psi K^*$ 事象の検出

この反応から生成される  $J/\psi$  粒子の偏極は、 $QCD$  におけるファクトリゼーションについての情報を与えるほか、 $J/\psi K^* (\rightarrow K_s \pi^0)$  は  $CP$  偶と  $CP$  奇の固有状態に分解でき、これを使って  $CP$  非対象の測定ができる。我々は、この  $B \rightarrow J/\psi K^*$  事象の検出に成功した。

#### 2.6.5 チャーム中間子と $B$ 中間子の寿命の測定

$CP$  非保存の解析には、二つの  $B$  中間子の崩壊点間の距離を正確に測定すると同時に、その測定精度を十分に理解することが系統的誤差を理解する上で重要である。我々は、 $B$  ファクトリーからの今年度のデータを用いて、 $B$  中間子の崩壊点の測定に成功した [14, 23]。チャーム中間子の寿命の測定は、シリコンバーテックス検出器を用いた崩壊点測定の解析方法を確立するのにきわめて有用であるばかりでなく、 $D^0$  および  $D_s^+$  の寿命測定では、2000年夏までに (実験開始後1年で) 世界で最も正確な測定値を出すことが期待できる [13, 24, 25]。

#### 2.6.6 $B$ 中間子の稀な崩壊モードの探索

$B$  中間子は、その属する世代中での崩壊、すなわちトップクォークへの崩壊がエネルギー保存則によって禁止されているので、数多くの分岐比の小さな崩壊が存在する。その中には、分岐比がきわめて小さいため未だに発見されていないものが多々ある。さらに、

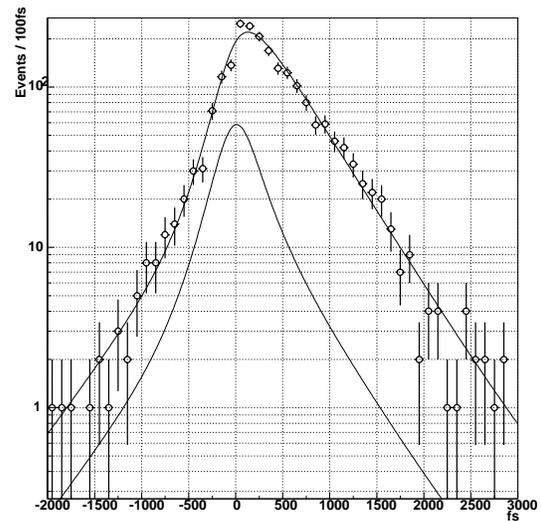


図 2.6 c:  $D^0$  中間子の固有時間の測定。エラーバーの付いた点が測定点で、寿命を求めるためのフィットが重ね合わせてある。データ点のない実線はバックグラウンドからの寄与である。この測定で、 $D^0$  中間子の寿命は  $405.3 \pm 13.3$  fs と決定された。

これらの中には超対称性など標準理論を越える理論からの寄与にセンシティブなモードもある。その一つが、 $B^0 \rightarrow K^* l^+ l^-$  モードである。標準理論の予想する分岐比は、 $BR(B^0 \rightarrow K^* l^+ l^-) \sim 1.0 \times 10^{-6}$  である。今回は、シミュレーションによって、その検出方法の検討を行った [15]。

#### 2.6.7 Belle シリコンバーテックス検出器のアラインメントと位置測定精度

$B$  ファクトリーにおいては、 $B$  中間子崩壊点を約  $100 \mu\text{m}$  の精度で測定する必要がある。そのために  $SVD$  が使用されているが、1つ1つの検出器の位置を  $20 \mu\text{m}$  以下の精度でアラインメントする必要がある。我々は、宇宙線の飛跡を用い検出器の相対位置を解析的に測定するプログラムを開発した。また崩壊点近傍での実際の位置測定精度がシミュレーションで期待された理想的な精度の 110% 程度であることを確認した。 [17, 22]

#### 2.6.8 集積回路の耐放射線化

$B$  ファクトリーにおいては、検出器が大量の放射線にさらされる。 $SVD$  は、測定器群の中でも最も内側すなわちビームに最も近い (最近接点でビームから  $3\text{cm}$  の) とおけるため、年間約  $30\text{kRad}$  の放射線を受ける。平成 11 年 6 月に実際に加速器が

運転を始めると、その放射線が当初予想された量の約4倍であることがわかり、現在使用している信号読み出し用プリアンプを集積したLSIの放射線耐性では、約1年しか持たない。したがって、当研究室では放射線耐性の高い信号読み出し用のLSIの開発に取り組み、成功した。MOS-LSIでは、MOS gateを形成する酸化膜を薄くすることによって放射線耐性が向上することがわかっている。ただし、一度にparameterを急激に変えることには危険が伴うので、2段階に分けて開発を行った。図2.6 dにLSI中のプリアンプの雑音とLSIに照射した放射線量との関係を示す。ゲート酸化膜を薄くすることによってLSIの放射線耐性が劇的に向上していることが明らかである。このLSIを使用することによって、SVDの放射線耐性は100年以上と十分なものとなった。

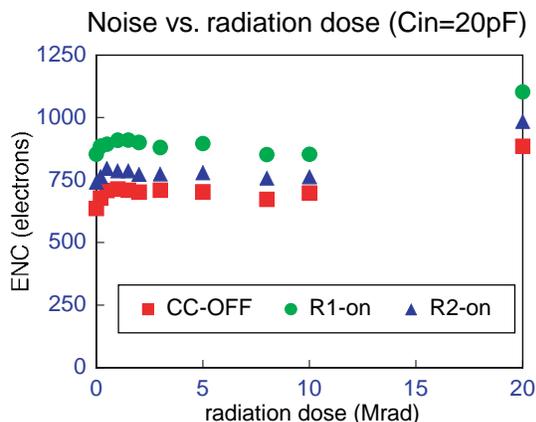


図 2.6 d: LSI 中のプリアンプの雑音と LSI に照射 LSI に照射した放射線量との関係

### 2.6.9 シリコンストリップセンサーの改良

次期の SVD のための重要な改善点は、SVD の有効立体角を広げる事と位置測定精度を向上させることである。現行機の有効立体角および位置測定精度は、採用したシリコンストリップセンサーで制限されており、検出器を設計・開発し直す必要があった。シリコン検出器を長くすることによって有効立体角を増やすと同時に、検出器を細くすることによって検出器を衝突点に近づけることを可能にした。衝突点に近づけることによって、衝突点近傍での位置測定精度が向上するとともに有効立体角もさらに増加する。検出器中の電極間隔を小さくすることによって測定位置精度のさらなる向上を図った。平成 11 年度はプロトタイプを製作し、その性能が予定通りであることを確認した。

### 2.6.10 Belle 次世代 SVD の設計

平成 13 年度に、Belle 実験に設置する予定の第二世代 SVD となる SVD2 の設計を進め、Technical Design Report を作成した。SVD 2 の特徴は、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を持つ IC や新しいシリコンストリップセンサーを用いて、今までの経験に基づき設計したもので、従来の位置測定精度をさらに (現在の約  $100\mu$  から  $50\mu$  へ) 向上させる。図 2.6 e は、SVD 2 の断面図で、ビームに垂直な方向から見たものである。4 層のシリコンセンサーからなっているのがわかる。

#### BELLE SVD2 Detector Layout

Layer 1: r=15mm 6 , 1z  
 Layer 2: r=22mm 6 , 2z  
 Layer 3: r=41,45mm 12 , 3z  
 Layer 4: r=56,59.5mm 16 , 4z

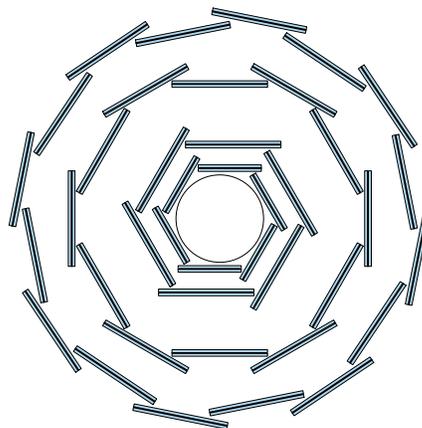


図 2.6 e: 第二世代シリコンバーテックス検出器の断面図

< 報文 >

(原著論文)

- [1] B. Abbott *et al.* [DØCollaboration], Measurement of the high-mass Drell-Yan cross section and limits on quark-electron compositeness scales, Phys. Rev. Lett. **82**, 4769 (1999)
- [2] B. Abbott *et al.* [DØCollaboration], Search for non-standard Higgs bosons using high mass photon pairs in p anti-p  $\rightarrow$  gamma gamma + 2jets at  $s^{**}(1/2) = 1.8$ -TeV, Phys. Rev. Lett. **82**, 2244 (1999)
- [3] B. Abbott *et al.* [DØCollaboration], Measurement of the top quark pair production cross section in p anti-p collisions using multijet final states, Phys. Rev. **D60**, 012001 (1999)

- [4] B. Abbott *et al.* [DØCollaboration], Search for squarks and gluinos in single-photon events with jets and large missing transverse energy in p anti-p collisions at  $s^{**}(1/2) = 1.8\text{-TeV}$ , Phys. Rev. Lett. **82**, 29 (1999)
- [5] B. Abbott *et al.* [DØCollaboration], Measurement of the top quark mass in the dilepton channel, Phys. Rev. **D60**, 052001 (1999)
- [6] B. Abbott *et al.* [DØCollaboration], The dijet mass spectrum and a search for quark compositeness in anti-p p collisions at  $s^{**}(1/2) = 1.8\text{-TeV}$ , Phys. Rev. Lett. **82**, 2457 (1999)
- [7] B. Abbott *et al.* [DØCollaboration] The inclusive jet cross section in anti-p p collisions at  $s^{**}(1/2) = 1.8\text{-TeV}$ , Phys. Rev. Lett. **82**, 2451 (1999)
- [8] B. Abbott *et al.* [DØCollaboration], Small angle J/psi production in p anti-p collisions at  $s^{**}(1/2) = 1.8\text{-TeV}$ , Phys. Rev. Lett. **82**, 35 (1999)
- [9] B. Abbott *et al.* [DØCollaboration], determination of the absolute jet energy scale in the DØCalorimeters, Nucl. Instrum. Meth. **A424**, 352 (1999)
- [10] G. Bonvicini *et al.* [CLEO Collaboration], Measurement of charm meson lifetimes, Phys. Rev. Lett. **82**, 4586 (1999)
- [11] M. Artuso *et al.* [CLEO Collaboration], First observation of the decay  $B^0 \rightarrow D^{*+}D^{*-}$ , Phys. Rev. Lett. **82**, 3020 (1999)
- [12] T. E. Coan *et al.* [CLEO Collaboration], Search for exclusive rare baryonic decays of B mesons, Phys. Rev. **D59**, 111101 (1999)

## (学位論文)

- [13] 戸村友宣 : Measurement of Charmed Meson Lifetimes at the KEK B Factory, ( 修士論文 )
- [14] 中平武 : A Study of B Meson Lifetime at the KEK B Factory, ( 修士論文 )

## (その他)

- [15] 植原洋介 : Event Selection of  $B^0 \rightarrow K^*\ell^+\ell^-$ , ( 4年特別実験 II レポート )

## &lt; 学術講演 &gt;

## (国際会議)

## 招待講演

- [16] H. Aihara: Physics Results from Belle, The 3rd International Conference on B Physics and CP Violation, December 3-7, 1999, Taipei, Taiwan.
- [17] H. Aihara: Belle Silicon Vertex Detector, The 4th International Symposium on Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors, March 22-25,2000,Hiroshima
- [18] M. Yokoyama: Radiation Hardness of VA1 Chip Fabricated by Sub-Micron Technology, *ibid*

## 一般講演

- [19] T. Higuchi: Distributed Belle Analysis Framework, Computing in High Energy Physics (CHEP2000), February 20-26, 2000, Padova, Italy.

## (国内会議)

## 招待講演

- [20] 田島宏康: Belle 実験, 物理学会・秋の分科会 (9月23 - 26日) 素粒子実験シンポジウム: 走り始めた Belle と K2K 実験

## 一般講演

- [21] 樋口岳雄 : Observation of  $B^0 \rightarrow J/\psi + (K_s\pi^0)^{*0}$  events with Belle, 物理学会・秋の分科会 (9月23 - 26日)
- [22] 横山将志 : Belle シリコンバーテックス検出器のライメントと位置測定精度, *ibid*
- [23] 中平武 : Belle 実験用シリコンバーテックス検出器の粒子崩壊点検出性能, *ibid*
- [24] 戸村友宣 : Belle 検出器による  $D^+$  中間子の寿命の測定, *ibid*
- [25] 田中純一 : Belle 実験における  $D^0$  lifetime の測定, *ibid*

## その他

- [26] 相原博昭 : C P非保存とB中間子の物理、東北大学理学部物理学教室コロキウム (12月17日)

## 3 物性理論

### 3.1 和達研究室

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

#### 3.1.1 ボース・アインシュタイン凝縮

調和ポテンシャル中に閉じ込められた  $D$  次元非線形シュレディンガー方程式の解の安定性 我々は、引力相互作用する原子からなるボース・アインシュタイン (BE) 凝縮体が、有限時間で崩壊することを、すでに証明している [6]。この問題をさらに拡張して、非等方な調和ポテンシャル項を伴う  $D$  次元の非線形シュレディンガー方程式の解の安定性について、一般的な考察を行った。非線形項が引力的であり、かつエネルギーに相当する保存量が負である場合、波動関数は有限時間で必ず特異点を持つ、すなわち崩壊することが分かった。また、エネルギーが正である場合については、解の一般的な初期条件に対して、波動関数が有限時間で崩壊し得る条件を具体的に書き下した [1, 6]。

軸対称な磁気トラップに閉じ込められたボース・アインシュタイン凝縮体の基底状態 非常に強い異方性を持つ軸対称な磁気トラップに閉じ込められた、BE 凝縮体の基底状態の性質を、ガウス型試行関数を用いたエネルギー関数の変分計算によって解析した。原子間に斥力相互作用が存在する場合について、原子間相互作用の強さを表わす (無次元化された) パラメータと、トラップのアスペクト比との大小関係による場合分けを行った結果、トラップ (調和ポテンシャル) の対称軸の方向と、それに垂直な方向に対してそれぞれ異なる近似法を与えることができる領域が存在することが分かった。原子間に引力相互作用が存在する場合については、BE 凝縮体が不安定になる原子数 ( $N$ ) の臨界値  $N_c$  を計算し、 $N = N_c$  での凝縮体のエネルギーおよびアスペクト比を求めた [2, 6]。

磁気トラップされたボソン・フェルミオン混合系のダイナミクス 磁気トラップ中で BE 凝縮したボソンとフェルミオン縮退したフェルミオンのダイナミクスについて解析を行った。ボソンに対しては、フェルミオンとの相互作用項を伴う「拡張された」Gross-Pitaevskii 方程式を導出した。フェルミオンについて

は、基底状態の数密度に対する摂動が従う運動方程式を、流体力学的な手法を用いて導出した。そして、この2つの非線形結合型方程式が、プラズマ中のラングミュア波のモデルである、Zakharov 方程式の拡張になっていることを示した [3]。

2成分ボース・アインシュタイン凝縮体の安定性 2成分 BE 凝縮体は異種原子間相互作用のために1成分の場合と異なる安定性を持つことが予想される。ガウシアンを試行関数とする変分計算を用いて静的な安定性について解析的に調べ、安定化の条件を各成分の粒子数に対する相図として表した [34, 41, 48, 69, 6]。

異種原子間に強い斥力が働く2成分 BE 凝縮体は、相分離を起こすことが観測されている。ガウシアンを変形した試行関数を用いた変分計算を行い、相分離を起こす条件を求めた [48, 69, 78, 6]。また、集団励起エネルギーを、総和則の方法を用いて求め、そのソフト化による凝縮体の不安定化について調べた [48, 78]。

#### 3.1.2 自由落下する流体フィラメントの運動

水道の蛇口から水がゆっくりと落ちるとき、水滴と蛇口の間には、細い流体の部分 (フィラメント) が形成され、落下とともにフィラメントは引き延ばされていく。この現象を記述する Navier-Stokes 方程式の厳密解を得た。この解は、実験結果を見事に説明する。また、解の安定性を調べることで、フィラメントの途中で切れるのか、両端で切れるのかを预言する条件式を導いた [4]。一方、ボース・アインシュタイン凝縮体を用いた実験への応用を念頭に、自由落下する量子粒子の初期値問題を解いた [5]。

#### 3.1.3 非平衡統計力学

低次元における反応拡散系は、非線形効果と大きな揺らぎの影響で様々な興味深い現象を示す事が知られている。我々は、ペーテ仮説やいわゆる行列の方法を用いて確率的拡散模型の研究を進めている。今年度は開放的境界条件下での1次元非対称排除模型 (ASEP) の定常状態の解析を中心に行った。開放的境界条件下での ASEP の定常状態は境界のパラメータの値によって相転移が起こる事が知られており、行列積仮説と呼ばれる手法を用いて近年活発に研究されている。これは模型の厳密な定常状態を行列の積の形に書くものであるが、手法上の困難さから従来は主として粒子が一方向のみに移動する場合 (以下、完全非対称の場合と書く) が調べられていた。それに対して粒子が左右両方向に移動する模型は、平均場近似を用いた解析により質的には完全非対称の場合と似ていると予想されていたが、物理量の厳密な計算はなされておらず未解決であった。しかし昨年行列積仮説がいわゆる  $q$ -直交多項式の理論と深く関係していることを発見し、この問題を解決した。

その結果、粒子の流れに関する相図は完全非対称の場合と本質的に同じだが、相関長に関する相図が完全非対称の場合より複雑な構造を持つ事が分かった [7]。この結果は平均場近似では得られないものである。また、この手法はより一般化された模型に拡張・適用することが可能であり、今後同様な手法を用いることにより多くの興味深い現象を解析できると期待される。

### 3.1.4 非線形波動論

逆散乱法 ソリトン理論において、逆散乱法は最も有効な手法の1つとして、古典可積分系の解析に広く用いられてきた。我々は、微分型非線形シュレディンガー方程式のうち、チェン・リー・リウ方程式とカウプ・ニューエル方程式の多成分化について逆散乱法の枠組に則って調べた。チェン・リー・リウ方程式のラックス表示をトレイスレスでない形に変形することで、行列拡張が可能となることを示し、行列チェン・リー・リウ方程式を見出した。行列変数のベクトル表示へのリダクションを考えることで、2通りの結合型チェン・リー・リウ方程式を得るとともに対応する保存量の構成法を示した。変数変換やゲージ変換を適用することにより、2つの結合型チェン・リー・リウ方程式の性質、差異等を調べた。1つの重要な結果として、一方の式は新しい結合型カウプ・ニューエル方程式と変数変換を通じて関係していることが示された [9]。

さらに、高次対称性に基づいた議論によりオルヴァーとソコロフが提出した、行列変数の微分型非線形シュレディンガー方程式の仲間達について調べた。行列チェン・リー・リウ方程式に対して、リダクションを仮定することなく一般形のままの変数変換を考案した。この変換を用いることにより、オルヴァーとソコロフが提出した9つの方程式のうち7つについて、ラックスの意味での可積分性及び互いの関連性について示した。残った2つの方程式については、スカラー変数の場合との類推から、線形化することに成功した。これにより、これら2つの方程式の一般解を構成し、可積分性を直接的に証明した [10]。

離散可積分系 代表的な可積分系の一つである Toda 場方程式は、Lie 環のルート系を利用した拡張がさかんに研究されている模型である。我々は、任意の有限次元単純 Lie 環に付随する Toda 場方程式の離散化を行った。さらに、得られた「格子 Toda 場方程式」を双線形化し、可解格子模型の転送行列が満たす非自明な関係式 ( $T$ -system) との関係を示した [15]。

### 3.1.5 ソリトンセルオートマトン

「Bogoyavlensky 格子」と「箱と玉の系」 「箱と玉の系」と呼ばれる SCA の時間発展式が、Bogoyavlensky 格子から「超離散化」と呼ばれる極限操作によって得られることが最近明らかになった。一方

我々は Bogoyavlensky 格子から箱と玉の系を得る、上記とは異なる新しい極限操作「結晶化」を発見した。結晶化とは、Bogoyavlensky 格子から導出される量子統計力学の模型に対する極限操作である。多くの統計力学的な模型と同様、この頂点模型でも同じ境界条件に対する各辺の状態は一般に一意には決まらないが、結晶化の極限操作によって一意に決定される。さらに正方格子の一方を時間発展の方向とみなすと SCA の時間発展と解釈でき、それが箱と玉の系の時間発展と一致する。各辺の状態が一意に決まった状態は、統計力学の言葉で言うならば温度ゼロの極限で系全体がある基底状態に落ちた場合に対応している。箱と玉の系が  $A$  型の Lie 環に付随する結晶基底で記述できるという事実と共に、結晶化は、量子可積分系と SCA を結び新しい関係を示唆している [11]。また、我々は箱と玉の系の補空間から得られる Toda 型の SCA を構成した [13]。

超対称性を持つ「箱と玉の系」 超対称性を持つ Lie 環に対する結晶基底で記述される SCA を構成した。モデルの持つ対称性を反映して、この SCA は Boson 的な性質も持つ玉 (もともとの箱と玉の系に登場した玉の性質) と Fermion 的な玉が混在する様な、箱と玉の系の拡張になっている。さらに、結晶基底で定義されるエネルギー関数を使ってソリトン解を記述する方法を示した [14]。

### 3.1.6 1次元強相関電子系

1次元ハバード模型の熱力学 強相関電子系である1次元ハバード模型は1次元可積分系として、座標ベータ仮説法を用いて厳密に解析されてきた。統計力学の枠組で熱力学量を取り扱う際には、励起状態をストリング仮説により仮定し、分配関数およびバルクの量を求められていた。ストリング仮説の正当性についてはさまざまな議論がなされてきているが、ストリング仮説を用いずに熱力学を扱う手法として量子転送行列法がある。この手法では、代数的ベータ仮説法が用いられるが、電子系も含めフェルミオン系を直接的に扱う方法が必要であり、フェルミオンの統計性が繰り込まれるように演算子表式の量子逆散乱法を確立することにより成功した [20, 21]。

### 3.1.7 量子多体系

一次元量子系の有限温度厳密解析 量子可積分系の有限温度の解析手法というのはそれほど多くは知られていない。現在一般的に知られている解析手法として、自由エネルギーは Thermal Bethe Ansatz の手法を用いて積分方程式の形で導出されている。この手法はその導出過程において、物理的直観を用いるものであり、一般的可積分系に適用した時の数学的正当性の証明は満足されうる答を得ていない。また、有限温度での相関関数を求める方法も研究されているが、解析的に答えを得るまでに、まだ困難は多い。我々は、これらの方法とは独立な、分配関数

の解析的導出手法を発見した。そこでこの方法を用いて可積分系の典型例として一次元 関数型相互作用する系を例に具体的計算を試みた [77]。

**Calogero-Sutherland 模型** Calogero-Sutherland 模型 (CS 模型) とは、一次元空間上で粒子間距離の逆二乗で相互作用する量子多体系であり、自由度と同数の可換な保存演算子を持つ「量子可積分系」の一つであることが知られている。調和振動子ポテンシャル中、あるいは周期的な空間上の CS 模型においては、これら全ての保存演算子を同時対角化する固有状態に多変数直交多項式が現れることが特徴的である。我々はこの CS 模型の固有状態について次の 2 種類の手法で研究した。

一つ目は一次元調和振動子ポテンシャル中の模型、Calogero 模型に対して、そのハミルトニアンを相似変換で相互作用のない調和振動子模型のハミルトニアンへ写像し、その逆変換から保存演算子とそのボソンの固有状態を構成する手法である [30]。同様に原点に境界を持ち、鏡像に相当する粒子との相互作用も含む *B* 型 Calogero 模型に対してもこの手法が適用できることを示した。

二つ目は変数の対称化によってボソンの固有状態を与える非対称な固有状態を、Dunkl-Cherednik 演算子の定式化を基礎にして考察する方法である [31, 32]。我々は周期的な空間上の CS 模型に対して、非対称な固有状態の多項式部分を代数的に与える昇降演算子を導入し、これらの非対称な固有状態のノルムの計算を実行した。さらにこの非対称な状態を、実際、対称化することによってボソンの固有状態を構成し、この状態のノルムが非対称な状態のノルムから Poincaré 多項式を介して得られることを示した [33]。以上のような方法は、粒子の統計性としてフェルミオンを選んだ場合にも拡張ができた。またこの方法は相対論的に拡張された CS 模型、Ruijsenaars 模型の固有関数に現れる Macdonald 多項式に対しても適用できた。

**楕円型 Ruijsenaars 模型** Ruijsenaars 模型とは相対論的多粒子系であり、非相対論的極限においては Calogero-Sutherland 模型に帰着する。これまでの研究によって、一般ルート系に付随する楕円型 Ruijsenaars 模型は、そのハミルトニアンを含む可換な作用素の族がアフィンルート代数によって構成されること、及びその作用素の生成する代数は正のウェイト格子の作る多項式環と同型になることなどを明らかにした。我々は、ルート代数の表現を 2 種類組み合わせることによって、これらの作用素はアフィンリー代数の正整数レベルの既約表現の指標空間に作用することを示した。また、適当な内積を導入することによって、ハミルトニアンは対応する古典リー代数のカルタン部分代数上の有理関数空間上で正定値対称作用素となることを示した。特に  $A_1^{(1)}$  型の場合、差分作用素に適用できる新たな摂動法を考案することによって、本質的に自己共役となることを証明した。また、ルート代数の表現をある条件のもと完全に分類した [43]。

### 3.1.8 スピン系

**有界なスピンチェーンの自発磁化** 両端の開いた有界な XXZ スピンチェーンを頂点作用素を用いて解析した。頂点作用素は半無限スピンチェーンそのものを意味しているため、Baxter の角転送行列に基づく頂点作用素を用いた従来の方法では、片端のみが開いた半無限チェーンの解析しか出来ない。我々は *q*-KZ 方程式に現れる Cherednik 演算子を両端の開いた XXZ 模型の転送行列と同一視し、また *q*-KZ 方程式の解が頂点作用素で与えられる事実に着目して、両端の開いた XXZ 模型の相関関数を頂点作用素で構成した [24]。また XXZ 模型の楕円の拡張である XYZ 模型についても同様の結果を得た [25]。

**非対称 XXZ 模型の相関関数** 非対称 XXZ 模型について研究した。これは Yang らによってその可積分性が証明されたスピンチェーンである。近年 KPZ 方程式で記述される一次元拡散過程との関係が指摘され、その重要性がますます高まっている。我々はこの非対称 XXZ 模型の相関関数の生成汎関数を計算し、「双対場」と呼ばれるボゾン場を含む行列式で表した [26]。さらにこの関数を用いて、熱力学的極限で相関関数が Fredholm 行列式で表されることを示した [27]。特に強磁場極限で対応する Fredholm 行列式は第五種パルヴェ超越方程式に従い、その方程式の解の漸近形から非対称 XXZ 模型の 2 点相関関数が計算できる。巾で減衰する事が確かめられた。

**XYZ 模型のノルム** XXZ 模型の楕円関数的な拡張である XYZ 模型の相関関数には、今だ不明な点が多い。我々は相関関数の計算において不十分であった XYZ 模型の代数的ベータ仮説法を完成させ、0 点相関関数 (ノルム) を計算した [28]。ベータ仮説法で解ける模型のノルムはベータ方程式のヤコビアンで与えられるという、Gaudin によって提唱された仮説が、XYZ 模型の場合にも成立した。

**XXZ 模型の相関関数とリーマンヒルベルト問題** 外場を含む XXZ 模型の相関関数、特にその漸近形について研究した。Korepin らによって求められた相関関数の Fredholm 行列式表示がその礎となる。一般に Fredholm 行列式はパルヴェ方程式等、古典可積分系の方程式の解となる場合が多いので、模型が「量子」的にもかかわらず、XXZ 模型の相関関数の計算は「古典」可積分系の問題に帰着される。我々は、XXZ 模型の相関関数の計算が、「リーマンヒルベルト問題」と呼ばれるある種の古典可積分系の問題に帰着されることを証明した [29]。このリーマンヒルベルト問題から XXZ 模型の 2 点相関関数の漸近形が求められる。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Tsurumi and M. Wadati: Stability of the *D*-Dimensional Nonlinear Schrödinger Equation under Confined Potential, J. Phys. Soc. Jpn. **68**, 1531–1536 (1999).

- [2] M. Wadati and T. Tsurumi: Ground State of a Bose-Einstein Condensate under Axially Symmetric Magnetic Trap, *J. Phys. Soc. Jpn.* **68**, 3840–3847 (1999).
- [3] T. Tsurumi and M. Wadati: Dynamics of Magnetically Trapped Boson-Fermion Mixtures, *J. Phys. Soc. Jpn.* **69**, 97–103 (2000).
- [4] D. Henderson, H. Segur, L. B. Smolka and M. Wadati: The motion of a falling liquid filament, *Phys. Fluids*, **12**, 550–565 (2000).
- [5] M. Wadati: The Free Fall of Quantum Particles, *J. Phys. Soc. Jpn.* **68**, 2543–2546 (1999).
- [6] T. Tsurumi, H. Morise and M. Wadati: Stability of Bose-Einstein Condensates Confined in Traps, to appear in *Int. J. Mod. Phys. B* **14**, No. 7/8 (2000).
- [7] T. Sasamoto: One-dimensional partially asymmetric simple exclusion process with open boundaries: Orthogonal polynomials approach, *J. Phys. A: Math. Gen* **32** (1999) 7109-7131.
- [8] T. Tsuchida and M. Wadati: Multi-Field Integrable Systems Related to WKI-Type Eigenvalue Problems, *J. Phys. Soc. Jpn.* **68** (1999) 2241.
- [9] T. Tsuchida and M. Wadati: New integrable systems of derivative nonlinear Schrödinger equations with multiple components, *Phys. Lett. A* **257** (1999) 53.
- [10] T. Tsuchida and M. Wadati: Complete integrability of derivative nonlinear Schrödinger-type equations, *Inverse Problems* **15** (1999) 1363.
- [11] K. Hikami, R. Inoue and Y. Komori: Crystallization of the Bogoyavlensky lattice, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **68** (1999) 2234.
- [12] R. Inoue and K. Hikami: Quantum integrable model on (2+1)-D lattice, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **68** (1999) 1843.
- [13] R. Inoue and K. Hikami: Construction of soliton cellular automaton from the vertex model – the discrete 2D Toda equation and the Bogoyavlensky lattice, *J. Phys. A: Math. Gen.*, **32** (1999) 6853.
- [14] K. Hikami and R. Inoue: Supersymmetric extension of the integrable box-ball system, *J. Phys. A: Math. Gen.*, to appear.
- [15] R. Inoue and K. Hikami: The Toda field theory for simple Lie algebras — Hamiltonian structure and  $\tau$ -function, *Nucl. Phys. B*, to appear.
- [16] K. Hikami, A unified approach to the quasi-particle excitations in the edge states of the paired Hall states, *Phys. Rev. B* **61**, 4473–4476 (1999).
- [17] K. Hikami and B. Basu-Mallick, Supersymmetric Polychronakos spin chain — motifs, distribution functions, and characters, *Nucl. Phys. B* **566**, 511–528 (2000).
- [18] H. Fan, M. Wadati and X. M. Wang: Exact diagonalization of the generalized super-symmetric  $t-J$  model with boundaries, *Phys. Rev. B* **61** (2000) 3450-3469.
- [19] X. M. Wang, H. Fan and X. W. Guan: Bethe ansatz for the one-dimensional small-polaron model with open boundary conditions, *J. Phys. Soc. Jpn.* **69** (2000) 251-258.
- [20] Y. Umeno, H. Fan and M. Wadati: Fermionic R-operator approach for the small-polaron model with open boundary condition, *J. Phys. Soc. Jpn.* **68** (1999) 3826-3830.
- [21] K. Sakai, M. Shiroishi, J. Suzuki and Y. Umeno, Commuting quantum transfer-matrix approach to intrinsic fermion system: Correlation length of a spinless fermion model, *Phys. Rev. B* **60** (1999) 5186.
- [22] H. Fan: The fermion-ladder models: Extensions of the Hubbard model with  $\eta$ -pairing, *J. Phys. A* **32** (1999) L509-L518.
- [23] K. Chen, H. Fan, B. Y. Hou, K. J. Shi, W. L. Yang and R. H. Yue: Elliptic Ruijsenaars-Schneider and Calogero-Moser models represented by Sklyanin algebra and  $sl(n)$  Gaudin algebra, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **135** (1999) 149-165.
- [24] Y. Fujii and M. Wadati: Correlation functions of finite XXZ model with boundaries, *Chaos, Solitons & Fractals* **11** (2000) 565–579.
- [25] Y. Fujii and M. Wadati: Magnetization formula in the XYZ spin chain, *Chaos, Solitons & Fractals* **11** (2000) 1339–1348.
- [26] Y. Fujii and M. Wadati: Scalar products of the asymmetric XXZ chain, *J. Phys. Soc. Jpn.* **68** (1999) 2228–2233.
- [27] Y. Fujii and M. Wadati: Correlation functions of the asymmetric XXZ chain and the Painlevé V equation, *J. Phys. Soc. Jpn.* **68** (1999) 3227–3235.
- [28] Y. Fujii and M. Wadati: Gaudin hypothesis for the XYZ spin chain, *J. Phys. A: Math. Gen.* **32** (1999) 8389–8398.
- [29] Y. Fujii and M. Wadati: Operator-valued Riemann–Hilbert problem for correlation functions of the XXZ spin chain, *J. Phys. A: Math. Gen.* **33** (2000) 1351–1361.
- [30] A. Nishino, H. Ujino and M. Wadati: Symmetric Fock space and orthogonal symmetric polynomials associated with the Calogero model, *Chaos, Solitons & Fractals* **11** (2000) 657.
- [31] A. Nishino, H. Ujino and M. Wadati: An algebraic approach for the non-symmetric Macdonald polynomial, *Nucl. Phys. B* **558** (1999) 589.
- [32] A. Nishino, H. Ujino, Y. Komori and M. Wadati: Rodrigues formulas for the nonsymmetric multi-variable polynomials associated with the  $BC_N$ -type root system, *Nucl. Phys. B* **571** (2000) 632.

- [33] A. Nishino and M. Wadati: Bosonic and fermionic eigenstates for generalized Sutherland models, *J. Phys. A: Math. Gen.* **33** (2000) 3795.
- [34] H. Morise, T. Tsurumi and M. Wadati: Stability of a Two-Component Bose-Einstein Condensate, *J. Phys. Soc. Jpn.* **68** (1999) 1871.
- [35] G. Kato and M. Wadati: Explicit Calculation of the Partition Function of a One-dimensional  $\delta$ -function Bose Gas, *Chaos, Solitons & Fractals* (in press).

(会議抄録)

- [36] M. Wadati and T. Tsurumi: Nonlinear Analysis of the Bose-Einstein Condensates, in “Proceedings of the APCTP-Nankai Symposium on Yang-Baxter Systems, Nonlinear Models and Their Applications”, pp. 116–130 (Eds. B. K. Chung, Q-Han Park and C. Rim, World Scientific).
- [37] K. Hikami, Integrable  $Z_N$  symmetric lattice field theory, in “Yang–Baxter Systems, Non-Linear Models and Their Applications”, edited by B. K. Chung, Q.-H. Park, and C. Rim, pp. 188–194, World Scientific.
- [38] 土田: Coupled Modified KdV 方程式に対する逆散乱法、研究集会「ソリトン理論の新展開」報告集 (九州大学応用力学研究所、1999年4月) pp. 190–196.
- [39] T. Tsuchida: Integrable Discretization of the Coupled Nonlinear Schrödinger Equations, Proceedings of 31st Symposium on Mathematical Physics “Solitons and Nonlinear Phenomena” (Torun, Poland), to appear.
- [40] H. Ujino and A. Nishino: Rodrigues formulas for nonsymmetric multivariable polynomials associated with quantum integrable systems of Calogero-Sutherland type, Proc. of International Workshop on “Special Functions –Asymptotics, Harmonic Analysis and Mathematical Physics”, to appear.
- [41] H. Morise, T. Tsurumi and M. Wadati: Two-Component Bose-Einstein condensates and their stability, *Physica A* **281** (2000) 432, in press.

(国内雑誌)

- [42] 鶴見、和達: 中性原子を用いたボース–アインシュタイン凝縮, *科学* **69** (岩波書店), No. 11, pp. 937–944 (1999).

(学位論文)

博士論文

- [43] 小森: Algebraic Analysis of One-dimensional Quantum Many-body Systems
- [44] 笹本: Exact Analysis of One-dimensional Asymmetric Diffusion Models.
- [45] 土田: Study of Multi-Component Soliton Equations Based on the Inverse Scattering Method

修士論文

- [46] 榊原: ハミルトニアン系と南部-ハミルトニアン系の比較
- [47] 松浦: Soliton solutions of coupled nonlinear Schrödinger equations
- [48] 森瀬: Stability of a Two-Component Bose-Einstein Condensate.

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [49] M. Wadati: Nonlinear Physics of Bose-Einstein Condensates, 4 lectures in “Advanced School on Interface of Statistical Physics and Mathematics”, National Center of Theoretical Physics, Hsin Chu, Taiwan, Aug. 1–7, 1999.
- [50] M. Wadati: Stability of Two-component Bose-Einstein Condensates, “Symposium on Equilibrium and Non-equilibrium Phase Transitions”, Academia Sinica, Taipei, Aug. 9–16, 1999.
- [51] M. Wadati: Symmetric and Non-symmetric Orthogonal Bases of Quantum Long-range Interacting Particles, “The Baxter Revolution in Mathematical Physics”, Canberra, Australia, Feb. 13–19, 2000.
- [52] M. Wadati: Nonlinear Physics of Bose-Einstein Condensates, “Recent Developments on Integrable Quantum Field Theories”, Cheju Island, Korea, Feb. 27–29, 2000.
- [53] M. Wadati: Orthogonal Bases of Quantum Long-range Interacting Particles, 2 lectures in “Winter School on Integrable Quantum Field Theories and their Applications”, Cheju Island, Korea, March 2–5, 2000.

一般講演

- [54] K. Hikami: Discrete Integrable Systems and Quantum Dilogarithm Function (“Physics and Combinatorics”, 名古屋大学、1999年8月)
- [55] T. Sasamoto: One-dimensional partially asymmetric simple exclusion process with open boundaries: Orthogonal polynomials approach (“Tohwa Stat-Phys ’99”、東和大学、1999年11月)
- [56] T. Sasamoto: Invariant measures for ASEP with open boundaries: matrix product ansatz and orthogonal polynomials (“Recent Topics on Stochastic Interacting Systems”、東京工業大学、2000年1月)
- [57] T. Tsuchida: Integrable Discretization of the Coupled Nonlinear Schrödinger Equations (31st Symposium on Mathematical Physics “Solitons and Nonlinear Phenomena”, Poland, 1999年5月)

- [58] T. Tsuchida: Integrable Discretization of Coupled Hirota Equations (13th Workshop on Nonlinear Evolution Equations and Dynamical Systems, Greece, 1999 年 6 月)
- [59] A. Nishino and H. Ujino: Rodrigues formulas for the nonsymmetric Macdonald polynomials, (“International Workshop on Special Functions – Asymptotics, Harmonic Analysis and Mathematical Physics”, City Univ. Hong Kong, Hong Kong, China, 1999 年 6 月)
- (国内会議)
- 招待講演
- [60] M. Wadati: Bose-Einstein Condensations, “Workshop on Anomalous Nuclear Reactions”, Osaka University, March 17, 2000.
- [61] 鶴見: 中性原子を用いたボース・アインシュタイン凝縮 (第 7 回原子衝突セミナー、東京農工大学、2000 年 4 月)
- 一般講演
- [62] 鶴見、和達: 調和ポテンシャル中に閉じ込められた D 次元非線形シュレディンガー方程式の解の安定性 (日本物理学会 1999 年秋の分科会、岩手大学、1999 年 9 月)
- [63] 土田、和達: 微分型非線形シュレディンガー方程式の多成分化 (同上)
- [64] 笹本、和達: 開放的境界条件下における 1 次元非対称排除模型の厳密解: 直交多項式による方法 (同上)
- [65] 井上、樋上、和達: ボゴヤブレンスキー格子の結晶化 (同上)
- [66] 藤井、和達: 非対称 XXZ 模型の相関関数とパルヴェ方程式 (同上)
- [67] 西野、宇治野、和達: 非対称マクドナルド多項式のロドリゲ公式 (同上)
- [68] 梅野、Heng Fan、和達: 境界のある小さいポーロン模型の可積分性とベータ仮説方程式 (同上)
- [69] 森瀬、鶴見、和達: 2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体の基底状態 (同上)
- [70] 和達、鶴見: 異方性の著しい軸対称トラップ中のボース・アインシュタイン凝縮体の基底状態 (日本物理学会 2000 年春の分科会、関西大学、2000 年 3 月)
- [71] 鶴見、和達: ボソン・フェルミオン混合系のダイナミクス (同上)
- [72] 土田、和達: 微分型非線形シュレディンガー方程式の行列変数への拡張 (同上)
- [73] 笹本: 1 次元 2 成分非対称排除模型が示す粒子の凝縮について (同上)
- [74] 樋上、井上: 超対称性を用いた箱玉系の拡張 (同上)
- [75] 藤井、和達: XXZ 模型の相関関数とリーマンヒルベルト問題 (同上)
- [76] 西野、宇治野、小森、和達:  $BC_N$  型サザーランド模型に付随する非対称多変数多項式 (同上)
- [77] 加藤、和達: 一次元 関数ボーズガスの分配関数の導出 (同上)
- [78] 森瀬、和達: 2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体の相分離と集団励起 (同上)
- [79] 鶴見: ボース・アインシュタイン凝縮体の安定性とダイナミクス (「非線形波動のメカニズム-現象とモデルの数理構造」、九州大学 応用力学研究所、1999 年 11 月)
- [80] 井上: Construction of soliton cellular automaton from the vertex model by crystallization (同上)
- [81] 小森: アフィンリー代数の指標と楕円型 Ruijsenaars 模型 (同上)
- [82] 西野、宇治野、小森:  $BC_N$  型ルート系に付随する非対称多変数多項式 (同上)
- [83] 笹本: ある一次元確率過程に対する  $q$ -直交多項式の理論の応用 (「超幾何系ワークショップ in 神戸 '99」、神戸大学、1999 年 12 月)
- [84] 鶴見: Dynamics of Magnetically Trapped Boson-Fermion Mixtures (レーザー冷却の物理と応用第 2 回研究会、湘南国際村センター、2000 年 2 月)
- (セミナー)
- [85] M. Wadati: Stability of Bose-Einstein Condensates under Traps (National University of Australia, 2000 年 2 月)
- [86] K. Hikami: Crystallization of the Bogoyavlensky Lattice (名古屋大学多元数理研究科、1999 年 5 月)
- [87] 樋上: ソリトン方程式の離散化と差分化 (東京大学数理科学研究科、1999 年 10 月)
- [88] H. Fan: The supersymmetric t-J model with boundaries and the Extensions of the Hubbard model (都立大学物理学科、1999 年 10 月).
- [89] Y. Fujii: Operator-valued Riemann-Hilbert problem for correlation functions of the XXZ spin chain (コロラド大学、1999 年 12 月)
- [90] A. Nishino: Rodrigues formulas for the nonsymmetric Macdonald polynomials (Colorado 大学、2000 年 3 月)
- [91] Y. Komori: Yang-Baxter equation and elliptic Ruijsenaars model. (同上)
- [92] A. Nishino: Rodrigues formulas for the nonsymmetric Macdonald polynomials (CRM, Montreal 大学、2000 年 3 月)
- [93] Y. Komori: Yang-Baxter equation and elliptic Ruijsenaars model. (同上)

## 3.2 塚田研究室

密度汎関数法など計算物理の新しい方法論の開発を行い、これを用いて表面・界面の電子状態、構造と動的現象、結晶成長や表面反応過程や走査プローブ顕微鏡の機構の解明を行っている。またカーボンナノチューブ系、原子細線系、分子架橋系などナノ構造系の量子輸送の基礎理論を研究している。

### 3.2.1 固体表面および吸着系の電子状態

Si(111)  $-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面構造の対称性の破れに関するポテンシャル面

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の原子構造は、銀原子が構成する三角形が蜂の巣上に連なって並ぶ honeycomb-chained-triangle (HCT) モデルによって説明されると考えられてきた。しかし相澤と塚田は第一原理電子状態計算に基づき、エネルギー的により安定な原子構造を発見した [2, 48]。ユニットセル中の二つの銀三角形が HCT 構造では同じ大きさであるが、新しく見つかった構造では異なる大きさになることから、この構造は inequivalent-triangle (IET) モデルと名付けられた。実際に IET モデルに対応する STM 像が低温で得られている。ところで、HCT 構造から IET 構造への変化は Si トライマーを囲むような（上述のものとは別種の）銀三角形の回転として記述することもできる。そこで、我々はこの回転角の関数としての全エネルギーを計算した。そして HCT 構造がポテンシャルエネルギー面上でのエネルギー極小にすらなっておらず、むしろこの回転角に関してはエネルギー極大になっていることを見出した。それではなぜ HCT 構造が室温で現れるのかというのが今後の興味深い問題である。

Ge(001) 表面の各種高次再構成構造の安定性

モンテカルロ計算による Ge(001) 表面の相転移と時空揺らぎの研究に役立てるため、Ge(001) 表面の各種高次再構成構造の安定性について詳細な第一原理計算を行った。[20, 28, 49] 詳細な計算の結果を解析し、ダイマー間の相互作用パラメーターを決定した。これを基礎にしたイジング模型のモンテカルロシミュレーションを、九大グループとの共同研究によって行い、 $2 \times 1$  c(4 × 2) 構造相転移を調べ、実験との良好な一致が見られた。

Si(001) 面での点欠陥生成エネルギーの深さ依存性

Si(001) 表面に作られるヘテロ構造を原子スケールから制御するためには、表面に導入した物質の深さ分布を理解する必要がある。深さ分布を決める要素の一つは、表面近傍での表面垂直方向の拡散速度である。通常は深さ方向への原子の拡散はボンドを多数

組み替える必要があるために無視されるが、Si(001) 面においては表面数原子層にわたって拡散がおこることが示唆されている。吉本と塚田は拡散の源と考えられる点欠陥の表面近傍での生成エネルギーを第一原理計算で求めて、その様子を調べた。

すると、Si(001) 表面の 4 原子層目までに、生成エネルギーがバルク Si 中でのそれに比べて 1 eV 以上小さい点欠陥が多数種類見いだされた。したがって、4 原子層目までは、拡散がバルク中にくらべて顕著に速いと思われる。我々は Ge/Si(001) 系について表面近傍での Ge の拡散速度を、GeSi 合金中（バルク）での拡散速度の実験式を基準にして見積もった。摂氏 600 度以上では求めた表面近傍での拡散速度は、100 秒のオーダーで熱平衡になるのに十分に速かった。[28, 85]

Si (001) 表面上の吸着アセチレン分子間の相互作用

半導体表面上の吸着分子間の相互作用の特徴を明らかにすることは、ナノスケールで吸着分子を制御し分子デバイスを作製する等の応用面からも興味深い。谷田と塚田は分子状吸着の代表的な例であるアセチレン分子吸着 Si 表面を第一原理計算を用いて調べた。吸着分子間の相互作用の詳細は、様々な吸着配置に関して計算されたエネルギーを有効イジングモデルに対応させることによって得られる。表面被覆率 0.5 の場合には、吸着分子間の相互作用エネルギーよりも表面に残っているダイマー間の相互作用エネルギーの方が大きく、その安定構造を決定していることが分かった。また、吸着分子間の相互作用エネルギーは主に双極子相互作用であることが分かった。この吸着表面系はダイマー間相互作用、吸着分子間相互作用、ダイマー-吸着分子間相互作用の和として二成分イジングハミルトニアンで記述できる。

### 3.2.2 走査プローブ顕微鏡と電子放射の理論

第一原理的電子状態計算に基づく Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の非接触原子間力顕微鏡像の計算

佐々木、相澤、塚田は非接触原子間力顕微鏡のイメージをシミュレートするフーリエ展開法を提案した [19, 24]。本方法は第一原理的密度汎関数計算で得られた、探針-表面間相互作用力の三次元分布を効率的に用いて、共鳴周波数における周波数シフトを計算するもので、表面の二次元周期性を厳密に記述することが出来る。本方法のケーススタディとして、Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  R 30°-Ag 試料表面 (HCT 構造) の非接触 AFM 像を計算した。表面は剛体として近似し、フォーススペクトロスコピーと AFM 像を異なる探針高さに対して計算し、実験で得られている像の探針高さ依存性を調べ、実験で得られている像の解釈を行うため、現在表面緩和を取り入れたより詳細な密度汎関数計算を継続している。またフーリエ

展開法を他の探針-半導体表面系に適用し、その有効性を確認する予定である。

### 電界放射顕微鏡の微視的理論

電界放射顕微鏡の像に関する実験では様々な像が得られているが、それを説明する理論はほとんどない。像の理解のためには、原子構造まで含めた探針の第一原理計算が必要だが、それは非常に困難である。また、最近の実験で像は探針の形状の影響を強く受けていることを示唆する結果が得られている。そこで小泉、塚田は前年度、探針を連続体の多面体と考えたモデルについて電子放出過程を計算をおこなった。今年度は、前年度のモデルをより現実的なものにするため、探針の原子構造を考慮した新しい計算法 (APW リカージョン・伝達行列法) の開発を試みた [77]。

### 非接触摩擦力顕微鏡の理論

近年 カンチレバーの共鳴周波数シフトの計測により非接触原子間力顕微鏡の原子像が観測されるようになったが、カンチレバーの振動の減衰も表面を分析するのに有効であることがわかってきた。そこでゴーチエと塚田は、揺動・散逸定理より探針が表面付近でうける摩擦を求める手法を求めた。これにより、表面の下に埋め込まれたナノメートルスケールの構造の検知や表面原子で異なる質量のもののコントラストを得る等の新しい可能性をしめした。

## 3.2.3 計算物性物理

### 実空間時間発展法の開発

昨年度に引き続き、渡辺と塚田は波動関数の時間発展を時間依存 Schrödinger 方程式から数値的に計算する方法の改良を続けた。まず、従来困難とされていた安定解法の要である Crank-Nicholson 法の陰解法の部分と有限要素法との融合を Cayley 近似を用いることで成功し、従来の差分法に比べて計算量を増やさずに計算精度を改善することができた。次に、磁場中での時間発展の計算法を改良し、従来複雑な計算式が必要だったこの計算を、ゲージ変換と Suzuki の Hybrid 指数積展開を用いて簡単化することに成功した。さらに、多電子系の時間依存 Kohn-Sham 方程式にもこの計算法がそのまま応用できることを示した。現在、原子分子系の強電磁波応答やメソスコピック系のダイナミクスを計算するスーパーコンピュータ用プログラムを作成中である。[26, 30]

### 実空間有限要素法による $C_{36}$ フラーレンの第一原理分子動力学

近年発見された 60 個未満の炭素から成るフラーレンは、 $C_{60}$  以上のフラーレンで考えられていた Isolated Pentagon Rule (IPR) が幾何学的に破られている。そのため原子同士が非常にストレスのある結合をしていると考えられる。そこで高橋と塚田は、独自に開発してきた実空間有限要素法を用いて、 $C_{36}$  フラーレンの破壊過程を第一原理分子動力学によって計算した。この計算方法は、高い並列性と、 $O(N)$  という大規模系に対する効率の良さを持ち、境界条件を自由に取れることから、高分子の分子動力学に適した方法である。その結果、隣り合った 5 員環を作っていた炭素の一つが、結合を振り切ってフラーレンの内側に飛び出し、フラーレンがリング状に広がっていく様子が観測された。

### タイトバインディング分子動力学法による Si(001)-H 表面の構造と振動

田上と塚田は、トランスファーラブルタイトバインディング分子動力学法により、水素終端 Si(001)/(1×1) 表面の静的並びに動的な特徴を研究している。隣接するダイハイドライド間の斥力的相互作用がそれらの性質に重大な役割を果たしていることが分かった。第一に、表面構造は、水素原子間の相互作用によりかなりゆがむ。ダイハイドライドは、1つのドメイン上では、傾いた構造をとることが知られていたが、我々は、ドメイン境界における構造を発見した。また、振動スペクトルでは、水素間の相互作用は、孤立したダイハイドライドの Si-H ボンドの伸縮振動の周波数よりも高い周波数域に、新たなピークを生み出すことが分かった。この新しいピークは、小さなテラス上でも現れることが予言される。さらに、表面における振動エネルギーの散逸について研究した。水素間の相互作用を通して、振動エネルギーが素早く他のダイハイドライドに伝わるため、緩和時間は水素終端 Si(001) 表面の中で最も短くなった。

### 水素終端 Si (001) 表面の振動と散逸

水素終端 Si(001) 表面の微細加工技術として STM のトンネル電流を用いる方法が注目されている。水素原子の脱離は、トンネル電流による振動励起と、エネルギーの散逸の競合により生ずるものであるが、散逸に関する知見は十分には得られていない。そこで、田上と塚田は、タイトバインディング分子動力学法により、相の異なる 3 種の水素終端 Si(001) 表面における、振動エネルギーの散逸速度・方向性を調べた。結果、表面に存在するダイハイドライドが、散逸を速める役割を果たすことが分かった。特に、1×1 相では、ダイハイドライド間の強い相互作用を伝えることで、極めて早い、また異方性の強い散逸が起こることが予言された。また、この相互作用は振動スペクトルでも、孤立したダイハイドライドよりも

高エネルギー側に、ピークとして直接観測可能であることが分かった。このことは、第一原理計算でも確認された。

### 3.2.4 ナノ構造の物理

#### ナノチューブ接合系の透過率

田村と塚田は、5員環欠陥と7員環欠陥対による金属的カーボンナノチューブ間接合の量子伝導の研究を行った。[21] フェルミレベルでの透過率について、k-p 近似による計算値はタイトバインディングモデルによるものよりわずかに大きい透過率をしめす。このずれは、 $n$  員環分子 ( $n = 5, 7$ ) の持つ  $n$  個のエネルギーレベルに起源をもつ欠陥レベルのために起こると考えられる。我々は、この欠陥レベルは格子の不連続性から来るもので連続体近似に基づく k-p 近似では記述できないものであり、それによる電子の散乱はボルン近似で説明できることを示した。

#### 分子架橋の量子伝導

中西と塚田は金属電極間に有機分子をはさんだ、分子架橋構造の電子透過について、引き続き研究を行った。分子には結合したループを持つものを選んでいる。これまでに、特定の種類の平面状分子について計算をおこない、分子内にソース・ドレイン電流をはるかに超える大きさ(数倍~数十倍)の誘起ループ電流(のエネルギー密度)が現れることを明らかにした。本年度は、分子の種類を多様化させ、この現象が一般的にみられるものであることを確認した。入射電子のエネルギーを変化させたときに、この誘起ループ電流のエネルギー密度は、分子の縮重準位の近傍で急激に成長し、向きを変化させることが数値計算によりわかった。この現象を解析的な近似理論(分子内部の波動関数を、分子軌道で展開)を用いて説明した。[9] すなわち、共鳴透過に寄与している分子軌道の展開係数間の位相差の変化が上記の現象を引き起こす。電極が特に単純な1次元の場合について、詳細な解析を行った。[53, 79] また、中西と塚田は、上記の計算を  $C_{60}$  分子に応用し、 $C_{60}$  分子に、1次元のソース・ドレインの各電極を取り付けたとき、 $C_{60}$  分子の LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) などの縮重準位の近傍のエネルギーで、上記と同様の誘起ループ電流が現れることを予言した。[82]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Yoshimoto and M. Tsukada: First-Principles study on the geometry and stability of the Ge atom in initial Ge growth on Si(001) surface, *Surface Sci.*, **423**, (1999) 32.
- [2] H. Aizawa, M. Tsukada, N. Sato, and S. Hasegawa: Asymmetric Structure of the Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag Surface, *Surf. Sci.* **429** (1999) L509.
- [3] A. Yajima, M. Tsukada, S. Watanabe, M. Ichimura, Y. Suwa, T. Onogi, and T. Hashizume: First-Principles Calculation of As Atomic Wires on H-Terminated Si(100) Surface, *Phys. Rev. B* **60**, (1999) 1456.
- [4] N. Sasaki and M. Tsukada: New Method for Noncontact AFM Image Simulations, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, (1999) 192.
- [5] N. Kobayashi, M. Brandbyge and M. Tsukada: Conductance through Atoms: Dot or Channel?, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, (1999) 336.
- [6] N. Kobayashi and M. Tsukada: Numerical Method for Local Density of States and Current Density decomposed into Eigenchannels in Multi-channel System, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, (1999) 3805.
- [7] N. Kobayashi, M. Brandbyge and M. Tsukada: Transmission Channels through Na and Al Atom Wire, *Surface Sci.* **433-435**, (1999) 854.
- [8] K. Akagi, M. Tsukada: Theoretical study of the hydrogen relay dissociation of water molecules on Si(001) surfaces, *Surface Science* **438**, (1999) 9.
- [9] S. Nakanishi and M. Tsukada: The Theory of Microscopic Current Distribution in Molecular Bridge Structures, *Surf. Sci.* **438** (1999) 305.
- [10] M. Gauthier and M. Tsukada: Theory of non-contact dissipation force microscopy, *Phys. Rev. B* **60**, (1999) 11716.
- [11] M. Brandbyge, N. Kobayashi and M. Tsukada: Conduction Channels at Finite Bias in Single-Atom Gold Contacts, *Phys. Rev. B* **60**, (1999) 17064.
- [12] K. Akagi and M. Tsukada: Interaction of H<sub>2</sub>O Clusters with Hydrogen-terminated and Clean Si(001) Surfaces, *Thin Solid Films*, (1999) 343, 397.
- [13] N. Sasaki and M. Tsukada: Theory for the effect of the tip-surface interaction potential on atomic resolution in forced vibration system of noncontact AFM, *Appl. Surf. Sci.*, **140**, (1999) 339.
- [14] K. Tagami, and M. Tsukada: Effects of H-H Interactions on Vibrational Spectra of Si(001)/H Surfaces, *J. Phys. Soc. Jpn* **68** (1999) 3254.
- [15] K. Tagami, and M. Tsukada: Nonlinear Effects on Vibrational Energy Transfer on Si(001)/H Surfaces, *J. Phys. Soc. Jpn* **68** (1999) 3303.
- [16] K. Tagami, and M. Tsukada: Dihydrides Accelerate Vibrational Relaxation on Si(001)/H Surfaces, *J. Phys. Soc. Jpn* **68** (1999) 3309.
- [17] E. Tsuchida, Y. Kanada, and M. Tsukada: Density-Functional Study of Liquid Methanol, *Chemical Physics Letters* **311**, (1999) 236.
- [18] R. Tamura and M. Tsukada: Degeneracy and Repulsion Between the Bands of Periodic Carbon Nanotube Junctions, *Eur. Phys. J. D.* **9** (1999) 377.
- [19] N. Sasaki, H. Aizawa and M. Tsukada: Fourier Expansion Method for Noncontact AFM Image Simulations — Application to Si(111)  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag Surface, *Jpn. J. of Appl. Phys.* **39**, (2000) L174.

- [20] Y. Yoshimoto, Y. Nakamura, H. Kawai, M. Tsukada and M. Nakayama: Ge(001) surface reconstruction studied using a first-principles calculation and a Monte Carlo simulation, Phys. Rev. B **61** (2000) 1965.
- [21] R. Tamura and M. Tsukada: Relation between the transmission rates and the wave functions in the carbon nanotube junctions, Phys. Rev. B **61**, (2000) 8548.
- [22] K. Tagami, E. Tsuchida, M. Tsukada: First-principles study of vibrational spectra on dihydride-terminated Si(001)/H surfaces, Surface Sci. **446**, (2000) L108.
- [23] M. Tsukada, N. Kobayashi, M. Brandbyge and S. Nakanishi: Physics of Artificial Nano-Structures on Surfaces, Progr. Surf. Sci, in press.
- [24] N. Sasaki, H. Aizawa and M. Tsukada: Theoretical simulation of noncontact AFM images of Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag Surface based on Fourier expansion method, Applied Surface Science **141**, (2000), in press.
- [25] Y. Tanida and M. Tsukada: First-principles structural determination of Si(001)-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> chemisorbed surface, Appl. Surf. Sci., in press
- [26] N. Watanabe and M. Tsukada: Fast and stable method to simulate quantum electron dynamics, Phys. Rev. E, in press.
- (学位論文)
- [27] Ryo Tamura: Electronic states of disclinations in graphitic sheets and in carbon nanotubes (論文博士)
- [28] Yoshihide Yoshimoto: First Principles Study of Temperature and Coverage Dependent Structures of Si(001), Ge(001) and Ge/Si(001) Surfaces (博士論文)
- [29] Yoshiaki Tanida: Theoretical Study of Temperature Dependent Overlayer Structures of Acetylene on Si(001) Surface (博士論文)
- [30] Naoki Watanabe: Fast and stable computational method for simulating time development of wave-functions (修士論文)
- [31] Michel Gauthier: Theory of non contact dissipation force microscopy (修士論文)
- [32] Yoshikura Kubo: Microscopic Theory of Field Emission Spectrum (修士論文)
- (著書)
- [33] 塚田捷: 「表面・界面と走査プローブ顕微鏡の計算物理」, 「自己組織化プロセス技術」(村田、尾関、野崎編)、培風館アドバンストエレクトロニクスシリーズ, 69-85 (1999)
- [34] 塚田捷: 「各種SPMの理論 - 原子間力顕微鏡 (AFM) - 」, 「走査型プローブ顕微鏡 基礎と未来予測」(森田清三 編著) 丸善株式会社, 169-173 (2000)
- [35] 佐々木成朗、塚田捷: 「原子間力顕微鏡の理論的基礎」, 「走査プローブ顕微鏡」2.2.1章(共立、河津瑋編、実験物理学シリーズ6) 印刷中.
- [36] N. Sasaki and M. Tsukada: Theory of Scanning Probe Microscopy, "Scanning Probe Microscopy" edited by T. Sakurai, Springer-Verlag, in press.
- [37] M. Tsukada, N. Sasaki and N. Kobayashi: Theory of Electronic and Atomic Processes in Scanning Probe Microscopy, in "Optical and Electronic Process of Nano-matters" eds. M. Ohtsu, Kluwer Academic Publishers, in Press
- (国内雑誌)
- [38] 塚田捷、小林伸彦、佐々木成朗: 「走査プローブ顕微鏡の理論 - その現状と新展開 - 」, 表面科学、306-312 (1999)
- [39] 塚田捷: 「表面・界面の計算物理-SX-4B/2Aの利用」, SX WORLD, No24, 6-7 (1999)
- [40] M. Tsukada, R. Tamura, N. Sasaki, H. Aizawa, K. Akagi, Y. Tanida, Y. Yoshimoto, S. Nakanishi: Prediction of Nano-Structures by the First-Principles Electronic State Theory, Activity Report 1998, Supercomputer Center, Institute for solid State Physics, University of Tokyo (Invited Paper), pp11-20 (1999)
- [41] 田上 勝規, 塚田 捷: 水素終端表面の構造と動力学表面科学 **20** 685 (1999)
- [42] 塚田捷: 「走査トンネル顕微鏡の物理」, 応用物理 第69巻 第3号, 329-332 (2000)
- [43] 赤木和人、塚田捷: 「Si(001)表面上の水のプロトンリレー型解離吸着」, 表面科学 vol. 21, No. 1, 39-48 (2000)
- [44] 佐々木成朗、塚田捷: 「原子間力顕微鏡における微視的凝着の理論」, 溶接学会誌 第69巻 第2号, 68-71 (2000)
- [45] 佐々木徹、長嶋雲兵、塚田捷: 「第一原理分子軌道計算DVX法のオブジェクト指向化と専用計算機の開発」, 化学ソフトウェア学会誌、印刷中
- [46] 塚田捷: 「電子状態計算と物質設計の将来展望」「コンピュータ支援電子材料設計報告書」(日本電子工業振興会)印刷中
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [47] S. Watanabe, A. Yajima, M. Tsukada, M. Ichimura, Y. Suwa, T. Onogi and T. Hashizume: Theoretical Study of Atomic-Scale Structures on a Hydrogen-Terminated Silicon Surface, The Japan-China Bilateral Symposium on Novel Methods for Preparation and Evaluation of Coatings, (Sanjo-Kaikan, Univ. Tokyo, 1999.3.17-18)

- [48] H. Aizawa, M. Tsukada, N. Sato, and S. Hasegawa: Asymmetric Structure of the Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag Surface, The 5th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces, and Nanostructures (ACSIN-5), Aix en Provence, France, 1999.7.9.
- [49] Y. Yoshimoto and M. Tsukada: The Ge(001) surface reconstruction: DFT and MCS, SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE STRUCTURE OF SURFACES, VANCOUVER CANADA, 1999.7.29.
- [50] N. Sasaki, H. Aizawa and M. Tsukada: Theoretical simulation of noncontact AFM images of Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag Surface based on first-principles method, *2nd International Workshop on Noncontact Atomic Force Microscopy, nc-AFM'99*, (Pontresina, Switzerland, Sept. 1-4 1999)
- [51] R. Tamura and M. Tsukada: Relation between band structures of helical nanotubes and the phason line, *Nanotec 99* (Brighton, U.K., Sep. 8-10, 1999)
- [52] N. Watanabe and M. Tsukada: Fast and stable method to simulate quantum electron dynamics, The 5th International Conference on Computational Physics (Kanazawa, Japan, Oct 11-13, 1999).
- [53] S. Nakanishi and M. Tsukada: Theory of Quantum Transport of Molecular Bridges: Internal Current Distribution, The Seventh Foresight Conference on Molecular Nanotechnology (Westin Hotel in Santa Clara, CA, USA, Oct 15, 1999)
- [54] R. Tamura and M. Tsukada: Transmission Rates and Wave Functions of Carbon Nanotube Junctions, The Seventh Foresight Conference on Molecular Nanotechnology (Westin Hotel in Santa Clara, CA, USA, Oct 15, 1999)
- [55] Y. Tanida and M. Tsukada: First-principles study of Si(001)-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> chemisorption system, Third International symposium on Control of Semiconductor Interfaces, *軽井沢プリンスホテル*, 1999.10.25
- [56] Y. Tanida and M. Tsukada: Effect of dimer buckling on the acetylene chemisorbed structures of Si(001) surface, 3rd International Symposium on Surface Science for Micro- and Nano-Device Fabrication, *早大国際会議場*, 1999.11.29
- [57] N. Sasaki, M. Tsukada and H. Aizawa: First Principles Study of Tip-Surface Interaction and Dynamic-AFM Images of Semiconducting Surfaces, *International Symposium on Surface Science for Micro- and Nano- Device Fabrication, ISSS-3*, (Tokyo, JAPAN, 1999年 Nov.29-Dec.1 1999)
- [58] Y. Yoshimoto and M. Tsukada: Ge penetration into Si(001), INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SURFACE SCIENCE FOR MICRO- AND NANO-DEVICE FABRICATION (ISSS-3), *早稲田大学*, 1999.12.1.
- [59] R. Tamura and M. Tsukada: Effects of disclinations on transmission rates of nanotube junctions, March meeting (Minneapolis, USA, March 21, 2000)

## 招待講演

- [60] N.Sasaki and M.Tsukada: Theoretical Issues of Noncontact AFM - Dynamics and Imaging Mechanism, The 2nd JRCAT Workshop on Scanning Probe and Nanoelectronics, (Tsukuba Research Center, AIST, Tsukuba, 1999.1.12-14)
- [61] M.Tsukada: Quantum Electron Transport of STM Related Nano-Structures, NEDO Symposium on "Frontiers in Electronically Induced Surface Processes", (Grad.Univ.for Advanced Studies, Hayama, 1999.2.13-14.)
- [62] M.Tsukada:Quantum Electron Transport of STM Related Nano-Structures, NEDO Symposium on "Frontiers in Electronically Induced Surface Processes" (Grad.Univ.for Advanced Studies, Hayama 1999.2.13-14)
- [63] S. Watanabe,A. Yajima,M. Tsukada, M. Ichimura,Y. Suwa, Toshiyuki Onogi and Tomihiro Hashizume: Theoretical study of atomic-scale structures on a hydrogen-terminated silicon surface, The Japan-China Bilateral Symposium on Novel Methods for Preparation and Evaluation of Coatings (Sanjo-Kaikan,Univ.Tokyo ,1999.3.17-18)
- [64] M.Tsukada and K.Akagi: Hydrogen Relay Dissociation of Water Molecules on Si(001), *第5回中日理論化学シンポジウム Sino-Japan Bilateral Symposium on Theoretica Chemistry* (Univ.of Sci. and Tech.,Hufe, China 1999.5.3-9)
- [65] M.Tsukada, N.Kobayashi, M.Brandbyge and S.Nakanishi: Physics of Artificial Nano-Structures on Surfaces,Viii-th Symposium on Surface Phys. (Trest Castle Czech Republic 1999.6.28-7.2)
- [66] M.Tsukada, S.Nakanishi, N.Kobayashi and M.Brandbyge: Theory of Quantum Transport through Atom and Molecular Bridges (STM'99 Seoul 1999.7.18-23)
- [67] M.Tsukada, N.Kobayashi, M.Brandbyge, and S.Nakanishi:Theory of Quantum Transport in Nano-Structures, The International Conf.on Computational Phys. ICCP (Ishikawa Prefectural Industrial Center, Kanazawa 1999.10.11-13)
- [68] N. Watanabe and M. Tsukada: Fast and stable method to simulate quantum electron dynamics, Riken symposium on Large scale calculation of electronic state (Wakoh, Japan, Nov 4-5, 1999).
- [69] M.Tsukada and N.Sasaki:Theory of Noncontact Atomic Force Microscopy, The 7th Intern.Coll.on SPM「走査型プローブ顕微鏡(13)」organized by Thin Film Surf.Phys.Div.of Jpn.Soc.of Appl.Phys.(Atagawa,1999.12.9-11)

- [70] M.Tsukada:Theory of SPM and Related Nano-Structures,5th Intern.Symp. on Advanced Phys. Fields (National Research Inst.for Metals, Tsukuba 2000.3.6-9)

(国内会議)

一般講演

- [71] 相沢秀明 塚田捷: Ag/Si(100) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の構造と電子状態、物性研短期研究会「表面反応ダイナミクス」(東大物性研 1999.1.7-8)
- [72] 渡辺 尚貴、塚田 捷: 波動関数の時間発展の高速で安定な計算法、物性研短期研究会「物性研究における計算物理 - 新しいアルゴリズムと超大型計算」(物性研、1999年6月14-16日)。
- [73] 渡辺 尚貴、塚田 捷: 波動関数の時間発展の高速で安定な計算法、日本物理学会 1999 年秋の分科会 (岩手大学、1999年9月)。
- [74] M. Gauthier, 塚田捷: Theory of noncontact dissipation force microscopy 日本物理学会 1999 年秋の分科会 (岩手大学、1999年9月)。
- [75] 吉本芳英, 塚田捷: Si(001) および Ge(001) 表面の P 型欠陥の拡散ポテンシャル面、日本物理学会 1999 年秋の分科会 (岩手大学、1999年9月)
- [76] 佐々木成朗, 相澤秀昭, 塚田捷: Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の非接触 AFM 像の第一原理計算, 日本物理学会 1999 年秋の分科会 (岩手大、1999年9月24日-9月27日)
- [77] 小泉 悟, 塚田 捷: リカーゾン伝達行列法の貴金属への拡張、日本物理学会 1999 年秋の分科会 (岩手大学、1999年9月24-27日)
- [78] 田村 了, 塚田 捷: ナノチューブ接合系の量子輸送、日本物理学会 1999 年秋の分科会 (岩手大学、1999年9月24-27日)
- [79] 中西祥介, 塚田捷: 分子架橋構造に現れる誘起ループ電流の起源と機能、日本物理学会 1999 年秋の分科会 (岩手大学、1999年9月)。
- [80] 塚田捷、岡崎進、渡辺聡、田村了: 非接触 AFM の理論、特定(B)「原子分子のナノ力学」H11年度公開シンポジウム (島津製作所イベントホール 2000.3.14)
- [81] 塚田捷、岡崎進、渡辺聡、田村了: 非接触 AFM の理論、特定(B)「原子分子のナノ力学」H11年度第2回推進委員会 (島津製作所イベントホール 2000.3.14)
- [82] 中西祥介, 塚田捷: 分子架橋構造の電子透過, 日本物理学会 2000 年春の分科会 (関西大学、2000年3月)。
- [83] 渡辺 尚貴、塚田 捷: 時間依存 Kohn-Sham 方程式の高速で安定な計算法、日本物理学会 2000 年春の分科会 (関西大学、2000年3月)。
- [84] M. Gauthier, 塚田捷: Concepts and applications of noncontact dissipation force microscopy 日本物理学会 2000 年春の分科会 (関西大学、2000年3月)。
- [85] 吉本芳英, 塚田捷: Si(001) 面での点欠陥生成エネルギーの深さ依存性, 日本物理学会 2000 年春の分科会 (関西大学、2000年3月)
- [86] 田上 勝規, 塚田 捷: 水素終端シリコン表面における散逸と振動, 日本物理学会 2000 年春の分科会 (関西大学、2000年3月)

招待講演

- [87] 渡辺 尚貴、塚田 捷: 波動関数の時間発展の高速で安定な計算法、計算物質科学フォーラム研究会 (日本大学、1999年11月19-20日)。
- [88] 佐々木成朗: 原子間力顕微鏡の理論、日本トライボロジー学会「マイクロマシンのトライボロジー第3種研究会」(名古屋大学 VBL、1999年12月10日)
- [89] 塚田捷、佐々木成朗 (東大理): 非接触原子間力顕微鏡の理論、H10 年度応用物理学会関西支部 STM/AFM 研究会「原子間力プローブ法による原子分子のナノ力学 - 原子分子の力学的分光と制御の可能性 - 」(阪大工学部 1999.1.19)
- [90] 塚田捷: 電極・分子接合系の量子輸送、第76化学会年会 特別企画「単一分子エレクトロニクス実現への化学の役割」(神奈川大学 1999.3.30)
- [91] 塚田捷 赤木和人 矢島章夫 相沢秀昭 小林伸彦 中西祥介: 表面科学における理論計算手法の最近の発展、第25回表面科学研究会 「表面科学における計算機シミュレーション法の最近の発展」(慶応大学、1999.5.25)
- [92] 塚田捷: ナノスケール仕事関数、応用物理学会「第27回薄膜・表面物理セミナー」(学習院大学、1999.7.22-23)
- [93] 塚田捷: 走査型プローブ顕微鏡の理論、第37回茅コンファレンス「超ミクロ観測手法の急激な進歩を追求 - 走査プローブ技術と新しい顕微鏡技術 - 」(宮城蔵王ロイヤルホテル 1999.8.21-24)
- [94] 塚田捷: フィールドエミッションの基礎的問題と局所仕事関数、日本電子工業振興会コールドエミッション制御技術分科会 (機械振興会館 1999.10.1)
- [95] 塚田捷: 表面における摩擦と散逸の素過程 - 吸脱着と原子間力顕微鏡 -、短期研究会 「多自由度系の運動と摩擦の物理」(物性研 1999.11.17-19)
- [96] 塚田捷: 走査プローブ顕微鏡の拓くナノ構造の世界、表面科学講演大会 学会賞受賞記念講演、(早稲田大学 1999.12.2)
- [97] 塚田捷: STM と STS で見るナノ物質の量子現象、COMPO 12月例会、(東工大百年記念館 1999.12.4)
- [98] 塚田捷、佐々木成朗、Michel Gauthier、田上勝規: 非接触原子間力顕微鏡の理論的課題、日本物理学会シンポジウム「非接触原子間力顕微鏡の新展開」(関西大学 2000.3.24)

### 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、ゲージ対称性の破れた多体状態を理論的に調べてきた。特に興味をもっているのは、電子相関効果（電子が互いの斥力のために複雑に連動するために生じる、特有な量子状態）の発現の様子と、相互作用を入れる前のバンド構造との関連である。つまり、特徴的なバンド構造に多体相互作用をスイッチオンすれば、特徴的な量子効果を生じるであろう、という問題意識である。

#### 3.3.1 超伝導

今年度も引き続き電子間斥力からの超伝導について調べた。直観的には、斥力からも、(スピン、電荷の)揺らぎを交換して異方的 (Cooper pair 内の 2 電子がノンゼロな相対角運動量を持ち、ギャップ関数に節 (node) をもつ) ペアリングが起き得る。普通はペアのスピンは反平行 (シングレット) であるが、近年様々な物質でスピン・トリプレットのペアリングが生じている可能性が指摘されていることにも触発され、様々な系においてトリプレット超伝導の可能性も含めて検討した。

#### 2次元,3次元 Hubbard 模型におけるシングレットおよびトリプレット超伝導

格子上で短距離斥力相互作用する最も簡単な模型である斥力 Hubbard 模型が超伝導し得るかという問題は古くからの問題であるが、とりわけ層状酸化物高温超伝導体の発見により、2次元反強磁性近傍におけるシングレット d 波超伝導の可能性に興味を持たれて来た。この問題に対して、数値計算からは否定的な結果が多かったが、昨年度までの黒木・青木による量子モンテカルロ計算からその可能性が初めて示唆された [25, 54]。そこで、有田、黒木、青木は今年度、さらなる基本的な問題として、(i) Hubbard 模型における強磁性相近傍にトリプレット超伝導の可能性はあるか? (ii) 2次元は3次元に比べて超伝導に有利なのか? という問題に取り組んだ [4, 5, 22, 31, 36, 52, 54]。「揺らぎ交換近似 (fluctuation exchange, 略して FLEX 近似)」と呼ばれる手法を用いて、3次元を含む様々な格子形と電子密度をスキャンした結果、銅酸化物に対応する 2次元反強磁性近傍の d 波超伝導が 'best case' で最も高い転移温度 ( $T_C \sim 0.01t$ : 電子の hopping 積分 ( $\sim$  バンド幅),  $t \sim 1$  eV とすると  $O(100)$  K) を持つことがわかった。Fig. 3.3 a は 2次元におけるグリーン関数の振舞いの例である。有田はこの問題を中心とした成果を博士論文にまとめた [57]。

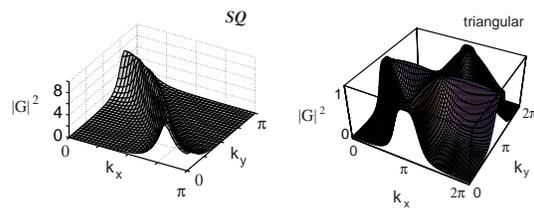


図 3.3 a: A FLEX result [4, 5] for Green's function  $G$  in the  $k$  space for the Hubbard model on a square (SQ) lattice where antiferromagnetic fluctuations dominate or a triangular lattice where ferromagnetic fluctuations dominate.

#### 非連結なフェルミ面を持つ Hubbard 模型におけるトリプレット超伝導

上記の結果では、通常のフェルミ面の形状では Hubbard 模型におけるトリプレット超伝導は、揺らぎ交換による相互作用が小さいことと準粒子が短寿命になることから不利 (低い  $T_C$ ) である。黒木、有田は、非連結なフェルミ面をもつ系においてはフェルミ面上の node を回避したトリプレット超伝導が有利になる可能性を指摘し、実際に非連結フェルミ面である三角格子と蜂の巣格子の場合について、FLEX 計算で検出可能な程度の転移温度を持つトリプレット超伝導が生じることを示した [3, 40]。

#### 有機導体における異方的超伝導

酸化物における高温超伝導機構の研究の発展として、黒木、青木は昨年度以来、有機超伝導体も強相関電子系ととらえ、超伝導機構を調べてきた。特に有機導体の結晶構造を考慮した Hubbard 模型を用いて量子モンテカルロ計算を (BEDT-TTF) $_2$ X や (TMTSF) $_2$ X に対して行い、シングレット d 波超伝導の可能性を指摘した [1, 32, 33, 48]。ただし、最近では (TMTSF) $_2$ X においてトリプレット超伝導の可能性を示唆する実験が現れており、この問題に対する検討にも着手した。

#### 銅酸化物および有機導体におけるフェルミ面の形状とスピン揺らぎ

スピンの間に相関が生じることも電子間相互作用の重要な発現である。昨年度来、黒木、有田、青木は銅酸化物において実験的に観測されるスピン構造および電荷構造 (感受率の  $k$  空間におけるピーク位置) がフェルミ面の形状からどこまで理解できるかを Hubbard 模型に対して FLEX 近似を用いて調べてきた [2, 21, 30, 37, 49, 50, 51, 53]。その結果、スピン構造に関しては定量的に理解可能であり、母体

に電子をドープした場合と正孔をドープした場合の非対称性も理解される。

また、銅酸化物の場合と同様、有機物においてもスピン構造がフェルミ面とどのように相関するかは興味深い問題である。武藤(聡)、黒木、青木は  $(\text{TMTSF})_2\text{X}$  の格子構造上でハバード模型を考え、FLEX 近似を用いてスピン感受率を計算し、実験と整合するスピン構造を得た。武藤はこの成果を修士論文にまとめた [59]。

### 3.3.2 強磁性

電子間斥力からスピンの揃う強磁性が得られるか、というのも基本的な電子相関の問題である。一般には強磁性状態は、運動エネルギー的に損なので、強磁性を実現できる条件・模型を見つけるのはチャレンジとなる。

#### スパイラル・スピン状態

昨年度、有田、草部(新潟大)、黒木、青木はスパイラル状態と呼ばれる殆ど強磁性の状態(スピン相関が系の長さと同じ波長を持つ状態)が、電子相関系の強磁性にしばしば付随して現れることを明らかにしたが、有田、青木は今年度はさらに、熱力学的極限(無限系)におけるスパイラル状態と強磁性との関係について考察した。その結果、無限系においては両者は区別できないものであることを示した [7]。

#### 様々な 3 次元格子上の Hubbard 模型における強磁性・反強磁性

斥力相互作用からの強磁性は、金森理論など長い歴史があるが、これを現代的な観点から詳しく見るために、有田、小野田(物性研)、黒木、青木は昨年度以来、3次元単純立方格子、面心立方格子(FCC)、体心立方格子(BCC)上の Hubbard 模型に対して FLEX 近似、および vertex 補正を取り入れた TPSC 近似という解析的方法を用い、スピン感受率を計算して磁気的性質を調べた [6]。その結果、FCC 格子のように、状態密度の発散がバンドの底に位置し、その近傍にフェルミ準位があるときに強磁性的の傾向が最も強くなることがわかった。

#### 強磁性近傍における電気伝導

有田、黒木、青木は村田(大阪市大理)らによる  $\pi$  型有機導体における磁気抵抗の実験に触発され、バンドに平坦な部分と dispersive な部分がある場合には、電子相関から強磁性的揺らぎが発達し、このため磁場をかけて Zeeman 分裂させると電流が流れ易くなる(負の磁気抵抗が生じる)ことを提案した。この直観像を、低電子密度においてバンドの平坦性が

ら強磁性的揺らぎが発達することが知られている 2次元  $t-t'-U$  模型に対して FLEX 近似を用いて磁気抵抗を線形応答理論により計算した [8, 32, 41]。その結果、低温で確かに負の磁気抵抗が現れる。

### 3.3.3 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。2次元空間に特有な電子相関効果であり、Chern-Simons ゲージ場(複合粒子=電子+磁束を考える)理論 [26] も展開されている。通常の電子相関系においては、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欠如しており、全ては相互作用で決まるという特異な状況にある。そのため、電子状態はランダウ準位の詰まり方 ( $\nu$ ) に極めて敏感に依存する。我々の問題意識は、(i)  $\nu = (\text{奇数})^{-1}$  がエネルギー・ギャップをもつ量子液体状態であるのに対し、 $\nu = (\text{偶数})^{-1}$  がギャップレスな量子液体とされているが、その真偽、(ii)  $\nu = (\text{整数})^{-1}$  に隣接して電子結晶状態があると考えられているが、その性質、さらに (iii) 分数量子ホール系を小さな空間に閉じこめると何が起きるか、である。

#### $\nu = 1/2$ 問題

ランダウ準位が丁度半分詰まった分数量子ホール系は、複合フェルミオン描像の平均場近似ではゼロ磁場中のフェルミ液体であることが予測されているが、平均場からの揺らぎは大きいはずである。特に、多体理論の試金石は励起スペクトルを再現できるか否かである、という観点から、小野田、青木と水崎、大塚(原子核理論)は  $\nu = 1/2$  の有限系を数値的方法(2000 万次元程度の大次元行列の厳密対角化)で解き、その低エネルギー励起スペクトルを求めた [9, 24, 27, 35]。これから、ゼロ磁場での低エネルギー励起(フェルミ面をまたぐ粒子・正孔励起)と同一の殻構造が強磁場中相互作用系の数値解に現れること(Fig. 3.3 b)を見い出した。また、この系では準粒子の有効質量は純粋に相互作用起源であるが、これをスペクトルのサイズ・スケーリングから評価するとともに、励起が熱力学極限でギャップレスであることも確認した。スペクトルの定量的形状や有効質量の付着磁束本数依存性には平均場近似や単一モード近似からのずれが見られるので、揺らぎの効果も確かに存在する。この結果は PRL 誌にも出版された。

#### 分数量子ホール系における光スペクトル

分数量子ホール系は多体系であるが、光学スペクトルから多体効果を検出するのは簡単ではない。良く知られているように、並進対称性のためにサイクロトロン共鳴スペクトルは内力である電子間相互作用

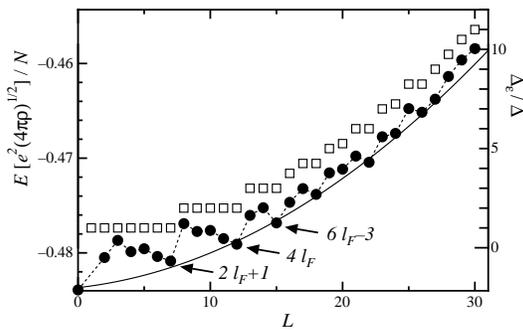


図 3.3 b: Numerical result (solid circles) for the low-lying excitation spectrum against the total angular momentum  $L$  in a fractional quantum Hall system with 16 electrons on a sphere.[9] Squares indicate the low-lying excitation spectrum for free fermions in *zero magnetic field*, while the full curve represents an asymptote  $\propto L(L+1)$ .

用を反映しない (Kohn の定理)。また、電子と正孔が同一面内に閉じ込められている 2 成分系では、フェルミ準位が最低ランダウ準位内にあるときには、電子正孔の対消滅による発光のエネルギーは孤立励起子のものに一致し、これは或る隠れた対称性のためである。浅野はこうした対称性を破った系で光学スペクトルにどのような多体効果が現れるかを、ハミルトニアンの数値的角化を用いて考察した [10, 11, 39, 44]。

Kohn 定理に縛られなくなる系としては、二重量子井戸系を考えた。スペクトルの相互作用依存性は、結合定数が正負のモード間反発、運動による先鋭化に分類でき、二層間の距離を離していくと、負のモード間反発が増強されることがわかった [10]。隠れた対称性が破れる例としては、フェルミ準位が下から 2 番目のランダウ準位にある場合の光ルミネッセンスを考察した。その結果スペクトルが、異なるスピンを持つ電子間のランダウ準位間散乱過程に起因したピーク構造を持つことを明らかにした [11]。

### 強磁場中の量子ドット

分数量子ホール系を電子が数個しか含まない程小さな領域に閉じこめるとは、最近の技術で可能になっているが、このとき何が起きるであろうか。強磁場中では電子はサイクロトロン運動の回転中心のダイナミクスにより支配されるが、この中心の  $x$  座標と  $y$  座標は同時には確定せず、磁気長 (10 T の磁場で  $\sim 100 \text{ \AA}$ ) 程度の量子零点振動を行う。この系を量子ドットに閉じこめると、電子は斥力により避け合い、「電子分子」構造 (3 電子なら正三角形、4 電子なら正方形、等) をもつ。つまり、原子核もないのに、斥力のために自発的にこうなり、全角運動量が特定の「魔法数」でエネルギーが安定化する、という原子核

の殻 (shell) 構造のような現象が起きる。魔法数は、電子がパウリの排他律を満たしながら分子的配置をとり、この周りに量子零点振動をしながら回転する分子という描像でとらえ得ることが、Maksym により提案されている。

Maksym (Leicester 大) 今村 (東北大) は電子分子を詳しく調べてきており、スピン自由度を解明したり量子ドットを二枚重ねた二重ドットにおける立体分子を調べた [12, 55, 56]。本年度はこれらについての総説も執筆した [13]。

### 2 次元古典電子系のシミュレーション

2 次元古典電子系は液体ヘリウム上の電子で実現され、液相・固相転移が起きる。武藤 (覚) と青木は、量子効果 (零点振動等) を取り入れる前の分数量子ホール系の固化の問題の出発点としての意味ももつことから、古典 2 次元電子系に対して分子動力学計算を行った [14, 15, 16, 38]。「有限温度では 2 次元系に真の長距離結晶秩序は存在しない」という Mermin の定理は、長距離相互作用である  $1/r$  相互作用について成立するかどうかは分かっていなかった。分子動力学計算によって電子の位置相関と角度相関の双方を見たところ、有限温度では位置の長距離秩序は無く、角度相関は長距離 (トポロジカルな秩序がある) という結果を得た。

### 3.3.4 その他

#### 3 次元空間における整数量子ホール効果

周期性をもつ 2 次元系に強磁場をかけると、エネルギー・スペクトルは Hofstadter butterfly と呼ばれるフラクタルなものになり、特異な整数量子ホール効果が生じることが知られている。3 次元系ではランダウ量子化や butterfly は一般には潰れるが、越野、黒木、青木、長田 (物性研) 鹿児島 (総合文化) は、異方的 3 次元 tight-binding 模型に磁場をかけた場合には、磁場方向の関数としてエネルギー・スペクトルが 2 次元での butterfly と似た構造をとることを示した [17, 42]。フェルミ・エネルギーがギャップ内にあるときに量子化されるホール伝導度の値も求めた。越野はこの成果を修士論文にまとめた [58]。

#### 曲面上の電子構造

越野、黒木、青木、森瀬、武田 (物性研) は、 $C_{60}$  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 [18, 43]。曲面を準備するのに、3 次元空間内の電子をポテンシャル障壁で膜に閉じこめて行き最後に膜厚をゼロにする極限操作と、最初から厚みがゼロの面を曲げて行く操作が考えられる。長岡等により示されたように、曲面上での量子力学においては、これら二通りの操作に対し

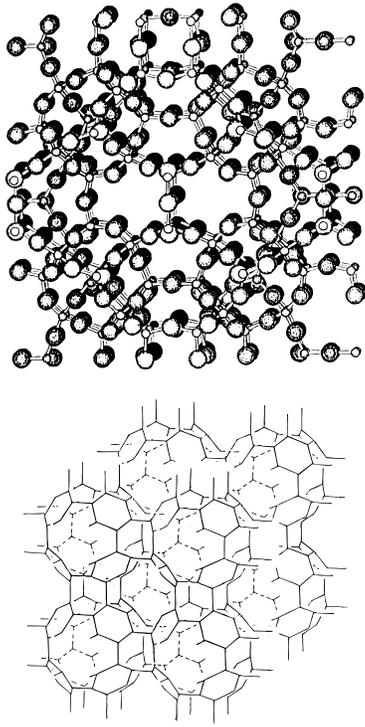


図 3.3 c: A polymorph of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_{60}$  zeolite silica, obtained in a molecular-dynamics study.[20] Upper panel is a ball-and-stick representation (small sphere: Si, large sphere: O), while lower panel represents the structure with polyhedra.

て微分幾何学的効果から生じる有効ポテンシャルに差異が現れる。ゼオライト構造のモデルとして極小曲面を採用し、極小曲面に対する Weierstrass 表示を援用して、プロック電子のエネルギー・バンド構造を求めたところ、意外にもこれら二つに対するバンド構造は、小さなオフセットを除けば意外にも似ていることを示した。

### 総説

青木は、「固体物理のこれから」についてレビューした [28]。また、青木は量子ホール効果 [46, 47]、強相関電子系における磁性 [45]、超伝導 [45, 51]、電子相関とスピン自由度 [23, 34] についての講演を行った。

出版としては、地球物理・結晶化学と固体物理の学際的単行書の編集 [29] を行った。この書中で、「物理と鉱物学の接点」 [19]、「多彩な結晶構造が固体物理学的にもつ意味」 [20] (Fig. 3.3 c は多彩な結晶構造の例) についての章も執筆した。

### < 報文 >

#### (原著論文)

- [1] K. Kuroki and H. Aoki: Superconductivity and spin correlation in organic conductors: a quantum Monte Carlo study, *Phys. Rev. B* **60**, 3060 (1999).
- [2] K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki: Link between the spin fluctuation and Fermi surface in high  $T_C$  cuprates — A consistent description within the single-band Hubbard model, *Phys. Rev. B* **60**, 9850 (1999).
- [3] K. Kuroki and R. Arita: Spin-triplet superconductivity in Hubbard models with disconnected Fermi surfaces, submitted (cond-mat/0004381).
- [4] R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: Spin-fluctuation exchange study of superconductivity in two- and three-dimensional single-band Hubbard model, *Phys. Rev. B* **60**, 14585 (1999).
- [5] R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki:  $d$ - and  $p$ -wave superconductivity mediated by spin fluctuations in two- and three-dimensional single-band repulsive Hubbard model, *J. Phys. Soc. Jpn.* **69**, 1181 (2000).
- [6] R. Arita, S. Onoda, K. Kuroki and H. Aoki: Magnetic properties of the Hubbard model on three-dimensional lattices: fluctuation-exchange and two-particle self-consistent studies, *J. Phys. Soc. Jpn.* **69**, 785 (2000).
- [7] R. Arita and H. Aoki: The relation between spiral and ferromagnetic states in the Hubbard model in the thermodynamic limit, *Phys. Rev. B*, in press.
- [8] R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: Electron-correlation-originated negative magnetoresistance in a system having a partly flat band, *Phys. Rev. B* **61**, 3207 (2000).
- [9] Masaru Onoda, Takahiro Mizusaki, Takaharu Otsuka, and Hideo Aoki: Excitation spectrum and effective mass of the even-fraction quantum Hall liquid, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 3942 (2000).
- [10] Kenichi Asano and Tsuneya Ando: Two-component cyclotron resonance in bilayer quantum Hall systems, *Physica E* **6**, 636 (2000).
- [11] Kenichi Asano and Tsuneya Ando: Electron-electron interaction effects in integer quantum Hall photoluminescence, *Physica E*, in press.
- [12] H. Imamura, P.A. Maksym and H. Aoki: Vertically coupled double quantum dots in magnetic fields, *Phys. Rev. B* **59**, 5817 (1999).
- [13] P.A. Maksym, H. Imamura, G. Mallon and H. Aoki: Molecular aspects of electron correlation in quantum dots, *J. Phys. Condensed Matter* **12**, R299 (2000).
- [14] S. Muto and H. Aoki: Crystallization of a classical two-dimensional electron system — positional and orientational orders, *Phys. Rev. B* **59**, 14911 (1999).

- [15] S. Muto and H. Aoki: Molecular dynamics study of a classical two-dimensional electron system — positional and orientational orders, *Physica E* **6** 116 (2000).
- [16] S. Muto and H. Aoki: Persistence of vibrational modes in a classical two-dimensional electron liquid, *J. Phys. Condensed Matter* **12**, L83 (2000).
- [17] M. Koshino, H. Aoki, K. Kuroki, S. Kagoshima, and T. Osada: Integer Quantum Hall Effect in Three Dimensions, submitted.
- [18] H. Aoki, M. Koshino, H. Morise, D. Takeda, and K. Kuroki: Electronic structure of periodic surfaces — ‘topological band structure’, submitted.

## (総説)

- [19] H. Aoki, Y. Syono and R. J. Hemley: Physics and mineralogy — the current confluence, in *Physics Meets Mineralogy — Condensed-Matter Physics in Geosciences*, ed. by H. Aoki, Y. Syono and R. J. Hemley (Cambridge Univ. Press, 2000), in press.
- [20] Hideo Aoki: Opportunities in the diversity of crystal structures — a view from condensed-matter physics, in *Physics Meets Mineralogy — Condensed-Matter Physics in Geosciences*, ed. by H. Aoki, Y. Syono and R. J. Hemley (Cambridge Univ. Press, 2000), in press.

## (国際会議録)

- [21] K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki: A link between the spin fluctuation and Fermi surface in high  $T_C$  cuprates — A description within the single-band Hubbard model, in *Proc. Int. Conf. on Physics & Chemistry of Molecular & Oxide Superconductors 99*; *J. Low Temp. Phys.* **117** (1999) 247.
- [22] R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: Fluctuation exchange study of singlet and triplet superconductivity in 2D and 3D single-band Hubbard model, in *Proc. CREST Int. Workshop — Pseudogap, Spin Gap and Anomalous Metals*; *J. Phys. Chem. Solids*, to be published.
- [23] H. Aoki: Spin states and transport in correlated electron systems in *Interactions and Quantum Transport Properties of Lower Dimensional Systems* ed. by T. Brandes (Springer Series ‘Lecture Notes in Physics’, Springer, 2000), p. 167.
- [24] H. Aoki: Composite fermions — excitation spectra in the odd- and even-fraction quantum Hall liquids in *Dynamics of Gauge Fields* (Universal Academy Press, 2000), in press.

## (国内雑誌)

- [25] 黒木和彦、青木秀夫: 斥力ハバード模型は超伝導になるか、*日本物理学会誌* **54** (1999) 557.
- [26] 中島龍也、青木秀夫: 分数量子ホール系の複合粒子理論、*固体物理* **34** 「量子輸送現象における新展開」特集号、339 (1999).

- [27] 小野田 勝、水崎高浩、大塚孝治、青木秀夫: モンテカルロ対角化法からみた  $\nu = 1/2$  状態、*物性研究* **72**, 188 (1999).
- [28] 青木秀夫: Nevill Mott の物理と固体物理のこれから、*固体物理* **35**, No.6 (2000) 451.

## (著書)

- [29] Hideo Aoki, Yasuhiko Syono and Russell J. Hemley (editors): *Physics Meets Mineralogy — Condensed-Matter Physics in Geosciences*, Cambridge Univ. Press, 2000.

## &lt; 学術講演 &gt;

## (国際会議)

## 一般講演

- [30] K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki: A link between the spin fluctuation and Fermi surface in high  $T_C$  cuprates — A description within the single-band Hubbard model, (Int. Conf. on Physics & Chemistry of Molecular & Oxide Superconductors 99, Stockholm, 27 July-2 Aug, 1999)
- [31] R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: Fluctuation exchange study of singlet and triplet superconductivity in 2D and 3D single-band Hubbard model, (CREST Int. Workshop — Pseudogap, Spin Gap and Anomalous Metals, Nagoya, 24-26 January, 2000)

## 招待講演

- [32] H. Aoki: Anisotropic pairing symmetries in organic superconductors — “Fermiology” in many-body effects (3rd Int. Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Ferromagnets, Oxford, 25-30 Sept, 1999).
- [33] H. Aoki: Pairing symmetry and spin structure in organic superconductors — a “fermiology” in the electron correlation (Int. Workshop on Control of Conduction Mechanism in Organic Conductors, Hachioji, 22-24 Nov, 1999).
- [34] H. Aoki: Spin states and transport in correlated electron systems (Int. Workshop on Interactions and Quantum Transport Properties of Lower Dimensional Systems, Hamburg, 27-28 July, 1999).
- [35] H. Aoki: Composite fermions — excitation spectra in the odd- and even-fraction quantum Hall liquids (TMU-Yale Symposium on Dynamics of Gauge Fields, Tokyo, 13-15 Dec, 1999).

## (国内会議)

## 一般講演

- [36] 有田亮太郎、黒木和彦、青木秀夫: 2次元、3次元、斥力ハバード模型における d 波および p 波超伝導 (日本物理学会、岩手、1999.9.24-27).

- [37] 黒木和彦、有田亮太郎、青木秀夫: 銅酸化物におけるフェルミ面の形状とスピン揺らぎ—ハバード模型に対する FLEX 解析 (日本物理学会、岩手、1999.9.24-27)。
- [38] 武藤覚、青木秀夫: 古典 2 次元電子系の動的性質 (日本物理学会、岩手、1999.9.24-27)。
- [39] 浅野建一、青木秀夫、安藤恒也: 二層量子ホール系におけるサイクロトロン共鳴 (日本物理学会、岩手、1999.9.24-27)。
- [40] 黒木和彦、有田亮太郎: 三角格子および蜂の巣格子上のハバード模型におけるトリプレット超伝導 (日本物理学会、大阪、2000.3.22-25)。
- [41] 有田亮太郎、黒木和彦、青木秀夫: 部分的に平坦なバンドを持つハバード模型における負の磁気抵抗 (日本物理学会、大阪、2000.3.22-25)。
- [42] 越野幹人、黒木和彦、青木秀夫、長田俊人、鹿児島誠一: 磁場中 3 次元 tight-binding 模型におけるバタフライ・スペクトル (日本物理学会、大阪、2000.3.22-25)。
- [43] 越野幹人、黒木和彦、青木秀夫、森瀬博史、武田大輔: 周期的極小曲面上に束縛された電子の量子状態 (日本物理学会、大阪、2000.3.22-25)。
- [44] 浅野建一、安藤恒也: 二層量子ホール系におけるサイクロトロン共鳴の単一モード近似による解析 (日本物理学会、大阪、2000.3.22-25)。
- [53] 黒木和彦、有田亮太郎、青木秀夫: A link between the Fermi surface and the spin structure in the Hubbard model for the high  $T_C$  cuprates (科研費特定領域 (A)「遷移金属酸化物」研究会、東北大、1999.11.15-17)。
- [54] 黒木和彦: 斥力ハバード模型における異方的超伝導—1,2, 及び 3 次元系における可能性 (東大工学部力学教室インフォーマルセミナー、1999.12.10)。
- [55] 青木秀夫: 2 次元電子系—液相と固相 (科研費特定領域 (A)「スピン制御半導体」研究会、伊豆長岡、1999.5.28)。
- [56] 青木秀夫: 強磁場中 2 次元電子系—ドット、固相、液相 (科研費特定領域 (A)「スピン制御半導体」研究会、物性研、2000.1.29)。

(学位論文)

- [57] Ryotaro Arita: Ferromagnetism and superconductivity in the Hubbard model — correlation with lattice structures、博士論文、1999 年 12 月。
- [58] Mikoto Koshino: Energy spectrum of three-dimensional Bloch electrons in magnetic fields、修士論文、2000 年 1 月。
- [59] Satoshi Muto: Fluctuation exchange study of spin structure in quasi-one-dimensional Hubbard model、修士論文、2000 年 1 月。

(セミナー・研究会)

- [45] H. Aoki: Superconductivity and magnetism in the Hubbard model (Heidelberg 大学理論物理学科セミナー、1999.7.29)。
- [46] 青木秀夫: 分数量子ホール効果 (立命館大学物理学科セミナー、1999.10.26)。
- [47] 青木秀夫: 分数量子ホール効果 (大阪大学基礎工学科セミナー、2000.1.25)。
- [48] 青木秀夫:  $\tau$  型導体の磁気抵抗 (物性研研究会「有機物の強相関効果」、1999.5.13)。
- [49] 黒木和彦: 強相関電子系におけるスピン揺らぎと超伝導—量子モンテカルロ法および FLEX 近似による解析 (第 40 回超伝導マグネティクス専門研究会「強相関物質の研究における数値計算法の現状と展望」、青山学院大、1999.5.21)。
- [50] 黒木和彦: 銅酸化物におけるフェルミ面の形状とスピン揺らぎ—ハバード模型における FLEX 解析— (第 6 回田中シンポジウム「高温超伝導体の電荷秩序」、浜松、1999.7.8-10)。
- [51] 青木秀夫: 銅酸化物高温超伝導体におけるスピン構造とフェルミ面—単一バンド・ハバード模型による FLEX 解析 (マルチコア・プロジェクト「超伝導」研究会、金材研 (筑波)、2000.2.8)。
- [52] 有田亮太郎、黒木和彦、青木秀夫: d-wave and p-wave superconductivity in two and three dimensional Hubbard model — a FLEX study (科研費特定領域 (A)「遷移金属酸化物」研究会、東北大、1999.11.15-17)。

## 3.4 小形研究室

強い電子相関のある系、すなわち高温超伝導、モット金属-絶縁体転移、低次元電子系、メゾスコピック系、有機伝導体、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、変分法、計算機シミュレーションなどの方法を組み合わせて用いている。小形は1999年10月から理学系研究科の併任となった。以下は駒場の総合文化研究科での活動を含む。

### 3.4.1 高温超伝導体のモデルハミルトニアンと、その基底状態

#### 反強磁性と超伝導状態の共存

高温超伝導が実現するパラメータの近傍には、反強磁性相が存在し、さらに実験的にはストライプ状態として超伝導と反強磁性が共存する可能性がわかっている。この問題に対して、まず両者が空間的に一樣に共存する波動関数を、高温超伝導のモデルハミルトニアンである  $t$ - $J$  モデルに対して考えた。強相関の場合の超伝導状態がどのようなものであるか理論的には着者がついていないが、我々は異方的超伝導を示す BCS 状態に Gutzwiller 射影演算子を掛けた状態を変分波動関数として用いた。ここで Gutzwiller 射影とは、電子相関のために上向きスピンと下向きスピンの2重占有を波動関数中から排除するという演算である。この共存状態に対する数値計算(変分モンテカルロ法)を開発し、half-filling 近傍でこの状態が実現することを見出した。この状態は変分法の範囲内で、現在のところ最もエネルギーの下がる波動関数である。[2]

#### グッツウィラー近似の拡張

超伝導と反強磁性の共存を数値的に調べる過程で、従来の Gutzwiller 近似というものを拡張しなければならぬということが明らかになった。高温超伝導では強相関に起因して各種の異常が起こっていると考えられるが、強相関の効果をどのように取り入れればよいかということが大きな問題になっている。Gutzwiller 近似はその1つの方法であり、射影の効果を  $t$ - $J$  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。この近似は、変分モンテカルロ法の結果を再現するなど精度のよい近似であることがわかっている。しかし反強磁性が絡んでくると近似の精度が落ちることが明らかになった。我々はこの問題を解決するような Gutzwiller 近似の拡張に成功した。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。[10]

#### ストライプ状態

強相関に起因する特殊な形の波動関数として、電荷密度波と反強磁性の密度波(とくにインコメンシュレートの波数を持つスピン密度波)および、 $d$ 波対称性を持つ超伝導の3者が空間的に波打ちながら共存しているストライプ状態というものがある。実験的にもいくつかの物質で見つかっている。この状態が  $t$ - $J$  モデルにおいて実現するかどうかについて、GL理論および数値計算によって調べた。[3, 11] とくに超伝導の空間変化について特殊な形のもの安定化することがわかった。

### 3.4.2 $d$ 波超伝導体における磁束周辺、表面近傍、不純物近傍の電子状態

#### 磁束周辺の電子状態

$d$ 波超伝導体に磁場をかけると、超伝導体内に磁束が導入される。とくに異方的超伝導における磁束まわりの電子状態は、従来の  $s$ 波対称性を持つ BCS 超伝導の場合と異なって、興味深いことが起こる。高温超伝導体は  $d_{x^2-y^2}$  波超伝導であると考えられているが、この場合の磁束の構造および電子状態については実験的にも理論的にも興味を持たれている。さらに、高温超伝導体ではコヒーレンス長が短いことと、反強磁性ゆらぎが強いことにより、特殊な磁束状態が可能になる。このことについて Gutzwiller 近似を用いて調べ、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。また磁束の持つ電荷について調べた。[12, 13, 14, 33, 34]

#### 表面近傍の電子状態

$d$ 波超伝導体の表面近傍では超伝導秩序変数が抑えられるので、磁束と似た状況が出現する。実験で得られたフェルミ面を再現するように一般化した  $t$ - $J$  モデルを用い、表面付近で実現するゼロエネルギー状態が表面の形状とフェルミ面の形状に大きく依存することを明かにした。この結論を逆に用いると、実験からミクロなフェルミ面などのパラメータが決定できる可能性があることを指摘した。また  $t$ - $J$  モデルの「 $d$ 波 + 空間的に振動する  $s$ 波」という状態が、電子ドープの高温超伝導の物質を記述できるのではないかとこの観点から調べた。この状態では  $[110]$  面においても  $s$ 波成分のためにゼロエネルギーピークが分裂することを明かにした。[4, 5, 15]

#### 不純物近傍の電子状態

高温超伝導体の  $Cu$  を不純物で積極的に置換し、それをプローブにすることによって、磁束状態と比較できるような状況を作り出すことができる。実験的には  $Cu$  を  $Zn$  や  $Ni$  で置き換える。  $Zn$  の場合は非

磁性 ( $S = 0$ )、Ni の場合は磁性 ( $S = 1$ ) 不純物となる。論文 [6, 17, 18, 19] では非磁性不純物の場合、ゼロエネルギーのピークが出現するがピークは 2 つに分裂しないことを明かにした。表面の場合と異なり、時間反転対称性は破れない。論文 [7, 20, 21] では、磁性不純物の場合を調べた。不純物の持つスピンの局所的な磁場をあたえるので、ゼロエネルギーピークを分裂させるという興味深いことが明かになった。この現象は実験的に検証できるものである。

### 3.4.3 朝永・ラッティンジャー液体理論

1 次元電子系で実現する朝永・ラッティンジャー液体の理論について、ベテ仮説の方法などの厳密解、数値計算などを組み合わせて、いろいろな場合について調べている。とくに 2 つのバンドがある場合の 1 次元系について、金属-絶縁体転移やリエントラント 1 次相転移が生じることを明らかにした。[31] また 2 層ヘリウムを念頭に、2 種類のフェルミ粒子系がある場合、特異な磁氣的相転移をする可能性を議論した。

### 3.4.4 スピン・ギャップ系

1 次元電子系では、電荷の自由度とスピンの自由度が分離して独立の振舞いをする。その結果、スピンの励起だけにギャップを持つようなスピンギャップと呼ばれる状態が可能になる。この状態での電子グリーン関数の振舞いについては、わかっていない。このことについて、比較的単純で扱いやすいイジング型の 1 次元電子系を用いて調べた。[8]

### 3.4.5 p 波超伝導体

$\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  という物質は、高温超伝導体と非常に似た構造をしているが、超伝導は、p 波対称性を持つ triplet 超伝導体であることが最近の実験で明らかになった。この超伝導発現の機構をミクロスコピックな立場から理解するために、スピンゆらぎの理論を拡張した。とくに (1) スピンゆらぎの異方性が強く (2) フェルミ面の形状とネスティング条件がよい場合には、反強磁性スピンゆらぎによって triplet 超伝導が実現することを示した。これは従来のような、強磁性スピンゆらぎによる triplet 超伝導の発現機構と全く異なる新しいものである。[26]

### 3.4.6 低次元有機物質に関する理論

有機超伝導体において、2 種類の密度波 (電荷密度波、スピン密度波) が共存することが実験的に見出されている。この結果は、従来の 1 次元パイエルズ不安定性の議論からは理解できないものであった。しかし長距離のクーロン斥力を考慮した平均場近似を用

いると、共存状態が素直に理解できることがわかった。[22]

また  $p$ -EPYNN· $[\text{Ni}(\text{dmit})_2]$  という有機物質は、大きなスピンギャップを持つ梯子型の構造を持つ。この物質に不純物を導入すると、不純物周りに特徴的なスピン配置を伴った局在スピンの励起されることが実験的にわかった。この結果についてスピン系による解析を行なった。[9]

<受賞>

- [1] 小形正男、西宮湯川記念賞、西宮湯川記念事業運営委員会および西宮市、1999 年 11 月 5 日。

<報文>

(原著論文)

- [2] A. Himeda and M. Ogata: Phys. Rev. B **60**, R9935-R9938 (1999). "Coexistence of  $d_{x^2-y^2}$  superconductivity and antiferromagnetism in the two-dimensional  $t$ - $J$  model and numerical estimation of Gutzwiller factors"
- [3] H. Yamase, H. Kohno, H. Fukuyama and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **68**, 1082-1085 (1999). "Effects of Charge Density Modulation on Incommensurate Antiferromagnetism: Ginzburg-Landau Study"
- [4] Y. Tanuma, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: Phys. Rev. B **60**, 9817-9826 (1999). "Quasiparticle states near surfaces of high- $T_c$  superconductors based on the extended  $t$ - $J$  model"
- [5] Y. Tanuma, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: to appear in J. Phys. Soc. Jpn. **69** (2000). "Local density of states near the surface of a d+s-wave superconductor in the two-dimensional  $t$ - $J$  model"
- [6] H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: J. Phys. Soc. Jpn. **68**, 2510-2513 (1999). "Quasiparticle Properties around a Nonmagnetic Impurity in the Superconducting State of the Two-Dimensional  $t$ - $J$  Model"
- [7] H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: to appear in Phys. Rev. Lett. **84** (2000). "Local density of states around a magnetic impurity in high- $T_c$  superconductors based on the  $t$ - $J$  model"
- [8] M. Ishihara and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **68**, 350-353 (1999). "Spectral Functions of One-Dimensional Electron Systems with Ising-like Spin Gap"
- [9] T. Otsuka, M. Yoshimaru, N. Wada, M. Ogata, K. Awaga, H. Imai, and T. Inabe: preprint. "Magnetic transition induced by paramagnetic lattice defects in the molecular ladder  $p$ -EPYNN· $[\text{Ni}(\text{dmit})_2]$ "

(会議抄録)

- [10] A. Himeda and M. Ogata: XXII international Conference on Low Temperature Physics (LT22, Helsinki, Finland, August 4 - 11, 1999). to appear in *Physica B*. “Numerical estimation of Gutzwiller factors in the two-dimensional  $t$ - $J$  model”
- [11] M. Ogata: Proceedings of International Workshop on *Magnetic Excitations in Strongly Correlated Electrons* (Hamamatsu, August 19 - 22, 1999). to appear in *J. Phys. Soc. Jpn. Supple.* “Stripe States in the Two-Dimensional  $t$ - $J$  Model”
- [12] M. Ogata: Proceedings for Taniguchi Symposium 1998. *Physics and Chemistry of Transition-Metal Oxides* ed. by H. Fukuyama and N. Nagaosa, pp. 212-220. “A New-type Superconducting State Locally Induced around a Vortex in the Two-Dimensional  $t$ - $J$  Model”
- [13] M. Ogata: Proceedings of the Second International Conference on *New Theories, Discoveries, and Applications of Superconductors and Related Materials* (New<sup>3</sup>SC) (Las Vegas, May 31 - June 4, 1999). to appear in *Int. J. of Mod. Phys. B* (2000). “Electronic States and Mixing of Different Symmetry or Antiferromagnetism in Vortex Cores in  $d_{x^2-y^2}$ -wave Superconductivity”
- [14] M. Ogata: Proceedings of the 12th International Symposium on Superconductivity (ISS'99), to be published in *Advances in Superconductivity XII*. “Impurities and Vortex Cores in the  $t$ - $J$  Model”
- [15] Y. Tanuma, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: Proceedings of the first Euroconference on “Anomalous Complex Superconductors” (Crete, Greece Sept.26-Oct.3, 1998) *Physica C* **317-318**, 521-523 (1999). “Local Density of States of Quasiparticles near the Surface of  $t$ - $t'$ - $t''$ - $J$  Model”
- [16] H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: Proceedings of the 11th International Symposium on Superconductivity (ISS'98), *Advances in Superconductivity XI* ed. by N. Koshizuka and S. Tajima (Springer Tokyo 1999) pp. 347-350. “Superconducting States with a Nodeless Gap in the  $t$ - $t'$ - $J$ - $J'$  Model”
- [17] H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: Proceedings of the 11th International Symposium on Superconductivity (ISS'98), *Advances in Superconductivity XI* ed. by N. Koshizuka and S. Tajima (Springer Tokyo 1999) pp. 331-334. “Impurity Effects on the Superconducting State with a Nodeless Gap in the  $t$ - $J$  Model”
- [18] H. Tsuchiura, Y. Tanuma, Y. Tanaka, M. Ogata, S. Kashiwaya and J. Inoue: Proceedings of International Symposium on Surface and Interface: Properties of Different Symmetry Crossing (ISSIPDSC-98), Tokyo, November 19-21, 1998. *Surf. Sci.* **438**, 347-352 (1999). “Study of the quasiparticle spectra near the surface or nonmagnetic impurities in high- $T_c$  superconductors”
- [19] H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: Proceedings of the first Euroconference on “Anomalous Complex Superconductors” (Crete, Greece Sept.26-Oct.3, 1998) *Physica C* **317-318**, 518-520 (1999). “Impurity effect in the superconducting state of the two-dimensional  $t$ - $J$  Model”
- [20] H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: XXII international Conference on Low Temperature Physics (LT22, Helsinki, Finland, August 4 - 11, 1999). to appear in *Physica B*. “The resonance states around an impurity in  $d_{x^2-y^2}$ -wave superconductors”
- [21] H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: Proceedings of CREST International Workshop — Pseudo Gap, Spin Gap and Anomalous Metals — (Nagoya, January 24 - 26, 2000), to appear in *J. Phys. Chem. Solids*. “Magnetic impurities in  $t$ - $J$  model”
- [22] M. Ogata, N. Kobayashi and K. Yonemitsu: Proceedings for ICSM '98. *Synth. Metals* **103**, 2242-2243 (1999). “Coexistence of SDW and purely-electronic CDW in quarter-filled organic conductors”
- (国内雑誌)
- [23] 小林暢子: 物性研究 Vol. 71-6, pp. 946-985 (1999-3). “ $1/4$  充填の擬 1 次元有機伝導体における新たに見出された基底状態について”
- [24] 小形正男: 固体物理 <量子輸送現象における新展開> 特集号 Vol. 34, No. 5 (1999) “朝永-ラッティンジャー液体としての量子細線”
- [25] 小形正男: 物性研究 (1999 年 物性若手夏の学校 サブゼミ 講義内容) “超伝導と強相関”
- (学位論文)
- [26] 桑原 武: “ $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導メカニズム” (東京大学大学院総合文化研究科・修士論文)
- (著書)
- [27] 小形正男: 『量子工学ハンドブック』 (大津元一・荒川泰彦ほか編集) (朝倉書店 1999 年)
- [28] 小形正男: 『振動・波動』 (裳華房 1999 年)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [29] M. Ogata: Monte Verità meeting on *Physics and Chemistry of Novel Materials: Strongly Correlated Electron Systems* (Ascona, Switzerland, June 6 - 11, 1999). “Antiferromagnetism and d-wave Superconductivity in the Two-Dimensional  $t$ - $J$  Model using a Modified Gutzwiller Approximation”

- [30] M. Ogata: International Workshop on *Magnetic Excitations in Strongly Correlated Electrons* (Hamamatsu, August 19 - 22, 1999). "Stripes and Impurities in the  $t$ - $J$  Model" to appear in J. Phys. Soc. Jpn. Supple.
- [31] M. Ogata: International Workshop (Hachioji, 1999, 11.22-11.24) "Metal-Insulator Transition in One-Dimensional Multi-Band Electron Systems"
- [32] M. Ogata: P. W. Anderson Workshop (Hongo, 1999, 12.1-12.2) "Ground States and Fermi Surface in  $t$ - $J$  Model"
- 招待講演**
- [33] M. Ogata: The Second International Conference on *New Theories, Discoveries, and Applications of Superconductors and Related Materials* (New<sup>3</sup>SC) (Las Vegas, May 31 - June 4, 1999). "Electronic States and Mixing of Different Symmetry or Antiferromagnetism in Vortex Cores in  $d_{x^2-y^2}$ -wave Superconductivity"
- [34] M. Ogata: The 12th International Symposium on Superconductivity (ISS'99) Morioka, Japan, September "Impurities and Vortex Cores in the  $t$ - $J$  Model"
- (国内会議)
- 一般講演**
- [35] 土浦宏紀、田仲由喜夫、小形正男、柏谷聡: 岩手大学 1999, 9.24-9.27 (分科会) "d 波ジョセフソン接合系における界面形状の効果 II"
- [36] 田沼慶忠、田仲由喜夫、小形正男、柏谷聡: 岩手大学 1999, 9.24-9.27 (分科会) "d 波超伝導体の表面状態と反強磁性"
- [37] 土浦宏紀、田仲由喜夫、小形正男、柏谷聡: 岩手大学 1999, 9.24-9.27 (分科会) " $t$ - $J$  モデルにおける磁性不純物近傍の局所状態密度"
- [38] 小形正男、土浦宏紀、田仲由喜夫、柏谷聡: 岩手大学 1999, 9.24-9.27 (分科会) " $t$ - $J$  モデルにおけるストライプ構造"
- [39] 桑原 武、小形正男: 関西大学 2000, 3.22-3.25 (分科会) "磁気ゆらぎと異方的超伝導の基本的な関係および  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  への応用"
- [40] 土浦宏紀、田仲由喜夫、小形正男、柏谷聡: 関西大学 2000, 3.22-3.25 (分科会) " $t$ - $J$  モデルにおける非磁性-磁性不純物近傍の局所状態密度"
- [41] 小形正男、石原博史: 物性研短期研究会「強相関電子系としての分子性導体」(東京大学 物性研究所) 1999, 5.11-5.13 "多バンド 1 次元系の金属絶縁体転移"
- [42] M. Ogata: 駒場ミニ研究会 "Quantum Effects in Molecule-Based Materials" 1999, 6.28 (東京大学 総合文化研究科) "Spin Charge Separation and First-Order Metal-Insulator Transition in 1D Systems"
- [43] 小形正男: 田中シンポジウム 1999, 7.8-7.10 "電荷自由度を含めた高温超伝導体の相図の多様性"
- [44] 小形正男: 1999 年 物性若手夏の学校 1999, 8.2 "強相関と超伝導"
- [45] 小形正男: 特定領域研究研究会 (東北大学金属材料研究所) 1999, 11.15-11.17 "Stripe in  $t$ - $J$  Model"
- [46] 小形正男、姫田章宏: 「高温超伝導体における磁束状態」研究会 (東北大学金属材料研究所) 1999, 12.13-12.15 " $t$ - $J$  モデルにおける磁束電荷のドーピング依存性"
- [47] 小形正男: 特定研究 (B) 「低次元ヘリウム 3 の新物性」研究会 (熱海) 1999, 12.20-12.22 "2 層 1 次元ヘリウムの磁氣的相転移"
- [48] 小形正男: 「強相関電子系におけるスピンと電荷の励起」研究成果検討会 (物性研・中性子散乱研究施設 研究棟) 2000, 1.6-1.8 " $t$ - $J$  モデルにおける反強磁性磁束コアと磁束電荷"
- (セミナー)
- [49] 小形正男: 東京理科大学 1999, 6.24 "量子細線における朝永・ラッティンジャー液体"
- [50] 小形正男: 東京大学理学部物理 教室談話会 1999, 12.17 "有機物伝導体での金属絶縁体相転移とスピン電荷分離"
- [51] 小形正男: 京都大学基礎物理学研究所、物性セミナー 2000, 1.27 "Impurities and Vortex Cores in the  $t$ - $J$  Model"

層から構成される単層ナノチューブが合成され、その電子的・磁氣的性質に興味深い現象が期待されている。

## 4 物性実験

### 4.1 壽榮松研究室

最近の物質科学の発展は、多くの領域で新規で特異な物質を生み出してきた。炭素原子のネットワークから構成される人工物質、フラーレンやナノチューブは、ネットワークのトポロジに特異な結合様式を持つと同時に、その大きさが分子と結晶の中間に位置するため本質的にメゾスコピック系としての特徴を持つ極めて興味深い物質群である。

カーボンナノチューブは、グラファイト・シートを円筒状に巻いた構造を持つ直径約 1 - 100 nm、長さ数ミクロンのチューブであり、ナノメートルサイズのいわば高分子または 1 次元結晶とも考えられる。メゾスコピック領域における 1 次元導体としての興味と同時に、円筒状の形状に起因して Aharonov-Bohm 効果による磁気量子効果が観測されるなど、電子的・磁氣的性質に興味深い現象が期待されている。一方、 $C_{60}$  に代表されるフラーレン分子は互いの分子間力によって分子性結晶を構成するが、この新奇な結晶は、分子の特異な対称性のゆえに、多様な構造相転移を示す。さらに、アルカリ金属や希土類金属との化合物では、金属原子との間の電荷移動効果により、半導体から金属さらに高温超伝導体に転移したり、強磁性体となる。また、フラーレン分子内に金属原子を含む「金属内包フラーレン」は、全く新しい「複合原子」としての性格を持ち、その新奇性、機能性、多様性、などきわめて興味深いものであり、今後、化学および物性物理学に重要な発展をもたらすものと期待される。このらカーボン・ネットワーク物質は、分子自身の新奇性と同時に、その電子構造、超伝導、磁氣的性質などを人為的に大きく変化・制御できるシステムであり、物質科学および固体物理における新奇性に富む領域である。現在、日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業の一プロジェクトとして他の共同研究者とともに研究を進めている。研究室のスタッフは、壽榮松宏仁教授、藤原明比古助手、および石井賢司（博士研究員）である。

#### 4.1.1 ナノチューブの電子構造および電気的性質の研究

カーボンナノチューブの電気的性質については、その直径が約 20 - 50 nm の多層ナノチューブについて、Aharonov-Bohm (AB) 効果による磁気量子効果 (図 4.1 a) や、高磁場で金属 - 絶縁体転移を観測してきた。最近、直径が 1nm 程度の単一のカーボン

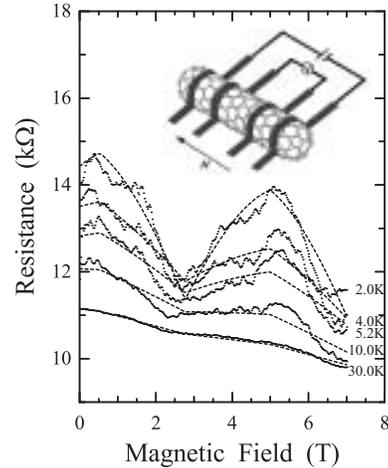


図 4.1 a: カーボンナノチューブの AB 効果による磁気抵抗振動。

我々は、単層ナノチューブの光伝導度の測定を行い、エネルギー構造を実験的に明らかにした。バンド構造については、光吸収スペクトル測定などによって大略が明らかにされているが、1 次元導体特有の著しい励起子効果のために、ギャップ・エネルギーの決定が困難であった。今回、波長可変レーザーを光源とし微細加工した伝導測定端子を用いることにより、光伝導スペクトルの測定に初めて成功し、半導体相（平均直径 1.4 nm）のチューブのギャップ・エネルギーが 0.75 eV となることをユニークに決定した。この光伝導の観測は、同時に、ナノチューブが 1 次元半導体として機能することを示す顕著な実験事実である。一方、この半導体としての伝導現象では、低温における単層ナノチューブの電流 - 電圧特性に、顕著なダイオード効果を観測した。この結果は、2 つの電極に逆方向のショットキー接合が構成されているとして解釈できる。直径 1.4 nm (14 Å) のダイオードが得られたことになる。

単層ナノチューブのガス吸着については、最近、水素ガス吸着が注目されているが、我々は、新たに、酸素ガスが吸着されることを発見した。このガス吸着特性を、等温吸着曲線および X 線構造解析によって明らかにした。チューブ先端を開放処理した試料については、ガスがチューブ外の空間と同時に内部に吸着されているとする極めて注目すべき特徴が観測された。すなわち、吸着過程での X 線回折スペクトルは、酸素分子をチューブ外壁に置いた場合には説明できず、分子がチューブ内にびっちり充満するとした計算結果によく一致することが明らかとなった。一方、合成後無処理のチューブ先端が閉じた試料では、チューブ間のみ吸着され、吸着量も、先端を開放処理した試料の半分に減少することが判明した。内部吸着の場合、その動力学が如何なるものか、興

味深い問題である。今後、実用的には、酸素ガスの精製、保存等の応用が考えられる。

#### 4.1.2 金属内包フラーレン結晶における X 線照射誘起による構造相転移

金属内包フラーレンは、カーボンケージ（変形したフットボール形ネットワーク）内に金属原子を内蔵する特異な分子であり、金属原子が希土類元素などの場合、磁気モーメントと大きな分極モーメントを持つ非常に興味深い物質である。

La を内蔵する金属内包フラーレン  $\text{La@C}_{82}$  については、既に、異常散乱を用いた放射光 X 線回折によって分子構造および結晶構造を決定、金属原子は分子中央ではなく炭素ケージ内壁に偏った特定位置を占めること、このため大きな電気分極モーメントを持つことなどを明かにしてきた。昨年、 $\text{La@C}_{82}$  の単結晶の合成に成功し、その X 線回折実験において、低温で明瞭な構造相転移を起こすこと、室温で安定な FCC 構造が、菱面体構造を経て三斜晶系相（構造 II）に転移するが、しかし、冷却速度が早い場合には立方晶系（構造 I）に転移する。すなわち、低温で 2 つの結晶相が存在し、これらの構造の違いは金属内包フラーレン分子に特有な電気双極子の秩序、無秩序配置の違いによっている。しかし、低温相の最も注目すべき性質は、X 線照射により三斜晶系結晶から単純立方晶系に相転移が誘起されることである。この相転移が真に X 線照射によるものかどうかを明らかにするため、入射 X 線のエネルギー依存性実験を行った。La の X 線吸収端エネルギー  $E_L$  の上下で相転移速度を測定した結果、 $E_L$  の高エネルギー側で速度が大きいことを明らかにした。この X 線誘起相転移の起因は、内包金属原子の励起状態によって分子内での原子位置が変化し、この分子構造変化による双極子モーメントの方位変化が構造相転移を誘起しているものと考えられる。最近の理論計算によると La 原子は  $\text{C}_{82}$  ケージ内でかなり平坦なポテンシャル井戸の中にあり、200 K 程度の小さなエネルギー励起によって原子位置が移動し双極子モーメントが変化することが示されており、結晶構造が分子間の双極子間相互作用と弾性的相互作用との微妙な競合関係によって決定されることが考えられる。この相転移は X 線照射によって双極子秩序状態が得られる結晶構造に安定化されることを示している。さらに、ESR 測定ではこの電気双極子の秩序 - 無秩序転移に伴って磁化率の異常が観測され、徐冷した三斜晶系結晶では非磁性状態だが、一方、立方晶系では常磁性状態が実現されていることが明らかとなった。この結果は、電気双極子だけでなくスピン間の相互作用がこの相転移に複雑に関与していることを示唆している。

#### 4.1.3 フラーレン希土類化合物における巨大磁気抵抗

$\text{C}_{60}$  などの閉殻型クラスターは、互いの分子間力によって分子性結晶を構成し、典型的な半導体結晶となる。これにアルカリ金属をインターカレートした化合物では大量の電荷移動により、金属に、しかも超伝導体に転移する。これら超伝導体の研究が多く進められてきたが、一方、希土類金属との化合物については従来系統的な研究はなされてこなかった。しかし、希土類金属の場合、f 電子に起因する磁性の発現が期待され、さらに、スピン - 伝導電子間の相互作用による電流磁気効果が期待でき、興味深い物質系である。我々は、希土類化合物について系統的な研究をすすめてきた。この結果、 $\text{Eu}_6\text{C}_{60}$  が低温で強磁性転移を持つこと、さらに強磁性転移温度以下で極めて大きい負の磁気抵抗を示すことなど、極めて興味深い事実を明らかにした。

磁化率および磁化過程の測定から、 $\text{Eu}_6\text{C}_{60}$  は転移温度  $T_C = 13.5$  K を持つ強磁性体であり、常磁性帯磁率および強磁性領域での飽和磁化の大きさから、Eu が 2 価の状態 ( $S = 7/2$ ) の状態であることが明らかとなった。この電荷状態は、X 線吸収スペクトル (XAFS) 実験からも確認された。しかし、最も重要な知見は、 $T < T_C$  での磁気抵抗の挙動であり、1 K 以下での高磁場 (2 テスラ以上) の磁気抵抗は、磁場ゼロの値に比べ、3 桁以上も減少し (図 4.1 b)、通常の Giant Negative Magnetoresistance 現象とは明らかに性質の異なる様相を示すことが明らかとなった。いわば、磁場による絶縁体 - 金属相転移とも考えられる。この巨大磁気抵抗は、基本的に  $\text{C}_{60}$  の電子構造を構成する電子の Eu イオンの f 電子による分極効果が大きいことを示しているが、しかし従来から提案されている微粒子間のスピン依存トンネル伝導モデルでは説明が困難であり、磁場誘起の電子相転移の可能性も考えられ、現在、理論家ともその可能性について討議を行っている。

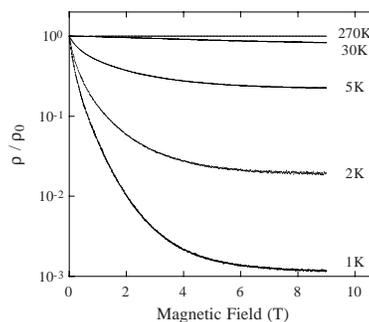


図 4.1 b:  $\text{Eu}_6\text{C}_{60}$  の巨大磁気抵抗。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Maniwa, K. Kumazawa, H. Kataura, H. Ishii, S. Suzuki, Y. Achiba, A. Fujiwara, H. Suematsu:

- Anomaly of x-ray Diffraction Profile in Single-Walled Carbon Nanotubes, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** (1999) L668-L670.
- [2] A. Fujiwara, K. Tomiyama, H. Suematsu, M. Yumura, K. Uchida: Quantum interference of electrons in multi-wall carbon nanotubes, *Phys. Rev.* **B60** (1999) 13492-13496.
- [3] T. Watanuki, A. Fujiwara, K. Ishii, Y. Matsuoka, H. Suematsu, K. Ohwada, H. Nakao, Y. Fujii, K. Kikuchi, Y. Achiba: Structural Phase Transitions of Endohedral Metallofullerene  $\text{La@C}_{82}$  Studied by Single Crystal X-ray Diffraction, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **340&341** (2000) in press.
- [4] K. Ishii, T. Watanuki, A. Fujiwara, H. Suematsu, Y. Iwasa, H. Shimoda, T. Takenobu, T. Mitani: Structural Phase Transition in ammoniated alkali fullerides: Orientational Ordering of alkali ammonia clusters, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **340&341** (2000) in press.
- [5] H. Ootoshi, K. Ishii, T. Watanuki, A. Fujiwara, H. Suematsu: Synthesis and Crystal Structure of europium fullerides, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **340&341** (2000) in press.
- [6] Y. Maniwa, K. Kumazawa, H. Kataura, H. Ishii, S. Suzuki, Y. Achiba, A. Fujiwara, H. Suematsu: Gas Storage in Single-Walled Carbon Nanotubes, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **340&341** (2000) in press.
- [7] S. Fujiki, Y. Kubozono, S. Emura, Y. Takabayashi, S. Kashino, A. Fujiwara, K. Ishii, H. Suematsu, Y. Murakami, Y. Iwasa, T. Mitani, and H. Ogata: Structure and Raman scattering of  $\text{Cs}_3\text{C}_{60}$  under high pressure, *Phys. Rev.* **B62** (2000) in press.
- (国際会議録)
- [8] H. Suematsu, A. Fujiwara, K. Tomiyama: Magnetic quantum effects in carbon nanotubes, *Proc. 4th International Symposium on Advanced Physical Fields: Quantum Phenomena in Advanced Materials at High magnetic Fields* (1999) 87-89.
- [9] K. Ishii, T. Watanuki, A. Fujiwara, H. Suematsu, Y. Iwasa, H. Shimoda, T. Takenobu, T. Mitani: Structural Phase Transition in Ammoniated Alkali Fullerides: Orientational Ordering of Alkali Ammonia Clusters, *Proc. Int. Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials*, (1999) 60-63.
- [10] Y. Kubozono, S. Fujiki, Y. Takabayashi, Y. Yoshida, S. Kashino, K. Ishii, A. Fujiwara, H. Suematsu: Structure and Physical properties of  $\text{Cs}_3\text{C}_{60}$  under Ambient and High Pressures, *Proc. Int. Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials*, (1999) 69-72.
- [11] T. Watanuki, A. Fujiwara, K. Ishii, Y. Matsuoka, H. Suematsu, K. Ohwada, H. Nakao, Y. Fujii, K. Kikuchi, Y. Achiba: Structural Phase Transitions of Metallofullerene  $\text{La@C}_{82}$  Studied by Single Crystal X-ray Diffraction, *Proc. Int. Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials*, (1999) 124-127.
- [12] A. Fujiwara, K. Tomiyama, H. Suematsu, M. Yumura, K. Uchida: Electron Interference Effect in Multi-wall Carbon Nanotubes, *Proc. Int. Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials*, (1999) 403-406.
- (学位論文)
- [13] 松岡康行: カーボンナノチューブの電子輸送現象 (修士論文)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [14] T. Watanuki, A. Fujiwara, K. Ishii, Y. Matsuoka, H. Suematsu, K. Ohwada, H. Nakao, Y. Fujii, K. Kikuchi, Y. Achiba: Structural Phase Transitions of Endohedral Metallofullerene  $\text{La@C}_{82}$  Studied by Single Crystal X-ray Diffraction, *10th International Symposium on Intercalation Compounds* (Okazaki, Japan, May 1999)
- [15] K. Ishii, T. Watanuki, A. Fujiwara, H. Suematsu, Y. Iwasa, H. Shimoda, T. Takenobu, T. Mitani: Structural Phase Transition in ammoniated alkali fullerides: Orientational Ordering of alkali ammonia clusters, *10th International Symposium on Intercalation Compounds* (Okazaki, Japan, May 1999)
- [16] H. Ootoshi, K. Ishii, T. Watanuki, A. Fujiwara, H. Suematsu: Synthesis and Crystal Structure of europium fullerides, *10th International Symposium on Intercalation Compounds* (Okazaki, Japan, May 1999)
- [17] Y. Maniwa, K. Kumazawa, H. Kataura, H. Ishii, S. Suzuki, Y. Achiba, A. Fujiwara, H. Suematsu: Gas Storage in Single-Walled Carbon Nanotubes, *10th International Symposium on Intercalation Compounds* (Okazaki, Japan, May 1999)
- [18] A. Fujiwara, K. Tomiyama, H. Suematsu, M. Yumura, K. Uchida: Molecular Structure and Quantum Transport Properties of Multi-Wall Carbon Nanotubes, *International Symposium on Fullerenes and Nanotubes* (Aichi, Japan, June 1999)
- [19] T. Watanuki, A. Fujiwara, K. Ishii, Y. Matsuoka, H. Suematsu, K. Ohwada, H. Nakao, Y. Fujii, T. Kodama, K. Kikuchi, Y. Achiba: Structural Phase Transitions of Endohedral Metallofullerene  $\text{La@C}_{82}$  Studied by Single Crystal X-ray Diffraction, *International Symposium on Fullerenes and Nanotubes* (Aichi, Japan, June 1999)
- [20] K. Ishii, . Nishi, A. Fujiwara, H. Ootoshi, H. Suematsu, Y. Kubozono: Magnetism and Electronic Transport in  $\text{Eu}_6\text{C}_{60}$ , *XIVth International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials* (Kirchberg, Austria, March 2000)

## (国内会議)

## 一般講演

- [21] 綿貫徹、藤原明比古、石井賢司、松岡康行、壽榮松宏仁、菊地耕一、阿知波洋次:  $\text{La@C}_{82}$  結晶の x 線誘起構造相転移、第 17 回フラーレン総合シンポジウム (岐阜、1999 年 8 月)
- [22] 藤木聡、久保園芳博、高林康裕、井上崇、柏野節夫、藤原明比古、石井賢司、壽榮松宏仁:  $\text{Cs}_3\text{C}_{60}$  と  $\text{Cs}_4\text{C}_{60}$  の高圧物性、第 17 回フラーレン総合シンポジウム (岐阜、1999 年 8 月)
- [23] 綿貫徹、藤原明比古、石井賢司、松岡康行、壽榮松宏仁、菊地耕一、阿知波洋次:  $\text{La@C}_{82}$  結晶の x 線誘起構造相転移、日本物理学会 1999 年秋の分科会 (岩手大、1999 年 9 月)
- [24] 石井賢司、大歳始、西義史、藤原明比古、壽榮松宏仁、久保園芳博:  $\text{Eu-C}_{60}$  化合物の合成と物性 II、日本物理学会 1999 年秋の分科会 (岩手大、1999 年 9 月)
- [25] 藤木聡、久保園芳博、高林康裕、柏野節夫、藤原明比古、石井賢司、壽榮松宏仁、岩佐義宏、三谷洋興:  $\text{Cs}_3\text{C}_{60}$  ならびに  $\text{Cs}_4\text{C}_{60}$  の高圧ラマン、日本物理学会 1999 年秋の分科会 (岩手大、1999 年 9 月)
- [26] 石井賢司、西義史、藤原明比古、大歳始、壽榮松宏仁、久保園芳博:  $\text{Eu}_6\text{C}_{60}$  の磁性と電気伝導、第 18 回フラーレン総合シンポジウム (岡崎、2000 年 1 月)
- [27] 綿貫徹、壽榮松宏仁、菊地耕一、阿知波洋次:  $\text{La@C}_{82}$  単結晶の ESR、第 18 回フラーレン総合シンポジウム (岡崎、2000 年 1 月)
- [28] 壽榮松宏仁: フラーレン・ナノチューブなどナノメーター人工物質の探索と物性、未来開拓推進事業「次世代人工物質・材料の探査的研究」に関する研究成果報告フォーラム (学習院大学、2000 年 2 月)
- [29] 石井賢司、藤原明比古、飯島良介、壽榮松宏仁:  $\text{Eu}_6\text{C}_{60}$  磁性と電気伝導、日本物理学会 2000 年春の分科会 (関西大学、2000 年 3 月)
- [30] 藤原明比古、壽榮松宏仁、片浦弘道、阿知波洋次、鈴木信三、真庭豊: 単層カーボンナノチューブのガス吸着特性、日本物理学会 2000 年春の分科会 (関西大学、2000 年 3 月)
- [31] 綿貫徹、壽榮松宏仁、菊地耕一、阿知波洋次:  $\text{La@C}_{82}$  単結晶の ESR、日本物理学会 2000 年春の分科会 (関西大学、2000 年 3 月)

## 招待講演

- [32] 壽榮松宏仁: フラーレン・ナノチューブなどナノメーター人工物質の探索と物性、日本学術振興会 未来開拓学術研究推進事業「次世代人工物質・材料の探査的研究」第 1 回公開シンポジウム (理化学研究所、1999 年 6 月)
- [33] 藤原明比古: カーボンナノチューブ磁場中量子干渉効果: 実験の現状、日本物理学会 1999 年秋の分科会シンポジウム (岩手大、1999 年 9 月)
- [34] 壽榮松宏仁、藤原明比古: カーボンナノチューブの電子構造と量子効果、理研シンポジウム (理化学研究所、1999 年 12 月)

- [35] 壽榮松宏仁: カーボンナノチューブの電子輸送と量子効果、第 18 回フラーレン総合シンポジウム (岡崎、2000 年 1 月)

## (セミナー)

- [36] 綿貫徹: 金属内包フラーレン  $\text{La@C}_{82}$  結晶の構造相転移 (岡山大学、1999 年 8 月)
- [37] 石井賢司:  $\text{C}_{60}$  化合物の最近の話題 - アンモニア・アルカリ金属・ $\text{C}_{60}$  三元化合物と希土類金属・ $\text{C}_{60}$  化合物 - (岡山大学、1999 年 12 月)
- [38] H. Suematsu: Electronic Transport and Quantum Effects in Carbon Nanotubes (産業技術融合領域研究所、2000 年 2 月)

## 4.2 長澤研究室

昨年に引き続き、レーザーを用いて半導体結晶における励起子に関する分光学的研究を行った。

励起子は、電子と正孔が水素原子の様な形態で束縛した結晶における電子の最低エネルギーの励起状態を表す素励起である。量子統計的には近似的にボース粒子と看做することができる。また、電氣的には中性の量子である。

近年、我々は水素モデルが典型的に適用できることが分光学的に確立している亜酸化銅 ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) の結晶に注目して、その高分解非線形分光や励起子起源の光電現象をこの量子の量子統計性の分光学的なアプローチを深めるために主に研究してきた。これまでこの物質では励起子のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) や超流動現象が起きるとするという実験の報告がなされてきた。一方、アルカリ原子系の BEC 相は、今日ではすでに日常的に実験室で用意できる新しい物質として色々な活用法が考案され、活発な研究活動が展開されている。しかし、励起子系では、色々な問題によって、先駆的な興味深い実験の結果がそのまま万人に認められるには至っていない。

高密度の励起子を生成するには、通常は強いレーザーによって照射して、試料という容器の中に気体状態の励起子を作る。この場合は往々にして励起子系の温度が結晶の温度より高くなり、さらに空間的に不均一な光励起が起きるために密度の決め方の不確かさや、拡散による密度の低下が深刻な実験上の問題となる。

このような実験上の問題を克服し、出来るだけ密度の高い冷えた励起子を試料の中の特定の空間に溜めるため、本年は、励起子のトラップを作り、そこに2光子共鳴励起によって冷たい励起子気体を閉じ込める手法を開発することに重点を置いた実験を行った。

一方、励起子の超流動性を調べる実験では、励起子を電極の近くまで移動させ、そこでイオン化させることによって発生する電気信号から励起子の運動を検出する。そこで本年は、実験結果に大きく影響することが知られている、試料に設置する電極の特性や光学現象への影響、時間特性などの予備的な研究を行ない、公表されている実験手法の分析を試みた。その結果の一つとして、励起子起源の光起電力の速い応答に寄与する共鳴弾性散乱光の効果を新たに明らかにすることが出来た。

また、光照射以外の方法で励起子を作り、その数を制御できる方法を開発するために、電流の注入による励起子の励起の特性を調べた。励起子の量はいわゆるエレクトロ・ルミネッセンスの分光学的手段によって評価できることがわかった。特に本年は、速いゲートを持つ CCD カメラの有用性を吟味した。これによって、電流の注入によって作られた励起子の発光が試料中を光として伝播する様子を時間空間的に追跡することが出来た。特にそれらの再吸収の効果は、励起子自身が試料の中を移動するほかに、かなりの数が、発光の再吸収によって高速で広い領域に分布する原因となることもわかった。これによって冷えた励起子気体を効率よく作るためにも、この

効果をあらかじめ念頭に置いた実験が必要があることが初めて実証的に吟味された。

### 4.2.1 半導体結晶の励起子系の関わる線形、非線形光学現象の分光学的研究

$\text{Cu}_2\text{O}$  結晶に生成されるトラップ中の冷たい励起子の二光子分光

最低の励起子状態である  $1s$  状態は、電子と正孔の交換相互作用によって三重に縮退したオルソ励起子と縮退のないパラ励起子に分裂している。オルソ励起子は電気4重極子相互作用による一光子遷移及び電気双極子相互作用による二光子遷移が許容である。二光子共鳴励起では、波数の小さいオルソ励起子を選択的に生成することができる。

本研究では、非一様ひずみによってオルソ励起子のエネルギー準位を空間的に変化させ、励起子に対するポテンシャルトラップを生成した。また、二光子共鳴励起によりトラップ中に生成された冷たい励起子の波数空間における分布を初めて二光子分光法により観測した。

$\text{Cu}_2\text{O}$  の結晶軸 [100] に平行に圧力をかけると、図1右のように、オルソ励起子は singlet と doublet の二準位に分裂する。立方体の試料を球面ストレッサーで押すヘルツ型接触では、非一様なひずみが結晶に生じ、その大きさに応じて準位の分裂がおきる。

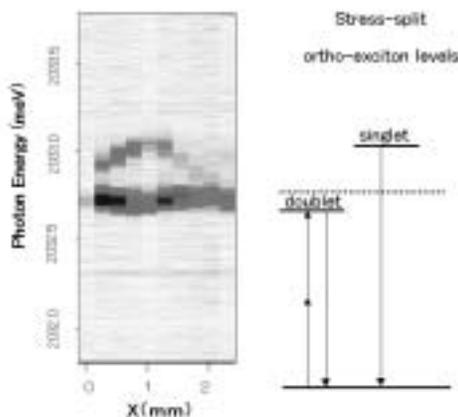


図 1

図1左は低エネルギー側の準位 (doublet) を二光子共鳴励起したときの二光子直接発光の分光写真である。位置  $X=1\text{mm}$  を中心にして、対称的なエネルギーシフトが得られていることが分かる。この場合のトラップの深さは、温度に換算して  $1.2\text{K}$  であり、格子温度と同程度である。わずかにシフトする下の準位と、大きく湾曲している上の準位の曲率の違いは、それぞれの準位に対する変形ポテンシャルの違いを反映している。一光子直接発光は上側の準位が

らも弱くみられるが、これは、下の準位に実励起された励起子が何らかの緩和によって上の準位にも分布していることを示している。二光子共鳴励起ではこれまでハイパーラマン散乱の存在が励起子密度を解析する上で問題となってきたが、この結果から、実励起されている励起子が少なくとも散乱成分と同程度は存在することが明らかになった。

図2は、トラップの縁(a)、底(b)を選択的に二光子共鳴励起したときのフォノンの放出を伴ったオルソ励起子の再結合発光(フォノンサイドバンド)の空間分解スペクトルを比較して示した例である。

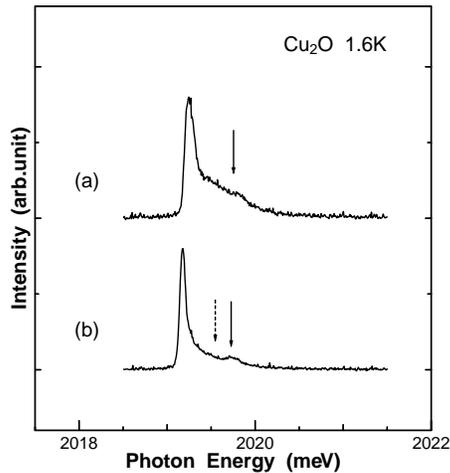


図2

フォノンサイドバンドの幅は、励起子の波数空間での広がりを表す。(a)では、その幅から、励起子系の実効温度は2.4Kと求められた。実線の矢印は、音響フォノン散乱による構造の位置を示す。一方、トラップの底を励起した(b)では、運動エネルギー0.3-0.5meV(破線矢印)に分布する励起子が明らかに少なくなっている。

このように、浅いポテンシャルトラップの底を共鳴励起すると冷たい励起子が実励起されることが分かった。[1, 3]

#### 二光子励起によるひずみトラップの形状の評価

赤外レーザーを用いた二光子励起では、吸収係数が非常に小さいために数mmの大きさの結晶をビームに沿ってほぼ一様に励起できる。また、1sオルソ励起子の共鳴幅は、深いトラップにおける歪みによる励起子準位のエネルギーシフトに比べて十分狭い。したがって、レーザースポットを掃引しながら発光の空間分布を調べると、赤外レーザーの二光子エネルギーが励起子に共鳴した部分だけから発光が観測され、等ポテンシャル面が得られる。この方法によりひずみトラップの形状を詳しく調べ、理論との比較を行った。

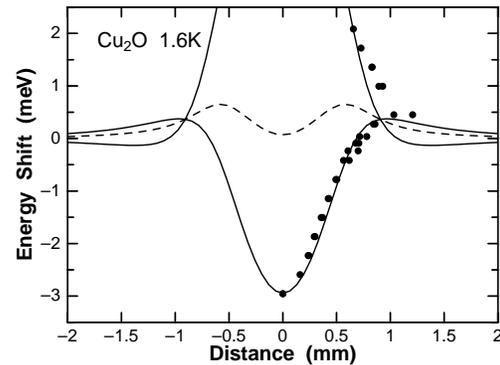


図3

図3の丸印は実験で得られたオルソ励起子のポテンシャル形状である。深さ約3meVの放物面状のポテンシャルが生成されていることが分かる。図中の実線は、二つに分裂したオルソ励起子のエネルギー変化を理想的なヘルツ型接触におけるひずみの分布から計算したものであり、実測との一致は良い。破線はパラ励起子に対する同様の計算値であり、パラ励起子に対しても放物型のトラップが生成されていることが期待される。[4, 7]

#### 圧力下でのパラ励起子の直接発光の観測

パラ励起子はマイクロ秒オーダーの長い寿命を持つとされており、BECの観点から興味深い系である。しかし、無摂動下ではオルソ励起子の500分の1といわれる非常に弱いフォノンサイドバンドのみが光学遷移が許容である。

1kbar程度の圧力の下でのパラ励起子の直接発光を、オルソ励起子の共鳴励起のもとでは初めて観測した。これは、冷たいオルソ励起子からパラ励起子が生成されていることを示唆するものである。現在この方向の研究が進んでいる。[5]

#### 4.2.2 半導体の電気伝導と光との相互作用に関する研究

##### 光起電力における励起子効果

Cu<sub>2</sub>Oは、その整流作用により有用な半導体素子として半導体研究の初期に活発な研究がなされたが、光伝導の異常等、いまだその原因が解明されていない興味深い物性を有する物質である。

我々は光照射によりCu<sub>2</sub>Oに発生する起電力が励起子の生成に深く関わっていることを明らかにした。すなわち、77K、2Kでの光起電力のスペクトルに一光子吸収スペクトルや発光の二光子励起スペクトルとほぼ同様な励起子系列の構造が現れることを発見した。

この光起電力発生と励起子との関係を探るため、

様々な温度において、特に  $1s$  励起子の近傍での光起電力スペクトルと吸収スペクトルを詳細に調べた。光起電力スペクトルには、 $1s$  励起子の共鳴と  $\Gamma_3$  フォノンの吸収端に対応するエネルギー位置とに鋭い構造が見つかった。また、これらのエネルギー位置の温度変化は、吸収スペクトルから得られるものと完全に一致し、励起子生成が光起電力発生に大きく関わっていることが確かめられた。

さらに、結合が弱く吸収スペクトルにはほとんど観測されない  $\Gamma_4$  フォノンの吸収端が、光起電力スペクトルには顕著に現れることが分かった。これは、光起電力が吸収に比べて励起子構造に対して感度が高く、光起電力測定が励起子分光法として有用であることを示している。[2, 8, 9]。

### 光起電力スペクトルの形状解析

一般に太陽電池などにおいて見られる光起電力スペクトルは、吸収スペクトル、結晶厚さ、拡散長、励起子解離領域の厚さに依存することが知られており、これを  $\text{Cu}_2\text{O}$  励起子系に拡張した研究も報告されている。我々は、 $1s$  励起子付近の細かい構造を、このモデルから説明することを試みた。実験で得られた光起電力スペクトルを再現するには、通常吸収スペクトルを各波長において3倍する必要のあることを見出した。この起源として、共鳴弾性散乱の可能性を検討した。このような散乱光が発生していることは、非近軸配置においても透過光が観測され、その実効的な吸収係数が通常の吸収の3倍となることから支持される。[A. Mori, N. Naka, and N. Nagasawa: Effects of Rayleigh scattering on photovoltaic spectra associated with  $1s$  ortho-excitons in  $\text{Cu}_2\text{O}$ , submitted to Phys. Rev. B.]

### 光起電力の空間特性

光起電力の空間分解測定では、光の照射位置に大きく依存するスペクトルが得られ、電極から最大5mm離れたところでの光照射の影響が起電力の発生に影響を及ぼしていることが分かった。電極から離れたところを照射した場合の起電力スペクトル形状は、同じ配置における非近軸配置の吸収スペクトルから良く再現できることから、光起電力信号のマクロな距離の伝播の媒体として弾性散乱光が関わっていることが明らかになった。

### エレクトロ・ルミネッセンス (EL) の時間空間特性

$\text{Cu}_2\text{O}$  の EL において、励起子由来の発光が含まれていることが知られているが、それを励起子のダイナミクスの研究に利用した試みは多くはない。そこで、我々は室温で EL の時間空間特性を測定した。

図4のように、試料に DC 電圧を印加し EL 強度を観測すると、電極のある部分だけでなく、電極以

外の場所も発光していることが分かった。その上で半値幅 13ns のパルス電圧を加え、試料を瞬間的に発光させ、発光分布の時間変化を測定した。

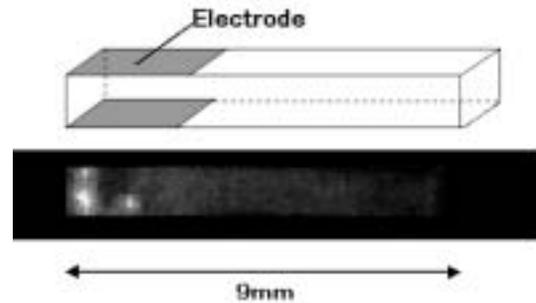


図 4

その結果、パルス電圧に対する EL の時間応答が電極のある部分と電極から 4mm 以上離れた部分で 500ps 以内の精度で一致することが分かった。[6]。

これは少なくとも  $8 \times 10^6 \text{m/s}$  以上の速度で EL が伝播していることになる。このような高速で移動しているものは  $\text{Cu}_2\text{O}$  においては光であると結論できる。これから、室温においては発光の伝播の主な要因は光によることが分かった。また、空間分解スペクトルの測定からも光で伝播していることを支持する結果が得られつつあり、現在詳しい測定と解析を進めているところである。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] N. Naka and N. Nagasawa: Two-photon spectroscopy on cold ortho-excitons in a stress trap in  $\text{Cu}_2\text{O}$  crystals, *J. Lumin.*, **87-89** (2000) 201.

(学位論文)

- [2] 森 敦弘: 亜酸化銅結晶の励起子による光起電力の分光学的研究 (修士論文)

(国際会議)

一般講演

- [3] N. Naka and N. Nagasawa: Two-photon spectroscopy on cold ortho-excitons in a stress trap in  $\text{Cu}_2\text{O}$  crystals, *1999 International Conference on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter* (Osaka, Japan, August 1999).

(国内会議)

一般講演

- [4] 中暢子、長澤信方:  $\text{Cu}_2\text{O}$   $1s$  励起子のひずみトラップの評価 I、日本物理学会 1999 年秋の分科会 (岩手大、1999 年 9 月)
- [5] 中暢子、長澤信方:  $\text{Cu}_2\text{O}$   $1s$  励起子のひずみトラップの評価 II、同上
- [6] 中村雄一、中暢子、長澤信方:  $\text{Cu}_2\text{O}$  におけるエレクトロルミネッセンスの時間空間特性、日本物理学会 2000 年春の分科会 (関西大、2000 年 3 月)

- [7] 中暢子、長澤信方：Cu<sub>2</sub>O 1s 励起子のひずみトラップの評価 III、同上
- [8] 森敦弘、中暢子、長澤信方：光起電力を用いた Cu<sub>2</sub>O 結晶の励起子分光 I、同上
- [9] 森敦弘、中暢子、長澤信方：光起電力を用いた Cu<sub>2</sub>O 結晶の励起子分光 II、同上

## 4.3 樽茶研究室

樽茶研究室では、極低温や高磁場下における低次元電子系の電子輸送、電子状態、多体相関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電子波干渉、荷電粒子のクーロン相互作用に由来する相関効果などが、直接、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一、零次元の電子系に着目し、(i) 人工原子、分子における電子状態の多体的秩序性、強磁場中で起こる相転移現象、近藤効果等のスピンに關与する伝導現象、一次元朝永-ラッティンジャー液体の非フェルミ電子液体的性質、等の電子物性の解明、(ii) フント則やパウリの排他律に代表される量子力学的基本仮説の検証、および、(iii) 表面敏感走査プローブを利用した状態密度、静電ポテンシャルなどの空間分布の直接観測法の開発を進めている。

### 4.3.1 人工原子の電子相関の研究

強磁性的電子占有とフント則 [10,13,31,36]

半導体人工原子の研究では、これまで、量子力学的閉じ込め効果と電子間相互作用に起因して、本物の原子に類似の電子的性質（殻構造やフント則）が現れることを見出した。フント則は、一般に、電子の軌道部分が縮退するとき起こる強磁性的電子占有として理解される。強磁性的電子占有の要因となる電子間相互作用は、簡単にはハバード模型で取り扱われるが、実際の電子系ではもっと複雑で、量子力学的性質、即ち、電子数や縮退軌道の種類に大きく依存して変わる。今年度は、この電子間相互作用の特徴を定量的に解明すべく実験を行い、強磁性的電子占有に対するク-ロン直接項と交換項の寄与を初めて明らかにすることができた。

人工原子では、磁場の関数として正確に電子の軌道縮退を調節することができる。これを利用して、零磁場で殻構造内に見られる軌道縮退と磁場中で軌道ランダウ縮退が起る時（即ち電子充填率が2となる時）に見られる軌道縮退に着目した実験を行った。これらの軌道縮退は、単一粒子の軌道二重縮退で記述できる。実験では、磁場の有無によらず、全ての軌道縮退に際してスピン三重項（反強磁性状態）から三重項（強磁性状態）への遷移が観測された。これにより、(ア) 零磁場の三重項状態は交換相互作用で引き起こされること、(イ) 磁場中の三重項状態については電子数が小さい場合（10個以下）には交換項、多い場合（10個以上）には直接項が主な寄与をすること、を明らかにした。さらに、この結果は、電子数依存性、縮退軌道依存性を含めて、2電子相互作用模型で定量的に説明することができた。

異方的な人工原子のスピン状態 [6,8,9,24]

人工原子の強磁性的電子状態（フント則）は、面内の閉じ込めポテンシャルの回転対称性に起因して規則的な軌道縮退構造ができること、及び電子波動関数の重なりが良いためにク-ロン相互作用が顕著になること、に起因している（1.1参照）。この面内ポテンシャルが異方的になると、軌道縮退が解けるので、スピン状態が反強磁性的になる。昨年度は、異方的な形状の人工原子について電子のエネルギ-スペクトルを調べ、その電子数依存性が反強磁性的特徴を良く反映することを明らかにした。今回さらに励起スペクトル測定を利用して、励起状態と基底状態の磁場依存性を比較することにより、縮退解離とそれにともなうク-ロン相互作用の変化を調べ、反強磁性的電子占有に対する両者の寄与を明らかにした。さらに、磁場を印可して、軌道縮退の解離を補償することにより、強磁性的電子占有が回復することを確認した。

微小リング構造の電子状態 [22,40]

微小なリング構造では、リング幅が広い時にはリングを周回する電子状態が作られ、それに対応して永久電流が発生すること、反対にリング幅が狭くなると周回チャンネルの局在状態への遷移が起こることが予測される。今回、4.3.1と同様な円形人工原子の中心をくり抜いたリング構造を作製し、トンネルコンダクタンス特性を調べた。まず、エッジ状態形成にともなうトンネルコンダクタンスの減少から、リング部分の有効電子チャンネル幅を見積もった。今回作製した構造では、このチャンネル幅が単一モード電子波長程度以下であり、リング幅が狭い場合に対応する。実験では、リング構造の中に小さいドット部分（局在部分）とバルク的に広がった部分が共存していることを示すトンネルコンダクタンスが観測された。これに磁場を印可すると、ランダウシフトと共に、二つの部分を分離しているポテンシャル障壁の高さが実効的に減少することを反映して、ドット部分がバルク的な部分に融合していく様子が観測された。今後、さらに検討を進めるとともに、チャンネル幅が広い場合についても実験を行っていく。

観測による量子ドットの電子局在と位相緩和 [21]

結合量子ドットでおこる電子状態のコヒーレント振動を利用して、量子ゼノ効果を実験的に検証することを目指している。その前段階として、まず、量子ドットをトンネルする電子の位相が、ドット中の電子数を確定させるような観測を行うことによって崩壊の様子を調べた。実験には、観測用の検出器として量子ドットに近接して量子ポイントコンタクトを配置した試料を用いた。ドットに電子が局在すると、静電結合のためにドット近傍の静電ポテンシャルが上昇するので、ポイントコンタクトをトンネルする電子の透過率は減少する。逆に、ポイントコンタクトをトンネルする電子の個数、即ち測定頻

度（電流に相当）を上げれば、ドットとの静電的結合を介してドットをトンネルする電子の位相が乱される。ドットをトンネルする電子のコヒーレントなエネルギー幅は、単一電子トンネル電流のピーク幅で評価した。実験では、ポイントコンタクトを透過する電流を上げていくと、わずかではあるが、電流ピーク幅が広がる様子、即ち位相緩和が促進されている様子が観測された。今のところ、まだ、測定精度や位相緩和時間の評価に問題があり、今後ゼノ効果の観測へと進むには、素子構造や測定方法を改善していく必要がある。

#### 量子ドットの近藤効果 [35]

量子ドット中の局在スピンと外部電極の伝導電子のスピンの反強磁性的結合に由来して近藤効果介在トンネルが起こることが予測され、最近その確認実験が進められている。量子ドットは、その電子軌道やスピン状態を制御できることから、近藤効果の物理を調べるための格好の研究対象と考えられる。今年度は、外部電極と強く結合した人工原子を作製し、低温でのク-ロン振動を調べることにより、一重項 - 三重項縮退に起因した新しいタイプの近藤効果介在トンネル現象を見出した。実験では、弱磁場で一重項 - 三重項縮退を誘起し、その条件でク-ロンブローケードが起こっている状態でのトンネル電流を調べた。温度の低下による電流の指数関数的増大、微分コンダクタンスの急峻なピーク（近藤状態密度）など、近藤効果的性質を観測した。従来の近藤効果は、ドットの全スピンの半整数（電子数は奇数）で起こるのに対して、今回観測した近藤効果は全スピンの整数（電子数は偶数）で起こる。この特徴は多重状態関与の近藤効果として説明される。その詳細については、現在検討中である。

#### 4.3.2 人工二原子分子の電子状態の研究

量子力学的に結合した人工分子の一重項 - 三重項遷移 [3,12,34,35]

半導体量子ドットを二個連結した人工分子では、ドット間の量子力学的結合やク-ロン相互作用に依存して電子状態が決定される。このような電子状態の特徴を、単一電子スペクトロスコピーの手法で調べている。特に、ディスク形の人工原子を縦方向に比較的強く結合させた人工分子について、横方向に磁場を印可することにより、スピン一重項 - 三重項遷移が起こることを見出した。実験では、2電子を含む人工分子について励起スペクトロスコピーの方法により、電子状態を調べた。通常基底状態は結合軌道  $1s$  状態の反強磁性的な電子占有状態になる。これは、水素分子の Heitler-London 軌道の一重項に対応する。ここに横磁場を印可すると、結合強度の減少、交換相互作用の増大、ゼ-マン効果のために三重項状態のエネルギーが相対的に低下し、やがて一重項状態に代わって基底状態となることが観測さ

れた（一重項 - 三重項遷移）。さらに、1電子の励起スペクトルと比較することにより、単一粒子的な結合、反結合分離エネルギー、人工分子固有の交換エネルギーを求めることができ、これらの値は厳密対角化の計算と良く対応することが分かった。

弱結合人工分子におけるスピン選択トンネルとスピンプローケード [37,48]

量子力学的に弱く結合した2重ドットでは、強磁性的、あるいは反強磁性的な電子占有に関連して特異なスピン選択トンネルとスピンプローケード現象が期待される。このことを、最も簡単な系である2電子系を例にとって提案すると共に実験的に確認した。モデルを簡単に説明する。まず、ソース・ドレイン電圧  $V=0$  で左側（ソース側）のドットの電子数  $N_1=1$  のエネルギーと右側（ドレイン側）のドットの  $N_2=2$  のそれとが一致している場合を考える。電子は（1）ソース電極と左側のドットの間、（2）2つのドットの間、（3）右側のドットとドレイン電極の間、をトンネルし、これら全てのトンネルが許されるときに電流が流れる。2重ドットに対して考えられる電子数状態  $(N_1, N_2) = (0, 1), (1, 1), (0, 2)$  のスピンを考えると、 $(0, 1)$  では1電子スピンの上向きか下向き、 $(1, 1)$  では2電子スピンの1重項か3重項をとることができる。一方、 $(0, 2)$  では2つの電子が右側のドットの最低軌道準位を占有しているため、1重項に限られる。ここで  $V > 0$  の場合を考えよう。 $(1, 1)$  は1重項も3重項もとる。この1重項からは  $(0, 2)$  への遷移は許容されるが、3重項から  $(0, 2)$  への遷移は全スピンの異なるため禁止される（スピンプローケード）。この両者が起こる一回毎の確率は同程度ではあるが、一度後者が起こると以降はその状態が継続するので、定常状態での伝導は抑制されることになる。実験では縦型2重ドットの  $N_1+N_2=2$  の領域において通常のクーロンブローケードでは説明できない電流の抑制を観測し、これが上記のスピン選択則によって説明できることが分かった。ドット間の結合が弱い人工分子では、2つのドットのエネルギー準位が共鳴している時はドット間に弾性トンネルが、非共鳴の時には非弾性トンネルが起こる。実験では、極低温の共鳴電流測定から電子の位相緩和時間（数ナノ秒）が求められた。また、非共鳴電流の温度依存性測定から、非弾性トンネルは電子と環境ボゾンの散乱によるもので、そのトンネル遷移確率は、自然放出と誘導放出、吸収に関するアインシュタインの関係式を良く満たすことが分かった。

#### 4.3.3 一次元電子系の電子間相互作用の研究

一次元電子系の電子輸送については、長さ数ミクロンの単一モード量子細線を使って、一次元朝永-ラッティンジャー液体の実験を行っている。これまで、温度に対して非普遍的なコンダクタンス特性を

観測し、これが朝永 - ラッティンジャー液体特有の”相関関数のべき乗則”を反映することを確認した。さらに、一次元の強い電子相関に起因する伝導現象について調べている。

短周期ポテンシャルをもつ朝永 - ラッティンジャー液体 [14,16,22,39,45]

量子細線の長さ方向に短周期ポテンシャルを付け加えた場合のコンダクタンス特性を調べている。ポテンシャルの周期が電子の充填率 = 2 となる条件では、ブラッグ反射による微分コンダクタンスの減少 (ブラッグギャップによるコンダクタンスディップ) が生じる。このとき、細線両端の化学ポテンシャル差を大きくすると、フェルミエネルギーがブラッグギャップからはずれるので、微分コンダクタンスディップは消失する。一方、コンダクタンスディップからはずれたところでは、フェルミエネルギーがブラッグギャップに入るにつれて微分コンダクタンスは減少する。非相互作用系のフェルミ液体の場合、この非線形コンダクタンスの変化は単調であるが、朝永 - ラッティンジャー液体では、(ア)相互作用のために微分コンダクタンスは増大、減少にオーバーシュートの的な変化を伴い、また(イ)スピン - 電荷分離効果のためにスピン部分と電荷部分のそれぞれに対応して、微分コンダクタンスの変化が現れる。このことを理論的に予測するとともに、具体的な確認実験を進めた。実験では、細線にエッチング法により、フェルミ波長の半分程度の短周期ポテンシャル変調を作り込んだ量子細線を作製した。まず、SdH 振動測定を利用して、短周期ポテンシャル変調の影響の存在を確認した後、非線形微分コンダクタンスを調べた。微分コンダクタンスには、エネルギーに対して3つ程度のディップが観測された。それぞれのディップについて、上記(ア)の特徴が観測したが、(イ)の特徴は観測できなかった。恐らく、ブラッグギャップが細線全体については形成されていないために、複数のギャップが部分的に存在して、これによる朝永 - ラッティンジャー液体効果が現れているものと考えられる。現在、さらに詳細な検討を進めている。

結合量子細線のク - ロンドラッグ [46]

クーロン相互作用の強く効く近距離にあるふたつの閉じた系において、一方に電流を流すと、もう一方の系でも電子が引きずられるために電圧を生じるという現象がクーロンドラッグである。結合量子細線の系においては、このクーロンドラッグが朝永 - ラッティンジャー液体効果によって強くなり、さらには特有の温度特性を持つことが予測されている。現在、長さ1から8  $\mu\text{m}$ の結合量子細線を作成し、その検証実験を進めている。実験では、長さ2  $\mu\text{m}$ の比較的長い結合量子細線の系において、朝永 - ラッティンジャー液体効果を反映していると思われる強いドラッグ信号が得られることと、各細線の状態密度を反映した特性を示すことを確認した。また、3

から4テスラの磁場中では、電流を流す方の細線が低密度でもう一方の細線がエッジ状態にあるときにドラッグが逆向きになるという結果が得られ、これを説明するモデルを構築中である。

#### 4.3.4 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

半導体微細構造の電子系は、磁場中で相関効果による様々な状態遷移を起こす。その多体相関効果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表面敏感走査プローブ (極低温、高真空、高磁場で動作) を開発している。今年度は、0.3Kの低温クライオスタットと高真空STMの結合装置系の設計と作製を開始した。平成12年度に完成予定。

本研究の大部分はNTT物性科学基礎研究所、デルフト工科大との共同研究である。

<受賞>

- [1] 大野圭司、井上研究奨励賞、井上科学振興財団、1999年2月4日。

<報文>

(原著論文)

- [2] S. Tarucha, T. Fujisawa, K. Ono, D.G. Austing, T.H. Oosterkamp, W.G. van der Wiel, and L.P. Kouwenhoven: Elastic and inelastic single electron tunneling in coupled two dot system, *Miroelectronic Engineering*, **47**, 101-105 (1999).
- [3] Y. Tokura, D.G. Austing, and S. Tarucha: Single electron tunneling in two vertically coupled quantum dots, *J. Phys. Cond. Matt.* **11**, 6023-6034 (1999).
- [4] T. H. Oosterkamp, J. W. Janssen, L. P. Kouwenhoven, D. G. Austing, T. Honda, and S. Tarucha: Maximum-density droplet and charge redistribution in quantum dots at high magnetic fields, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 2931-2934 (1999).
- [5] P.D. Ye and S. Tarucha: Internal magnetic focusing in an array of ballistic cavities, *Phys. Rev. B* **59**, 9794-9797 (1999).
- [6] S. M. Reimann, M. Koskinen, J. Kolehmainen, M. Manninen, D. G. Austing, and S. Tarucha: Electronic and magnetic structure of artificial atoms, *Euro. J. Phys. D* **9**, 105-110(1999).
- [7] D. G. Austing, S. Tarucha, P. C. Main, S. T. Stoddart, and L. Eaves: Multiple gated InAs dot ensembles, *Appl. Phys. Lett.* **75**, 671-673 (1999).
- [8] D. G. Austing, S. Sasaki, S. Tarucha, S.M. Reimann, M. Koskinen, M. Manninen: Vertical quantum dots with elliptically deformed cross sections, *Physica B*, **272**, 68-71 (1999).

- [9] D.G. Austing, S. Sasaki, S. Tarucha, S. M. Reimann, M. Koskinen and M.Manninen: Ellipsoidal deformation of vertical quantum dots, Phys. Rev. B **60**,11514-11520 (1999).
- [10] S. Tarucha, D.G. Austing, Y. Tokura, W.G. van der Wiel and L.P. Kouwenhoven: Exchange and direct Coulomb interactions in artificial atoms, to be published in Phys. Rev. Lett.**84**, 2485-2488 (2000).
- [11] D.G. Austing, Y. Tokura, S. Taruch, T.H. Oosterkamp, J.W. Janssen, M.W.S. Danoesastro, L.P. Kouwenhoven: Vertical quantum dots at high magnetic fields beyond the few-electron limit,Physica E **6**, 358-363 (2000).
- [12] Y. Tokura, S. Sasaki, D. G. Austing, and S. Tarucha: Single-electron tunneling through two vertically coupled quantum dots, Physica E **6**, 676 (2000).
- [13] S. Tarucha, D.G. Austing, S. Sasaki, Y. Tokura, W. van der Wiel, and L.P. Kouwenhoven:Effects of Coulomb interactions on spin states in vertical semiconductor quantum dots, Applied Physics A in print.
- [14] Y. Tokura, A. A. Odintsov, and S. Tarucha: Interaction effects in semiconductor one-dimensional systems, Springer lecture note series (proceedings 219.WE-Heraeus-Seminar, "Interactions and Quantum Transport Properties of Lower Dimensional Systems" Ed. T. Brandes) in print.
- (会議抄録)
- [15] Y. Tokura, D. G. Austing, and S. Tarucha: Quantum blockade in two vertically coupled quantum dots, Proc. of the 24th Int. Conf. on The Physics of Semiconductors (World Scientific, Singapore. Editor David Gershoni (1999)).
- [16] Y. Tokura, A. A. Odintsov, and S. Tarucha: Bragg reflections in a Tomonaga-Luttinger liquid,Proc. of the 24th Int. Conf. on The Physics of Semiconductors (World Scientific, Singapore. Editor David Gershoni (1999)).
- [17] P.D. Ye, S. Tarucha, and D. Weiss: Magnetoresistance oscillations in a ballistic Aharonov-Bohm ring with a micromagnet embedded at the center, Proc. of the 24th Int. Conf. on The Physics of Semiconductors (World Scientific, Singapore. Editor David Gershoni (1999)).
- [18] S. Tarucha, D. G. Austing, T. Fujisawa, Tjerk Oosterkamp, W. van der Wiel and L.P.Kouwenhoven:Single Electron Tunneling in Double Dot System, The 18th Symposium On Future Electron Devices (October.20-21,1999).
- (国内雑誌)
- [19] 樽茶清悟、藤澤利正：半導体人工分子，固体物理，Vol.34，No.5 (1999).
- [20] 樽茶清悟：人工原子分子のユニークな物理，パリティ **15**，No.6 (2000) 予定  
(修士論文)
- [21] 田村一裕：結合量子ドットにおける量子コヒーレンスと Zeno 効果
- [22] 新田英嗣：短周期ポテンシャル変調をもつ量子細線の電気伝導
- [23] 山口健作：微小半導体リング構造における電子の局在・非局在  
(著書)
- [24] S. Tarucha, D.G. Austing, S. Sasaki, L.P. Kouwenhoven, S. Reimann, M. Koskinen and M. Manninen:Electronic states in circular and ellipsoidally deformed quantum dots, Physics and Applications of Semiconductor Quantum Structure, ed. by T. Yao, IOP Publishing Co., Bristol, UK.
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [25] S. Sasaki, D. G. Austing, Y. Tokura, K. Muraki, and S. Tarucha: Magnetic field modulation of the quantum mechanical coupling in an artificial molecule,XVI Sitges Conference on Statistical Mechanics (Barcelona,June 1999).
- [26] D. G. Austing, S. Sasaki, S. Tarucha, S.M. Reimann, M. Koskinen, M. Manninen: Vertical quantum dots with elliptically deformed cross sections, HCIS-11 (Kyoto, July 1999).
- [27] K. Ono, D. G. Austing, Y. Takahashi, A. Fujiwara, and S.Tarucha:Zeeman effect of Si quantum dot, HCIS-11 (Kyoto, July 1999).
- [28] Y. Tokura, S. Sasaki, D. G. Austing, and S. Tarucha: Single electron tunneling through two vertically coupled quantum dots,13th Int. Conf. on the Electronic Properties of Two-dimensional systems (EP2DS-13) (Ottawa, Canada August1999) PC.22.
- 招待講演
- [29] S. Tarucha: Correlated electrons in quantum dot atoms and molecules, 7th Int. Symp. on Nanostructures, Physics and Technology (St Petersburg, Russia June 1999).
- [30] Y. Tokura, A. A. Odintsov, and S. Tarucha: Interaction effects in semiconductor one-dimensional systems, 219.WE-Heraeus-Seminar 'Interactions and Quantum Transport Properties of Lower Dimensional Systems (Hamburg, Germany July 1999).
- [31] S. Tarucha: Spectroscopy of artificial atoms and molecules: 22nd Int. Conf. on Low Temperature Physics (Espoo & Helsinki, Finland August 1999).

- [32] S. Tarucha: Transport in quantum dots and quantum wires, Electron Transport in Mesoscopic Systems (Goeteborg, Sweden, August 1999).
- [33] S. Tarucha, NTT Basic Research Laboratories: Spin effects in semiconductor quantum dots, CREST Workshop, Physics and Applications of Quantum Dots (Hakone, October 1999).
- [34] S. Tarucha: Spin effects in many-particle states of quantum dots, Int. Symp. on Mesoscopic Superconductivity (MS2000), NTT Basic Res. Lab. (Atsugi, March 2000).
- [35] S. Tarucha: Spin Effects in Vertical Single Dot and Double Dot structures, APS March Meeting 2000 (Minneapolis M E7. DCMP, March 2000).

(国内会議)

一般講演

- [36] 樽茶清悟、D.G.Austing、都倉康弘、Wilferd van der Viel、Leo Kouwenhoven: 磁場中の人工原子におけるクーロン直接項と交換項 - フント第一則との関係 -、日本物理学会 (岩手大学、1999年9月)
- [37] 大野圭司、D.G.Austing、都倉康弘、樽茶清悟: 弱結合2重量子ドットの電気伝導 II、日本物理学会 (岩手大学、1999年9月)
- [38] 大野圭司、高橋康夫、藤原聡、樽茶清悟: Si量子ドットのゼーマン効果、日本物理学会 (岩手大学、1999年9月)
- [39] 新田英嗣、都倉康弘、村木康二、宮下宣、大野圭司、樽茶清悟: 短周期ポテンシャルを持つ量子細線のコンダクタンス特性、日本物理学会 (岩手大学、1999年9月)
- [40] 山口健作、D.G.Austing、都倉康弘、樽茶清悟: 微小半導構造のトンネル特性、日本物理学会 (岩手大学、1999年9月)
- [41] 山口尚秀、八木隆多、宮崎久生、神田晶申、大塚洋一、樽茶清悟、小林俊一: 並列抵抗を付加した微小ジョセフソン接合2次元配列の超伝導・絶縁体転移、日本物理学会 (岩手大学、1999年9月)
- [42] 山口尚秀、八木隆多、宮崎久生、神田晶申、大塚洋一、樽茶清悟、小林俊一: 並列抵抗を付加した微小ジョセフソン接合2次元配列における超伝導、日本物理学会 (関西大学、2000年3月)
- [43] 山口尚秀、八木隆多、宮崎久生、神田晶申、大塚洋一、樽茶清悟、小林俊一: 並列抵抗を付加した微小ジョセフソン接合2次元配列の超伝導・絶縁体転移 II、日本物理学会 (関西大学、2000年3月)
- [44] 都倉康弘、A.A.Odintsov、樽茶清悟: 偏重された半導体量子細線における相互作用効果、日本物理学会 (関西大学、2000年3月)
- [45] 新田英嗣、山本倫久、都倉康弘、村木康二、宮下宣、大野圭司、樽茶清悟: 短周期ポテンシャル変調をもつ量子細線におけるコンダクタンスのバイアス電圧依存性、日本物理学会 (関西大学、2000年3月)

- [46] 山本倫久、大野圭司、平山祥郎、樽茶清悟: 結合量子細線におけるクーロンドラッグ、日本物理学会 (関西大学、2000年3月)
- [47] 佐々木智、D.G.Austing、樽茶清悟: 縦型半導体量子ドットにおける近藤効果、日本物理学会 (関西大学、2000年3月)
- [48] 大野圭司、D.G.Austing、都倉康弘、樽茶清悟: 縦型2重量子ドットにおけるドット間トンネルのスピンブロック、日本物理学会 (関西大学、2000年3月)
- [49] D.G.Austing、都倉康弘、樽茶清悟: Electron filling of the 3rd shell of an artificial atom close to 0 T、第47回応用物理学会 (青山学院大学、2000年3月)
- [50] 都倉康弘、佐々木智、D.G.Austing、樽茶清悟: 楕円形量子ドットの励起スペクトルと交換相互作用の寄与、第47回応用物理学会 (青山学院大学、2000年3月)

招待講演

- [51] 樽茶清悟: 半導体人工分子の電子状態、特別講演、超微粒子とクラスター懇談会第3回研究会 (東京都立大学、1999年5月)
- [52] 樽茶清悟: メソスコピック構造の量子伝導実験の展望、東大ナノリンク公開シンポジウム (東大生産研、1999年8月)
- [53] 樽茶清悟: 半導体微細構造を用いた量子力学実験と検証、第4回久保記念シンポジウム (東京理科大学、1999年10月)
- [54] 樽茶清悟: 人工原子のスピン効果、物性研究所研究会シリーズ「物性研究の展望」「表面・人工物質における物性科学のフロンティア」(東大生産研、1999年11月)
- [55] 樽茶清悟: 半導体人工原子/分子の電子相関、第12回佐々木学術シンポジウム (筑波大学、1999年12月)
- [56] 樽茶清悟: 人工原子で量子力学を検証する、第10回青梅市フロンティアサイエンス会議 (東京都青梅市・ブリヂストン奥多摩園、2000年3月)

(セミナー)

- [57] 樽茶清悟: 半導体人工原子の磁場中での状態遷移、(東大教養、1999年4月)
- [58] 樽茶清悟: 人工分子の電子状態、(豊田工業大学コンボン研究所、1999年8月)
- [59] 樽茶清悟: 半導体メソスコピック構造と量子力学 (新潟大、2000年2月1日)

## 4.4 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により、固体の電子物性の研究を行っている。強相関電子系の示す様々な基底状態とゆらぎ、相転移近傍の特異な振る舞いなどを調べている。具体的には、 $d$  電子系（遷移金属化合物）、 $f$  電子系（希土類元素化合物）、低次元系など電子相関の強い系が示す金属-絶縁体転移（モット転移、アンダーソン転移など）、磁性（磁気輸送現象、近藤効果）、エキゾチックな超伝導、量子相転移、擬ギャップ、スピン電荷ストライプ形成などの機構解明をめざす。

実験室光源の外に、高エネルギー加速器研究機構のフォトン・ファクトリー、スタンフォード放射光研究所、SPRING-8 等の放射光を用いて実験をおこなっている。

### 4.4.1 超伝導、金属-絶縁体転移

#### 高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ のストライプゆらぎ

$\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  の電子状態のホール濃度依存性を角度分解光電子分光により調べた。高ドープ領域で電子的な形状を示していたフェルミ面が、低ドープ領域でホールのかつ直線的になり、1 次元的な電子状態の形成が示唆された。この結果は、La の一部を Nd で置換し 1 次元的なスピン電荷ストライプを安定化させた物質の結果と酷似しており、電荷ストライプ状の動的な揺らぎが超伝導体で存在することを示した。

#### 電子ドープ型高温超伝導体 $\text{Nd}_{1-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ における化学ポテンシャルのシフト

ホールドープ型  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  の低ドープ領域では、ストライプ揺らぎのために化学ポテンシャルのシフトが抑えられているが、電子ドープ型高温超伝導体  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$  がどのように振舞うか大変興味深い。これを調べるために、内殻光電子スペクトルの精密測定を行った。シフトの抑制は見られず、中性子散乱でストライプ揺らぎが見えないことと符合する結果が得られた。

#### ペロブスカイト型 Fe 酸化物における電荷整列と金属-絶縁体転移

低温で電荷不均化  $2\text{Fe}^{4+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{5+}$  を伴う金属  $\rightarrow$  絶縁体転移を示す  $\text{La}_{1/3}\text{Sr}_{2/3}\text{FeO}_3$  を、光電子分光および核共鳴 X 線散乱により調べた。Battle らが中性子回折から提唱した  $\langle 111 \rangle$  方向の超周期スピン・電荷配列構造が、実際にハートリー-フォック計算の安定な絶縁体解として得られた。X 線散乱の弾性ピークが転移点で非常に大きな強度変化を示した。

これは、構造解析から得られているわずかな結晶構造の変化では説明しにくく、転移機構の再検討が望まれる。

#### 軟 X 線吸収分光による $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{BiO}_3$ の電子構造

銅を含まない高温超伝導体  $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{BiO}_3$  の非占有電子状態のホール濃度依存性を、酸素  $1s$  内殻吸収分光により調べた。類似の超伝導体  $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$  とは異なり、銅酸化物と同様に、母体絶縁物質  $\text{BaBiO}_3$  から出発すると、ホールドーピングに伴いフェルミ準位直上に状態が成長することが見出された。

#### バイポーロン系 $\text{Ti}_4\text{O}_7$ におけるランダムネスの効果

$\text{Ti}_4\text{O}_7$  は、バイポーロンが整列した低温相、バイポーロンが動き回る中間相、個々の電子が動き回る高温相の間で相転移を示す。この物質のフェルミ準位近傍の電子状態を高分解能光電子分光により調べ、それぞれ特徴的な形状を見出した。低温相では絶縁体的なギャップが開き、高温相では金属的なフェルミ端が見られたが、中間相はエネルギーの二乗で立ち上がる中間的な形状を示し、これをランダム系におけるクーロンギャップと同定した。

#### $\text{VO}_2$ のモット転移と絶縁体相の温度変化

$\text{VO}_2$  は約 320 K で一次の金属-絶縁体を示すことで知られているが、低温相が強相関のモット絶縁体か弱相関のパイエルス（バンド）絶縁体かの論争があり、決着がついていない。低温相の電子状態の温度変化を詳しく調べ、バンドギャップの温度変化などが通常の絶縁体と区別がつかないことを示した。一方、スペクトル形状はバンド理論とは大きく異なり、電子相関の重要性を示した。Cr をドープした試料の測定でも、モット絶縁体描像を支持する結果が得られた。

#### パイロクロア型 $\text{Tl}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ の金属-絶縁体転移

温度により金属-絶縁体転移を示す  $\text{Tl}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$  の電子構造を、光電子分光、逆光電子分光により調べた。スペクトルでは、金属-絶縁体転移を反映したフェルミ準位近傍の Ru  $4d$  バンドの温度変化が観測された。一方、転移を担う可能性のある Tl  $6s$  電子の寄与を示唆するデータは得られなかった。

#### 3 次元系 $\text{CuV}_2\text{S}_4$ における電荷密度波の可能性

$\text{CuV}_2\text{S}_4$  は 3 次元スピネル型結晶構造と持つにも関わらず、入線回折より 90 K の相転移が電荷密度波

転移であると言われている。高分解能光電子分光によりフェルミ準位近傍の温度変化を調べ、相転移を示さない  $\text{CuTi}_2\text{S}_4$  と比較した。擬ギャップの温度変化が転移より高温で起こり、転移点以下ではほとんど変化がなく、揺らぎの効果が強いことが示唆された。また、第一原理バンド計算を行ない、フェルミ面のネスティングの有無を検討中である。

#### アモルファス Ge:Mo 合金の Altshuler-Aronov 型異常の観測

電子間相互作用を考慮すると、ランダム・ポテンシャルにより電子の局在した絶縁体はソフト・クーロンギャップを示すことが Efros-Shklovskii により示され、金属もランダム・ポテンシャルにより状態密度の異常を示すことが Altshuler-Aronov により予言されている。金属-絶縁体転移（アンダーソン転移）を示すアモルファス Ge:Mo 合金を高分解能光電子分光で調べ、これらの検証を行なった。金属試料で Altshuler-Aronov 型異常が観測されたが、絶縁体試料でも同様の異常が見られたが、クーロンギャップは観測されなかった。

#### 4.4.2 遍歴磁性体

##### 遍歴強磁性体 $\text{SrRuO}_3$ の軟 X 線吸収と光電子スペクトルの磁気円二色性

$4d$  遷移金属酸化物唯一の強磁性金属  $\text{SrRuO}_3$  の軟 X 線吸収と光電子スペクトルの磁気円二色性を測定した。吸収の円二色性から、スピンおよび軌道磁気モーメントを見積もり、光電子の磁気円二色性から、伝導帯へのスピン軌道相互作用の効果を観測した。

##### $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ の軟 X 線吸収と磁気円二色性

ホールドーピングにより強磁性金属となるペロブスカイト型酸化物  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$  の軟 X 線吸収磁気円二色性を測定し、スピンおよび軌道磁気モーメントを見積もった。Co イオンが中間スピン状態にあること、ホールドーピングにより  $d$  電子の遍歴性が増す（よりバンド的になる）ことがわかった。

##### 巨大磁気抵抗系 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ における化学ポテンシャルのシフト

ペロブスカイト型マンガン酸化物において、金属-絶縁体転移近くで相分離が起こるという理論的予想がなされ、巨大磁気抵抗との関連が議論されている。そこで、マクロあるいはミクロな相分離に敏感な化学ポテンシャルのシフトの測定を行った。その結果、金属-絶縁体転移の起こるホール濃度の低い領域では

目立ったシフトの抑制は見られず、相分離による巨大磁気抵抗出現機構が疑問視された。

#### スピン制御半導体 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ のバンド構造

半導体にスピンとキャリアを同時に導入できることで注目を集めている Mn ドープ III-V 族半導体  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  のバンド構造を角度分解光電子分光により調べた。Mn ドーピングにより、GaAs 母体のバンドの一部がシフトすること、価電子帯頂上のフェルミ準位付近に、運動量分散のない不純物バンド的な状態が出現することが見出された。

#### 酸化物希薄磁性半導体 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}$ の電子構造と $p$ - $d$ 交換相互作用

新しい希釈磁性半導体として最近注目されている  $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}$  の電子状態を光電子分光により調べた。内殻光電子スペクトルのサテライト構造、共鳴光電子分光による Mn  $3d$  部分状態密度のクラスターモデルによる解析を行なった。交換相互作用定数が III-V 族や他の II-VI 族半導体に比べて 2 倍程度と見積もられ、ホールをドーピングできれば高いキュリー点を持つ強磁性体が得られることが予言された。

#### 弱強磁性合金 $\text{Y}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2$

Al 置換によって常磁性-メタ磁性-強磁性と変化するラーベス相化合物  $\text{Y}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2$  の電子状態を、光電子・逆光電子分光により調べた。Al 置換により、バンド理論で予想されるように状態密度のピークがフェルミ準位を横切ることが見い出されたが、そのピーク幅はバンド理論に比べて非常に広がっていた。これを、現象論的な自己エネルギーを用いて説明した。

#### 遍歴磁性体 $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$

非磁性（温度誘起磁性）半導体 FeSi と反磁性半金属 CoSi の混晶系  $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$  は、広い組成範囲で長周期のスパイラル反強磁性、強磁性を示す。高分解能光電子分光により、組成、温度による電子構造の変化を調べた。磁気相転移点以下でフェルミ準位近傍の状態密度が減少し、電気抵抗の上昇と併せて、フェルミ準位上に擬ギャップができることが示唆された。

### 4.4.3 低次元物質

#### PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> および PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>4</sub>O<sub>8</sub> における Cu-O 一次元鎖の電子状態

高温超伝導体 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> の Y サイトを Pr に置換すると、CuO<sub>2</sub> 面は絶縁体となり、Cu-O 鎖にのみキャリアーがドーブされた 1 次元電子系となる。単一ドメインからなる PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 単結晶を用い、角度分解光電子分光をおこなったところ、2 本の 1 次元的分散を持つバンドが観測され、スピン電荷分離の可能性を示した。一方、PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>4</sub>O<sub>8</sub> における Cu-O 二重鎖は金属的で、スピン電荷分離の兆候は観測されなかった。その理由について考察を行なっている。

#### 1 次元鎖を持つ TlGaTe<sub>2</sub> の電子構造

1 次元的結晶構造を持つ半導体 TlGaTe<sub>2</sub> の電子構造を、角度分解光電子分光および第一原理バンド計算により調べた。両者の結果は初めの予想に反し、1 次元軸 (*c*-軸) に垂直な方向に大きなバンド分散を示し、TlGaTe<sub>2</sub> が電子的に 3 次元性の強い物質であることが示された。

### 4.4.4 近藤格子、重い電子系、高熱電能物質

#### 近藤絶縁体 YbB<sub>12</sub> に対する置換効果

典型的な近藤絶縁体と考えられている YbB<sub>12</sub> に対する Lu 原子置換の効果を、超高分解能光電子分光により調べた。わずかな量の Lu 置換により YbB<sub>12</sub> の幅 ~ 10 meV の擬ギャップが崩壊すること、幅 ~ 40 meV の擬ギャップも徐々に崩壊することが見出された。Lu 濃度依存性より、後者は Yb 一原子の効果、前者は複数の Yb 原子間の相互作用の効果であることが結論された。

#### 近藤絶縁体 FeSi に対するホールドーピングの効果

近藤絶縁体的な磁性、伝導性を示す *d* 電子系 FeSi に対するホールドーピングの効果、FeSi<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub> の高分解能光電子測定により調べた。擬ギャップ崩壊における非リジッドバンド的な振る舞いが明らかになった。

#### 重い電子系 LiV<sub>2</sub>O<sub>4</sub> の電子状態

低温で電子比熱が大きく増大し、磁気秩序が起らない、いわゆる重い電子的振る舞いを示すことで注目を集めている LiV<sub>2</sub>O<sub>4</sub> の電子構造を、高分解能光電子分光および第一原理バンド計算により調べた。

V 3*d* バンドの温度変化と動的平均場理論の予想を比較検討した。

#### YbInCu<sub>4</sub>

40 K 付近で 1 次相転移を示す価数揺動物質 YbInCu<sub>4</sub> のフェルミ準位近傍の電子状態を、高分解能光電子分光により調べた。近藤ピークの位置と価数の温度変化を再現するように、アンダーソン不純物モデルによる解析を行ない、Yb 4*f* 準位の位置と軌道混成強度の温度変化を定量的に見積もった。

#### 高い熱電能を持つ CoSb<sub>3</sub> の電子構造

スクッテルダイト結晶構造を持つ CoSb<sub>3</sub> の電子構造を光電子分光により調べた。Co 3*d* および Sb 4*p* 原子軌道の混成により特徴的なバンド構造が形成されることが明らかにされた。*p* 型、*n* 型試料間でフェルミ準位のシフトが観測され、その大きさはバンドギャップの大きさと有効質量で説明された。

<受賞>

- [1] 藤森淳、高橋隆：超伝導科学技術賞、光電子分光法を用いた高温超伝導体の電子構造の解明 (1999 年 4 月)

<報文>

(原著論文)

- [2] D. Z. N. Curz, M. Abbate, H. Tolentino, P. J. Schilling, E. Morikawa, A. Fujimori, and J. Akimitsu: Linearly Polarized Cu *K*-Edge Absorption Spectroscopy of CuGeO<sub>3</sub>: Orbital Population, Band Dispersion and Interatomic Interactions, *Phys. Rev. B* **59** (1999) 12450.
- [3] A. Ino, C. Kim, T. Mizokawa, Z.-X. Shen, A. Fujimori, M. Takaba, K. Tamasaku, H. Eisaki, and S. Uchida: Fermi Surface and Band Dispersion in La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>, *J. Phys. Soc. Jpn.* **68** (1999) 1496; cond-mat/9809311.
- [4] E. Z. Kurmaev, M. A. Korotin, V. R. Galakhov, L. D. Finkelstein, E. I. Zabolotzky, N. N. Efremova, N. I. Lobashevskaya, S. Stadler, D. L. Ederer, A. Moewes, S. Bartkowski, M. Neumann, J. Matsuno, A. Fujimori, J. Mitchell: X-Ray Emission and Photoelectron Spectra of Pr<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>MnO<sub>3</sub>, *Phys. Rev. B* **59** (1999) 12799.
- [5] K. Kobayashi, T. Mizokawa, A. Ino, J. Matsuno, A. Fujimori, H. Samata, A. Mishiro, Y. Nagata, and F. M. F. de Groot: Doping Dependence of the Electronic Structure of Ba<sub>1-x</sub>K<sub>x</sub>BiO<sub>3</sub> Studied by X-Ray Absorption Spectroscopy, *Phys. Rev. B* **59** (1999) 15100; cond-mat/9903261.
- [6] A. Sekiyama, S. Suga, M. Fujikawa, S. Imada, T. Iwasaki, K. Matsuda, T. Matsushita, K. V. Kaznacheyev, A. Fujimori, H. Kuwahara, and

- Y. Tokura: Electronic States of Charge-Ordering  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  Probed by Photoemission, Phys. Rev. B **59** (1999) 15528.
- [7] J.-Y. Son, T. Mizokawa, A. Fujimori, K. Kouji, and T. Goto: Photoemission Study of Weakly Magnetic  $\text{Y}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2$ , Phys. Rev. B **60** (1999) 538.
- [8] J. Matsuno, A. Fujimori, and L. F. Mattheiss: Electronic Structure of Spinel-Type  $\text{LiV}_2\text{O}_4$ , Phys. Rev. B **60** (1999) 1607; cond-mat/9904004.
- [9] J. Okamoto, T. Mizokawa, A. Fujimori, I. Hase, M. Nohara, H. Takagi, Y. Takeda and M. Takano: Correlation Effects in the Electronic Structure of  $\text{SrRuO}_3$ , Phys. Rev. B **60** (1999) 2281.
- [10] J. Matsuno, T. Mizokawa, A. Fujimori, K. Mamiya, Y. Takeda, S. Kawasaki and M. Takano: Photoemission and Hartree-Fock Studies of Oxygen Hole Ordering in Charge-Disproportionated  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ , Phys. Rev. B **60** (1999) 4605.
- [11] S. Suga, A. Kimura, T. Matsushita, K. Mamiya, A. Fujimori, H. Takahashi, M. Mōri, S. Tanaka, and T. Jo:  $2p$  Core Excitation Resonance Photoemission in  $\text{NiS}_2$ , Phys. Rev. B **60** (1999) 5049.
- [12] T. Mizokawa, C. Kim, Z.-X. Shen, A. Ino, A. Fujimori, M. Goto, H. Eisaki, S. Uchida, M. Tagami, K. Yoshida, A. I. Rykov, Y. Siobata and S. Tajima: Angle-Resolved Photoemission Study of Untwinned  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ : Undoped  $\text{CuO}_2$  Plane and Doped  $\text{CuO}_3$  Chain, Phys. Rev. B **60** 12335; cond-mat/9908015.
- [13] T. Mizokawa, D. I. Khomskii, G. A. Sawatzky: Interplay between Orbital Ordering and Lattice Distortions in  $\text{LaMnO}_3$ ,  $\text{YVO}_3$ , and  $\text{YTiO}_3$ , Phys. Rev. B **60** (1999) 7309; cond-mat/9906010.
- [14] M. Nakamura, T. Yoshida, K. Mamiya, A. Fujimori, Y. Taguchi, and Y. Tokura: Resonant Photoemission Study of  $\text{LaTiO}_{3.04}$ , Mater. Sci. Eng. B **68** (1999) 123.
- [15] M. Satake, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Tanabe, T. Katsufuji and Y. Tokura: Charge Ordering and Chemical Potential Shift in  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$  Studied by Photoemission Spectroscopy, Phys. Rev. B, in press; cond-mat/9908014.
- [18] A. Fujimori, J. Okabayashi, and K. Mamiya: Photoemission Study of the Electronic Structure of Semiconducting Compounds, *Proceedings of XXVIII International School on Physics of Semiconducting Compounds*; Acta Phys. Polonica **96** (1999) 525.
- [19] T. Mizokawa and A. Fujimori: Spin, Charge and Orbital Ordering in  $3d$  Transition-Metal Oxides Studied by Model Hartree-Fock Calculation, *2nd International Conference on "Stripes and High  $T_C$  Superconductivity"*, J. Superconductivity, in press.
- [20] J. Matsuno, K. Kobayashi, A. Fujimori, L. F. Mattheiss and Y. Ueda: Electronic Structure of the "Heavy Fermion" System  $\text{LiV}_2\text{O}_4$ , in *Proceedings of LI-st Yamada Conference on Strongly Correlated Electron Systems*, Physica B, in press.
- [21] T. Susaki, Y. Takeda, M. Arita, A. Fujimori, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, S. Hiura, F. Iga and T. Takabatake: Photoemission Study of Kondo Insulator  $\text{YbB}_{12}$ , *ibid*, in press.
- [22] T. Mizokawa, C. Kim, Z.-X. Shen, A. Ino, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Goto, H. Eisaki, S. Uchida, M. Tagami, K. Yoshida, A. I. Rykov, Y. Siobara, K. Tomimoto, S. Tajima and Y. Yamada: Angle-Resolved Photoemission Study of  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  and  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ , in *12-th International Symposium of Superconductivity*, in press.
- [23] A. Fujimori, A. Ino, T. Yoshida, T. Mizokawa, M. Nakamura, C. Kim, Z.-X. Shen, T. Kakeshita, H. Eisaki and S. Uchida: Fermi Surface, Pseudogap and Superconducting Gap in  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ , in *Proceedings of 6-th International Conference, Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors*, Physica C, in press.
- [24] A. Fujimori, A. Ino, T. Yoshida, T. Mizokawa, M. Nakamura, C. Kim, Z.-X. Shen, K. Kishio, T. Kakeshita, H. Eisaki, S. Uchida: Pseudogaps and dynamical stripes in  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  from Photoemission Spectroscopy, in *Proceedings of CREST International Workshop on Pseudo Gap, Spin Gap and Anomalous Metals*, J. Phys. Chem. Solids, in press.

## (会議抄録)

- [16] K. Shimada, O. Rader, A. Fujimori, A. Kimura, K. Ono, N. Kamakura, A. Kakizaki, M. Tanaka, and M. Shirai, Spin-Resolved Core-Level and Valence-Band Spectroscopy of Ferromagnetic MnAs, *Proceedings of 12th International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics*; J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **101-103** (1999) 383.
- [17] K. Shimada, T. Mizokawa, A. Fujimori, M. Shirai and T. Kamimura: Photoemission Study of Electron Correlation in  $M_7X_8$  ( $M = \text{Fe}, \text{Co}, X = \text{S}, \text{Se}$ ), *ibid*; J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **101-103** (1999) 777.

## (綜説、解説、その他)

- [25] 藤森淳: 光電子分光で見た強相関係の金属-絶縁体転移、日本物理学会誌 **54** (1999) 83.
- [26] 藤森淳: 光電子分光屋から見た高温超伝導、FSST NEWS (未到科学技術協会) **76**, 15 (1999).

## (学位論文)

- [27] 須崎友文: High-Resolution Photoemission Study of Kondo Insulators (博士論文)
- [28] 小林研介: Spectroscopic Studies of Metal Oxides with Competing Electron-Electron and Electron-Lattice Interaction (博士論文)

- [29] 孫珍永: Photoemission Study of Itinerant Magnetism in Intermetallic Compounds (博士論文)
- [30] 岡本淳: Photoemission and Magnetic Circular Dichroism Studies of Ru oxides (博士論文)
- [31] 岡崎浩三: Photoemission Study of Low-Dimensional Systems: VO<sub>2</sub> and TiGaTe<sub>2</sub> (修士論文)
- [32] 石川義祐: High-Resolution Photoemission Study of Amorphous Mo:Ge Alloys (修士論文)

(編著書)

- [33] N. Tsuda, K. Nasu, A. Fujimori, and K. Siratori: *Electronic Conduction in Oxides* (Springer-Verlag, Berlin) in press.
- [34] A. Fujimori, T. Yoshida, A. Ino, C. Kim, Z.-X. Shen, Y. Taguchi, T. Katsufuji, Y. Tokura, H. Eisaki, S. Uchida, and K. Kishio: Fermi-Liquid versus Pseudogap Behaviors in Filling-Control Transition-Metal Oxides, in *Physics and Chemistry of Transition-Metal Oxides* (Springer-Verlag, Berlin, 1999) p. 111.
- [35] 菅野暁、藤森淳、吉田博 編: 「新しい放射光科学」(講談社サイエンティフィック、2000) 印刷中
- [36] 藤森淳: 放射光を用いた物性研究の基礎、「新しい放射光科学」菅野暁、藤森淳、吉田博 編 (講談社サイエンティフィック、2000) 印刷中
- [37] T. Mizokawa and A. Fujimori: II-VI and III-V Semimagnetic Semiconductors: Photoemission and Interpretation, in *Physics and Control of Defects in Semiconductors* (Gordon & Breach, London, 2000), in press.
- [38] 藤森淳、小谷章雄、難波孝夫 編: 物理学論文選集「強相関  $f$  電子系の分光」(日本物理学会、2000)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [39] A. Fujimori: Unusual Photoemission Spectra of La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>, *NEDO Spin-Charge Research Group Meeting* (Hawaii, May 1999).
- [40] J. Matsuno, K. Kobayashi, A. Fujimori, L. F. Mattheiss and Y. Ueda: Electronic Structure of the “Heavy Fermion” System LiV<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, *the LI-st Yamada Conference on Strongly Correlated Electron Systems* (Nagano, August 1999).
- [41] T. Susaki, Y. Takeda, M. Arita, A. Fujimori, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, S. Hiura, F. Iga and T. Takabatake: Photoemission Study of the Kondo Insulator YbB<sub>12</sub>, *ibid.*
- [42] T. Mizokawa, C. Kim, Z.-X. Shen, A. Ino, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Goto, H. Eisaki, S. Uchida, M. Tagami, K. Yoshida, A. I. Rykov, Y. Siohara, K. Tomimoto, S. Tajima and Y. Yamada: Angle-Resolved Photoemission Study of

PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> and PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>4</sub>O<sub>8</sub>, *12th International Symposium on Superconductivity* (Morioka, October 1999)

- [43] T. Yoshida, A. Ino, J. Matsuno, T. Mizokawa, A. Fujimori, D. Lu, N. P. Armitage: Photoemission Study of the Superconducting Gap Anisotropy in La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>, *Stanford Synchrotron Radiation Laboratory 26-th Users' Conference* (Stanford, October, 1999)

招待講演

- [44] A. Fujimori: Photoemission Study of Charge and Orbital Ordering in Perovskite-Type Oxides *Magnetic and Orbital Fluctuations in Manganites* (Schlöss Ribberg, Gernamy, April 1999)
- [45] A. Fujimori: Photoemission Study of the Electronic Structure of Semiconducting Compounds *XXVIII International School on Physics of Semiconducting Compounds* (Jaszowiec, Poland, June 1999)
- [46] T. Mizokawa: Instability to Charge Ordering in Doped 3d Transition-Metal Oxides, *Quantum Effects in Magnetic Systems*, (Leiden University, The Netherlands, July 1999)
- [47] N. B. Brooks, G. Ghiringhelli, O. Tjernberg, P. Ohresser, L. H. Tjeng, T. Mizokawa, N. T. Hien, and A. A. Menovsky, Spin Resolved Resonant Photoemission from High Temperature Superconductors, *Workshop on Theory and Computation for Synchrotron Radiation* (Frascati, Italy, September 1999)
- [48] A. Fujimori: Pseudogap Behavior and Microscopic Phase Segregation in High- $T_C$  Cuprates, *International Workshop on Concepts in Electron Correlation* (Hvar, Croatia, September 1999)
- [49] A. Fujimori: Fermi Surface and Its Destruction Probed by Photoemission Spectroscopy, *12th International Symposium on Superconductivity* (Morioka, October 1999)
- [50] A. Fujimori: Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy of La-based High- $T_C$  Cuprates, *Miniworkshop on Strongly Correlated Systems* (Bangalore, India, November 1999)
- [51] A. Fujimori: Photoemission and Magnetic Circular Dichroism Studies of Old and New Giant Magnetoresistance Materials, *Recent Advances in Scattering Studies in Condensed Matter Physics* (Coorg, India, November 1999)
- [52] A. Fujimori: Pseudogap and Microscopic Phase Separation in La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>, *CREST International Workshop on Pseudo Gap, Spin Gap and Anomalous Metals* (Nagoya, January 2000)
- [53] A. Fujimori: Angle-Resolved Photoemission Study of La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>: Pseudogap and Stripe Issues,

- Gordon Research Conference on High Temperature Superconductivity* (Ventura, U. S. A., February 2000)
- [54] A. Fujimori: Fermi Surface, Pseudogap and Superconducting Gap in LSCO, *6th International Conference, Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors* (Houston, U.S.A., February 2000)
- [55] A. Ino: Unusual Features in Angle-Resolved Photoemission Spectra of  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ , *American Physical Society March Meeting* (Minneapolis, U.S.A., March 2000)
- (国内会議)
- 一般講演
- [56] 岡林潤、木村昭夫、O. Rader、溝川貴司、藤森淳、林稔晶、田中雅明:  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  の角度分解光電子分光、内殻吸収円二色性、化学ポテンシャルシフト、特定領域研究「スピン制御半導体」平成 11 年度第 1 回研究会 (伊豆長岡、1999 年 5 月)
- [57] 溝川貴司: 遷移金属酸化物でのスピン、軌道そして電荷の秩序、第 6 回田中シンポジウム (浜松、1999 年 7 月)
- [58] 藤森淳: 機能調和酸化物材料の電子状態、科学技術振興調整費「機能調和酸化物」第 1 回合同分科会 (木更津、1999 年 2 月)
- [59] 小林研介、須崎友文、藤森淳、外海透、高木英典: バイポーロン系  $\text{Ti}_4\text{O}_7$  の高分解能光電子分光、日本物理学会秋の分科会 (岩手大、1999 年 9 月)
- [60] 須崎友文、竹田幸治、有田将司、藤森淳、島田賢也、生天目博文、谷口雅樹、日浦さやか、伊賀文俊、高畠敏郎、播磨尚朝: 近藤絶縁体  $\text{YbB}_{12}$  の光電子スペクトルの Lu 置換依存性、同上
- [61] 須崎友文、小林研介、岡林潤、藤森淳、大野玲、外海透、高木英典:  $\text{FeSi}$  の光電子スペクトルの温度および Al 置換依存性、同上
- [62] 岡本淳、藤森淳、武田隆史、菅野了次、石井史之、小口多美夫: パイロクロア型構造 Ru 酸化物  $\text{Tl}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$  の光電子、逆光電子分光、同上
- [63] 岡本淳、溝川貴司、藤森淳、宮内洋司、関根武俊、設楽哲夫、小出常晴、雨宮健太、斎藤智彦、武田保雄、高野幹夫:  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$  の Co  $L_{2,3}$ 、O  $K$  内殻吸収磁気円二色性、同上
- [64] 孫珍永、岡崎浩三、須崎友文、溝川貴司、藤森淳、野手竜之介、鹿又武:  $\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x}\text{Si}$  の光電子分光、同上
- [65] 松野丈夫、三宅章雅、天羽真一、岡崎浩三、藤森淳、萩埜貴継、永田正一:  $\text{CuV}_2\text{S}_4$  の光電子分光、同上
- [66] 松野丈夫、小林研介、藤森淳、上田寛:  $\text{LiV}_2\text{O}_4$  の電子構造 II、同上
- [67] 吉田鉄平、井野明洋、松野丈夫、溝川貴司、藤森淳、D. Lu、P. Armitage、C. Kim、Z.-X. Shen、永崎洋、内田慎一:  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  の超伝導ギャップの異方性、同上
- [68] 岡崎浩三、吉田鉄平、小林研介、藤森淳、小野田雅重:  $\text{VO}_2$  の高分解能光電子スペクトルの温度依存性、同上
- [69] 岡崎浩三、田中清尚、小林研介、藤森淳 N. Y. Mamedov、E. Kerimova、飯田誠之:  $\text{TlGaTe}_2$  の角度分解光電子分光、同上
- [70] 石井啓之、須崎友文、岡崎浩三、藤森淳、長本泰征、小柳剛:  $\text{CoSb}_3$  の光電子分光、同上
- [71] 関根武俊、小出常晴、宮内洋司、岡本淳、設楽哲夫、藤森淳、福谷博仁、川崎修嗣、高野幹夫: 強磁性ペロプスカイト  $\text{SrFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  の内殻吸収磁気円二色性 IV: 電荷移動とスピン状態、同上
- [72] 宮内洋司、小出常晴、岡本淳、設楽哲夫、関根武俊、藤森淳、福谷博仁、川崎修嗣、高野幹夫、武田保雄: ペロプスカイト酸化物  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  の内殻磁気円二色性 IV: 物理的解釈、同上
- [73] 小出常晴、宮内洋司、関根武俊、岡本淳、設楽哲夫、藤森淳、福谷博仁、小林啓一郎、木村剛、富岡泰秀、十倉好紀: 2 重整列ペロプスカイト  $\text{Sr}_2\text{FeMO}_6$  ( $M = \text{Mo}$ ) の内殻磁気円二色性 I、同上
- [74] 小出常晴、宮内洋司、関根武俊、岡本淳、設楽哲夫、藤森淳、福谷博仁、富岡泰秀、十倉好紀:  $\text{Pr}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  の電荷整列磁場融解状態の内殻磁気円二色性 II、同上
- [75] 藤森淳、溝川貴司、内田慎一、吉田鉄平、井野明洋、C. Kim、Z.-X. Shen、永崎洋: Pseudogap and Superconducting Gap Anisotropy in  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 、特定領域研究「遷移金属酸化物」研究会 "Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides" (東北大金研、1999 年 11 月)
- [76] 岡崎浩三、小林研介、藤森淳、小野田雅重: Photoemission Study of the Metal-Insulator Transition in  $\text{VO}_2$ 、同上
- [77] 岡林潤、木村昭夫、O. Rader、溝川貴司、南部貴、藤森淳、林稔晶、田中雅明: Electronic Structure of  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  Studied by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy、特定領域研究「スピン制御半導体」主催 第 5 回「半導体スピン工学の基礎と応用」研究会 (仙台、1999 年 12 月)
- [78] 溝川貴司、岡林潤、南部貴、藤森淳: Configuration Interaction Description of  $3d$  Transition-Metal Impurities in  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZnS}$ , and  $\text{ZnSe}$ 、同上
- [79] 木村昭夫、松野丈夫、岡林潤、藤森淳、獅子堂達也、E. Kulatov、鹿又武: Soft X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of the Ferromagnetic Spinel-Type Cr Chalcogenides、同上
- [80] 南部貴、岡林潤、溝川貴司、藤森淳、福村知昭、川崎雅司: Photoemission Study of Oxide-Diluted Magnetic Semiconductors  $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}$ 、同上
- [81] 木村昭夫、松野丈夫、岡林潤、藤森淳、獅子堂達也、鹿又武: スピネル型 Cr カルコゲナイドの内殻吸収磁気円二色性、第 13 回日本放射光学学会年会 (分子研、2000 年 1 月)
- [82] 高市芳雄、平井千之、仲武昌史、佐藤仁、生天目博文、島田賢也、木村昭夫、谷口雅樹、藤森淳、野末竜弘、上村孝: Cr および Ni プニクタイトの電子状態、同上

- [83] 岡林潤、木村昭夫、O. Rader、溝川貴司、藤森淳、林稔晶、田中雅明：GaMnAs の角度分解光電子分光、同上
- [84] 関根武俊、小出常晴、宮内洋司、岡本淳、設楽哲夫、藤森淳、福谷博仁、川崎修嗣、高野幹夫、武田保雄：強磁性ペロブスカイト  $\text{SrFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  の内殻吸収磁気円二色性：電荷移動とスピン状態、同上
- [85] 宮内洋司、小出常晴、関根武俊、岡本淳、設楽哲夫、藤森淳、福谷博仁、小林啓一郎、木村剛、富岡泰秀、十倉好紀：2重整列ペロブスカイト  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  の内殻吸収磁気円二色性、同上
- [86] 小出常晴、宮内洋司、岡本淳、設楽哲夫、関根武俊、藤森淳、福谷博仁、高野幹夫、武田保雄：ペロブスカイト  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  の内殻吸収磁気円二色性：磁気モーメント、電荷移動、及び格子歪みの強相関の証拠、同上
- [87] 藤森淳、岡林潤、南部貴、溝川貴司、木村昭夫、O. Rader、林稔晶、田中雅明、福村知昭、川崎雅司：Mn希薄磁性半導体の光電子分光、特定領域研究「スピン制御半導体」平成11年度成果報告会（東大生産研、2000年1月）
- [88] 岡林潤、木村昭夫、O. Rader、南部貴、溝川貴司、藤森淳、林稔晶、田中雅明： $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  の角度分解光電子分光 II、日本物理学会春の分科会（阪大、2000年3月）
- [89] 吉田鉄平、中村元彦、藤森淳、X.-J. Zhou、P. Bogdanov、E. Lu、A. Lanzara、S. A. Kellar、Z. Hussain、Z.-X. Shen、永崎洋、掛下照久、内田慎一： $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  のフェルミ面とストライプ、同上
- [90] 松野丈夫、藤森淳、武田保雄、高野幹夫： $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  の化学ポテンシャルシフト、同上
- [91] 岡崎浩三、藤森淳、D. D. Sarma、小野田雅重： $\text{V}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_2$  の光電子スペクトルの温度依存性、同上
- [92] 石川義祐、藤森淳、林信吾、田中一英：アモルファス Mo-Ge の高分解能光電子分光、同上
- [93] 石井啓之、岡崎浩三、藤森淳、長本泰征、小柳剛：スクッテルダイト化合物  $\text{CoSb}_3$  の光電子分光、同上
- [94] 播磨有幸、松野丈夫、石川義祐、藤森淳、小野瀬佳文、田口康二郎、十倉好紀： $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$  の化学ポテンシャルシフト、同上
- [95] 須崎友文、奥沢誠、藤森淳、J. L. Sarrao、Z. Fisk： $\text{YbInCu}_4$  の光電子分光、同上
- [96] 高市芳雄、平井千之、木村昭夫、森原敦、渡邊誠一、竹田幸治、佐藤仁、島田賢也、谷口雅樹、藤森淳、野末竜弘、上村孝： $\text{CrP}(100)$  単結晶の角度分解光電子分光、同上
- [97] 高市芳雄、平井千之、木村昭夫、仲武昌史、佐藤仁、島田賢也、生天目博文、谷口雅樹、藤森淳、野末竜弘、上村孝： $\text{Ni}$  および  $\text{Cr}$  プニクタイトの電子状態、同上
- [98] 溝川貴司、C. Kim、Z.-X. Shen、井野明洋、吉田鉄平、藤森淳、吉田宏二、A. I. Rykov、塩原融、富本晃吉、田島節子、後藤昌宏、永崎洋、内田慎一、山田裕、堀井滋、山田修義、山田容士、平林泉： $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 、 $\text{PrBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$  の角度分解光電子分光、同上。
- [99] 植田浩明、高木英典、北沢宏一、藤森淳、八木健彦：パイライト型銅カルコゲナイドの電子状態、同上。
- [100] 福村知昭、金政武、庄野知至、長谷川哲也、鯉沼秀臣、川崎雅司、藤城輝、腰原伸也、南部貴、溝川貴司、藤森淳： $\text{Mn}$  ドープ  $\text{ZnO}$  薄膜の電子・磁気物性、応用物理学会（2000年3月）。
- [101] 金政武、福村知昭、村上真、松本祐司、大友明、南部貴、溝川貴司、藤森淳、鯉沼秀臣、川崎雅司：コンピナトリアル手法で合成した  $3d$  イオンドープ酸化亜鉛薄膜の発光特性、同上。

## 招待講演

- [102] 藤森淳：磁性と放射光、INS-SOR 記念講演会（乃木坂、1999年10月）
- [103] 藤森淳：酸化物の磁性、超伝導、金属-絶縁体転移、シンポジウム'99「明日をめざす科学技術」（竹橋、1999年10月）
- [104] 藤森淳：高分解能光電子分光による強相関系の研究、物性研究所研究会シリーズ・物性研究の展望「先端光物性研究の将来展望」（1999年10月）
- [105] 松野丈夫、藤森淳： $t_{2g}$  電子系スピネル化合物の電子構造：光電子分光とバンド計算の立場から、第43回超伝導マグネティクス専門研究会「稜共有ネットワークを持つ  $t_{2g}$  電子系の化学と物理」（東京大学、1999年12月）
- [106] 藤森淳：光電子分光、超伝導応用基盤技術動向調査委員会、平成11年度「第1回基礎物性小委員会」（超伝導工学研究所、1999年12月）
- [107] 藤森淳：LSCO の光電子分光 - 擬ギャップとストライプ、超伝導マルチコアプロジェクト基礎理論関連動向調査ワーキンググループ研究会「ストライプ構造と擬ギャップおよび磁束状態と超伝導層間結合」（金属材料技術研究所、2000年2月）
- [108] 藤森淳：光電子スペクトルと配置間相互作用クラスターモデル、分子研研究会「遷移金属元素を含む超微粒子の化学と物理」（2000年3月）

## (セミナー)

- [109] 藤森淳：光電子分光で見た高温超伝導と巨大磁気抵抗（東北学院大、1999年7月）
- [110] 藤森淳：強相関系の電子構造、第44回物性若手夏の学校（志賀高原、1999年8月）
- [111] A. Fujimori: High-Resolution Photoemission Spectroscopy of Strongly Correlated Systems (Tata Institute for Fundamental Research, Bombay, India, December 1999)

## 4.5 長谷川研究室

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、固体表面特有の様々な構造と現象につい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すことをめざしている。そのために、表面構造の制御・解析と同時に、表面電子状態や電子輸送特性もあわせて研究している。特に、従来から研究例の少ない低温領域で、新しい表面相転移を見出し、表面電気伝導との関連も明らかにしようとしている。さらに、表面近傍での電子励起やフォノン構造、原子層・分子層の成長構造と電子輸送特性との関連、エレクトロマイグレーションなどの表面質量輸送現象と表面電気伝導との関連など、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。

### 4.5.1 表面電子輸送

#### マイクロ4端子プローブによる表面電気伝導の測定

昨年に引き続き、デンマーク工科大学マイクロエレクトロニクスセンターで開発されたマイクロ4端子プローブ(プローブ間隔;  $4 \sim 20 \mu\text{m}$ )を当研究室所有の超高真空走査電子顕微鏡・MBE装置に組み込み、表面超構造を制御しながらミクロな領域の表面電気伝導度を測定した。昨年、プローブ間隔を数 $\mu\text{m}$ 程度に縮小すると、mm程度の4端子法に比べ、表面感度が1桁以上向上することを見出したが、今年度は、その高感度性を利用して、電気伝導に与える表面欠陥の影響を明らかにできた。すなわち、ステップバンド(単原子高さの表面ステップが50本ほど密集した領域)を跨いで電気抵抗を測定すると、ほとんどステップ・フリーのテラス上で測定した電気抵抗より、はるかに高いことがわかった。Si(111)- $7 \times 7$  清浄表面の場合は約2桁高く、Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ の場合は、約5倍高かった。この結果は、表面電子バンドや表面直下を流れるキャリアがステップ端に散乱されて抵抗を生じていることを直接示している。この結果から、電子波動関数のステップ端での透過率が求められた。[11,16,18,21,30,34,37,38,39,40,43,46,53,54,64,65,66](デンマーク工科大学マイクロエレクトロニクスセンターとの共同研究)

#### 独立駆動型4探針STM装置の開発

4つのプローブが独立してナノメータスケールでポジショニングできる究極的な局所4端子法の測定機器として、「独立駆動型4探針超高真空STM(走査トンネル顕微鏡)装置」を製作し、ほぼ完成した。本装置の特色を挙げると、(1)走査電子顕微鏡による4つの探針位置と試料表面のその場観察が可能、

(2)反射高速電子回折(RHEED)による試料表面の構造のその場観察が可能、(3)それぞれのプローブがSTMと等価な機能を持つ、(4)STM測定と4端子法プローブ測定の機能切り替えを備えた測定系、などである。それぞれのプローブのユニットはOmicron社のマイクロスライドで粗動を、 piezo素子で微動をつかさどっている。プローブ間隔として600nmまで近づけることに成功した。今後、この装置を用いて、(1)4端子法におけるプローブ間隔をミリメートルオーダーからナノメートルオーダーまで変化させたときの表面電気伝導度の変化、(2)単原子層ステップの表面電気伝導度に与える影響、(3)プローブを任意に配置することで、一次元的強い原子配列をもつSi(111)- $5 \times 2$ -Au表面やSi(111)- $4 \times 1$ -In表面などの表面電気伝導度の面内異方性、などについて調べる。[21,37,40,43,53,54,57,62,64,65,66]

#### Si(001)表面上でのAg原子層のunwettingと電気伝導

Si(001)- $2 \times 1$  清浄表面上にAgを蒸着していくと、蒸着膜厚が40原子層程度で電気抵抗が一時的に急上昇することを見出したが、STMによる観察からこの蒸着量では60nm程度のアイランドが形成されていることがわかった。一方、この清浄表面上にわずかに0.5原子層のAgを蒸着して作られるSi(001)- $2 \times 3$ -Ag表面超構造上に同様にAg原子層を成長させた場合には、このような抵抗の急激な上昇が起こらないことを発見した。RHEED、LEED、および光電子分光法による測定から、それぞれのAg原子層の成長様式に大きな違いがあることが明らかとなった。 $2 \times 1$  清浄表面上では、Ag(001)面およびAg(111)面をもつAg原子層が成長しているが、 $2 \times 3$ -Ag表面上では、Ag(001)面の原子層しか成長しない。また、後者が単純な3次元核成長様式をとるのに対し、前者はこれまでは報告の無い複雑な成長様式をとる。すなわち、蒸着量の増加に伴って、Ag(001)面の原子層島がAg(111)島に転移しながらunwettingを起こす。これが、電気抵抗の特徴的な変化の原因であると考えられる。[23,47,61](東京大学理学系研究科スペクトル化学センターとの共同研究)

#### Si(111)- $4 \times 1$ -In表面の電気伝導

Si(111)- $4 \times 1$ -In表面は、擬1次元金属的な表面電子状態を持ち、約130Kに冷却するとパイエルズ転移を起こして電荷密度波(CDW)を形成することを昨年度見出した。我々は、次に、その表面電子バンドの電気伝導を検出しようとしている。伝導度の温度変化はまだ測定できていないが、低温CDW相の表面上に微量のInやAgを追加蒸着すると、CDW相が破壊されることを見出し、そのとき、伝導度が変化するをとらえた。つまりCDW相が破壊され、擬1次元金属相が回復すると伝導度が上昇した。これは、 $4 \times 1$ 相の金属的な表面電子バンドの伝導度を検出している可能性があるため、今後、光電子分

光測定と組み合わせた解析をする予定である。[48]

#### 4.5.2 表面超構造と相転移

低温での Si(111)- $21 \times 21$ -Ag 表面の電子状態

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面を 250 K 以下の低温に保って、その上に 0.2 原子層程度の Ag 原子を追加蒸着すると、 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$  表面超構造が形成され、表面電気伝導度が急増することを我々が見い出している。この表面相の表面電子状態を、筑波 KEK のフォトンファクトリー (PF) において角度分解光電子分光法と内殻光電子分光法を用いて測定した。その結果、フェルミ準位を横切る放物線的な表面電子バンドが見い出され、また、表面空間電荷層は空乏層になっていることも分かった。この結果から、高い表面電気伝導度は、この自由電子的な表面電子バンドに起因することがはっきりした。このような電子状態や伝導特性は、Ag の代わりに Au を吸着させたときに形成される  $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Ag+Au) 表面超構造と酷似している。[24,60] (東京大学理学系研究科スペクトル化学センターおよび物性研究所筑波分室との共同研究)

擬 1 次元構造の電子状態：Ca 吸着 Si(111) 表面

Ca 吸着 Si(111) 表面に形成される一次元的表面超構造の電子状態を調べた。微斜面基板を用いることにより一連の表面超構造をシングルドメインで作成することに成功したので、PF で角度分解光電子分光法によって表面電子バンドを求めた。その結果、 $3 \times 2$ -Ca 表面の表面電子バンドは少なくとも 3 つ在り、半導体的であることがわかった。また、結合エネルギーが最低の  $S_1$  バンドは、その分散の異方性から、縞状構造の列内に局在している一次元的電子状態であることもわかった。内殻準位光電子分光測定では、Si2p 内殻準位にはバルク成分に対して結合エネルギーの低い側と高い側にそれぞれ 1 つの表面成分があることがわかった。これらの結果のうち、 $S_1$  バンドの  $[1 \bar{1} 0]$  方向の分散が大きいこと以外は、アルカリ金属原子吸着による  $3 \times 1$  構造のもの共通するので、互いに類似した構造であると考えられる。現在、これまでに測定した STM の結果などと合わせて、アルカリ金属原子吸着による  $3 \times 1$  構造に対して提唱されている HCC (Honeycomb Chain-Channel) モデルに 2 倍周期の変調を加えた構造モデルを検討している。[22,49] (東京大学理学系研究科スペクトル化学センターおよび物性研究所筑波分室との共同研究)

IV 族原子吸着 Si(111)- $3 \times 3$  表面の CDW 転移

Si(111) 表面上に  $1/3$  原子層の Pb が吸着した時に形成される  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  表面超構造を 150 K 程度に冷却すると、 $3 \times 3$  構造に転移することを昨年までに見出し、調べてきた。今年度、Pb の代わりに Sn を吸着させて同様の観察をしたところ、ほとんど同じ現象が見られた。これらは、Pb または Sn が吸着した Ge(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  表面上で見られる  $3 \times 3$  相への CDW 転移と酷似しており、IV 族原子が作る金属的表面電子状態を持つ  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  表面に共通して現れる現象のようだ。[56,63]

擬 1 次元表面 Si(111)- $4 \times 1$ -In の電子状態

昨年、この表面が 130 K 程度でパイエルズ転移を起こすことを見出したが、今年度、さらに詳しく表面電子状態を調べるため、南バリ大学の放射光施設 LURE で高分解能光電子分光測定を行った。その結果、30 K まで冷やした CDW 相での In 原子の内殻準位エミッションから金属的性質が残っていることが明かとなった。また、フェルミ準位近傍のスペクトルでは、フェルミ端は消えたものの、完全なエネルギーギャップが見えなかった。これらから、パイエルズ転移から期待される単純な金属・非金属転移ではなく、フェルミ液体・非フェルミ液体転移の可能性を検討した。(プロバンス大学および南バリ大学との共同研究)

#### 4.5.3 表面電子励起

Si(111)- $3 \times 3$ -Ag 表面電子バンドの 2 次元プラズモン

固体、液体、電離気体を問わず 2 次元系のプラズマは自然界において珍しく、これまで殆ど観測例がない。最近我々は Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の表面電子バンド中に閉じ込められた、2 次元量子液体とみなせる電子系のプラズマ (シートプラズモン) の測定に成功した。電子系が固体相か液体相かについて検証するため、分散関係を理論と比較した。その結果、弱い相互作用を仮定する RPA 理論とほぼ一致することを明らかにした。同時に、横波モードが観測されなかった事実からこの電子系はウィグナー固体相ではなくフェルミ液体相であることも見出した。さらに、フォノン散乱、不純物散乱以外の未知の減衰プロセスがあることも見出し、この減衰過程に量子液体としての特徴が発現しているとする解釈を提案した。[20,42,45,50,52] (ハノーバー大学固体物理学研究所との共同研究)

## Si(111)- $4 \times 1$ -In 表面の擬 1 次元プラズモン

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面における 2 次元プラズモン (シートプラズモン) の測定に引き続き、今度は異方性の強い Si(111)- $4 \times 1$ -In 表面のプラズモン分散関係の測定を試みた。その結果、2 次元プラズモンの場合と同様に波数 0 の極限で 0 エネルギーへと分散する構造が観測された。この構造は幾つかの分枝の重ね合わせであるらしく、エネルギー損失スペクトルにおける構造は Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の場合に比べてブロードである。これは、この系には複数の金属的表面電子バンドが存在することと矛盾しない。また 1 次元金属性の高い方向からずれた方位で角度分解測定を行うと、エネルギー損失ピークの分散が小さいことがわかり、プラズモン分散に異方性があることが明らかになった。[55] (ハーバー大学固体物理学研究所との共同研究)

## 4.5.4 原子層・分子層の成長

Si 表面上の Bi 超薄膜の異常な成長—S K 様式から完全 F M 様式への移行—

Si(111) 表面上に Bi を蒸着すると最初の数原子層は S K モード (2 次元層の上に 3 次元島が形成) で成長する。しかし、さらに蒸着すると意外なことに大きな格子不整合にもかかわらず層状成長 (F M モード) に移行する。S K から F M への移行において、数原子層の高さを持ったアイランドが界面すべりや、1 層目の wetting layer との質量移動を伴いながらアイランドの方位角を揃えつつ表面平行方向に成長する。この際、最初の 1 原子層で格子ミスフィットは完全に緩和される。全てのアイランドがつながった後に完全な F M 成長 (下地のミスカットが顕著な場合はステップフロー成長) に移行する。ステップの高さは 2 原子層でありバルク Bi と類似の 2 原子層がベアになった 2 次元性の強い構造を持って成長することが示唆された。また成長には蒸着速度などの速度論的な効果は少ないことが判った。[14,25,31,35,59]

### 1 次元テンプレート表面上での金属原子層の成長

Si(111)- $4 \times 1$ -In 表面は、原子配列も電子状態も異方性の強い擬 1 次元的な性質を持つ。そこで、その表面上に原子層を成長させれば、異方性の強い結晶成長が期待できる。実際、室温で Ag 原子層を成長させてみると、 $4 \times 1$  の縞方向に伸びた 1 次元的な Ag 微結晶が成長することが、RHEED および STM の観察からわかってきた。しかし、150 K 程度の基板温度では、そのような異方的な成長は見られない。これらの現象を Ag 原子の表面拡散の異方性から説明することを検討している。[36]

## 4.5.5 表面質量輸送

表面近傍の電場または電流によって、表面上の原子が移動するというエレクトロマイグレーション (表面電気移動) 現象のミクロなメカニズムは、未だ解明されていない。昨年度から、S(111) 表面上に Au を 1 原子層以下吸着させて  $5 \times 2$ -Au、 $\alpha$ - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au および  $\beta$ - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au 表面超構造を準備し、その上での Ag 原子のエレクトロマイグレーションを観察している。その結果、基板表面超構造に依存して、Ag のマイグレーションの様式が著しく異なることを見出したが、その原因は、Au と Ag が作る表面合金相 (Au + Ag = 1 原子層の組成比を満たす全率固溶体的な 2 次元相) の形成に支配されていることが明らかとなった。また、同様の Au 吸着 Si(111) 表面上での In 原子のエレクトロマイグレーションは、Ag 原子と全く異なった。それは、In は Au と表面合金相を作らないことに起因すると考えられる。[13,15,32]

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 B 「走査型 TRAXS (全反射角 X 線分光法) の開発と、それによる表面動的過程の研究」(代表者 長谷川修司)
- ・科研費 基盤研究 B (国際学術) 「表面電子輸送」(代表者 長谷川修司)
- ・科研費 基盤研究 C 「半導体の表面電子準位バンドの電気伝導特性」(代表者 長谷川修司)
- ・科研費 基盤研究 C 「2 次元角度走査型高分解電子エネルギー損失分光装置による表面構造相転移の研究」(代表者 長尾忠昭)
- ・科研費 創成的基礎研究 「表面・界面 — 異なる対称性の接点の物性 —」(代表者 八木克道)
- ・科学技術振興事業団 戦略的基礎研究 「人工ナノ構造の機能探索」(代表者 青野正和)
- ・受託研究 科学技術振興事業団 「半導体表面超構造と表面電気伝導の制御」(代表者 長谷川修司)

< 報文 >

(原著論文)

- [1] C.-S. Jiang and S. Hasegawa: Photoconductivity of the Si(111)- $7 \times 7$  and  $-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surfaces, *Surface Science* **427** (1999, Jun) 239-244.
- [2] H. W. Yeom, S. Takeda, E. Rotenberg, I. Matsuda, K. Horikoshi, J. Schaefer, C. M. Lee, S. D. Kevan, T. Ohta, T. Nagao, and S. Hasegawa: Instability and charge density wave of metallic quantum chains on a silicon surface, *Physical Review Letters* **82** (1999, Jun) 4898-4901.
- [3] D. A. Tsukanov, S. V. Ryzhkov, S. Hasegawa, and V. G. Lifshits: Surface conductivity of submonolayer Au/Si system, *Physics of Low-Dimensional Structures* **7/8** (1999, Aug) 149-154.
- [4] X. Tong, K. Horikoshi, and S. Hasegawa: Structures and electrical conductance of Pb-covered

- Si(111) surfaces, *Physical Review* **B60** (1999, Aug) 5653-5658.
- [5] K. Tsuchie, T. Nagao, and S. Hasegawa: Structure of  $C_{60}$  layers on the Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface, *Physical Review* **B60** (1999, Oct) 11131-11136.
- [6] N. Sato, T. Nagao, and S. Hasegawa: Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface at low temperatures — symmetry breaking and surface twin boundaries, *Surface Science* **442** (1999, Nov) 65-73.
- [7] K. Horikoshi, X. Tong, T. Nagao, and S. Hasegawa: Structural phase transitions of Pb-adsorbed Si(111) surfaces at low temperatures, *Physical Review* **B60** (1999, Nov) 13287-13290.
- [8] N. Sato, T. Nagao, and S. Hasegawa: Two-dimensional adatom gas phase on the Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface directly observed by scanning tunneling microscopy, *Physical Review* **B60** (1999, Dec) 16083-16087.
- [9] X. Tong, C.-S. Jiang, K. Horikoshi, and S. Hasegawa: Surface-state electrical conduction on the Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface with noble-metal adatoms, *Surface Science* **449** (2000, Mar) 125-134.
- [10] T. Nagao and S. Hasegawa: Construction of an ELS-LEED — an electron energy-loss spectrometer with electrostatic two-dimensional angular scanning —, *Surface and Interface Analysis* **29** (2000) 印刷中.
- [11] S. Hasegawa, N. Sato, I. Shiraki, C. L. Petersen, P. Boggild, T. M. Hansen, T. Nagao, F. Grey: Surface-state bands on silicon — Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface superstructure —, *Japanese Journal of Applied Physics* **39** (2000) 印刷中.
- [12] S. Hasegawa, K. Tsuchie, K. Toriyama, X. Tong, and T. Nagao: Surface electronic transport on silicon — Donor- and acceptor-type adsorbates on Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag substrate—, *Applied Surface Science* (2000) 印刷中.
- [13] F. X. Shi, I. Shiraki, T. Nagao, and S. Hasegawa: Substrate-structure dependence of Ag electromigration on Au-precovered Si(111) surfaces, *Japanese Journal of Applied Physics* (2000) 印刷中.
- [14] T. Nagao, T. Sekiguchi, and S. Hasegawa: Epitaxial growth of single-crystal ultrathin film of Bi on the Si(111) surface, *Japanese Journal of Applied Physics* (2000) 印刷中.
- [15] F. X. Shi, I. Shiraki, T. Nagao, S. Hasegawa: Diffusion Anisotropy of Ag and In on Si(111) Surface Studied by UHV-SEM, *Ultramicroscopy* (2000) 印刷中.
- [16] I. Shiraki, C. L. Petersen, P. Boggild, T. M. Hansen, T. Nagao, F. Grey, and S. Hasegawa: Micro-four-point probes in an UHV-scanning electron microscope for *in-situ* surface conductivity measurements, *Surface Review and Letters* (2000) 印刷中.
- (総説)
- [17] S. Hasegawa, X. Tong, S. Takeda, N. Sato, and T. Nagao: Structures and electronic transport on silicon surfaces, *Progress in Surface Science* **60** (1999, Jun) 89-257.
- [18] S. Hasegawa: Atomic imaging of macroscopic surface conductivity, *Current Opinion in Solid State & Materials Science* (2000) 印刷中.
- (国内雑誌)
- [19] 長谷川修司: 電子の海のさざ波, *東京大学理学部廣報* **31/2** (1999, Sep) 8-9.
- [20] 長尾忠昭、長谷川修司: ELS-LEED 法による表面電子バンド中のプラズモンの分散測定、物性研だより (東京大学物性研) **39** (2000, Mar) 39-40.
- (学位論文)
- [21] 白木一郎: マイクロおよびナノ4端子プローブ法による局所表面電気伝導の研究 (博士論文).
- [22] 関口武治: アルカリ土類金属原子が吸着したシリコン表面の構造と電子状態 (博士論文).
- [23] 谷川雄洋: シリコン表面上の銀原子層の成長様式と電気伝導の研究 (修士論文).
- [24] 大内暁: 銀吸着シリコン (111) 表面の低温での電子状態と電気伝導 (修士論文).
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [25] T. Nagao and S. Hasegawa: Growth of single-crystal Bi layer on Si(111) surfaces, The 5th International Conference on Atomically Controlled Surfaces Interfaces and Nanostructures (ACSIN-5), 1999年7月8日 (Aix-en Provence, France).
- [26] H. Aizawa, M. Tsukada, N. Sato, and S. Hasegawa: Asymmetric structure of the Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface, The 5th International Conference on Atomically Controlled Surfaces Interfaces and Nanostructures (ACSIN-5), 1999年7月9日 (Aix-en Provence, France).
- [27] S. Takeda, H.-W. Yeom, N. Sato, T. Nagao and S. Hasegawa: Low temperature STM observation of Si(111)- $8 \times 2$ -In one-dimensional charge density waves, The 5th International Conference on Atomically Controlled Surfaces Interfaces and Nanostructures (ACSIN-5), 1999年7月9日 (Aix-en Provence, France).
- [28] T. Nagao and S. Hasegawa: Development of a high-resolution electron energy loss spectrometer with two-dimensional angular scanning, 9th International Conference of Production Engineerings (9t ICPE), 1999年8月31日 (Osaka, Japan).

- [29] T. Nagao and S. Hasegawa: Construction of an ELS-LEED — an electron energy loss spectrometer with electrostatic two-dimensional angular scanning —, 8th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis (ECASIA'99), 1999年10月8日 (Sevilla, Spain).
- [30] S. Hasegawa, I. Shiraki, C. L. Petersen, P. Boggild, T. Hansen, and F. Grey: Micro-four-point probes for local surface conductivity measurements in UHV, International Symposium on Surface Science for Micro- and Nano-Device Fabrication (ISSS-3), 1999年11月30日 (Tokyo, Japan).
- [31] T. Nagao, T. Sekiguchi, T. Doi and S. Hasegawa: Epitaxial growth of single-crystal ultrathin film of bismuth on Si(111) surfaces, International Symposium on Surface Science for Micro- and Nano-Device Fabrication (ISSS-3), 1999年11月30日 (Tokyo, Japan).
- [32] S. Hasegawa, F. Shi, I. Shiraki, and T. Nagao: Surface electromigration of Ag and In atoms on Au-induced superstructures on Si(111), International Symposium on Surface Science for Micro- and Nano-Device Fabrication (ISSS-3), 1999年11月30日 (Tokyo, Japan).
- [33] S. Hasegawa, N. Sato, T. Nagao, H. Aizawa, and M. Tsukada: Structure of Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface, International Symposium on Surface Science for Micro- and Nano-Device Fabrication (ISSS-3), 1999年11月30日 (Tokyo, Japan).
- [34] S. Hasegawa: Micro- and nano-four-point probes for local surface conductivity measurements in UHV, Symposium on Surface Physics 2000, 2000年1月9日 (Furano, Japan).
- [35] T. Nagao and S. Hasegawa: Growth and Electrodynamics of Surface-Superstructures and Epitaxial Nanofilms on Silicon Surfaces, International Symposium on Nanoscale Magnetism and Transport, 2000年3月10日 (Sendai, Japan).
- [36] S. Ryjkov, T. Nagao, and S. Hasegawa: Epitaxial growth and resistance of Ag on Si(111)- $4 \times 1$ -In surfaces, The 3rd SANKEN International Symposium, 2000年3月15日 (Osaka, Japan).
- [40] S. Hasegawa: Micro- and nano-four-point probes for surface conductivity measurements, The 3rd SANKEN International Symposium, 2000年3月14日 (Osaka, Japan).
- (国内会議)
- 一般講演
- [41] 長谷川修司: 表面輸送、科学技術振興事業団 戦略的基礎研究「量子効果等の物理現象領域 – 人工ナノ構造の機能探索」青野グループ研究会、1999年8月27日 (箱根).
- [42] 長尾忠昭、長谷川修司: 低速電子分光-電子回折によるシリコン表面の電子物性の研究、科学技術振興事業団 戦略的基礎研究「量子効果等の物理現象領域 – 人工ナノ構造の機能探索」青野グループ研究会、1999年8月27日 (箱根).
- [43] 白木一郎、長尾忠昭、長谷川修司: マイクロおよびナノ4端子プローブ法による局所表面電気伝導の研究、科学技術振興事業団 戦略的基礎研究「量子効果等の物理現象領域 – 人工ナノ構造の機能探索」青野グループ研究会、1999年8月27日 (箱根).
- [44] 長尾忠昭、長谷川修司: 高分解2次元角度走査型電子エネルギー損失分光装置、第66回応用物理学学会学術講演会、1999年9月3日 (甲南大学).
- [45] 長尾忠昭、T. Hildebrandt, M. Henzler、長谷川修司: 表面電子バンド中に局在した(2次元?)プラズモン、日本物理学会秋の分科会、1999年9月25日 (岩手大学).
- [46] 白木一郎、田邊輔仁、P. Boggild, C. L. Petersen, F. Grey、長尾忠昭、長谷川修司:  $\mu$ -4 probe 内蔵 UHV-SEM-SREM による表面電気伝導のその場観察、日本物理学会秋の分科会、1999年9月25日 (岩手大学).
- [47] 谷川雄洋、松田巖、長尾忠昭、長谷川修司: Si(001) 表面上の Ag 原子層の un wetting と電気伝導、日本物理学会秋の分科会、1999年9月26日 (岩手大学).
- [48] 長谷川修司、淺沼伸彦、谷川雄洋、長尾忠昭: インジウムが吸着した Si(111) 表面での低温相転移、日本物理学会秋の分科会、1999年9月26日 (岩手大学).
- [49] 関口武治、堀越孝太郎、長尾忠昭、H. W. Yeom、松田巖、大内暁、田邊輔仁、X. Tong、谷川雄洋、原沢あゆみ、木下豊彦、長谷川修司: Si(111)- $3 \times 2$ -Ca 表面の電子状態、日本物理学会秋の分科会、1999年9月27日 (岩手大学).
- [50] 長尾忠昭、長谷川修司: ELS-LEED 法による表面電子バンド中のプラズモンの分散測定、物性研究所研究会シリーズ「物性研究の展望 — 表面・人工物質における 科学のフロンティア —」1999年11月10日 (東京大学).
- [51] 長谷川修司: Electronic growth, 東北大学電気通信研究所 プロジェクト研究会「半導体エピタキシャル成長の原子レベル制御に関する研究」1999年11月11日 (松島).
- 招待講演
- [37] S. Hasegawa: Electrical conduction through ordered atoms on silicon surfaces, Pre-Congress Workshop on "Generation and Verification of Functional Surfaces", IMEKO/TC14, 1999年6月11日 (Tokyo, Japan).
- [38] S. Hasegawa: Surface electronic transport on silicon surfaces, The 5th International Conference on Atomically Controlled Surfaces Interfaces and Nanostructures (ACSIN-5), 1999年7月7日 (Aix-en-Provence, France).
- [39] S. Hasegawa: Surface-state band on silicon, The 7th International Colloquium on Scanning Tunneling Microscopy, 1999年12月10日 (Atagawa, Japan).

- [52] 長尾忠昭, T. Hildebrandt, M. Henzler, 長谷川修司: 表面電子バンド中の低次元電子系のプラズモン分散関係、文部省科学研究費補助金創成的基礎研究費「表面・界面-異なる対称性の接点の物性」第1班・第2班研究会、1999年11月20日(名古屋大学).
- [53] 長谷川修司, 長尾忠昭, 白木一郎, C. L. Petersen, P. Boggild, T. Hansen, F. Grey: 局所表面電気伝導の測定 — マイクロ4端子プローブと4探針STM、科学技術振興事業団 戦略的基礎研究「量子効果等の物理」第3回シンポジウム、1999年12月21日(東京).
- [54] 長谷川修司, 長尾忠昭, 白木一郎: マイクロおよびナノ4端子法による局所表面電気伝導の測定、文部省科学研究費補助金創成的基礎研究費「表面・界面 — 異なる対称性の接点の物性」研究会、2000年1月28日(東京工業大学).
- [55] 長尾忠昭, T. Hildebrandt, M. Henzler, 長谷川修司: Si(111)-4x1-In 表面電子バンド中の擬一次元プラズモンとそのエネルギー分散関係、文部省科学研究費補助金創成的基礎研究費「表面・界面-異なる対称性の接点の物性」第3回ワークショップ「密度波転移などの表面量子物性」、2000年2月3日、東京大学.
- [56] 堀越孝太郎, H.-W. Yeom, 関口武治, 武田さくら, 田邊輔仁, 松田巖, 長尾忠昭, 長谷川修司: 鉛吸着シリコン表面上での整合・不整合転移のSTMおよび光電子分光法による研究、日本物理学会春の年会、2000年3月22日(関西大学).
- [57] 白木一郎, 田邊輔仁, 長尾忠昭, 長谷川修司: 独立駆動型4端子STMによる表面電気伝導の測定、日本物理学会春の年会、2000年3月23日(関西大学).
- [58] 武田さくら, M. Eichman, 服部賢, 大門寛, H. Pfner, 長尾忠昭, 長谷川修司: SPA-LEEDによるSi(111)-4 × 1-In 8 × 2 相転移の温度依存性の測定、日本物理学会春の年会、2000年3月23日(関西大学).
- [59] 長尾忠昭, 関口武治, 長谷川修司: Si(111) 表面上の単結晶 Bi 超薄膜の成長メカニズム、日本物理学会春の年会、2000年3月24日(関西大学).
- [60] 大内暁, X. Tong, 谷川雄洋, 松田巖, 長尾忠昭, 長谷川修司: Si(111)- $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -Ag 表面の電子状態、日本物理学会春の年会、2000年3月24日(関西大学).
- [61] 谷川雄洋, 松田巖, 長尾忠昭, 長谷川修司: Si(001) 表面上の Ag 原子層の un wetting と電気伝導 II、日本物理学会春の年会、2000年3月24日(関西大学).
- [62] 田邊輔仁, 白木一郎, 長尾忠昭, 長谷川修司: 独立駆動型4端子STM装置の開発、日本物理学会春の年会、2000年3月24日(関西大学).
- [63] 堀越孝太郎, H.-W. Yeom, 長尾忠昭, 長谷川修司: Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  3 × 3 相転移のSTMによる研究、日本物理学会春の年会、2000年3月24日(関西大学).
- [64] 長谷川修司: 表面電気伝導の物理とデバイス応用、公開講座「表面・界面 — 異なる対称性の接点の物性 —」、1999年10月28日(東京大学).
- [65] 長谷川修司: 表面シリサイドの電子状態と表面電気伝導、日本化学会第78春季年会 特別企画「物質概念からみた表面化学の新展開 — 原子レベルでの表面物質の生成・構造・物性 —」2000年3月28日(日本大学船橋).
- [66] 長谷川修司: 金属吸着シリコンの電気伝導、第47回応用物理学関連連合講演会 シンポジウム「IV 族半導体の新機能表面・界面」2000年3月29日(青山学院大学).

## (セミナー)

- [67] 長谷川修司: シリコン表面の構造と電気伝導、東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻、1999年6月28日.
- [68] S. Hasegawa: Surface electronic transport, デンマーク工科大学マイクロエレクトロニクスセンター、1999年8月3日.
- [69] 長谷川修司: シリコン表面の電子輸送、名古屋大学大学院工学研究科応用物理学専攻、1999年10月19日.
- [70] 長谷川修司: シリコン表面の構造と電気伝導、大阪大学大学院工学研究科電子工学専攻、2000年2月10日.

## (講義等)

- [71] 長谷川修司: 現代物理学入門(4年生)(分担任当): 原子を観る、触る、手繰る、1999年7月12日
- [72] 長谷川修司: 現代実験物理学 I (3年生)(分担任当) 1999年度夏学期
- [73] 長谷川修司, 長尾忠昭, 堀越孝太郎 (TA): 物理学実験 II (3年生) 表面物性、1999年度冬学期
- [74] 長谷川修司: 半導体表面の構造と物性、集中講義(名古屋大学大学院工学研究科応用物理学専攻) 1999年10月18-20日.
- [75] 長谷川修司: 物性物理学特論(4年生、大学院「表面物理学」と共通講義)(分担任当) 1999年度冬学期

招待講演

## 4.6 福山研究室

福山研究室では室温以下  $\mu\text{K}$  に至る広範な低温領域で発現する様々な量子多体現象および相転移現象、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 ( $\text{He}$ )、電荷密度波や超伝導を示す層状物質、疑一次元伝導体などを対象に研究している。

量子多体現象を研究する上で、液体および固体  $\text{He}$  を実験対象とするメリットは以下に集約される。

(1) 我々が実験室で扱うことのできる凝縮系の中で最も純度の高い試料が得られる。

(2)  $\text{He}$  原子は構成粒子として非常に単純で (低温では剛体球と見なせる)、2 原子間相互作用 (Lennard-Jones 型) も精密に知られている。また、完全に単一成分の凝縮系を構成することができる。これらは第 1 原理からの理論計算との定量的な比較すら可能にする。

(3) 異なる量子統計に従う原子間相互作用の等しい  $^3\text{He}$  (フェルミ粒子) と  $^4\text{He}$  (ボース粒子) という安定同位体が存在する。また、両者の一様な混合液体も安定して存在する。

こうした構造の単純さとは裏腹に液体および固体  $\text{He}$  が極 / 超低温域で示す物性の多様性には驚くべきものがあり、まさに多体効果あるいは協力現象の妙と言うべきである。

当研究室は、平成 10 年 4 月に福山が筑波大学物理学系より転任して発足した。今年度は、我々が筑波大学において開発した超低温走査トンネル顕微鏡 ( $1\text{K}$  以下の低温下で原子分解能を有する世界で最初の STM 装置) の性能を圧倒的に向上させた第 2 世代の超低温走査プローブ装置の基本設計を終え、一部の建設を終えた。システム全体として平成 12 年 9 月からの稼働開始を目指している。さらに、 $100\ \mu\text{K}$  以下の超低温域での物理実験を可能とする核断熱消磁冷凍機の建設にも着手した。こちら平成 13 年 1 月からの稼働を目指して現在急ピッチで建設が進んでいる。これらは文部省科学研究費補助金特別推進研究 (平成 10-14 年度: 樽茶研究室との共同研究) のもとでおこなわれている。

一方、本学物性研究所と高磁場中の  $^3\text{He}$  融解圧曲線測定に関して共同研究を行い、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の国際共同研究 (平成 9-11 年度) の一環として米国 Stanford 大学、California 大学 Berkeley 校、Northwestern 大学との国際研究交流も推進した。平成 12 年 1 月には米国ハワイ大学において第 2 回 NEDO 量子液体固体国際シンポジウムを主催者の一人として開催し、外国人 21 名、日本人 15 名の専門家の出席を得て、量子液体固体研究に関する国際交流を深めた。

### 4.6.1 2 次元および 3 次元の固体 $^3\text{He}$ の核磁性と原子のトンネル運動の研究

熱力学の第 3 法則によれば、物質の温度を絶対零度に向けて限りなく下げてゆくとエントロピーはゼ

ロに近づき、ただ一つの基底状態が実現するはずである。3 次元の磁性体の場合、各サイトのスピンの向きの平均値が有限となる長距離秩序相あるいはスピングラス相が基底状態となる。しかし、1、2 次元系では“量子スピン液体”状態と呼ばれる新しいタイプの基底状態が実現すると考えられている。ここではフラストレーション効果のために絶対零度でもスピンの向きが時間的に揺らぎ、平均値はゼロにとどまる。

固体  $^3\text{He}$  の核スピン ( $S = 1/2$ ) 間には、隣接原子が強い零点振動のためトンネル効果で互いに位置交換するために生ずる交換相互作用が働く。このトンネル運動は周囲に自由空間の多い方が起きやすいので、格子間隔が広いほど相互作用が強いこと、2 体から 6 体程度までの多体交換が重要であること (MSE モデル)、など電子系の磁性体にはないユニークな特徴をもつ。さらに、偶数個の原子のリング交換は反強磁性的、奇数は強磁性的の相互作用を与えるので、相互作用の競合も密度とともに大きく変化し、それをコントロールすることができる。

我々は現在実験的に得られる恐らく最も理想的な 2 次元および 3 次元の局在スピン系であるグラファイト表面に吸着した  $^3\text{He}$  単原子層膜およびバルクの固体  $^3\text{He}$  の核磁性を調べることにより、相互作用の競合、フラストレーション、次元性、相転移の問題を研究している。[1, 16, 17]

### サブモノレイヤー $^3\text{He}$ の 2 次元核磁性

我々は以前、グラファイト表面に吸着した第 2 層目の低密度領域の反強磁性相 (全面密度  $\rho = 18.2 \sim 18.4\ \text{nm}^{-2}$ ) について、量子スピン液体状態を強く示唆する比熱のダブルピーク構造と、高温域の比熱の温度依存性の異常 ( $C \propto 1/T$ ) を見出した。多体交換相互作用の大きさは周囲の原子の配列に敏感なので、吸着基盤や下層および上層の結晶構造によって  $^3\text{He}$  単原子層膜の磁性が変わる可能性がある (2 層目の下地は 1 層目、1 層目の下地はグラファイト表面)。そこで本研究では、吸着第 1 層のサブモノレイヤー固層の比熱 ( $C$ ) を交換相互作用に比べて十分低い  $100\ \mu\text{K}$  まで測定することにより、吸着 2 層目の磁性との相違を調べた。

実験結果は広い密度範囲 ( $6.1\ \text{nm}^{-2} \leq \rho \leq 8.7\ \text{nm}^{-2}$ ) にわたって  $C \propto T^n$  ( $-2 \leq n \leq -1$ ) の奇妙な温度依存性が  $0.1\ \text{mK} \leq T \leq 80\ \text{mK}$  という 2 桁以上にわたる広い温度範囲で観測された (図 4.6 a)。この系は局在スピンモデルで良く近似できると考えられるので、交換相互作用に比べて十分高温でも  $n = -2$  に漸近しないのは奇妙である。一つの可能性として多体の交換相互作用間の競合が強く、フラストレーションが強いことがその原因かもしれない。 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  整合相から非整合相へかけての中間密度領域 ( $6.6\ \text{nm}^{-2} \leq \rho \leq 7.5\ \text{nm}^{-2}$ ) では  $n = -0.8$  と最も異常であるが、そこでの磁性は強磁性的であることが帯磁率測定から分かっている。これに対して、同じように異常な  $n = -1$  の振る舞いがほぼ同じ面内密度をもつ 2 層目の反強磁性相で見られてい

る。また、図 4.6 a を見ると  $\rho = 7.6, 8.5 \text{ nm}^{-2}$  付近では、 $n$  の値がスパイク的に正常値 ( $n = -2$ ) に近づくことが分かる。交換相互作用の競合が面密度依存性の関数としてこのように複雑な変化を示す背後には、サブモノレーヤー  $^3\text{He}$  の構造、例えば整合相と非整合相の間のドメイン壁構造などの複雑な面密度依存性が隠されているのかも知れない。原子の交換経路は固相の結晶構造やドメイン壁構造に非常に敏感であることが予測される。[2, 7]

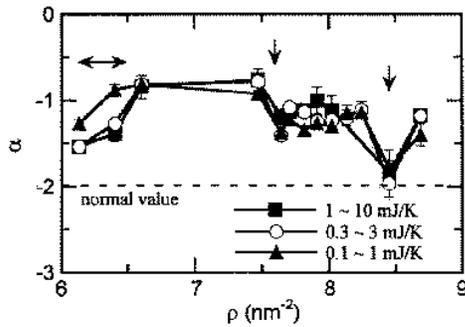


図 4.6 a: サブモノレーヤー固体  $^3\text{He}$  の比熱の温度依存性 ( $C \propto T^n$ ) の面密度変化。

### $^3\text{He}$ 単原子層膜の 2 次元核磁性に対する磁場効果の研究

我々は最近、グラファイト上に吸着した第 2 層目の 2 次元固体  $^3\text{He}$  の反強磁性相の比熱測定から  $300 \mu\text{K}$  以下の超低温で量子スピン液体状態が実現している可能性を指摘した。もし本当にそうであるならば、磁化曲線にはスピンギャップの大きさに応じて磁化が大きく立ち上がる閾磁場が観測されるはずである。また、これまでの実験および MSE モデルに基づく理論の予測どおり 4 体交換相互作用が本当に支配的ならば、飽和磁化の半分の値に磁化曲線にプラトーが現れるはずである。一方、外部磁場を印かすることで比熱の温度依存性もダブルピークからシングルピークに移り変わるはずである。こうした数々の予測を確かめるため、 $100 \mu\text{K}$  以下の超低温、 $1 \text{ T}$  に至る高磁場下で  $^3\text{He}$  単原子層膜の核磁化曲線と比熱を測定できるファラデー型磁化率計と比熱セル、そして核断熱消磁冷凍機を開発している。

我々が開発しているファラデー型磁化率計は磁場勾配中で磁気モーメント ( $m$ ) をもつ試料にかかる力をダイアフラムの変位による静電容量の変化として測定するもので、SQUID では対応できないような高磁場中まで使用することができる。ダイアフラムの材質としては、超低温下での実験に対応するため熱リンクを兼ねた銀フォイル (厚さ  $50 \mu\text{m}$ ) を用いている。またその両面には  $^3\text{He}$  試料の吸着基盤であるグラフォイル (劈開性グラファイト、厚さ  $0.13 \text{ mm}$ 、表

面積  $= 1.5 \text{ m}^2$ ) を熱圧着してある。微小な永久磁石 ( $m = 4.7 \times 10^{-4} \text{ JT}^{-1}$ ) をテスト試料としてダイアフラムに貼り付けて行った  $T = 77 \text{ K}$  における予備実験の結果、グラフォイルを熱圧着しない場合; 分解能  $\Delta m = 6 \times 10^{-11} \text{ JT}^{-1}$ 、ヒステリシス  $0.2\%$  以下、グラフォイルを熱圧着した場合;  $\Delta m = 2 \times 10^{-11} \text{ JT}^{-1}$ 、ヒステリシス  $2\%$  以下であった。我々はこの結果から、ブリッジ法を用いてバックグラウンドとなるグラファイト自身の反磁性をキャンセルする機構を併用することにより、微小な  $^3\text{He}$  単原子層膜の核磁化を測定可能であると判断している。[5, 11, 20]

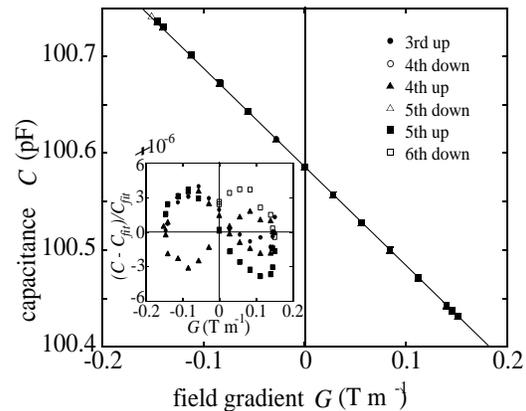


図 4.6 b: 永久磁石の微小片を乗せた銀フォイル-ダイアフラムに磁場勾配を印かしたときのキャパシタンス変化。挿入図は磁場勾配を掃引したときのヒステリシスループを示す。

また図 4.6 c は、平成 13 年 1 月からの運転をめざして現在建設中の銅の核スピンを利用した断熱消磁冷凍機的设计図である。この冷凍機は  $^3\text{He}$  単原子層膜の実験に限らず、広く  $100 \mu\text{K}$  以下の超低温域での物理実験に用いられる予定である。

### 極低温・高磁場下における $^3\text{He}$ 融解圧温度スケールの確立

近年  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  希釈冷凍機と超伝導マグネットの技術は完成されたものになり、市販品を用いて  $10 \text{ mK}$ 、 $15 \text{ T}$  という極低温・高磁場の複合極限環境が比較的容易に手に入るようになった。ところがこうした極限環境を生成する技術に比して、極低温域での测温技術の確立は相対的に遅れている。特に  $10 \text{ T}$  程度の高磁場下になると、 $50 \text{ mK}$  の温度でも満足に使用できる市販の温度計はない。例えば  $\text{RuO}_2$  抵抗温度計の場合、 $25 \text{ mK}$ 、 $5 \text{ T}$  で  $15\%$  もの磁場変化があり、それ以下の温度ではゼロ磁場下でも正確な测温は困難である。これは、極低温になると素子の熱抵抗や被测温物との間の界面熱抵抗 (カピッツァ抵抗) が急速に大きくなり、微小な外部電磁ノイズや

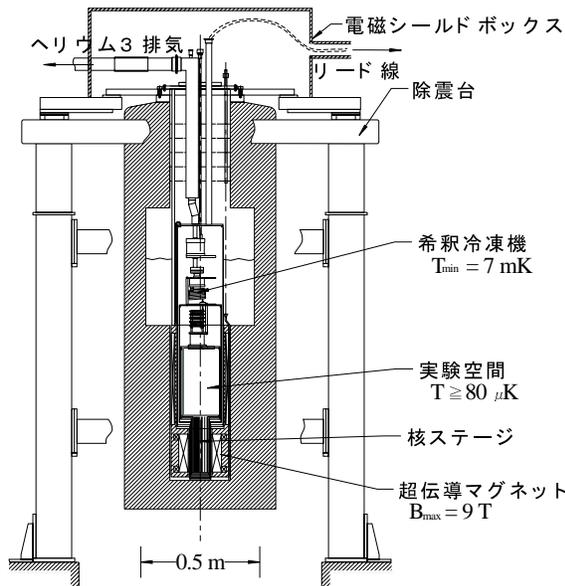


図 4.6 c: 建設中の核断熱消磁冷凍機。振動や電磁波によるヒートリークを防ぐために除震架台と電磁シールドボックスが設置されている。

自己発熱によって被測温度と温度計の間に温度差が生じるという抵抗温度計に共通の技術的困難があるからである。

これに対して、ゼロ磁場下の  $^3\text{He}$  融解圧曲線は、1) 測温精度、再現性が非常に高い、2) 測温範囲が  $1\text{ mK} \leq T \leq 750\text{ mK}$  と広い、3) 熱緩和時間が比較的短く、数 mK でも 20~30 秒と実用的、4)  $^3\text{He}$  試料の高純度化が容易で、融解圧力と温度の関係は素子の形状に依らない、5) 融解曲線上に温度と圧力の定点が複数存在するので自己較正ができる、等々の優れた特徴を有し、最近では mK 域での温度スケールとして事実上の国際標準となっている。

本研究では、こうしたゼロ磁場下の  $^3\text{He}$  融解圧温度計 (MCT) の高い性能を維持しつつ、これを高磁場中でも作動する温度計あるいは温度スケールとして活用することを提案するため、 $0.5\text{ mK} \leq T \leq 140\text{ mK}$  の温度範囲で  $^3\text{He}$  融解圧曲線を 15 T の高磁場中まで初めて精密に測定した。図 4.6 d は実際の実験データであるが、 $T = 25\text{ mK}$ 、 $B = 5\text{ T}$  でも磁場補正は 2% と非常に小さく、挿入図にあるように補正量の温度および磁場依存性は簡単な関数形で表されることが分かる。今後、この温度スケール ( $P-T-B$  関係式) が世界的に認知されることにより、極低温・高磁場下での測温確度が飛躍的に高まり、簡便で安価ではあるが磁場補正が大きな他の 2 次温度計 (例えば抵抗温度計) を高磁場中で MCT に対して直接比較校正することができるようになった。

融解曲線の温度勾配は、2 相共存しているフェルミ縮退した液体  $^3\text{He}$  のエントロピーと固体  $^3\text{He}$  のスピンエントロピーの差で決まる。このことを利用して、測定した融解圧曲線データから融解密度 (24.21

$\text{cm}^3/\text{mol}$ ) の固体  $^3\text{He}$  (bcc 相) の核磁気秩序温度 ( $T_c$ ) を決定し、その磁場依存性を従来より約 2 倍高い磁場まで決定した。その結果、 $T_c$  は約 10 T で最大値をもつ reentrant な形状をしていることが判明した。これはすでに知られている高密度試料 ( $22.69\text{ cm}^3/\text{mol}$ ) のそれと定性的に同じで、各種の多体交換相互作用の体積依存性に顕著な差はないことが分かる。[10, 13, 19]

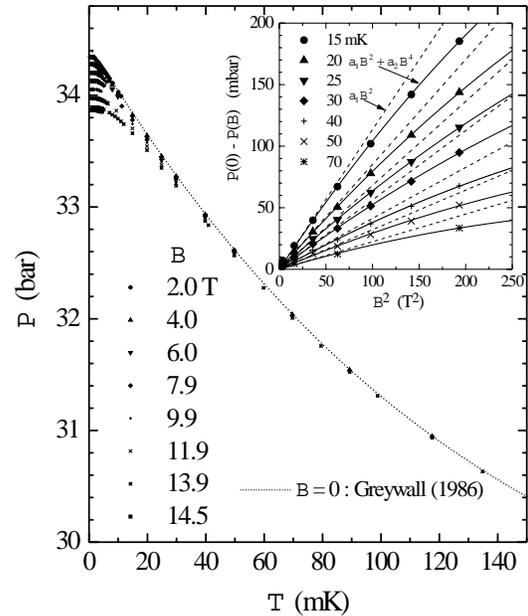


図 4.6 d: 高磁場中 ( $B \leq 14.5\text{ T}$ ) における  $^3\text{He}$  融解圧曲線の測定結果。挿入図は温度一定のときの融解圧力の磁場変化とその関数フィッティング。

#### 4.6.2 超低温走査プローブ顕微鏡の開発

超低温 ( $T \geq 20\text{ mK}$ )、高磁場 ( $B \leq 6\text{ T}$ )、超高真空 ( $P \leq 10^{-8}\text{ Pa}$ ) の複合極限環境下で原子分解能をもって作動する新型の超低温走査プローブ顕微鏡 (ULT-SPM) の設計を行い、建設を開始した。我々は以前、希釈冷凍機温度 ( $T \geq 80\text{ mK}$ ) で原子分解能を有する超低温走査トンネル顕微鏡 (ULT-STM) を初めて開発し (当時は筑波大学)、2 次元固体  $^4\text{He}$  の STM 観測で注目すべき結果を得た。しかし、この装置では外部磁場を印加することはできず、試料も層間 Van der Waals 結合した層状物質に限られていた。その後、米国カリフォルニア大学バークレー校の J. C. Davis 教授のグループが  $^3\text{He}$  冷凍機温度 (300 mK) の STM を製作し、酸化物高温超伝導体表面の不純物原子近傍の STM 観測で重要な成果をあげた。ただこの装置は、低温劈開して清浄表面を得ることができる劈開性試料に限定されている。

我々の新型 ULT-SPM は、あらゆる点でこれら先行装置を上回る高いポテンシャルをもっている。まず、動作温度が 20 mK とこれまでで最も低い。試料の清浄表面を超高真空チャンバー内で作成し、低速電子線回折 (LEED) で評価したのち、超高真空環境を破ることなく STM 観測室に搬送できるので、これまで手ではなかった金属 / 半導体表面を含むほとんどの伝導性物質を対象とすることができる。また、STM 観測室は希釈冷凍機の断熱真空槽から隔絶されているので、表面吸着系の実験にも対応できる。試料 / 探針の交換を 2 K 以下の極低温を維持したまま行うので、交換後最低温度に戻るまでに要する時間が約 3 時間と短く、測定的大幅なスピードアップが望める。さらに、光学窓を通して光励起した状態で STM 実験をすることも可能である。STM 探針を自動式カンチレバーに交換することにより、比較的簡単に原子間力顕微鏡として使用することもできる。[15]

具体的にはこの装置を使って次のような研究を予定している。

- (1) 吸着希ガス単原子層の STM 観察と構造。
- (2) 表面吸着希ガス原子系で予測される単一原子のトンネル現象などの実験的検証。
- (3) エキゾチック超伝導体の対称性および磁場中の量子渦糸状態の研究。
- (4) 電荷密度波 (CDW) 状態のスライディング転移に対する量子効果と格子欠陥の役割。

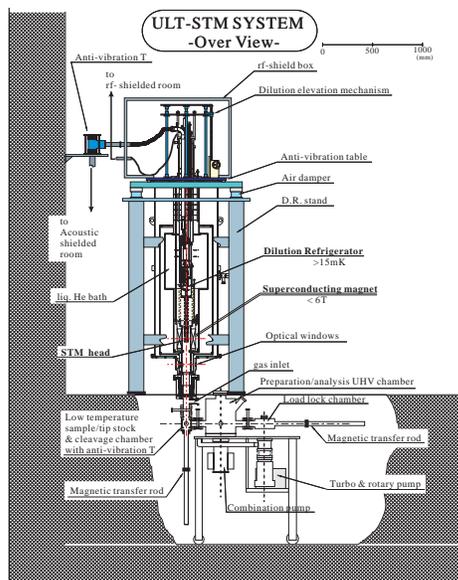


図 4.6 e: 建設中の超低温 SPM 装置。探針 / 試料は希釈冷凍機の底部からトランスファーロッドを使って極低温・超高真空を維持したまま搬送入される。探針 / 試料の表面処理と分析は、希釈冷凍機底部から横方向に展開した超高真空チャンバー内で行われる。

#### 4.6.3 異方的超伝導 / 超流動体の研究

超伝導や超流動状態はミクロな世界の法則である量子力学がマクロなスケールで顔を出したコヒーレントな基底状態である。酸化物高温超伝導体では超流動  $^3\text{He}$  (p 波スピン 3 重項) のようにクーパー対の空間分布が異方的 (非 s 波) な対称性をもつ BCS 状態が実現していると考えられている (この場合、d 波スピン 1 重項)。伝導を担う  $\text{CuO}_2$  面のもつ 2 次元性が高転移温度とどう関係しているのか、電子間引力の機構は何か、などその機構解明が急がれている。我々は層状物質  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  および  $\text{MX}_2$  (M: 遷移金属原子, X: カルコゲン原子)、超流動  $^4\text{He}$  薄膜上に浮かんだ  $^3\text{He}$  単原子層膜などをモデル物質として、電子-格子相互作用以外の引力機構に基づく超伝導機構、異方的超伝導体の量子渦糸状態、2 次元の BCS 状態など新奇な超伝導現象の解明に取り組んでいる。

#### 低温 STM を用いた $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の超伝導相の研究

$\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  ( $T_c = 1.5\text{ K}$ ) は酸化物高温超伝導体と同じ層状ペロブスカイト構造をもつ物質の中で、銅を含まない唯一の超伝導体として知られている。最近の研究では、この物質も超流動  $^3\text{He}$  と同様にスピン 3 重項のクーパー対をもつと考えられている。さらに興味深いことに、過剰な Ru 金属 ( $T_c = 0.49\text{ K}$ ) が内部析出した試料では  $T_c$  が 2 倍も上昇することが報告されている。我々は、この物質について小型の低温 STM 装置を用いたトンネル分光実験をごく最近開始した。まず  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  単結晶試料 (京都大学前野研究室から供与) を 4.2 K の極低温に冷却して超高真空を得たのち劈開して清浄表面を得ることのできる低温劈開装置を製作した。これは実際低温下で劈開してトンネル電流を検知できることを確認した。今後、析出した微小 Ru 金属領域 (数  $\mu\text{m}$  サイズ) 近傍の超伝導ギャップの空間変化を詳細に調べる予定である。また、前述の ULT-SPM 装置の完成を待って、磁場中での渦糸格子および渦芯構造の観測を行う準備も進めている。

#### 4.6.4 相転移の物理

##### 急速な 2 次相転移で生成される位相欠陥の観測

物質中で 2 次の相転移が急速に起こると、空間の各点に生じた低温相 (対称性の低い相) の微小領域が互いに異なる秩序変数をもったまま成長し、多数の幾何学的な位相欠陥を生成することが予測されている。超流動体や超伝導体の場合この欠陥は量子渦糸であり、渦芯に高温相 (対称性の高い常流動 / 常伝導相) が閉じこめられている。これは物質中の相転移に限ったことではなく、急速な 2 次の相転移に一般的な現象である。例えばビッグバン後の初期宇宙で起きたと信じられている Higgs 機構による真空の相転移においても、もしそれが急速な 2 次相転移であるならば同様に多くの位相欠陥 (宇宙ひもなど) を生

じた可能性がある (Kibble-Zurek 機構)。これが直ちに現在観測される宇宙の背景輻射や銀河団の空間的非一様性と結びつくかどうかは単純でないが、この一般的な現象は超流動  $^4\text{He}$  や  $^3\text{He}$  を使って実験室の中で繰り返し精密に調べることが可能である。

最近我々は、超流動  $^4\text{He}$  が急速にラムダ転移する際に生成するであろう量子渦糸の密度を第 2 音波の減衰によって調べる実験を開始した。第 2 音波とは超流動成分比が空間的に波として伝播する超流動相特有の秩序変数の集団運動で、その減衰量は渦糸密度に敏感である。まず第一段階として熱パルス法で第 2 音波を高感度に検出できることを確かめた。次に、ラムダ転移温度の圧力依存性を利用した減圧法で急速相転移させて他グループの実験を追試する。しかし、この方法は流体力学的な擾乱の結果生成する渦糸の効果を取り除く必要がある点や、実験温度がラムダ転移直下に限定されるので生成した渦糸の寿命が短いという欠点がある。そこで新たな試みとして十分低温に冷却した超流動  $^4\text{He}$  に  $\gamma$  線を照射して局所的に急速加熱 / 冷却し、これを前者の結果と比較することを計画している。この実験では、液体 He を対象物質とすることでほとんど不純物による heterogeneous な効果を心配しなくて良いという事実がポイントである。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Hiroshi Fukuyama and Masashi Morishita: A Possible Quantum Spin-Liquid State in Antiferromagnetic 2D Solid  $^3\text{He}$ , *Physica B* **280**, 104-105 (2000).
- [2] M. Morishita, H. Nagatani, and Hiroshi Fukuyama: Nuclear-Spin Heat Capacities of Submonolayer Solid  $^3\text{He}$  Adsorbed on Graphite, *Physica B* **284-288**, 220-221 (2000).
- [3] M. Morishita, H. Nagatani, and Hiroshi Fukuyama: Excess Heat-Capacities of  $^3\text{He}$  Films adsorbed on Grafoil, *Physica B* **284-288**, 228-229 (2000).
- [4] K. Yokota, G. Kurata, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Superconductivity in the Quasi Two-Dimensional Conductor 2H-TaSe<sub>2</sub>, *Physica B* **284-288**, 551-552 (2000).
- [5] Y. Matsumoto, J. Taniguchi, and Hiroshi Fukuyama: Construction of a Faraday Magnetometer for Studies of Monolayer Magnetic Films, *Physica B* **284-288**, 2041-2042 (2000).
- [6] H. Kambara, S. Kishishita, and T. Mamiya: Specific Heat due to Amorphous Surface Layers in Liquid and Solid  $^3\text{He}$ , *Physica B* **284-288**, 204-205 (2000).

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [7] M. Morishita, H. Nagatani, and Hiroshi Fukuyama: Nuclear-Spin Heat Capacities of Submonolayer Solid  $^3\text{He}$  Adsorbed on Graphite, *22nd International Conference on Low Temperature Physics* (Helsinki, Finland, Aug. 1999).
  - [8] M. Morishita, H. Nagatani, and Hiroshi Fukuyama: Excess Heat-Capacities of  $^3\text{He}$  Films adsorbed on Grafoil, *22nd International Conference on Low Temperature Physics* (Helsinki, Finland, Aug. 1999).
  - [9] K. Yokota, G. Kurata, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Superconductivity in the Quasi Two-Dimensional Conductor 2H-TaSe<sub>2</sub>, *22nd International Conference on Low Temperature Physics* (Helsinki, Finland, Aug. 1999).
  - [10] K. Yawata, D. Ito, H. Ikegami, H. Ishimoto, and Hiroshi Fukuyama:  $^3\text{He}$  Melting Pressure in High Magnetic Fields up to 14.5 Tesla, *22nd International Conference on Low Temperature Physics* (Helsinki, Finland, Aug. 1999).
  - [11] Y. Matsumoto, J. Taniguchi, and Hiroshi Fukuyama: Construction of a Faraday Magnetometer for Studies of Monolayer Magnetic Films, *22nd International Conference on Low Temperature Physics* (Helsinki, Finland, Aug. 1999).
  - [12] H. Kambara, S. Kishishita, and T. Mamiya: Specific Heat due to Amorphous Surface Layers in Liquid and Solid  $^3\text{He}$ , *22nd International Conference on Low Temperature Physics* (Helsinki, Finland, Aug. 1999).
  - [13] K. Yawata, D. Ito, H. Ikegami, H. Ishimoto, and Hiroshi Fukuyama:  $^3\text{He}$  Melting Pressure in High Magnetic Fields up to 14.5 Tesla, *International Symposium on Ultralow Temperature Physics* (St. Petersburg, Russia, Aug. 1999).
  - [14] H. Kambara, S. Kishishita, and T. Mamiya: The Origin of the Anomalous Specific Heat in Solid  $^3\text{He}$ , *International Symposium on Ultralow Temperature Physics* (St. Petersburg, Russia, Aug. 1999).
  - [15] H. Kambara, T. Matsui, and Hiroshi Fukuyama: Development of a new ULT-SPM at Univ. of Tokyo, *NEDO 2nd International Workshop on Quantum Fluids and Solids* (Honolulu, U.S.A., Jan. 2000).
- 招待講演
- [16] Hiroshi Fukuyama and Masashi Morishita: A Possible Quantum Spin-Liquid State in Antiferromagnetic 2D Solid  $^3\text{He}$ , *22nd International Conference on Low Temperature Physics* (Helsinki, Finland, Aug. 1999).
  - [17] Hiroshi Fukuyama: Magnetism in 3D and 2D Solid  $^3\text{He}$ , *NEDO 2nd International Workshop on Quantum Fluids and Solids* (Honolulu, U.S.A., Jan. 2000).

(国内会議)

一般講演

- [18] 横田健一、倉田剛大、松井朋裕、福山 寛: 遷移金属ダイカルコゲナイド  $2\text{H-TaSe}_2$  の超伝導相の研究、日本物理学会 1999 年秋の分科会 (岩手大学、1999 年 9 月)
- [19] 八幡和志、伊藤大介、石本英彦、福山 寛: 超低温・高磁場中におけるヘリウム 3 融解圧曲線の研究 (V)、日本物理学会 1999 年秋の分科会 (岩手大学、1999 年 9 月)
- [20] 松本洋介、八幡和志、神原 浩、福山 寛: 磁気単原子層膜のためのファラデー型磁束計の開発、日本物理学会 1999 年秋の分科会 (岩手大学、1999 年 9 月)

積の大きい場合の統計的性質がモデルで説明し得ることを示した。[8]

## 5 一般物理理論

### 乱流場の渦構造の実験観測

回転乱流における高レイノルズ数 ( $\sim O(10^4)$ ) での渦度場の振舞いが、高速度カメラを用いて観測された。乱流場の圧力信号を測定し、確率分布を求めた。圧力分布の正負非対称性を確認し、渦モデルによる統計理論と比較した。[10, 11]

### 5.1 神部研究室

#### 5.1.1 乱流の研究

##### 乱流場の渦構造と統計法則

乱流場には、強い渦度が管状に集中した worm 構造がランダムに分布している。渦度方程式の漸近定常解であるバーガス渦でこれをモデル化することで、乱流場の諸性質が良く説明し得ることを明らかにした。特に、乱流場に特有なスケーリング領域である慣性領域において指数分布を与える 2 点間速度差が得られたのは、これまで理論的にはほとんど説明されていない結果である。また、高次構造関数は実験や DNS で得られた結果に非常に近い異常スケーリングを示す。これは、マルチフラクタルの具体例とみることができる。[1, 3, 12, 13, 14, 15, 19]

##### 乱流場の条件付統計法則の研究

一様等方性乱流の縦速度増分の確率密度関数を、条件付平均を用いて解析した。まず直接数値計算によって得られた乱流場から条件付平均の振舞いを計測した。次にそれ自身の持つ物理的な意味からモデル化を行った。これらから、確率密度関数の形の変化と局所構造との関連を見た。[1, 3, 12, 13, 14, 15, 19]

##### 乱流への遷移の研究

層流-乱流遷移過程における速度場を解析するため、チャンネル流及び平板境界層の大規模直接数値計算を行った。これにより、TS 波型の遷移過程における渦構造の変化をとらえることができた。[4]

##### 乱流の循環の統計法則の研究

乱流場の速度循環の統計法則について、一様等方性乱流場の DNS データ解析とモデル解析を行なった。乱流の渦度場をフィラメントに対応する強い部分と弱い部分に分解して、現行の乱流データ (レイノルズ数  $R_\lambda = 89.5$ ) では、弱い部分の循環の確率分布関数 (PDF) は積分路の張る面積についてほぼ自己相似的であることが示された。強い部分は渦フィラメントのランダムな分布のモデルを導入して、面

#### 5.1.2 渦輪と衝撃波の相互作用

衝撃波が高速の渦輪に入射する問題を考える。この問題には、圧縮性の縦波 (衝撃波) と横波の性質を持つ渦運動との強い相互作用があり、更に衝撃波が非一様の流れ場に入射するという、複雑化要因が存在する。この現象を実験による可視化とコンピュータ・シミュレーションにより解析する。

渦輪と衝撃波の相互作用の散乱音波をシャドウグラフ写真から観測した。マイクロフォン測定によって得られた散乱音波のイメージとコンピュータシミュレーションで得られた密度分布を幾何光学を用いることによって比較し、両者がよく一致することを示した。また、散乱音波の波形についても幾何音響学で説明のつく可能性があることが分かり、散乱波を実験的に同定することができた。

また渦輪自身についても熱線風速計を用いた速度場の測定を行ない、シャドウグラフ写真と併用することでコア半径、リング半径の値を決めることができた。[5]

#### 5.1.3 数理流体力学

##### 流体運動および力学系のヤコビ場

完全流体の流れのラグランジュ的記述は、体積保存の微分同相写像群上の測地線で表せる。その群の要素は、オイラーの運動方程式の解から得られる各時刻の流体粒子の配位を表している。流れのラグランジュ的記述は、もし微分幾何学的方法に依らないならば、従来の流体力学でなされているように、初歩的段階に留まらざるをえない。

ヤコビ場は測地線上のリーマン曲率テンソルによって支配され、隣りあう測地線の安定性を特徴づける。2 次元流体運動および ABC 流の断面曲率はほとんどが負であることが知られている。この性質は流体粒子の混合に関係している。そこで、流体力学系のヤコビ場と、剛体の自由回転運動、渦糸系、あるいは KdV 系のような可積分系のヤコビ場とを比較してみることは意味がある。可積分系の断面曲率は、例外はあるが、ほとんどが正であることが導かれた。

### 5.1.4 微分幾何学的手法による力学系の安定性解析

Lie-Poisson 構造をもつ力学系の解は、対応する Lie 群上の測地線として定式化されることが知られている。本研究の目的は、測地線方程式を拡張することにより、より広いクラスの力学系の解を Lie 群上の曲線として定式化し、その安定性を微分幾何を用いて解析することである。

本研究では、多様体上の測地線方程式に接空間の線形写像を付け加えることによりこれを拡張し、その線形化方程式を導出した。そして、粘性流体の運動が、微分同相写像群上の拡張測地線として定式化されることを示した。さらに、拡張測地線の線形化方程式が、Lagrange displacement の発展方程式に一致することを示した。[17, 18, 9] .

### 5.1.5 柱状物体の抵抗と渦放出

柱状物体に一樣流があたる問題において抵抗の小さな断面形を見いだされた。円柱に比べて抗力が 2 割低減されるが、抗力減少の流体力学的メカニズムについて、物体後流の渦構造の時間的変化との関係を詳細に調べた。[1, 7, 16, 19]

### 5.1.6 渦と波の相互作用

鉛直渦に水面波が相互作用する問題は、渦度を磁場、速度を磁気ベクトルポテンシャルに対応させると、量子力学における Aharonov-Bohm 効果と類似する。渦の大きさが水面波の波長より十分大きい場合には、入射波は正弦波でなく転位波となる。流体方程式から背景流を考慮した波動方程式を導き、渦による入射転位波の散乱問題を定式化し、散乱振幅を計算した。また、同様の方程式を音波と渦の相互作用において導き、背景流に依存した螺旋波の存在を示した。[6]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Kambe: "Recent findings from Computational Fluid Dynamics: Drag on Cylinders, Vortex Sound and Turbulent Statistics", *AIAA paper* (2000)
- [2] T. Kambe and N. Hatakeyama: "Statistical laws and vortex structures in fully developed turbulence", *Fluid Dyn. Res.* 27 (2000) to appear.
- [3] T. Kambe: "Statistical Laws governed by Vortex Structures in Fully Developed Turbulence", *Proc. of IUTAM Symposium on Geometry and Statistics of Turbulence*, Edited by T. Kambe, T. Miyauchi and T. Nakano. (Kluwer)
- [4] K. Yamamoto, N. Takahashi and T. Kambe: "Direct Numerical Simulation of Transition in Plane Poiseuille Flow", *ditto*.

- [5] T. Shimizu, Y. Watanabe and T. Kambe: "Scattered waves generated by shock wave and vortex ring interaction", *Fluid Dyn. Res.* 27 (2000), to appear.
- [6] C. Cost, F. Lund and M. Umeki: "Scattering of Dislocated Wave Fronts by Vertical Vorticity and the Aharonov-Bohm Effect. I. Shallow Water", *Phys. Rev. E.* 60(1999) 4908-4916.

(国内雑誌)

- [7] 橋口真宜、馬詰耕輔、神部 勉: 柱状物体の抗力と渦放出について、日本流体力学会誌「ながれ」18 巻 pp.171-172. (1999)

(学位論文)

- [8] K. Yoshida: Statistical laws of velocity circulation in fully developed turbulence. 博士論文 (1999 年 7 月)
- [9] Y. Watanabe: Geometrical method for stability analysis of dynamical systems and its application to hydrodynamics, 博士論文 (2000 年 3 月)
- [10] 吉野健太郎: 乱流場の渦構造と圧力場の解析、修士論文 (2000 年 3 月)
- [11] K. Takagi: Vortex dynamics in turbulence, 修士論文 (2000 年 3 月)

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [12] T. Kambe: "Vortex Structures and Statistics of Turbulence in Fully Developed Turbulence", *The Fourth International Congress on Industrial and Applied Mathematics* (Edinburgh, Scotland, July, 1999)
- [13] T. Kambe: "Statistical Laws governed by Vortex Structures in Fully Developed Turbulence", *IUTAM Symposium on Geometry and Statistics of Turbulence* (Hayama, Kanagawa, Japan, November, 1999)

一般講演

- [14] T. Kambe: "Recent findings from Computational Fluid Dynamics: Drag on Cylinders, Vortex Sound and Turbulent Statistics", *30th AIAA Fluid Dynamics Conference* (Norfolk, VA, USA, June, 1999).

(国内会議)

招待講演

- [15] 神部 勉: 乱流場の構造と統計法則、および高次構造関数、東京工業大学工学部乱流理論講演会 (東工大、1999 年 10 月)

一般講演

- [16] 橋口真宜、馬詰耕輔、神部 勉：柱状物体の抗力と渦放出について、日本流体力学会年会'99（工学院大、1999年7月）
- [17] 渡辺曜大：微分幾何学的手法による粘性流体のカオス混合問題の解析，日本物理学会秋の分科会（岩手大、1999年9月）
- [18] 渡辺曜大：流れのラグランジュ安定性の解析，日本物理学会春の分科会（関西大、2000年3月）

(特別講義)

- [19] 神部 勉：乱流現象の物理と物体の抵抗についての新発見、九州工業大学工学部特別講義、（北九州、1999年12月）

(セミナー)

- [20] 梅木 誠：ファラデー水面波のカオス現象、東京大学合原研究室「数理第一研究室夏のセミナー」（東京、1999年8月）

## 5.2 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、山田助手、杉之原助手、白水助手（休職中：在ケンブリッジ大学）、松原助手（休職中：在ジョンズホプキンス大学）および十数名の大学院学生、研究員が様々な宇宙物理の問題に取り組んでいる。研究室の活動は、「初期宇宙・相対論」、「観測的宇宙論」、「超新星・高密度天体」の3つの中心テーマを軸として行なわれており、研究室全体でのセミナーに加えて、それぞれのテーマごとのグループでのセミナーや論文紹介等、より研究に密着した活動も定期的に行なわれている。

我々の住むこの宇宙は今から 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、インフレーションモデル、宇宙初期における真空の相転移とそれともなう位相的欠陥の生成進化、始原的元素合成、一般相対論の原理的課題などの研究を通じてこのテーマに取り組んでいる。

宇宙の誕生の瞬間を出発として宇宙の進化を説明しようとするのが素粒子的宇宙論の立場であるとするれば、「観測的宇宙論」は、逆に現在の宇宙の観測データを出発点として過去の宇宙を探ろうとする研究分野である。1992 年に米国の宇宙背景輻射探査衛星 COBE が発見した 3K マイクロ波背景輻射の温度揺らぎ、1993 年に打ち上げられた日本の X 線衛星 ASCA、1993 年に修理が成功した米国のハッブル宇宙望遠鏡の成功は言うまでもないが、すばる望遠鏡や、大規模銀河探査である日米共同プロジェクトスローンデジタルスカイサーベイもすでに稼働を開始した。また、2000 年 11 月には COBE 衛星に続くアメリカの宇宙背景輻射探査衛星 MAP が打ち上げられる予定であり、現在そして近い将来においてきわめて重要な観測データが大量に提供されることが期待される。これらの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、非線型確率論的パイアスの理論、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。

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。さらに GINGA 衛星による超新星 1987A、ASCA 衛星による超新星 1993J の観測などから超新星、中性子星の形成を解明する重要なデータが得られている。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 r-プロセス元素合成の研究なども進めている。

### 5.2.1 初期宇宙論・相対論

#### 試験紐と超紐理論の多重ソリトン解

試験紐の重心についての運動方程式の導出を行い、孤立ソリトン解との力の釣り合いを議論した。この釣り合いは、多重ソリトン厳密解の存在と関係がある [1][2]。これらの力の釣り合いは宇宙論的な場合も成り立っていることが確認でき [3]、特に宇宙論的な回転するソリトンの衝突を記述する新しい厳密解の発見を超紐理論の枠内で促した [4]。この解は回転するブラックホールの衝突を記述していると期待される。

#### 漸近的にフリードマン的な時空構造

これまでの一連の時空の時間的無限遠方の解析を応用し、現実の宇宙モデルの漸近構造についての解析を行った。漸近的対称性と保存エネルギーの定義を与えた [5]。

## ブレーンワールド

M 理論と超紐理論との関係から、我々の宇宙は高次元時空中のドメイン壁 (ブレーン) として捉えるのが自然のようである。そこでブレーン上のインシュタイン方程式の導出を行い、種々の宇宙論的な洞察を行った [6]。同時にブレーン上とバルク時空中の重力の性質について詳しい解析を行った [7]。また宇宙論的な厳密解の大域的構造を調べ、我々の 4 次元一様等方宇宙が 5 次元のシュバルツシルド・反ドジッター時空上を時間的に走るドメイン壁で記述されることを確認した [8]。

一般にはコンパクト化された余次元を持つ時空は任意の負のエネルギーを持つ Kaluza-Kleina 泡時空という穴の開いた時空へ突然崩壊するが、崩壊後の時空の古典的な発展を調べ、裸の特異点が発生しそうであることを数値的に示した [9]。

## ダークエネルギー

最近の high redshift での Type Ia 超新星の観測や宇宙背景放射の揺らぎのスペクトラムや銀河の質量分布等の観測から宇宙は平坦であり、またバリオンとダークマターだけでは臨界密度に達し得ない ( $\Omega_M < 1$ )、という強い示唆が得られている。従って残りの密度を担うエネルギー成分 (ダークエネルギー) が必要である、という結論に達する。宇宙初期のインフレーションと同じように、このエネルギーをスカラー場が担っているものとするのがいわゆる quintessence の考えである。ここでは特に、時間変動する宇宙項の役割を担うスカラー場 (quintessence 場) が重力場とあらわに結合すると (1) quintessence 場 (スカラー場) が重力の源になってしまうことによる等価原理の破れや (2) quintessence 場は時間的に変動することによる重力定数の時間変動を引き起こしてしまうことに着目し、重力場との結合定数は小さくしなければならないことを示した [11]。また、kinetic term だけからなる Lagrangian から時間変動する宇宙項のモデル (k-quintessence) がつくれることも示した [13]。

## インフレーション

トンネル効果を用いた、インフレーションシナリオの枠内での開いた宇宙の生成の model building について研究を行った。重力と nonminimal に結合するスカラー場を用いることで、多項式からなるポテンシャルだけからでもトンネル効果を記述するインスタントン解 (Coleman-De Luccia 解) が存在し且つインフレーションが実現されるモデルが広いパラメータの範囲で実現されることを示した [12]。

## ブラックホール

ブラックホール形成の判定条件として提案されている Hoop conjecture の妥当性を Apparent horizon の形成を数値的に調べることで議論した。この際、この仮説のなかで使われる hoop (物体の周囲の長さ) の定義に従来曖昧さがあったので、数学的に曖昧さがなく物理的に意味のある定義を以前に提案した。この判定条件は非球対称的な時空を特に念頭においているので、軸対称以外では数値的に解析を行うのも困難であった。しかしながら最近になって非軸対称 (ただし離散的対称性は許す) な場合にも軸対称のときと同じように効率よく Apparent horizon を求めるアルゴリズムが開発された。そこで直ちにこの方法を Hoop conjecture に応用して、非軸対称な場合に以前提案した定義にもとづいて hoop (物体の周囲の長さ) をはじめて計算し、非軸対称な時空における Hoop conjecture の妥当性を調べた [10]。

## ブラックホール時空を運動する粒子に対する重力波放射反作用

近年建設がすすむ重力波の観測において、理論的な重力波の予想が重要と考えられている。そうしたなか、粒子に働く重力波放射反作用力の導出が、残された問題とされている。ここではブラックホール摂動を使った反作用力の導出を考えた [63]。

重力波の理論的計算について、粒子の運動を完全に記述する方程式について、これまでの結果から、時空の摂動を行うときのゲージが重要であることが分かった。これについて、当初特殊関数を使った系統的な計算可能性について検討したが、困難があることが分かった。そこで、もっと簡単な多項式による展開を考えたところ、展開の最低次において成功を収めた。この結果は、多項式による系統的な高次の展開が可能であることを示している。

## 重力波観測における、データ解析プログラムの作成

重力波観測は、これまでのどの素粒子実験ともタイプが異なる実験である。とくに長時間の観測データをフィルターしなければいけないところで、膨大な計算を要するものである。

現在ある解析手法において、観測ノイズにおいて非常に単純な仮定をおくが、それを拡張する方法について考察を行い、それに基づいたプログラムの開発を行った。

## グローバルストリングのダイナミクスとアクシオン

複素スカラー場を数値的に解くことによって、グローバルストリングのダイナミクスを調べた。輻射優勢、物質優勢の両時代でスケールリング則が成り立つことを確かめた。また、ストリングから放出されるア

クシオンの典型的なエネルギーがホライズンスケールぐらいであることを示し、現在のクシオンのエネルギー密度を求めた。[14][15][16][57][58][70][71][72]

超重力理論に於けるニューインフレーションの初期値問題の解決法

インフラトン場が、超重力理論から予言される相互作用項によってハッブルスケールの質量を熱浴からもらい、自然に原点付近に局在化されることによって、初期値問題が解決されることを示した。

[17][69]

ダブル・インフレーションと宇宙の大規模構造

超重力理論の枠組みでは、再加熱温度を下げるためにニュー・インフレーションが望ましいが、初期値問題を伴う。初期値問題をハイブリッド・インフレーションで解決し、再加熱温度をニュー・インフレーションで解決する、ダブル・インフレーションを考察した。そこから得られるブレイク入りの密度揺らぎが宇宙の大規模構造の観測結果をうまく説明する可能性があることが分かった。[18, 40, 73]

ダブル・インフレーションと原始ブラックホール

ニュー・インフレーションで終わるようなダブル・インフレーションを考えると、一般に小スケールにおいて赤方に傾いた密度揺らぎを得る。これによって、ダブル・インフレーションの接続スケールに非常に大きなブレイクが作られ、それによって原始ブラックホールが作られる可能性について考察した。[19]

多次元宇宙の量子論的創生

ハートル-ホーキングの無境界仮説に基づいて、物質はないが正の宇宙定数のある多次元宇宙モデルの宇宙の波動関数を数値計算した [59, 74]。

初期宇宙における重力的粒子生成

カオティックインフレーションシナリオで初期宇宙におけるモジュライ粒子の重力的な生成を考えた。この場合、現在の宇宙の密度パラメーターが1をはるかに超えてしまうことを数値計算で確認した。また、Thermal Inflationを導入すれば、モジュライは十分うすめられ、観測事実と矛盾しないことを解析的に評価した [50]。

## 5.2.2 観測的宇宙論

準解析的銀河進化モデルを用いたクェーサー形成シナリオの考察

クェーサーの個数密度は、赤方偏移の減少とともに増加し、赤方偏移が2の付近でピークを迎え、それ以降、現在まで減少している。高赤方偏移側の増加は構造の進化に伴うクェーサーブラックホールの増加のためであり、ピーク以降の低赤方偏移側の減少はクェーサーブラックホールへ落ち込むコールドガスの量が減少するためであると解釈するのが一般的であるが、定量的には確かめられてはいない。そこで、この解釈にしたがったクェーサー形成シナリオを都立大の研究者と共同で構築し、クェーサーの光度関数の時間進化について調べることにした。(個数密度は光度関数の積分により求まる量なので、光度関数について調べることは、個数密度についても調べることになる。)構造の進化に関しては、ダークマターハローの形成率の式を用いてクェーサーブラックホールの形成率を記述することにし、クェーサーの燃料となるコールドガスの量に関しては、銀河形成の準解析的モデルによる計算結果を用いることにした。その結果、クェーサーの光度が赤方偏移の高次の巾に比例して増加しなければ、上で述べたような観測事実を説明できないことが分かった [75]。

遠方天体の2点統計における光円錐効果と赤方偏移歪みの統一的定式化

遠方天体の空間相関を観測する際には、一般相対論的效果により見かけ上の非等方性が生み出される。さらに、観測者からの距離の違いは同時にそれらの宇宙時刻の違いでもあるために、光円錐効果を正しく取り入れる必要がある。赤方偏移歪みに関しては、従来の我々の理論モデルの信頼性を宇宙論的N体シミュレーションを用いて検証するとともに、非線型効果をモデル化して取り込む方法を議論した [21, 49]。これらの効果は、今まで我々のグループによって初めて指摘され定式化されたものであるが、今回その双方を統一的に考慮する理論的定式化を完成させた [20, 23, 64]。また、この定式化を用いて、高赤方偏移のX線銀河団に対する2点相関関数の理論予言を行った [24]。

ダークマターハローの密度分布の普遍性

重力的に形成されるダークマターハローは、銀河や銀河団などの天体に関する第0近似である。このダークマターハローの密度プロファイルがある普遍的な関数形に従うことが、数年前提唱され、大きな話題となっている。我々は、従来の計算で用いられている空間メッシュを、さらに階層的に分割することで高密度領域での質量・空間分解能をともに向上させたコードを開発し、系統的なシミュレーション

を行った。その結果、内側の密度プロファイルのべき指数は普遍的ではなく、ハローの質量に依存して変化し、銀河団スケールで  $\rho(r) \propto r^{-1.1}$ 、銀河スケールで  $\rho(r) \propto r^{-1.5}$  であることを示した。これは、観測されているスロープよりもかなり急であり、冷たいダークマターモデルの問題点として活発な議論が行われている [22, 81]。

#### 宇宙論的流体シミュレーションを用いた X 線銀河団の温度関数における輻射冷却効果の検証

Press – Schechter 理論は解析的な近似理論として、銀河団に関する宇宙論的予言を行う際にひろく使われている。それから導かれる質量関数の妥当性は N 体計算の範囲でかなり確認されているが、実際に観測される温度関数あるいは光度関数は、銀河団内ガスの輻射冷却の効果により、単純な予言は困難である。我々は京都大学の共同研究者とともに、 $N = 128^3$  のガス粒子および同数のダークマター粒子を用いた、世界最大の SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) シミュレーションを 6 モデル行うことによって、銀河団スケールにおいては、輻射冷却や背景紫外線輻射による加熱を考慮しても、Press – Schechter 理論の予言する温度関数が良い近似であることを明らかにした。一方で、X 線光度はモデル依存性や数値計算の分解能に大きく依存し、現時点では信頼できる結果を与えないことを示した [25]。

#### ダークマターハローに対する非線型確率的バイアスの解析的モデル

銀河分布と見えないダークマターの対応関係が明らかになれば、大規模銀河サーベイによる大量の観測データを駆使することで、ダークマターの質量分布に対する情報を高い精度で構成することができる。銀河分布とダークマターの質量分布同士の統計的関係を「バイアス」と呼ぶが、このバイアスを理論的に再考しようという研究が、観測の進展を受けて近年特に盛んである。一般に、バイアスは単純な比例関係にならず一対一対応でもない、非線型で確率的なものとなっている。バイアスが確率的になる 1 つの理由は、ダークマターの質量分布以外に、光る天体を特徴づける隠れた変数の存在と考えられているが、具体的にそうした証拠を挙げた理論的研究は数値シミュレーションにとどまるものであった。そこで我々は、簡単な解析的モデルを提唱し、隠れた変数を通じてバイアスの諸性質（スケール依存性、時間的進化）がどのように決まるのか、定性的振る舞いを調べた。解析では、拡張 Press – Schechter 理論を軸に、隠れた変数（質量と形成時刻）で特徴づけられたハローとダークマターの対応関係を確立、それらを記述する分布関数を具体的に評価して見せた。その結果、これまで知られている N 体シミュレーション・準解析的銀河形成モデルの結果とよく一致することがわかり、隠れた変数（特に形成時刻）の及ぼす影響の定量的側面も明らかになった。

#### 宇宙論的 N 体シミュレーションを用いた、ダークマターハローと高密度ピークの 2 点相関に対する非線型確率バイアス

バイアスのもつ非線型性・確率的要素は、重力レンズ効果などを使えば、将来、直接観測できるようになるが、こうした観測だけから質量分布の 3 次元データを再構成することは困難である。従って、シミュレーションに基づく解析から、現実の天体がどのようにバイアスされているか、経験的理解を得ることも不可欠となる。ここでは、バイアスに対する重力進化の影響に特に着目し、N 体シミュレーションを用いて、仮想天体に対する非線型確率的バイアスの性質（スケール依存性・時間的進化）を調べた。質量分布の 3 次元データから、重力平衡にある領域（ハロー）と高密度領域（ピーク）を選び出し、カタログデータに反映される非線型確率的バイアスの性質を 2 点相関の評価を通じて、定量化した。その結果、バイアスの非線型性・確率的要素は、重力の非線型性に伴って増大し、天体の特性（サイズ等）に強く依存することが示された。その一方、準非線型・線型領域では、バイアスはスケールに依らない単純な線型関係になり、仮想天体とダークマターの一対一対応が、かなりいい近似として成り立つことが明らかになった。さらに、そうした領域では解析的モデルによる理論予言ともよく一致することも確かめられた。

#### ミリ波領域における銀河団のスニャーエフ・ゼルドビッチ効果の高角度分解能マッピング

我々は、国立天文台、東北大学、京都大学の共同研究者とともに、全天で最も明るい X 線銀河団 RXJ1347-1145 の系統的な多波長観測を行っている。特に、銀河団の高温プラズマと宇宙マイクロ波背景輻射の光子との逆コンプトン散乱によって、銀河団の方向の背景輻射の温度が低下する現象（スニャーエフ・ゼルドビッチ効果）を、サブミリ波領域において、世界ではじめて検出に成功した [41, 46]。さらに、野辺山 45m 望遠鏡にとりつけられた NOBA と呼ばれるアレイ検出器を用いて、ミリ波領域（波長 2mm）での銀河団 2 次元マップを得た。この検出器のビームサイズは、約 13 秒角であり、センチメートル波で通常用いられる干渉計に比べて一桁近く小さい。この、高角度分解能によって、従来観測されていなかった銀河団のサブストラクチャーを発見した。このような形態の非一様性が遠方銀河団で珍しくないとするれば、スニャーエフ・ゼルドビッチ効果を用いた宇宙論パラメータの決定に対して、重要な問題点を投げかけることになる。

## 測光観測による $z \sim 1.1$ クェーサーグループ周辺の銀河集団大構造の発見

現在の宇宙には、超銀河団と呼ばれる、銀河の空間的な大構造が存在する。高赤方偏移宇宙では、対応するような構造は知られていないが、これは宇宙の構造進化のためであるか、あるいは、暗くなるための観測的限界によるのかは明らかでない。一方、 $z \sim 1.1$  付近で、23 個のクェーサーが密集している領域が存在することが知られている。我々は、東北大学、プリンストン大学の共同研究者とともに、米国アパッチポイント天文台の 3.5m 望遠鏡を用いて、この領域内の銀河の測光観測を行った。その結果、このクェーサー集団の付近で、確かに銀河の面密度が高くなっていることを発見した。この銀河集団は、個々のクェーサーとは相関が強くなく、むしろクェーサー集団とともに全体として宇宙の大構造を形作っているものと解釈される。

## 銀河団高温ガスの進化：超新星爆発に起因する加熱の影響

重力、ガスの圧力、ショック加熱、熱制動輻射による冷却および超新星爆発によるガスの加熱を取り入れた、銀河団高温ガスのシミュレーションを行った。超新星爆発による加熱を取り入れなかった場合に比べて、冷却の効果が抑制され、その結果として、観測されているような、中心部分にコアを持つガスの密度構造が再現できることがわかった。[60]

## 銀河群の X 線光度に対する超新星爆発による加熱の効果

銀河群にも、銀河団と同様に、熱的に X 線を放射する高温ガスが付随している。しかし、銀河群の X 線光度は、質量の大きな銀河団を単純にスケールダウンしたときに予想されるものに比べて、1 桁程度小さいことがわかっている。これに対する説明として、超新星爆発によるガスの加熱の効果が考えられる。一般に、加熱の効果により X 線光度は低下すると考えられるが、ガスの単位質量あたりの加熱を一定とした場合、この効果は重力ポテンシャルの浅いシステムほど強く働くからである。この効果を現実的なモデルに基づいて定量的に調べるためには、シミュレーションを用いるのが最も有効である。本研究では、重力、ガスの圧力、ショック加熱、熱制動輻射による冷却および超新星爆発によるガスの加熱を取り入れたシミュレーションを行った。シミュレーションの結果から、超新星爆発による加熱の効果により、銀河群の X 線光度は十分下がることを確認した。また、超新星爆発によるエネルギーの一部のみが加熱に使われ、残りは輻射として逃げたことが、観測されている X 線光度から推測されることを見いだした。[76]

## 銀河分布と質量分布の関係についての一般的定理

我々自身のみならず、銀河を始めとして宇宙の中で我々に観測できる対象は、複雑な物理過程を通して形成され、理論的には不確定な要素が非常に大きく、これまですっきりとした理論と観測との比較が難しい状況であった。ところが近年の大規模な宇宙論的観測の進歩は、格段に広い領域の観測を可能とする新たな段階に突入しつつある。このような場合に観測される、いわゆる線型領域の密度ゆらぎについて、これまで不確定性の元凶と見られていた現象論的な銀河のバイアスおよびその確率分布のモデルについての重要な定理を、一般的な仮定のもとに導いた [27]。

## 赤方偏移空間における 2 点相関関数の一般的解析解

観測的宇宙論における最も重要な対象のひとつ、銀河、クェーサーの相関関数を、非常に一般的な形で求めることに成功した。これまで求められていた形は空間の相対論的ゆがみや時間発展を無視しているか、あるいは観測領域を見込む角度が小さい極限などの、実際には必ずしも満たされるとは限らない近似の下に得られていたが、そのような制限を一切取り去り、一般相対論的ゲージ不変線型理論の枠内でまったく一般的な形を求めた [28]。

## ラスカンパナスサーベイの固有モード解析による宇宙論パラメータ

我々はジョンズホプキンス大学の共同研究者と共に、カーフネルーベ変換に基づく銀河の赤方偏移データの固有モード解析のプロジェクトを進めているが、最近実際の観測データであるラスカンパナスサーベイを用いてこのプロジェクトの第一結果を得た [29]。比較的データの質が均一でなく、有効体積も小さいこのサーベイにありながら、この解析の有効性を大きく示す結果となった。特に、格段にデータの質の向上する SDSS サーベイへの応用に計り知れない可能性を強く示した。

## マゼラン星雲に於ける化学進化

化学進化モデルを使うことで、我々は具体的にどの程度銀河進化に関する情報を引き出せるのかを、大マゼラン星雲を例に検討した。結果として、化学進化モデルのパラメータを適当に選ぶことで、大マゼラン星雲のガスと星の質量比、化学組成史、星形成率、Ia 型と重力崩壊型の超新星残骸比等の観測値が無理なく説明出来ることが示された。これによって、化学進化モデルを使うことで大マゼラン星雲の進化の歴史に対してかなりの情報が得られることが示された。又、 $[\text{Ti}/\text{Fe}]$  比は、従来の超新星の元素合成計算の結果を使うと、観測よりも低めに出てしまうことが避けられず、太陽組成再現問題で言われて

いるところの Ti 不足問題が大マゼラン星雲の化学進化問題でも顕著であることが確認された。[30, 43]

### 5.2.3 超新星・高密度天体

#### 重力崩壊型超新星でのニュートリノ輸送

重力崩壊型超新星の爆発のシミュレーションではニュートリノによるエネルギー輸送を正確に扱うことが重要である。数値計算法を開発するだけでなく、ニュートリノの反応断面積を正しく評価する事も重要な課題である。土岐 (阪大) らとの協同研究では、超新星コアでの高温高密度下でのニュートリノと核子の吸収、放出、散乱反応率に対する多体効果を乱雑位相近似を用い、状態方程式の相対論的平均場近似とコンシステントに計算した。[31] また、核密度より低い密度で重要となると考えられる核子どうしの散乱による、ニュートリノ反応率への影響を簡単な核力と、Bethe-Salpeter 方程式を用いて評価した。[32] Janka, Keil (共に Max-Planck-Institut) と共同で、この変化から期待されるニュートリノ光度の変化と原始中性子星内での対流に与える影響を調べた。[66, 87]

一方、上記目的で開発した流体コードを用いて、住吉 (理研) 等と共同で、r-過程元素合成の候補地として有望と考えられている原始中性子星からのニュートリノ風の数値シミュレーションに応用し、解析的な取扱での状態方程式の問題点を指摘するとともに、重い中性子星 ( $\sim 2M_{\odot}$ ) での r-過程元素合成の成功例をデモンストレーションした。[33]

超新星コア内でニュートリノ振動が起こる場合、他の吸収、放出、散乱などの反応と同時に振動をボルツマン方程式型の輸送方程式で扱う方法を定式化した。[34]

#### ストレンジレットにおけるカラープラズマ振動

最近の CERN や Brookhaven における超相対論的重イオン衝突実験においては、QCD により存在が予言されているものの未だ確認されていないクォークグルーオンプラズマ (QGP) の検出が目標の一つとして掲げられている。ストレンジレットとよばれる up, down, strange という三つのフレーバーからなるクォークのかたまりが最安定な自己束縛系であると仮定すれば、QGP がストレンジレットという形で検出される可能性がある。その場合、オーダー 100 MeV という温度のもと、ストレンジレットは励起状態にあることが予想される。ここでは、異なるカラー自由度間で振動しあうモード、縦カラープラズマ振動に着目し、その長波長・低温・弱結合極限における分散関係と減衰率を評価した。[35]

#### 重力崩壊型超新星に於けるジェット状爆発の効果

重力崩壊型超新星爆発のダイナミクスを検討していく上では角運動量や磁場の効果を考慮することが重要であり、それらを考慮するとジェットの爆発を起こす可能性がある指摘されて久しいが、このようなジェット状爆発の元素合成や物質混合に対する影響を見積もり、具体的に観測と比較することはされていなかった。今回、我々は SN1987A を対象として、観測値と数値計算の結果の比較を行い、SN1987A は極方向と赤道方向で爆発の強さが約 2:1 である可能性が極めて高いことを結論づけた。又、SN1987A から未だ確認されていない中性子星は、南側に向かって走っている可能性が高いことも併せて議論された。又、最近言われている GRB/SN(HN) 相関については、SN1987A の case よりも強いジェット状爆発が要求されるため、SN1987A からは線パースト的な現象は生み出されていないだろうと結論された。[36, 37, 44, 78, 92, 93]

#### 中性子星内殻における非球状原子核

高密度物質の性質やその中の原子核の状態を調べることは、超新星爆発や高密度天体の現象を理解する上で必要不可欠である。中性子星内殻底部では、もはや球状の原子核ではなく、円柱状や板状の原子核が結晶格子を組んだ相、及び一樣核物質に円柱状や板状の孔が空いたようなパブル状の相がエネルギー的に安定な状態として存在し得るといふ多くの計算結果が提出されており、このような非球状の原子核は "nuclear pasta" と呼ばれている。これらの相が発現するか否かということは、高密度かつ中性子過剰な状況下にある、極めて不定性の大きな原子核の性質に依存するが、本研究では、これらの性質に応じて "nuclear pasta" の各相の出現状況がどのように変化するのかを体系的に調べることによって、温度ゼロの下では、円柱状、板状の原子核から成る相は核モデルによらず普遍的に出現する一方で、パブル状の相の発現は小さい表面エネルギーの核モデルに限られるということを見出だした。また、円柱状、板状の原子核から成る相の秩序構造に対する熱揺らぎも併せて議論し、中性子星内殻における典型的な温度では、板状の原子核は熱揺らぎによって破壊され得ることを示した。[38, 51, 61, 62, 79]

#### 銀河団内の宇宙線の伝播

我々の銀河に、宇宙線と呼ばれる非熱的分布を持った高エネルギー粒子が存在することはよく知られている。宇宙線は大半が陽子であり、銀河系内磁場の乱れにより  $10^7$  年程度閉じ込められているということが知られている。

一方、銀河団にも、銀河系内と同程度の強さ ( $\sim \mu\text{G}$ ) の磁場が存在することが知られており、また、ファラデー回転の観測より、適度に乱れていることも確認されている。よって、この銀河団内磁場によ

り、銀河団に宇宙線が閉じ込められることが考えられる。その効果を、宇宙線のソース、銀河団内のガスおよび銀河の分布、そして銀河団内の磁場の乱れについてモデルを作り、それにより、銀河団内にはある程度の期間 ( $\sim 10^8$  年程度) 宇宙線を閉じ込めておく能力があることを示した。

また、直接観測することのできないこれら銀河団内の宇宙線の存在を示す間接的証拠として、銀河団内ガスとの衝突により生じるガンマ線強度を予想し、現行の EGRET 衛星での観測と矛盾しないことを示した。また次期衛星である GLAST の検出限界と比較し、GLAST による検出はあまり期待できないことも示した。

さらに、銀河系内宇宙線起源のガンマ線が銀河系内ガンマ線背景放射に寄与しているのと同様、銀河団内宇宙線起源のガンマ線が宇宙ガンマ線背景放射に寄与している可能性があるため、その寄与の度合いを理論的に予想し、10% 程度の寄与はありうるということを示した [45]。

## 5.2.4 その他

佐々木節 大阪大学教授が 1999 年 4 月 1 日より流動講座教授に着任し、宇宙理論研究室と連携し研究を進めた。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Shiromizu, Phys. Lett. B460, 141(1999)
- [2] T. Shiromizu, Phys. Rev. **D60**, 64019(1999)
- [3] T. Shiromizu and U. Gen, Class. Quantum Grav.**16**, 2955(1999)
- [4] T. Shiromizu, Prog. Theor. Phys. **102**, 1207(1999)
- [5] T. Shiromizu and U. Gen, Class. Quantum Grav. **16**, 2955 (1999)
- [6] T. Shiromizu, K. Maeda and M. Sasaki, to be published in Phys. Rev. D(gr-qc/9910076)
- [7] M. Sasaki, T. Shiromizu and K. Maeda, to be published in Phys. Rev. D(hep-th/9912233)
- [8] S. Mukohyama, T. Shiromizu and K. Maeda, to be published in Phys. Rev. D(hep-th/9912287)
- [9] H. Shinkai and T. Shiromizu, to be published in Phys. Rev. D(hep-th/0003066)
- [10] Takeshi Chiba: Apparent Horizon Formation and Hoop Conjecture in Non-axisymmetric Spaces; Physical Review D, **60** 044003 (1999).
- [11] Takeshi Chiba: Quintessence, the Gravitational Constant, and Gravity; Physical Review D, **60** 083508 (1999).
- [12] Takeshi Chiba, Masahide Yamaguchi: Extended Open Inflation; Physical Review D, **61** 027304 (2000).
- [13] Takeshi Chiba, Takahiro Okabe, and Masahide Yamaguchi: Kinetically Driven Quintessence; Physical Review D, in press.
- [14] Masahide Yamaguchi, M. Kawasaki, and J. Yokoyama: Evolution of axionic strings and spectrum of axions radiated from them, Physical Review Letters, **82**, 4578-4581 (1999).
- [15] Masahide Yamaguchi: Scaling Property of the global string in the radiation dominated universe, Physical Review **D60**, 103511, 1-10 (1999).
- [16] Masahide Yamaguchi, J. Yokoyama, and M. Kawasaki: Evolution of a global string network in a matter dominated universe, Physical Review **D61**, 061301R, 1-5 (2000).
- [17] T. Asaka, M. Kawasaki, and Masahide Yamaguchi: Initial condition for new inflation in supergravity, Physical Review **D**, Physical Review **D61**, 027303, 1-3 (1999).
- [18] Toshiyuki Kanazawa, M. Kawasaki, Naoshi Sugiyama and T. Yanagida: Double Inflation in Supergravity and the Large Scale Structure, Phys. Rev. **D61** (2000) 023517.
- [19] Toshiyuki Kanazawa, M. Kawasaki and T. Yanagida: Double Inflation in Supergravity and the Primordial Black Hole Formation, Phys. Lett. **B**, in press.
- [20] Kazuhiro Yamamoto, Hiroaki Nishioka and Yasushi Suto: The cosmological light-cone effect on the power spectrum of galaxies and quasars in wide-field redshift surveys; The Astrophysical Journal **527**(1999)488-497 (astro-ph/9908006).
- [21] Hiromitsu Magira, Y.P. Jing, and Yasushi Suto: Cosmological Redshift-space distortion on clustering of high-redshift objects: correction for non-linear effects in power spectrum and tests with N-body simulations; The Astrophysical Journal **528**(2000)30-50 (astro-ph/9907438).
- [22] Y.P. Jing and Yasushi Suto: Density Profiles of Dark Matter Halo are not Universal; The Astrophysical Journal **529**(2000)L69-L72 (astro-ph/9909478).
- [23] Yasushi Suto, Hiromitsu Magira, and Kazuhiro Yamamoto: Light-cone Effect on Clustering Statistics in Cosmological Redshift Space; Publications of the Astronomical Society of Japan **52**(2000)249-257 (astro-ph/9912367).
- [24] Yasushi Suto, Kazuhiro Yamamoto, Tetsu Kitayama, and Y.P.Jing: Two-point correlation functions of X-ray selected clusters of galaxies: theoretical predictions for flux-limited surveys; The Astrophysical Journal **534**(2000) May 10 issue, in press (astro-ph/9907105).
- [25] Kohji Yoshikawa, Y.P. Jing, and Yasushi Suto: Cosmological SPH simulations with four million particles: statistical properties of X-ray clusters in a low-density universe; The Astrophysical

- Journal **535**(2000) May 20 issue, in press (astro-ph/0001076).
- [26] Atsushi Taruya and Yasushi Suto: Nonlinear stochastic biasing from the formation epoch distribution of dark halos; *The Astrophysical Journal* (2000), in press (astro-ph/0004288).
- [27] Takahiko Matsubara: Stochasticity of Bias and Nonlocality of Galaxy Formation: Linear Scales; *Astrophysical Journal*, **525** (1999), 543-553.
- [28] Takahiko Matsubara: The Correlation Function in Redshift Space: General Formula with Wide-angle Effects and Cosmological Distortions; *Astrophysical Journal*, **535** (2000), in press
- [29] Takahiko Matsubara, Alexander S. Szalay, Stephan A. Landy: Cosmological Parameters from the Eigenmode Analysis of the Las Campanas Redshift Survey; *Astrophysical Journal Letters*, **535** (2000), in press
- [30] Shigehiro Nagataki and Gentaro Watanabe: Chemical evolution in the Large Magellanic Cloud; *Pub. Astron. Soc. Japan* **52** (2000), in press (astro-ph/9907108)
- [31] S. Yamada and H. Toki: Neutrino – nucleon reaction rates in the supernova core in the relativistic random phase approximation; *Phys. Rev. C* **61** (2000) 015803-1 - 015803-16.
- [32] S. Yamada: Reduction of neutrino-nucleon scattering rate by nucleon-nucleon collisions; *Nucl. Phys. A* **662** (2000) 219 - 232.
- [33] S. Yamada: Boltzmann equations for neutrinos with flavor mixings; *Phys. Rev. D* (2000) in press.
- [34] K. Sumiyoshi, H. Suzuki, K. Otsuki, M. Terasawa and S. Yamada: Hydrodynamical study of neutrino-driven wind as an r-process site; *Pub. Astron. Soc. Japan* (2000) in press
- [35] Kei Iida: Color plasma oscillation in strangelets, *Phys. Rev. C* **60**(1999) 024905.
- [36] Shigehiro Nagataki: Effects of Jet-like Explosion in SN 1987A; *Astrophys. J. Suppl.*, in press. (astro-ph/9907109)
- [37] Shigehiro Nagataki and Kazunori Kohri: Pulsar Kick and Asymmetric Iron Velocity Distribution in SN 1987A; *Prog. Theo. Phys.* **103** (2000) 713-721
- [38] G. Watanabe, K. Iida and K. Sato: Thermodynamic properties of nuclear "pasta" in neutron star crusts; *Nuclear Physics A*, accepted (astro-ph/0001273).
- (会議抄録)
- [39] Takeshi Chiba: Phantom Field, In the Proceedings of the Nineth Workshop on General Relativity and Gravitation, eds. Kojima et al. (Hiroshima University, 1999).
- [40] Toshiyuki Kanazawa, M. Kawasaki, Naoshi Sugiyama and T. Yanagida: Double Inflation in Supergravity and the Large Scale Structure; Proceedings of the 4th RESCEU International Symposium "The Birth and Evolution of the Universe", in press.
- [41] Yasushi Suto, Tetsu Kitayama, Eiichiro Komatsu, Makoto Hattori, Ryohei Kawabe, Hiroshi Matsuo, Sabine Schindler, and Kohji Yoshikawa: Cosmological implications of galaxy clusters in X-ray, millimeter and submillimeter bands; *Advances in Space Research* **25** (2000)771-780 (astro-ph/9902350).
- [42] Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, and Yasushi Suto: Cluster Abundances in X-ray and Radio Wavebands; *Advances in Space Research* **25** (2000) 781
- [43] 長滝 重博: 超新星での元素合成とマゼラン雲の化学進化、第2回「マゼラン星雲大研究」集録(国立天文台) P.289
- [44] 長滝 重博: 重力崩壊型超新星に於けるジェット状爆発、第12回理論天文学懇談会シンポジウム集録(国立天文台) P.146
- [45] Shinya Tsubaki: Confinement of cosmic rays by clusters of galaxies; in the Proceedings of the 26th International Cosmic Ray Conference (Salt Lake City, 1999).
- (国内雑誌)
- [46] 須藤 靖: サブミリ波で銀河団をみる: 観測的宇宙論の新しい窓、*パリティ* (1999) 7月号, pp.31-39
- [47] 佐藤勝彦: 宇宙物理と応用物理、*応用物理学会誌* 68巻 8号 (1999), pp.880-885
- [48] 佐藤勝彦: 宇宙の創生、*数理科学* 38巻 4号 (2000) pp.33-39
- (学位論文)
- [49] 間明 宏充: The cosmological redshift-space distortion on two-point statistics of high-z objects (博士論文)
- [50] 田中 冬彦: 初期宇宙における重力的粒子生成 (修士論文)
- [51] 渡邊 元太郎: Thermodynamics properties of nuclear "Pasta" in super dense matter. (超高密度物質における核物質パスタの熱力学的性質) (修士論文)
- (著書)
- [52] 金澤敏幸 (共著), 天文学が分かる (*アエラムック*, 朝日新聞社, 1999)
- [53] 佐藤勝彦: 「アインシュタインとボーア」 11章 量子論と宇宙創生 (分担執筆)、日本物理学会編、裳華房、1999年10月
- [54] 佐藤勝彦: 「宇宙天体論」 1章 インフレーション宇宙 (分担執筆)、学習研究社、1999年5月
- [55] 佐藤勝彦: 「天文学がわかる」 若者が宇宙創世の謎を解く (分担執筆)、朝日新聞社、1999年7月

## &lt; 学術講演 &gt;

## (国際会議)

## 一般講演

- [56] Takeshi Chiba: Quintessence, the Gravitational Constant, and Gravity, The 4th RESCEU International Symposium on "The Birth and Evolution of the Universe", Tokyo(1999年11月).
- [57] Masahide Yamaguchi, M. Kawasaki, and J. Yokoyama: Scaling of axionic strings and relic axion density, in *the 4th RESCEU International Symposium on the Birth and Evolution of the Universe* (Tokyo, Nov, 1999).
- [58] Masahide Yamaguchi, M. Kawasaki, and J. Yokoyama: Global string evolution and axion emission, in *the 7th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology (PASCOS99)* (Lake Tahoe, Dec, 1999).
- [59] H. Ochiai and K. Sato: An Approach to Quantum Creation of the Multidimensional Universe, RESCEU Symposium(Tokyo)
- [60] Tatsushi Suginoara: Density Profile of Intracluster Gas: Effect of Supernova Heating, 4th RESCEU International Symposium on "The Birth and Evolution of the Universe", Tokyo (1999年11月)
- [61] G. Watanabe, K. Iida and K. Sato: Thermodynamic properties of nuclear "pasta" in neutron star crusts, in the 4th RESCEU International Symposium on "The Birth and Evolution of the Universe", (Tokyo, Nov. 1999)
- [62] G. Watanabe, K. Iida and K. Sato: Thermodynamic properties of nuclear "pasta" in neutron star crusts, "The Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2000", (Tokyo, Jan. 2000)

## 招待講演

- [63] Mino Yasushi: Radiation Reaction Force on a Compact Body Spiraling into a Supermassive Black Hole , AMALDI CONFERENCE (1999年7月12日から16日、Caltech、US)
- [64] Yasushi Suto: Clustering statistics on a light-cone in the cosmological redshift space , the 4th RESCEU symposium, 東京大学山上会館 (1999年11月17日)
- [65] K. Sato: Quantum Creation of the Universe with Inner Space, Int. Nat. Symposium on Inner Space Outer Space II, Chicago (1999, June)
- [66] S. Yamada: Physics of Collapse-driven Supernovae, "The Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2000" (Tokyo,Jan.,2000)

## (国内会議)

## 一般講演

- [67] 千葉 剛、杉山 直: Cosmic Microwave Probe of Gravity Theories, 日本物理学会、島根大学、1999年9月.
- [68] 千葉 剛: Phantom field, 第9回「一般相対論と重力」研究会、広島大学、1999年11月.
- [69] 山口昌英, 浅賀岳彦, 川崎雅裕: 超重力模型におけるニューインフレーションの初期値問題、日本物理学会1999年秋の分科会(島根大学、1999年10月)
- [70] 山口昌英: グローバルストリングのスケールング則とループ分布、日本天文学会1999年秋季年会(九州大学、1999年10月)
- [71] 山口昌英, 横山順一, 川崎雅裕: Scaling of the global string network in the matter dominated universe、第9回「一般相対論と重力」研究会(広島大学、1999年11月)
- [72] 山口昌英, 横山順一, 川崎雅裕: 物質優勢時代におけるグローバルストリングの進化、日本物理学会2000年春の分科会(近畿大学、2000年3月)
- [73] 金澤敏幸、川崎雅裕、杉山直、柳田勉: ダブル・インフレーションにおける密度揺らぎ、日本物理学会1999年秋の分科会(島根大学、1999年9月)
- [74] 落合洋敬、佐藤勝彦: 多次元宇宙の量子論的創生へのアプローチ、日本物理学会 秋の分科会、島根大学、9月
- [75] 清水 守, 北山 哲, 佐々木 伸, 須藤 靖: QSO 光度関数の時間進化と高赤方偏移での観測可能性、日本天文学会、九州大学、1999年10月.
- [76] 杉之原立史: 銀河群のX線光度に対する超新星爆発による加熱の効果、日本天文学会2000年春季年会(東京大、2000年4月)
- [77] 佐藤勝彦: 素粒子物理と宇宙の創成、高エネルギー加速器機構公開講座、筑波、1999年11月
- [78] 長滝 重博: 重力崩壊型超新星に於けるジェット状爆発の物質混合に対する効果、日本天文学会春季年会(九州大、1999年10月)
- [79] 渡辺 元太郎、飯田 圭、佐藤 勝彦: 中性子星内殻における核物質 "パスタ" の熱力学的性質、日本物理学会2000年春の分科会(近畿大学、2000年3月)

## 招待講演

- [80] 千葉 剛: "Horizons" of General Relativity, 第29回天文天体物理若手の会夏の学校 招待講演(1999年7月27日)
- [81] 須藤 靖: 多波長での銀河団の統計と宇宙論、第12回 理論天文学懇談会シンポジウム、於 国立天文台(1999年12月21日)
- [82] 須藤 靖: 宇宙論パラメータとサーベイ観測、第6回 東京大学素粒子物理国際研究センターシンポジウム、(2000年2月21日)
- [83] 須藤 靖: 観測的宇宙論の問題点、京都大学基礎物理学研究所 短期研究会 "観測的宇宙論における諸問題"(2000年3月15日)
- [84] 須藤 靖: 宇宙論の来し方行く末、日本天文学会 特別講演 於 東京大学理学部(2000年4月5日)

- [85] 佐藤勝彦: 宇宙論の新展開と核物理、日本物理学会春の分科会、近畿大学、2000年3月
- [86] 佐藤勝彦: 宇宙の誕生と宇宙の未来、日本物理学会、応用物理学会名古屋支部例会、名古屋、2000年1月
- [87] 山田 章一: 重力崩壊型超新星爆発の物理、日本物理学会年会理論核物理、実験核物理合同シンポジウム「天体核物理の成果と展望」(近畿大学、2000年3月30日)

(セミナー)

- [88] 佐藤勝彦: Neutrino Burst from Supernovae and Background Neutrinos, Theoretical Astrophysics Center, Copenhagen University, August, 1999.
- [89] 佐藤勝彦: 宇宙は第2のインフレーションを始めたのか?、東京大学物理学教室談話会、1999年7月
- [90] 佐藤勝彦: 宇宙定数と宇宙論、九州大学物理学教室談話会、2000年3月
- [91] 佐藤勝彦: 宇宙の創生、東京女子大学数理系談話会、2000年1月
- [92] 長滝 重博: 重力崩壊型超新星に於けるジェット状爆発の効果、東京大学、天文学教室談話会 (1999年7月13日)
- [93] 長滝 重博: 重力崩壊型超新星に於けるジェット状爆発の効果、理化学研究所、原子核セミナー (1999年7月26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形光学、量子光学、量子エレクトロニクスを中心に、光物性物理学、分子物理学、光生物物理学にわたる幅広い研究を行っている。特に、超短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形光学効果や動的な光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、ポーロン、バイポーロン等) による超高速非線形光学過程を解明している。また、非線形分光、非線形光学過程や量子光学の基礎的な問題 (微小共振器、量子テレポーテーション等) に関する研究も行っている。

#### 6.1.1 超短パルスレーザーの開発

##### 4.7 fs 可視光パルス発生装置の開発

通常の光パラメトリック増幅 (OPA) では、増幅のエネルギー源となる励起光と増幅される信号光とが、非線形結晶中を同一直線上にかつ平行に伝搬する配置で行う。この場合には、屈折率の異方性が十分に大きくとれないので、位相整合条件を満たすスペクトル領域が狭い範囲に限定され、パルス幅が 20 fs 程度以下に狭くならない。我々は、この制約を取り除くため、非同軸配置のパラメトリック増幅 (non-collinear optical parametric amplifier; NOPA) を行った。信号 (signal) 光と励起 (pump) 光をある非同軸角で非線形光学結晶に入射すると、アイドラー光の群速度の信号光方向の射影成分が、信号光の群速度と一致し、信号光とアイドラー光の群速度不整合が消失して、同軸配置に比べて一桁も大きなバンド幅が得られる。この方法によって、世界で初めて波長可変な半値幅 10 fs 以下のパルス発生に成功した。この信号光である白色光の残余チャープをチャープミラーによって補償することにより、増幅可能なすべての波長領域において、パラメトリック増幅を行うことを試みた。これによって、可能な範囲のすべての波長、550 nm ~ 700 nm の領域でパラメトリック増幅を行い、増幅された広帯域スペクトルの光を圧縮することによって、可視光領域において世界最短である 4.7 fs のパルスを発生させることに成功した。従来のサブ 5 fs パルス発生方法は、ファイバーなどを通過させて、自己位相変調して広がったスペクトルを

もったパルスを圧縮するという方法であったが、我々の方法はそれとはまったく違った方法であり、世界中から注目されている。

以前のサブ 5 fs パルスのスペクトルは 800 nm を中心とするため、応用の観点からはあまり実用的ではなく、分光に応用されることは少なかった。しかし、NOPA においては、波長は可視領域であり、様々な物質がその波長に対して共鳴しており、光物性の視点から考えれば非常に魅力的な光源であるといえる。そのパルスエネルギーは  $5 \mu\text{J}$ 、繰り返し周波数は 1 kHz であり、超高速非線形分光にもっとも適した特性であるといえる。

#### 6.1.2 サブ 5 fs 実時間分光

##### 共役高分子

ポリアセチレンやポリジアセチレンなどの、共役高分子は、その  $\pi$  電子共役が、一次元主鎖方向に局在化して広がっている。その低い次元性のために、高速応答と大きな非線形性を示し、将来の超高速巨大非線形光学材料として注目されている物質である。

その大きくかつ速い非線形特性について深い理解を得るために、サブ 5 fs パルスを用いてポリジアセチレンについてポンプ・プローブ分光をおこなった。その結果、炭素の一重結合、二重結合、三重結合の振動モードの時間変化を観測することができた。その振動モードの時間変化についてスペクトログラム解析を行うと、一重結合と二重結合の結合交替の強さが、 $230 \text{ cm}^{-1}$  の変調周波数で、逆相的に変化し、三重結合はあまり相関がないことがわかった。このことは、130 fs の周期で、一重結合が長くなったとき二重結合のそれが短くなり、三重結合はそれに伴った変化はしないということである。この現象は dynamic mode coupling と呼ぶことができる。(static) mode coupling については、赤外吸収・ラマンスペクトルなどでよく研究されており、教科書にも記述されている普遍的な現象であるが、dynamic mode coupling は、これが初めての実験例である。

このような実験結果から、最低励起状態と終状態である高い励起状態のポテンシャル曲線の曲率の差を求めることが可能である。何らかの方法で、例えば吸収スペクトル、発光スペクトル、発光励起スペクトルなどから最低励起状態のポテンシャル曲線を知ることが出来れば、高い励起状態のポテンシャル曲線を原理的に計算する事が可能となる。

##### 有機色素分子

高分子にドープした有機色素分子の系として、クレジルバイオレット分子 (以下 CV) をポリビニルアルコール (以下 PVA) にドープしたものをを用いた。この試料はラマン散乱の実験において、 $590 \text{ cm}^{-1}$  に ring-distortion mode である強い振動モードが 1 つあることが知られており、非常に単純な系である。こ

の振動モードの実時間変化を調べるのが、この実験の目的である。

実験はポンプ・プローブ分光法を用いた。測定された規格化透過率が、増加した後に振動する様子が明瞭に観測された。この振動の周期はほぼ 60 fs である。これは、CV 分子が持つ、ring-distortion mode の  $590\text{ cm}^{-1}$  と対応している。このような振動を観測するためには、少なくとも 60 fs 以下の時間分解能が必要であり、サブ 5 fs のパルスによって、非常に明瞭に観測することができた。この振動波形についてスペクトログラム解析を行った結果、 $590\text{ cm}^{-1}$  の振動モードが時間的に振幅と周波数がともに変動していることがわかった。これから振幅と周波数とが共に 400 fs の周期で変調を受けていることがわかり、この振幅と周波数変調の位相はほぼ逆位相であることがわかった。このことは、ポテンシャル曲線が時間的に変調を受けることによって説明できる。この振幅変調と周波数変調の大きさとその位相関係から、ポテンシャルが時間的に曲率が変わるだけでなく、基底状態と励起状態のポテンシャルのずれも変わっていることがわかった。この変調の原因としては、CV 分子の ring-distortion mode 以外の振動モードとのカップリングによるものであると考えられる。

このような振幅変調、周波数変調の情報は従来のフェムト秒分光では得られなかったが、サブ 5 fs パルスを用いることによって明瞭に観測することができ、ポテンシャル曲線について詳しい情報を得ることができた。

## J 会合体

光合成を行うクロロフィルは、ポルフィリン分子が一次元状もしくは環状に並んだ会合体で構成され、その構造は J 会合体に似ていると考えられている。本研究で試料として用いる TPPS (tetraphenylporphine tetrasulfonic acid) J 会合体はそのモデル物質として現在盛んに研究が行われている分子集合体である。

本研究では、サブ 5 fs パルスを用い、ポルフィリン J 会合体の実時間分光を行った。実験で見られた振動モードは  $241\text{ cm}^{-1}$  の ruffling mode であると同定した。このモードのラマンスペクトルは、分散した分子では極めて弱くしか観測されていないが、J 会合体形成により、その強度は大きくなることが報告されている。このような、会合体中のフレンケル励起子と結合したコヒーレントな分子振動を観測したのは、本報告が初めてである。この振動成分の位相と振幅のプローブ波長依存性は、振動の起源が、 $241\text{ cm}^{-1}$  の ruffling mode を介した、B バンドから Q バンドへの dynamic intensity borrowing (DIB) による、Q バンドの双極子モーメントの変調によるものと解釈することができた。B バンドから Q バンドへの (static) intensity borrowing という現象は、ポルフィリン及びその類似化合物分子の吸収スペクトルを説明するために導入されている。また、金属ポルフィリンの共鳴ラマン散乱の実験で報告されており、また他の多くの分子のスペクトルに見られている。しかし、DIB という概念及び実験的観測は、本

研究が始めてである。この DIB を定量的に評価したところ、Q バンドは B バンドから振動に伴って、定常の場合の static intensity borrowing に加えて、更に 0.3% の振動子強度を借りていることがわかった。

## 擬一次元ハロゲン架橋金属錯体

擬一次元ハロゲン架橋金属錯体は電子格子相互作用の強い一次元励起子系として知られている。これまでの研究より光励起直後に形成される自由励起子はエネルギー的に安定な自己束縛励起子へと格子緩和することが明らかにされてきたが、この緩和過程を実時間分光により直接観測した報告例はこれまでにない。そこで我々はこの度開発されたサブ 5 fs の超短光パルスを用いてこの課題に取り組むことにした。

実験は反射型配置のポンププローブ法によって行い、試料には  $[\text{Pt}(\text{en})_2][\text{Pt}(\text{en})_2\text{I}_2](\text{ClO}_4)_4$  という錯体の単結晶を用いた。結果として、290 fs という振動周期の変調成分を伴った反射率変化が観測された。フーリエ変換により周波数スペクトルに変換すると  $114\text{ cm}^{-1}$  にピークが見られた。このピークは共鳴ラマン散乱スペクトルで観測されているヨウ素イオンの対称伸縮振動モード ( $123\text{ cm}^{-1}$ ) と良く対応している。したがってこの振動成分はコヒーレントに誘起されたヨウ素イオンの対称伸縮振動によるものであると考えられる。更に振動成分は 2 種類の相異なる減衰振動成分を含んでいることが分かった。このうち遅く減衰する成分の減衰時定数は 1400 fs で観測波長に依存しなかった。これは基底状態に生じた振動であると考えられる。減衰時定数はラマン散乱スペクトルの半値幅から予想される値と良く対応していた。一方、早く減衰する成分は自己束縛励起子状態のポテンシャル上での波束の振動によるものと考えられ、その減衰時定数は観測波長 (200~700 fs) に大きく依存していることが分かった。この減衰時定数の観測波長依存性は励起子の熱緩和過程を反映したものと考えられるが、エネルギー緩和レートは  $180\text{ meV/ps}$  と見積もられた。また振動の開始には、約 40 fs の時間的な遅れのあることも明らかになった。このような遅れは孤立分子中における励起状態中の波束の振動では起こり得ず、一次元励起子系特有の現象であると考えている。遅れの理由としては、(1) 自由励起子帯内での熱緩和過程、(2) 自由励起子帯から自己束縛励起子帯への内部転換過程が挙げられる。

## 6.1.3 新しい分光装置の開発

### 広帯域マルチプレックス非線型感受率スペクトル測定法の開発

これまで物質の非線型感受率スペクトルを測定するには単色のレーザーを基本波として用いて一波長ごとの値を測定していた。そのため複数の発振波長をもつレーザーを用意しなくてはならず、測定にかなりの時間を要し、さらに多くても数十波長点くら

いしか測定できず、スペクトルとしても完全な形を得られないだけでなく、その信頼性に大きな疑問点が残る結果しか得られなかった。そこで我々は、物質の非線型感受率スペクトルを広帯域で連続的にかつ高精度に求めることができる測定法である広帯域マルチプレックス非線型感受率スペクトル測定法の開発を行なった。この測定法が確立すれば、系統的な物性測定が可能となり、より詳細な物質構造解析へと応用されることが期待される。光源はチタンサファイア再生増幅器を基本とした近赤外域の光パラメトリック増幅器を用いた。それから発生したパルス測定したい試料に入射し、それによって発生する高調波のスペクトルを分光器を通して CCD カメラで測定する。参照試料としては、入射光パルスの領域で非線型感受率がほぼ一定であると考えられている FDS9 という高屈折率ガラスを用いている。これについても測定試料とまったくの同条件で高調波のスペクトルを測定し、それを基準として測定試料の非線型感受率スペクトルを求めるといったことを行った。これにより、励起光スペクトルの 2 乗および 3 乗を基準とした場合と比較して、再現性が非常に良くなった。その方法で PDA-4BCMU の非線型感受率スペクトルを測定した。ここでは、二つのピークが観測された。青相では 0.62 eV と 0.88 eV であり、赤相では 0.75 eV と 0.85 eV である。この内、0.62 eV と 0.75 eV については、そのエネルギーを三倍にした時に、ほぼ  $1^1B_u$  励起子のエネルギー (青相においては  $1^1B_u$  励起子のピークは 2.0 eV であり、赤相においては 2.35 eV である。) に一致することから、 $1^1B_u$  励起子に対する三光子共鳴であると思われる。このことはこの領域において、PDA-TPCLP にこの低エネルギーの  $1^1B_u$  励起子に対する三光子共鳴が現れていないことから分かる。PDA-TPCLP では  $1^1B_u$  励起子のピークは 1.76 eV と PDA-4BCMU よりも低く、観測されない。もうひとつの高エネルギー側のピークは  $2^1A_g$  状態に対する二光子共鳴の効果によるものではないかと思われる。このピークが  $2^1A_g$  状態に対する二光子共鳴と考えると、このピークから  $2^1A_g$  状態のエネルギーを見積ることができる。すなわち、PDA-TPCLP に対して 1.64 eV、PDA-4BCMU (青) に対して 1.76 eV という値になる。これは  $1^1B_u$  励起子のエネルギーより、わずかに低い値となっている。この  $1^1B_u$  励起子よりも状態の方がわずかにエネルギーが低くなっているということはこの三次非線型感受率スペクトルから始めて分かることである。

#### 中赤外吸収分光測定装置の製作

我々のグループはこれまでレーザー発振では直接得ることが困難な  $1\sim 3\ \mu\text{m}$  の光パルスの発生に成功し、これをフェムト秒広帯域吸収分光法や広帯域なスペクトル領域における第三次高調波光の同時測定に応用してきた。今年度は、更なる長波長領域の光の発生とその応用への興味から、中赤外光領域の光パルスの発生を試みた。中赤外光とは定義の仕方にもよるが、今回の計画では特に  $5\sim 10\ \mu\text{m}$  の光の発生に重点を置いた。一般に  $1500\ \text{cm}^{-1}$  よりも低い周波数領域は、指紋領域と言われ、物質の性質を敏感に

反映した振動準位間遷移に関わる信号が観測されることが知られている。フェムト秒光源はチタンサファイア再生増幅器からの出力で、中心波長  $0.775\ \mu\text{m}$ 、パルス幅 160 fs、パルスエネルギー  $700\ \mu\text{J}$  である。これを二段階の光パラメトリック過程を経て中赤外光を発生させる。まず、一段階目ではレーザーからの基本波光  $\lambda_p = 0.775\ \mu\text{m}$  をポンプ光とし、非線型光学結晶上で信号光  $\lambda_s = 1.39\ \mu\text{m}$  およびアイドラー光  $\lambda_i = 1.75\ \mu\text{m}$  に周波数分割する。そして、これをポンプ光によって非線型光学結晶上で増幅する。非線型結晶には BBO を用いた。増幅は二回行い、一回目のパラメトリック過程でプリアンプし、二回目目飽和領域に達するまで増幅し、安定な光の発生を得る。信号光とアイドラー光の出力の和は  $30\ \mu\text{J}$  であり、パルスごとの安定性は  $\pm 5\%$  未満である。続いて信号光とアイドラー光を再度時間的、空間的にあわせ、差周波光を発生させる。用いた非線型光学結晶は  $\text{AgGaS}_2$  である。上記の信号光  $\lambda_s = 1.39\ \mu\text{m}$  アイドラー光  $\lambda_i = 1.75\ \mu\text{m}$  の場合、発生する差周波光の波長は  $6.75\ \mu\text{m}$  である。差周波光の波長は可変で信号光、アイドラー光の波長を適当に調整することにより現在まで  $5\sim 8\ \mu\text{m}$  の領域での光の発生を確認している。有機非線型材料へ応用する準備段階として Si のポンププローブ分光を行った。励起光としてレーザーからの基本波光である  $0.775\ \mu\text{m}$  の光を照射したところ中赤外の広い波長領域において過渡吸収が観測された。この結果は中赤外光のパルス特性の評価に用いられ、装置の時間分解能は 400 fs と測定された。

#### 近接場顕微鏡を用いた時間分解顕微分光装置の製作

有機一次元物質は、大きな非線型光学特性と超高速性を併せ持ち、その機構解明は新規材料開発のため重要である。非線型光学特性の機構解明のために、これまで多くの分光実験がなされてきたが、詳細な機構解明を阻む不均一拡がりや分子間相互作用の影響を分離し観測することは不可能であった。しかし、単一分子や単一会合体の線型・非線型光学特性を明らかにすることで、それらの影響を分離することが可能になる。そのためには単一分子のみを観測できるほど空間分解能が高い顕微分光をする必要があり、近接場顕微鏡システムの構築を進めた。近接場顕微鏡の空間分解能は  $100\ \text{nm}$  以下である。従って、単一分子からの発光や吸収を観測することができる。光源にフェムト秒パルス光を使用することで時間分解顕微分光が可能になり、非線型性に大きく関与する励起子ダイナミクスを観測することができる。また、励起子-格子相互作用による影響を解明するためには温度依存性を研究する必要がある。そのため、室温から 4K まで温度を変化できるヘリウムフロー型のクライオスタットを用いて、時間分解分光実験を行えるよう低温 SNOM システムを構築した。さらに、サンプルと光ファイバプローブ間の距離を数十 nm に保つためのプローブ制御器も、将来の拡張に柔軟に対応できるように自作した。このシステムの特徴は試料の下部に対物レンズが配置されていることである。通常低温 SNOM 実験において用いられるイ

ルミネーション・コレクションモード (プローブで光を照射し受光する方法)での観測のみならず、イルミネーションモードとコレクションモードによる観測も可能となる。対物レンズはプローブに比べ集光効率がいため、より大きな S/N で時間分解分光実験を行うことができ、半導体に比べるとより小さな強度で励起しなければならない有機物の時間応答の観測には有利である。この低温 SNOM システムを用いて、試験的に回折格子のトポグラフを測定した。それによって  $1\ \mu\text{m}$  周期の矩形が明瞭に測定された。この像が得られたことから、低温 SNOM システムの正常な動作が確認された。さらに、擬イソシアニン色素 (PIC) J 会合体などの顕微発光分光を行い空間分解能が  $100\ \text{nm}$  の定常発光スペクトルの観測にも成功した。現在は時間分解分光システムを構築中である。

## 6.1.4 量子光学・量子情報

### 量子テレポーテーション

近年実験が盛んになりつつある量子光学の分野に関しては物理的な量子状態を持つ情報を操作するというこれまではあまり見られない大きな意味がある。特に莫大な量の情報処理や物理法則に基づいた完全な秘話通話への応用などに期待できるため 21 世紀の高度情報化社会に必要な基礎技術として興味深い。我々は光子を持つ量子状態を観測せずに別の場所へ情報の形で転送し、同じ量子状態を持つ光子を再生するという実験 (量子テレポーテーション) を計画している。共役な物理量は直交振幅の 2 つであり連続波で実験を行う。具体的には光子の量子状態を量子力学的に相関のある粒子対である EPR 対の片方と重ね合わせて暗号化したうえで転送し、別の空間においてその情報と EPR 対のもう片方からもとの光子と同じ量子状態を持つ光子を再生することができる。というものである。我々の実験では、光パラメトリック発振器 (OPO) から発生する縮退したスクイズド光を利用することを考える。スクイズド光は共役な物理量の分散が片方で増大し、もう片方では減少する。このスクイズド光で EPR 対を発生させ相関を持つ物理量の分散を大きくしておけば、跳弾雑音に埋もれることのない相関を得ることができ、ホモダイン検出によって意味のある情報を測定することになる。この情報は送るべき情報を含んでいるが EPR 対のランダムな出力との重ねあわせとなっており光子の量子状態を直接表現するものではない。この情報を電気信号で送信し、受信側では全く関係のない光子をこの情報に基づいて変調する。この光子と EPR 対のもう片方を重ね合わせることで初めの光子と同じ量子状態の光子を再生することができる。既にこのような量子テレポーテーションの実験は行われているが、量子状態の転送の忠実度  $F = |\langle \Psi_{\text{in}} | \Psi_{\text{out}} \rangle|^2$  はこれまでの最高値が  $F = 0.58 \pm 0.02$  であり真の量子テレポーテーションを達成するための基準  $F > 2/3$  をまだ達成していない。F を向上させ、真の量子テレポーテーションを達成することが我々の長期的な

目標である。実験のためには、まず量子力学的に相関を持つ光子対の発生が必要である。高いスクィージングを得るために、OPO の非線型媒体として、ニオブ酸カリウム (KN) 結晶を採用した。これにより 1 つの  $430\ \text{nm}$  の光子が二つの  $860\ \text{nm}$  の 2 個の光子に変換され、エネルギー保存則、運動量保存則等により、エネルギーだけでなく直交振幅や位相などに相関がある 2 つの光子を発生させることができる。この OPO を励起するために十分な強度の波長  $430\ \text{nm}$  のレーザー光が必要となる。このレーザー光を発生させるため、チタンサファイアレーザーの共振器内に LBO 結晶を設置して共振器内で 2 次高調波を発生させる系を現在構築中である。

## 6.1.5 量子光生物学

### バクテリオロドプシン

バクテリオロドプシン (以下 bR) は、Halobacterium halobium という古細菌のタンパク質で、細胞膜中の紫膜と呼ばれる領域を構成する、248 個のアミノ酸からなる膜タンパク質である。bR の中で光のエネルギーを吸収するのは発色団レチナールである。レチナールは、プロトン化されたシッフ基を介してタンパク質の Lys216 に結合している。bR が可視光を吸収すると、レチナールが all-trans 型から 13-cis 型へと構造異性化し、その後、異性化したレチナールに合わせて bR が構造を変え、一連の光プロトン輸送サイクルが引き起こされる。この光サイクルは、分光学的に区別できるいくつかの準安定な中間体間の移り変わりによって説明されている。このサイクルの初期過程 (bR<sup>-</sup> J 中間体) は超高速な過程であり、これを調べるためにはフェムト秒の時間分解能の実験が必要である。この過程を詳しく調べようというのがこの実験の目的である。

実験で用いた bR は、けん化剤で水に可溶化した試料である。実験はサブ 5fs パルスで励起光としたポンプ・プローブ分光法によって行い、各プローブ波長における試料の透過率変化の実時間スペクトルを測定した。その振動成分を抽出し、スペクトログラム解析した結果から、振動数  $1530\ \text{cm}^{-1}$  付近に 1 ps 以上持続する強い振動成分があることがわかった。これはレチナール分子の C=C 二重結合の伸縮振動である。また、200 fs 以前では振動  $1250$ 、 $1000\ \text{cm}^{-1}$  の振動成分がみえるが、これはそれぞれ C-H 結合の C=C 二重結合平面内での横揺れ、および C=C 二重結合平面外での縦揺れである。この  $1250\ \text{cm}^{-1}$  と  $1000\ \text{cm}^{-1}$  の二つの振動成分の周波数は 200 fs 付近になるとお互いに近づいていくように見えるが、これは、異性化の途中で C=C 二重結合平面がねじれ、C-H 結合の振動にとって、平面内と平面外の明確な区別がつかなくなり、二つの振動モードが似た状況になるためであると考えられる。また、 $1530\ \text{cm}^{-1}$  の振動数がやや小さくなっているが、これは C=C 二重結合の  $\pi$  電子が非局在化して結合次数が下がるためであると考えられる。300 fs 以降になると  $1250$ 、 $1000\ \text{cm}^{-1}$  の振動が、振幅が弱くなりながらそれぞ

れ元の振動数に戻っている。これは C=C 結合の両側の分子部分が、再び共平面に近い 13-cis 型にもどって行くからである。以上の考察の結果、bR 中のレチナールの異性化が、光励起後 200~300 fs の間に起こることが結論できる。また、分子が光構造異性化する途中の遷移状態という短寿命な状態の振動スペクトルを観測したのはこの実験が初めてである。

<受賞>

- [1] 藤 貴夫、日本光学会奨励賞、日本光学会、1999 年 11 月 24 日。

<報文>

(原著論文)

- [2] T. Kobayashi. Giant static dipole moment in pseudocyanine J-aggregate with a hierarchical structure. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, Vol. 314, pp. 1–11, 1998.
- [3] B. Ullrich, H. Sakai, N. M. Dushkina, H. Ezumi, S. Keitoku, and T. Kobayashi. The influence of the laser fluence on the transmission features of thin CdS films formed by laser ablation. *Microelectronic Engineering*, Vol. 43-44, pp. 695–700, 1998.
- [4] T. Kobayashi. Femtosecond phase spectroscopy. *Annual Reports on the Progress of Chemistry, Section C*, Vol. 94, pp. 375–395, Cambridge, 1998. The Royal Society of Chemistry,.
- [5] K. Misawa and T. Kobayashi. Ultrafast exciton and excited-exciton dynamics in hierarchical J-aggregates of three-level porphyrin. *J. Chem. Phys.*, Vol. 110, No. 16, pp. 5844–5850, 1999.
- [6] A. Shirakawa, I. Sakane, M. Takasaka, and T. Kobayashi. Sub-5-fs visible pulse generation by pulse-front-matched noncollinear optical parametric amplification. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 74, No. 12, pp. 2268–2270, 1999.
- [7] N. Kamiya, H. Ohtani, T. Sekikawa, and T. Kobayashi. Sub-picosecond fluorescence spectroscopy of the M intermediate in the photocycle of bacteriorhodopsin by using up-conversion fluorometry. *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 305, No. 1–2, pp. 15–20, 1999.
- [8] K. Yamamoto, K. Misawa, T. Kobayashi, T. Ohta, T. Kamata, S. Iwai, S. Kazaoui, N. Minami, and F. Mizukami. Franz-Keldysh oscillation in the interband absorption spectra of a one-dimensional metal complex. *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 302, No. 3, pp. 609–614, 1999.
- [9] Z.-Y. Deng, J.-L. Shi, Y.-F. Zhang, J.-K. Guo, and T. Kobayashi. Microstructure and creep behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC ceramic matrix composites. *Key Eng. Mater.*, Vol. 159-160, pp. 399–404, 1999.
- [10] Z. P. Guan and T. Kobayashi. Electromagnetic reflection from higher subband transition in a ZnSeZn<sub>0.8</sub>Cd<sub>0.2</sub>Se superlattice. *Solid State Commun.*, Vol. 111, pp. 311–316, 1999.
- [11] Z.-Y. Deng and T. Kobayashi. Microstructure and R-curve behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC ceramic matrix composites. *J. Mater. Sci. Lett.*, Vol. 18, pp. 489–492, 1999.
- [12] Z.-Y. Deng and T. Kobayashi. Optical absorption spectra in a three-dimensional corner under an applied electric field. *J. Phys.: Condens. Matter*, Vol. 11, pp. 5583–5591, 1999.
- [13] R. Sun, Q. Zheng, X. Zhang, T. Masuda, and T. Kobayashi. Light-emitting substituted polyacetylenes. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 38, pp. 2017–2023, 1999.
- [14] B. Ullrich, T. Loeher, Y. Segawa, and T. Kobayashi. The influence of hydrogen passivation of silicon on the photocurrent of CdS/Si heterodiodes. *Mater. Sci. and Engin.*, Vol. B56, pp. 150–152, 1999.
- [15] H. F. Hofmann. Nonclassical correlations of phase noise and photon number in quantum nondemolition measurements. *Phys. Rev. A*, 2000. 033815.
- [16] B. C. Chin, K. Misawa, T. Masuda, and T. Kobayashi. Large static dipole moment in substituted polyacetylenes obtained by electroabsorption. *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 318, pp. 499–504, 2000.
- [17] T. Kobayashi, A. Shirakawa, H. Matsuzawa, and H. Nakanishi. Real-time vibrational mode-coupling associated with ultrafast geometrical relaxation in a polydiacetylene induced by sub-5-fs pulses. *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 321, p.p. 385–393, 2000.
- [18] Z.-Y. Deng, X. Chen, T. Ohji, and T. Kobayashi. Subband structures, exciton and impurity states in V-shaped GaAs-Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As quantum wires. *Phys. Rev. B*, 2000. in press.
- [19] H. Kano and T. Kobayashi. Simultaneous measurement of real and imaginary parts of nonlinear susceptibility for the verification of the Kramers-Kronig relations in femtosecond spectroscopy. *Opt. Comm.*, 2000. in press.
- [20] H. F. Hofmann, T. Kobayashi, and A. Furusawa. Nonclassical correlations of photon number and field components in the vacuum state. *Phys. Rev. A*, 2000. in press.
- [21] H. Kano and T. Kobayashi. Time-resolved fluorescence spectroscopy of porphyrin J-aggregates using optical Kerr gate methods. *J. Chin. Chem. Soc.*, 2000. in press.
- [22] T. Kobayashi and A. Shirakawa. Sub-10fs tunable pulses in visible and NIR visible sub-5fs pulses generated by noncollinear OPA. *Appl. Phys. B*, 2000. in press.

(会議抄録)

- [23] T. Kobayashi. Ultrafast relaxations in one-dimensional systems:  $\pi$ -conjugated polymers, J-aggregates, and metal-halogen chain complexes.

In T. Kamiya, F. Saito, O. Wada, and H. Yamajima, editors, *Femtosecond Technology*, pp. 350–363. Springer, 2000.

- [24] T. Kobayashi and A. Shirakawa. Sub-10-fs tunable pulses in visible and NIR and visible sub-5-fs pulses generated by noncollinear OPA. *J. Luminescence*, Vol. 87–89, p.p. 119–120, 2000.
- [25] T. Fuji, T. Saito, and T. Kobayashi. Sub-5-fs study of self-induced phase and amplitude modulations of molecular vibration. *Quantum Electronics and Laser Science Conference, Technical Digest*, p. 220, 2000.
- [26] H. Kano, T. Saito, and T. Kobayashi. Phase jump in the wavelength dependence of coherent vibration in porphyrin j-aggregates by sub-5-fs spectroscopy. *Quantum Electronics and Laser Science Conference, Technical Digest*, p. 221, 2000.
- [27] T. Kobayashi, H. Kano, and K. Misawa. Spectral fringes in difference phase and transmission spectra using a femtosecond Sagnac interferometer. *Quantum Electronics and Laser Science Conference, Technical Digest*, p. 124, 2000.
- [28] K. Misawa and T. Kobayashi. Wave packet engineering: From molecules to semiconductor nanostructures. R. J. Gordon and Y. Fujimora, editors, *Quantum control of molecular dynamics*. World Scientific, 2000. in press.
- [29] T. Kobayashi. Sub-5-fs spectroscopy of polydiacetylenes. R. J. Gordon and Y. Fujimora, editors, *Quantum control of molecular dynamics*. World Scientific, 2000. in press.
- [30] T. Kobayashi, H. Kano, and T. Saito. Dynamical intensity borrowing in porphyrin J-aggregates revealed by sub-5-fs spectroscopy. R. J. Gordon and Y. Fujimora, editors, *Quantum control of molecular dynamics*. World Scientific, 2000. in press.

(国内雑誌)

- [31] 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, No. 44, pp. 30–40, 2000.
- [32] 小林孝嘉. フェムト秒実時間分光法—超高速ダイナミクスへの応用. 日本物理学会誌, Vol. 55, pp. 332–339, 2000.
- [33] 橋本秀樹, 山田隆, 高橋宏典, 細田誠, 小林孝嘉. p-ニトロアニリン型分子を用いた有機非線形光学結晶の開発. 固体物理, Vol. 35, , 2000. in press.

(学位論文)

- [34] 古田敦浩. ポリジアセチレンの近赤外フェムト秒分光及び第三次高調波発生スペクトル. (修士論文).
- [35] 吉田和広. ポリアセチレン置換体のフェムト秒時間分解発光分光. (修士論文).

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [36] H. Kanou and T. Kobayashi. Novel multi-exciton states: homo- and hetero-two-exciton states in porphyrin J-aggregates. *Conference on Lasers and Electro-Optics and Quantum Electronics and Laser Science Conference*, Baltimore, Maryland, May 23–28 1999. QMB7.
- [37] K. Misawa and T. Kobayashi. Control of emission spectrum and excited-state dynamics in a cyanine dye molecule with femtosecond chirped pulses. *Conference on Lasers and Electro-Optics and Quantum Electronics and Laser Science Conference*, Baltimore, Maryland, May 23–28 1999. JTUC2.
- [38] K. Misawa, A. Sugita, J. Janszky, and T. Kobayashi. Squeezing of a one-dimensional phonon in a halogen-bridged mixed-valence metal complex. *Conference on Lasers and Electro-Optics and Quantum Electronics and Laser Science Conference*, Baltimore, Maryland, May 23–28 1999. QWJ2.
- [39] T. Kobayashi, A. Shirakawa, H. Matsuzawa, and H. Nakanishi. Sub-5-fs real-time spectroscopy of coherent geometrical relaxation processes in polydiacetylenes. *Conference on Lasers and Electro-Optics and Quantum Electronics and Laser Science Conference*, Baltimore, Maryland, May 23–28 1999. QThF2.
- [40] H. Kanou and T. Kobayashi. Simultaneous measurement of real and imaginary parts of nonlinear susceptibility for the verification of the Kramers-Kronig relations in femtosecond spectroscopy. *Conference on Lasers and Electro-Optics and Quantum Electronics and Laser Science Conference*, Baltimore, Maryland, May 23–28 1999. QThG17.
- [41] T. Kobayashi. Visible sub-5-fs pulse generation by pulse-front matched optical parametric amplification. *1999 International Conference on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter*, Osaka, Japan, August 23–27 1999.
- [42] T. Kobayashi. Third-harmonic generation (THG) spectrum polydiacetylenes measured by a novel multiplex method. *The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, Seoul, Korea, August 30–September 3 1999.
- [43] T. Kobayashi. Third-harmonic generation (THG) spectrum of polydiacetylenes measured by a novel multiplex method. *XI International Symposium Ultrafast Phenomena in Spectroscopy*, Taipei, October 25–29 1999.
- [44] H. F. Hofmann, T. Kobayashi, and A. Furusawa. Correlations of measurement information and noise in quantum measurements with finite resolution. *RIMS symposium on analytical studies of Quantum Information and Related Fields*, January 2000.

- [45] T. Fuji, T. Saito, and T. Kobayashi. Sub-5-fs study of self-induced phase and amplitude modulations of molecular vibration. *Conference on Lasers and Electro-Optics, Quantum Electronics and Laser Science Conference*, San Francisco, California, U. S. A., May 7–12 2000. QThM3.
- [46] H. Kano, T. Saito, and T. Kobayashi. Phase jump in the wavelength dependence of coherent vibration in porphyrin j-aggregates by sub-5-fs spectroscopy. *Conference on Lasers and Electro-Optics, Quantum Electronics and Laser Science Conference*, San Francisco, California, U. S. A., May 7–12 2000. QThM5.
- [47] T. Kobayashi, H. Kano, and K. Misawa. Spectral fringes in difference phase and transmission spectra using a femtosecond Sagnac interferometer. *Conference on Lasers and Electro-Optics, Quantum Electronics and Laser Science Conference*, San Francisco, California, U. S. A., May 7–12 2000. QWI12.
- 招待講演**
- [48] A. Shirakawa, I. Sakane, and T. Kobayashi. Sub-5-fs visible pulse generation by pulse-front-matched optical parametric amplification. *Conference on Lasers and Electro-Optics and Quantum Electronics and Laser Science Conference*, Baltimore, Maryland, May 23–28 1999. CTuF5.
- [49] A. Shirakawa. Sub-9fs pulse generation tunable in visible (550–700 nm) and near-IR (0.9–1.5  $\mu\text{m}$ ) by non-collinear phase matching and pulse-front matching. *The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, Korea, August 30 – September 3 1999.
- [50] T. Kobayashi. Various optical nonlinear processes in J-aggregates. *The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, Seoul, Korea, August 30–September 3 1999.
- [51] T. Kobayashi. Ultrafast relaxation in conjugated polymers. *The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, Seoul, Korea, August 30–September 3 1999.
- [52] T. Kobayashi. Mechanism of ultrafast nonlinear photonic materials. *Sixth Symposium on Nonlinear Photonic Materials*, Tokyo, Japan, March 3–4 1999.
- [53] T. Kobayashi. Nonlinear optical process in polymers and J-aggregates. *International Symposium on Image Processing Molecular Systems*, Tsukuba, Japan, March 5 1999.
- [54] T. Kobayashi. Sub-5-fs real-time spectroscopy for the study of energy flow among vibrational modes. *Time Resolved Vibrational Spectroscopy IX*, Tucson, May 16–22 1999.
- [55] A. Shirakawa. Novel sub-5-fs pulse generation by noncollinear optical parametric amplification. *The 6th International Workshop on Femtosecond Technology*, Makuhari Messe, Chiba, Japan, July 13–15 1999. WA-8.
- [56] T. Kobayashi and A. Shirakawa. Sub-10fs tunable pulses in visible and NIR and visible sub-5fs pulses generated by noncollinear OPA. *Ultrafast Optics '99*, Monte Verit, Switzerland, July 11–16 1999.
- [57] T. Kobayashi and A. Shirakawa. Sub-5-fs real-time spectroscopy of geometrical relaxation processes in polydiacetylenes. *FemtoChemistry IV*, Leuven, Belgium, July 18–22 1999.
- [58] T. Kobayashi. Tunable sub-9fs pulse generation in the visible and near infrared. *1999 Gordon Research Conference on Nonlinear Optics and Lasers*, New Hampshire, U.S.A., July 25–30 1999.
- [59] T. Kobayashi. The generation of sub-9fs pulses in visible and near infrared. *The 1999 Annual Meeting of Optical Society of America*, Santa Clara, September 26–30 1999.
- [60] T. Kobayashi. Sub-10fs tunable pulses in visible and NIR and visible sub-5fs pulse generated by noncollinear OPA. *1999 International Conference on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter*, Osaka, Japan, August 23–27 1999.
- [61] T. Kobayashi. Generation of sub-5fs pulses for the study of coherent molecular vibrations. *1999 International Conference on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter*, Osaka, Japan, August 23–27 1999.
- [62] T. Kobayashi. Sub-5fs nonlinear dynamics in polydiacetylenes. *Chitose International Sasaki Memorial Forum Chitose*, Chitose, Hokkaido, October 12–13 1999.
- [63] T. Kobayashi. Sub-5fs spectroscopy of polydiacetylenes. *XI International Symposium Ultrafast Phenomena in Spectroscopy*, Taipei, October 25–29 1999.
- [64] T. Kobayashi. Sub 5fs pulse generation and its application to real time spectroscopy. *XI International Symposium Ultrafast Phenomena in Spectroscopy*, Taipei, October 25–29 1999.
- [65] T. Kobayashi. Ultrafast optical nonlinearity in porphyrin J-aggregates. *XI International Symposium Ultrafast Phenomena in Spectroscopy*, Taipei, October 25–29 1999.
- [66] T. Kobayashi. Sub-5-fs real-time spectroscopy and its application to molecular vibration control. In R. J. Gordon and Yuichi Fujimora, editors, *Workshop on the Quantum Control of Molecular Reaction Dynamics*, p. 26, Honolulu, Hawaii, U. S. A., December 12–15 1999.
- [67] T. Kobayashi. Sub-5-fs real-time spectroscopy of polymers. *18th General Conference of the Condensed Matter Division of the European Physical Society*, Montreux, Switzerland, March 13–17 2000.

- [68] T. Kobayashi. Sub-5-fs nonlinear optical processes in polydiacetylenes. *5th International Conference on Organic Nonlinear Optics*, Davos, Switzerland, March 12–16 2000.
- [69] T. Kobayashi. Ultrashort pulse generation by optical parametric amplifier. *Conference on Lasers and Electro-Optics, Quantum Electronics and Laser Science Conference* San Francisco, California, U. S. A., May 7–12 2000. CWO1, tutorial.
- (国内会議)
- 一般講演
- [70] 小林孝嘉, 白川晃. サブ 5fs 可視光パルスを発生する新しいパラメトリック増幅器の開発. 日本物理学会, 岩手 (岩手大学), 9 月 1999. 25YB-1.
- [71] 小林孝嘉, 白川晃, 斎藤敬, 松沢博, 中西八郎. ポリジアセチレンのサブ 5fs 実時間分光. 日本物理学会, 岩手 (岩手大学), 9 月 1999. 25YB-2.
- [72] 杉田篤史, 斎藤敬, 加納英明, 山下正廣, 小林孝嘉. 擬一次元ハロゲン架橋金属錯体の 5fs 時間分解分光. 日本物理学会, 岩手 (岩手大学), 9 月 1999. 25aYB-6.
- [73] 藤貴夫, 斎藤敬, 加納英明, 小林孝嘉. 有機色素分子 / 高分子のサブ 5 フェムト秒実時間分光. 日本物理学会, 岩手 (岩手大学), 9 月 1999. 25aYB-7.
- [74] 斎藤敬, 藤貴夫, 大谷弘之, 小林孝嘉. バクテリオロドプシンのサブ 5 フェムト秒実時間分光. 日本物理学会, 岩手 (岩手大学), 9 月 1999. 25aYB-8.
- [75] 藤貴夫, 斎藤敬, 加納英明, 小林孝嘉. 有機色素分子 / 高分子のサブ 5 フェムト秒分光 II-分子振動の自己誘導振幅・周波数変調. 日本物理学会, 大阪 (関西大学), 3 月 2000. 23aN-1.
- [76] 斎藤敬, 藤貴夫, 大谷弘之, 小林孝嘉. バクテリオロドプシンのサブ 5 フェムト秒実時間分光 II. 日本物理学会, 大阪 (関西大学), 3 月 2000. 23aN-2.
- [77] 小林孝嘉, 斎藤敬. バクテリオロドプシンのサブ 5 フェムト秒実時間分光 III. 日本物理学会, 大阪 (関西大学), 3 月 2000. 23aN-3.
- [78] 加納英明, 斎藤敬, 藤貴夫, 小林孝嘉. ポルフィリン j 会合体のサブ 5fs 分光. 日本物理学会, 大阪 (関西大学), 3 月 2000. 23aN-4.
- [79] 杉田篤史, 斎藤敬, 山下正廣, 小林孝嘉. 擬一次元ハロゲン架橋金属錯体のサブ 5fs 時間分解分光 II. 日本物理学会, 大阪 (関西大学), 3 月 2000. 23pM-1.
- [80] 小林賢史, 古田淳浩, 小林孝嘉, 橋本秀樹. 広帯域マルチプレックス非線型感受率スペクトル測定法の開発. 日本物理学会, 大阪 (関西大学), 3 月 2000. 23pN-1.
- [81] 小林孝嘉, 小林賢史, 古田敦浩, 橋本秀樹. 広帯域マルチプレックス非線型感受率測定法の開発. 応用物理学会, 東京 (青山学院), 3 月 2000. 30p-Y-5.
- [82] 小林孝嘉, 古田敦浩, 小林賢史, 島田悟, 松田宏雄. ポリジアセチレン (PDA) の第 3 高調波発生非線型感受率スペクトル. 応用物理学会, 東京 (青山学院), 3 月 2000. 30p-Y-6.
- [83] 小林孝嘉, 白川晃, 斎藤敬, 松沢博, 中西八郎. ポリジアセチレンのサブ 5fs 分解能実時間振動分光. 日本物理学会, 岩手 (岩手大学), 9 月 1999. 25pYH-8.
- [84] 小林孝嘉, 藤貴夫, 斎藤敬, 加納英明, 杉田篤史. サブ 5fs パルスをを用いた実時間分光. 物性研究所研究会「先端分光物性研究の現状と将来展望」, 柏 (東京大学物性研究所), 10 月 1999.
- [85] 小林孝嘉. サブ 5fs パルスをを用いた実時間分光法. 日本分光学会シンポジウム「超分光法を目指して」, 理化学研究所, 11 月 1 日 1999.
- [86] 小林孝嘉. サブ 5 フェムト秒実時間分光. 第 5 回フェムト秒光エレクトロニクス研究会, 青山学院大学, 12 月 20 日 1999. 電気電子情報学術振興財団.
- [87] 小林孝嘉. サブ 5 フェムト秒パルスによるコヒーレント分光. 「超高速フォトンクス」ワークショップ, 東京大学工学部, 1 月 25 日 2000.
- < 特許 >
- [88] 小林孝嘉. J 会合体配向分散膜及びその製造方法. 日本国特許 出願番号 特願平 11-263807
- [89] 小林孝嘉, 白川晃. 超短光パルス発生装置 日本国特許 出願番号 特願平 11-241422
- [90] 小林孝嘉, 白川晃, 坂根勲, 高坂正臣. レーザー装置 日本国特許 出願番号 特願平 11-22397
- [91] 小林孝嘉, 古田敦浩, 小林賢史 非線形感受率スペクトル測定法 日本国特許 出願番号 特願 2000-42955

招待講演

## 6.2 牧島研究室

### 6.2.1 「あすか」GIS 装置の運用と較正

打ち上げ5年目に入った宇宙X線衛星「あすか」は、しだいに軌道高度が下がってはいるものの、順調に稼働している。近地点高度は、打ち上げ当初の520 km から2000年4月現在で464 km に下がり、同じく遠地点高度はこの間に620 km から502 km へと低下してきた。我々の責任製作になる撮像型蛍光比例計数管 (GIS=Gas Imaging Spectrometer) は、ゲインのゆるやかな時間変動や、場所による相対的ゲインのわずかな変化はあるものの、まったく問題なく動作を続け、全世界に貴重なデータを供給し続けている。粒子バックグラウンドは昨年あたりまでは徐々に増加(年間約4%)していた。これは軌道上で長い崩壊寿命をもつ放射性同位体が作られ蓄積してきたためと考えられる。今年度ありからは、軌道の低下を反映して、GISの粒子バックグラウンドは減少に転じている。

### 6.2.2 「あすか」による宇宙X線の観測

#### ○ 近傍銀河の Kerr ブラックホール候補天体

近傍の多くの渦巻銀河の腕領域には、中性子星のエディントン限界を1~2桁もしのぐ謎の強いX線源 (ULX; Ultra-Luminous Compact X-ray Source) が存在する。牧島、水野、久保田らは昨年度に引き続き、ULXのX線スペクトルが標準降着円盤からの多色黒体放射で記述できること、よってULXはソフト状態にあるブラックホール連星であること、しかも大光度なのでそれらのブラックホールは、 $\sim 100 M_{\odot}$ の質量をもつことを、観測的に確立した [1][13][22][35][42][48][55]。古徳らは渦巻銀河 NGC 2403 に、ULXと系内ブラックホール連星との中間的な性質をもつ天体を確認した [54]。

ULXでは円盤の温度が異常に高く、Schwarzschild ブラックホールと考えては矛盾が生じる。Kerr ブラックホールだと、円盤内縁が中心により近づくことによる温度の上昇と、より強い相対論的效果とが競合するが、円盤が pole-on に近くない限り前者が勝ち、観測された高い円盤温度が説明できることが、水野により示された [35]。よってULXは、Kerr ブラックホールである可能性が高い [1][13][22][42][55][62]。

2000年2月に行われた「あすか」による渦巻き銀河 IC 342 の観測を1993年の結果と比べることで、決定的な証拠をえた。この銀河にある2つのULXのうち、一方 (Source 1) は1993年には図6.2 aのように、スペクトル的にソフト状態だったが、2000年にはハード状態に遷移していた。他方のULX (Source 2) のスペクトルは偶然、まったく逆の遷移を行っていた [62]。このような挙動は、銀河系内ブラックホール連星に固有であることから、ULXがブラックホール連星であることは確実に言ったと言える。

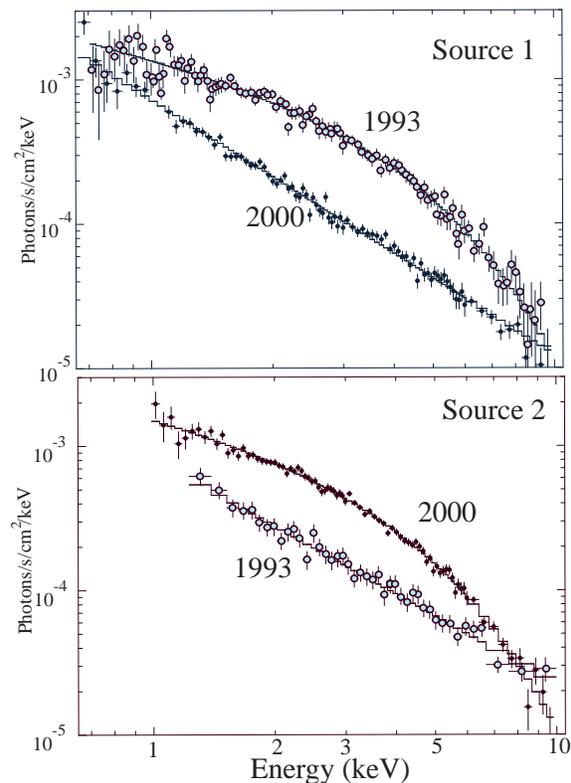


図 6.2 a: X-ray spectra of Source 1 (top) and Source 2 (bottom) of the spiral galaxy IC 342 obtained with *ASCA*, compared between the September 1993 and February 2000 observations. The data are corrected for the instrumental responses and photoelectric absorption. Thus, Source 1 made a spectral transition from the soft state to the hard state, *vice versa* for Source 2.

#### ○ 標準降着円盤の検証

ブラックホールまわりの標準降着円盤では、円盤の温度は半径の  $p = -3/4$  乗で中心に向け上昇し、円盤の内縁は最終安定軌道の位置で一定に保たれる。しかし光度がエディントン限界に近づくとき、アドベクションの効果が効き、これらの性質が破れるであろう。水野らは「あすか」によるULX(上述)および銀河系内/大マゼラン雲のブラックホール連星のデータを詳しく調べた結果、3個のULXでは、変動にともない円盤の見かけの内縁半径が、内縁温度にほぼ反比例して変化することを発見した。これはアドベクションが効いていることを示唆する [35]。

いっぽう久保田らは、これらの天体のスペクトルを、温度の指数  $p$  を変えて合成したスペクトルのモデルと比較したところ、ほぼ  $p = -3/4$  であることが確認され、アドベクションの効果が小さいという答えを得た [21][49][61]。これら2つの結果は一見あい矛盾しており、今後さらなる研究が必要である。

### ○ ライン X 線の共鳴散乱効果の研究

昨年度、牧島、寺田らは、白色わい星の磁極のプラズマ中でライン光子が共鳴散乱され、縦方向にコリメートされることで、ライン放射が異方性をもつ可能性を指摘した。今年度はさらに強磁場白色わい星の代表である AM Her の「あすか」データを解析し、磁極を上から見下ろすフェーズで、鉄ラインが強くなっている気配を発見した [60]。またヨーロッパの巨大 X 線衛星 XMM-Newton (1999 年 12 月に打ち上げ) では、この効果の確認をねらった寺田らの観測提案が採択され、観測を待っている。

### ○ 活動銀河核の変動のタイムスケール

伊豫本らは昨年度、構造関数とモンテカルロシミュレーションを用いることで、ひじょうにまばらな時系列データから、変動のパワースペクトルを推定する新しい方法を開発した [18] [40] [45]。ひき続き伊豫本、江副らはこの方法を発展させ、代表的な低光度 AGN である M81 の中心核の X 線強度と、たまたまその近くに見られる遠方のクエーサーの X 線強度を、6 年にわたって追跡した。その結果、2 つの天体の変動の特徴的な時間とともに数百日と長いことがわかった [40] [64]。よって 2 つの中心核は、光度が 4-6 桁も異なるにもかかわらず、ほぼ同程度 ( $\sim 10^8 M_{\odot}$ ) の質量をもつと考えられる。これらの結果は、宇宙の進化とともにクエーサーの質量降着が減り、低光度 AGN になったことを示唆する。

### ○ ジェットをもつ活動銀河核の物理

田代、磯部、杉保らは、BL Lac 型天体 OJ287 からの X 線を、変動が激しくソフトなシンクロトロン放射と、変動が遅くハードなシンクロトロン自己コンプトン放射という、2 成分に分解することに成功した [6] [8] [19] [46] [63]。

電波ジェットの終端ローブで発生する逆コンプトン放射の研究も続けられた。ジェット中、ならびに定衝撃波でローブが形成された時点では、粒子エネルギーは磁場エネルギーに勝っているようである。いっぽうローブの周辺にかけては、磁場が圧縮されるとともに粒子がエネルギーを失い、最終的には磁場の壁により粒子が閉じ込められていることがわかった [16] [32] [41] [44] [65]。磯部らは Centaurus A のローブのデータ解析に着手した。XMM-Newton 衛星では、逆コンプトン X 線の探査をねらった我々の 3 件の観測提案がすべて採択され、観測を待っている。

### ○ 銀河群からの X 線と粒子加速

中澤らは、木曾シュミット望遠鏡を用いて暗黒銀河団の候補である X 線源 RX J1833.6+6520 を光学観測し、光で検出限界以下の銀河まで考えると、必ずしも暗黒銀河団とは断定できない [17] [50]。

高橋らは小平 (天文台) と協力し、これまで X 線で研究されていなかった Shakhbazyan のコンパクト銀河群を「あすか」で観測し、3 つのうち 2 つ (SCGG202 および SCGG223) から X 線を検出した [56]。これらの銀河群は光ではきわめて大きな速度分散を示すが、X 線観測でえられた温度と光度は、他の銀河群のものと大差ないので、高い速度分散は銀河の運動が緩和していないことを示唆する。

昨年、深沢 (釜江研) の主導により発見された、銀河群からの広がった非熱的放射も、ひき続き研究されており、銀河群で定常的に粒子加速が起きている可能性が検討されている [47] [66]。牧島は、銀河がプラズマ中を運動することで生じる磁気乱流により、銀河の運動エネルギーがプラズマ加熱と粒子加速に費やされているという考えを発展させた [15] [39]。

### ○ 銀河団の中心における物理の総まとめ

牧島は深沢泰司 (釜江研)、大橋隆哉、松下恭子 (都立大)、池辺靖 (Max Planck)、江澤元 (天文台野辺山)、田村隆幸 (SRON/Utrecht)、徐海光 (上海交通大学) らと協力し、「あすか」で得られた銀河団の中心における物理の総まとめを進めた。要点は、(1) 銀河団の中心で重力ポテンシャルはカスプをもち [14]、さらに cD 銀河の影響でそこに階層的なポテンシャルの凹みができること [4] [11]、(2) cD 銀河の周囲には重元素に富んだ低温プラズマが閉じ込められており [4]、それは固有の磁気圏を形成しているらしいこと、(3) この磁場のリコネクションにより、低温プラズマは熱的に安定に保たれ、さらに粒子加速が生じていること [15]、(4) そのエネルギー源は、cD 銀河が自己重力系として収縮したり、メンバー銀河が中心に落下するさいに解放するエネルギーで賄われること [15]、(5) 磁気圏をつき破った重元素はすみやかに銀河間空間に運ばれること [7] [12] [28] [29]、というものである。従来は銀河は化学的に閉じた系とみなされ、銀河団プラズマは放射冷却により中心に流れ込むとされていたが、「あすか」の観測により、そうした古い描像が一新されつつある [38]。とくに高温プラズマ中を銀河が運動することに伴う磁気流体効果に着目したことは、プラズマ物理学者から高い評価を受けた [27] [39]。

### 6.2.3 硬 X 線検出器 (HXD) の開発

我々は ASTRO-E 衛星に搭載される 4 つの装置の一つとして、硬 X 線検出器 (HXD) を、釜江研、宇宙研、阪大核物理センターなどと共同で開発してきた。後述のように ASTRO-E は軌道投入を果たせなかったが、HXD の開発は無事に完了した。

#### ○ HXD-S 衛星搭載品の製作

HXD の検出器部 (HXD-S) は重量 200 kg をもち、結晶とシリコン PIN ダイオード [51] を組み合わせ

て、10–700 keV のエネルギー域を確保する。HXD-S は BGO/GSO フォスウィッチ構成、BGO のアクティブコリメーション、複眼型の検出器モジュール構成、BGO のアンチカウンタなどを用いることで、きわめて低いバックグラウンドを実現する [9]。HXD のアナログ電子回路部 (HXD-AE) は、100 チャンネルに及ぶ信号の並列処理を行うもので、衛星搭載の電子回路部としては、従来にない複雑さをもつ [10]。HXD アナログ電子回路部 (HXD-DE) は、HXD-AE からのデジタル信号に CPU 処理を施して情報の編集と圧縮を図るとともに、衛星と HXD 装置とのインタフェースを司る役目をもつ [24]。これら 3 つの衛星搭載コンポーネントは、いずれも 1999 年 5 月までに完成された [9][10]。

### ○ HXD の単体較正試験

1999 年 6 月には、ほぼ 1 月を費やして、HXD の単体較正試験が宇宙研にて行われた。前半には HXD-S の熱真空試験 (HXD-AE は真空槽の外、HXD-DE はプロトモデルを使用) が行われ、真空中での動作が確認された。

ついで HXD-S を恒温槽 (大気中) で  $-20^{\circ}$  に保った状態で、外部の HXD-AE と接続し、基本的な動作および性能を確認した [10][52]。とくに図 6.2 b に示すように、PIN 検出器のエネルギー下限は設計目標である 10 keV を確保でき、また PIN 検出器も GSO 検出器も、目的とする低いバックグラウンドを達成することができた [37]。ついで検出器の正面からさまざまなアイソトープを照射することで、検出器のエネルギー応答 [53] [67] [59] [68] および角度応答 [23] [57] [70] が詳しく較正された。

最後に検出器を常温に置き、さまざまな方向からアイソトープを照射することで、アンチカウンタの応答を較正した [43] [58] [69]。

### ○ 衛星上での各種試験

単体試験を終えた HXD 装置は 1999 年 7 月初め、宇宙科学研にて ASTRO-E 衛星に搭載された。以後は 12 月まで、衛星全体としての電氣的インタフェース試験、電磁干渉試験、熱真空試験、振動・衝撃試験など、打ち上げ前の一連の試験が行われた。この間、HXD-S の CFRP 遮光板を臭素を含まない素材に取り替え、AE のカレントリミタの感度を調整し、HXD-DE ソフトウェアのわずかな変更を行ったほかは、HXD に不具合は発生せず、無事に試験をパスした。また衛星の他の機器から HXD への電磁干渉もなく、単体試験と同様に、低いバックグラウンド特性が確認できた。

### ○ シリコン PIN ダイオードの詳細較正試験

HXD のために開発した 2 mm 厚のシリコン PIN ダイオードは、複雑なエネルギー応答を示す [51]。上

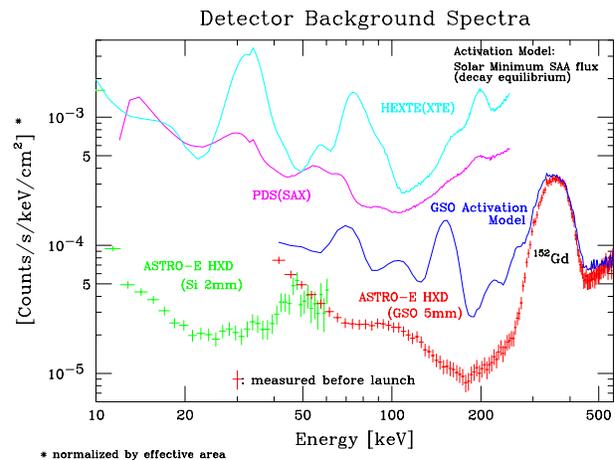


図 6.2 b: Room background spectra of the HXD experiment, taken in the pre-flight calibration at a temperature of  $-20^{\circ}$  and normalized to the effective area. The lower energy threshold of 10 keV has been achieved, together with very low background levels which satisfy the design goal. Also shown are the predicted in-orbit HXD background, in comparison with those of other satellite experiments.

述の較正試験では不十分なため、フライト予備品を用い、スリットで絞って  $^{109}\text{Cd}$  の X 線、また  $^{241}\text{Am}$  の X 線および  $\gamma$  線を照射することで、場所ごとの応答を調べた。その結果、p 層の周辺にあるガードリング電極付近で X 線が止まると、電荷がガードリングに分割されるので、正しいイベントの 2/3 のパルスハイトをもつイベントが生じること、また完全に空乏化していないと、i 層と n 層の境界付近で止まったイベントは、スペクトルに低エネルギーのテールを作ることがわかった [37] [68]。

## 6.2.4 ASTRO-E 衛星の打ち上げ失敗

重量 1670 kg の ASTRO-E 衛星は、2000 年 2 月 10 日の日本標準時 10:30 に、宇宙科学研の内之浦宇宙空間観測所より、M-V 型ロケット 4 号機にて打ち上げられた。しかしロケット 1 段目のノズル部分を絞りこむグラファイト断熱材に破損が生じ、発射後 52 秒ごろから 3500 の燃焼ガスが、ノズルの根元を破って横に漏れたため、ノズルの首振り制御するサーボアンプが焼損し、発射後 55 秒から 75 秒 (1 段目の燃焼終了) まで、ロケットは姿勢制御されない状態で飛行してしまった。このためロケットは進行方向の推力をロスするとともに、姿勢の乱れにより、大きな空気抵抗を受ける結果となった。2 段目と 3 段目は、地上からの軌道修正の指令に応じて完璧に動作したにもかかわらず、1 段目の損失を完全には回復できず、衛星の最終速度は地球周回にとって

必要な値に、ごくわずか(0.7%ほど)届かなかった。結果として衛星は地球を1/3ほど回った地点で大気圏に再突入し、我々のHXD装置を含めて、すべて燃え尽きて失われてしまったと考えられる。ASTRO-E計画が承認された時点からは6年間、それ以前に釜江研で行われていた基礎開発を含めると、10年近い歳月をHXD装置の開発に費やしたにもかかわらず、このような結果に終わってしまったことは、無念としか言いようがない。一日も早く同型の衛星を再び打ち上げられるよう、奔走中である。

## 6.2.5 新しい線検出器の開発

釜江研と協力し、MeV領域の線の新しい検出方法として、結晶シンチレータの発光を青色に感度をもつ新型フォトダイオード(浜松ホトニクスS3590-18)で読み出す方法を開発した[36][71]。フォトダイオードは信号増幅を行わないため電氣的雑音の問題となるが、100%に近い量子効率をもつので、フォトチューブ読み出しに比べ、統計的雑音は減ると期待される。じっさい10mm角のGSOシンチレータをフォトダイオードで読み出した場合、エネルギーの下限は150keVまで下げることができ、 $> 1.5$  MeVではフォトチューブで読み出した場合より、エネルギー分解能が良くなることが検証された。将来は、小型シンチレータを3次元に並べ、個別にフォトダイオードで読み出すことで、コンプトン望遠鏡の実現をはかる。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Mizuno, T., Ohnishi, T., Kubota, A., Makishima, K. & Tashiro, M.: ASCA Observations of Two Ultra-Luminous Compact X-Ray Sources in the Edge-On Spiral Galaxy NGC 4565, *Publ. Astr. Soc. J.* **51**, 663 (1999)
- [2] Ueda, Y., Takahashi, T., Inoue, H., Tsuru, T., Sakano, M., Ishisaki, Y., Ogasaka, Y., Makishima, K. et al.: LogN-LogS Relations and Spectral Properties of Sources from the ASCA Large Sky Survey, *Astrophys. J.* **518**, 656 (1999)
- [3] Ueda, Y., Takahashi, T., Ishisaki, Y., Ohashi, T. & Makishima, K.: The ASCA Medium-Sensitivity Survey (The GIS Catalog Project): Source Counts and Evidence for Emerging Population of Hard Sources, *Astrophys. J.* **524**, L11 (1999)
- [4] Ikebe, Y., Makishima, K., Fukazawa, Y., Tamura, T., Xu, H., Ohashi, T. & Matshushita, K.: Two-Phase Intracluster Medium in the Centaurus Cluster of Galaxies, *Astrophys. J.* **525**, 58 (1999)
- [5] Makishima, K., Mihara, T., Nagase, F. & Tanaka, Y.: Cyclotron Resonance Effects in Two Binary X-Ray Pulsars and the Evolution of Neutron Star Magnetic Fields, *Astrophys. J.*, **525**, 978 (1999)

- [6] Kataoka, J., Takahashi, T., Makino, F., Inoue, S., Madejski, G. M., Tashiro, M., Urry, C. M. & Kubo, H.: Variability Pattern and the Spectral Evolution of the BL Lacertae Object PKS 2155-304, *Astrophys. J.*, **528**, 243 (2000)
- [7] Fukazawa, Y., Makishima, K., Tamura, T., Nakazawa, K., Ezawa, H., Ikebe, Y., Kikuchi, K. & Ohashi, T.: Statistical Properties of Metal Abundances of the Intracluster Medium in the Central Region of Clusters, *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* **313**, 21 (2000)
- [8] Watson, D., Hanlon, L., McBreen, B., Smith, N., Tashiro, M. et al.: Simultaneous Multifrequency Observations of the BL Lac MS 0205.7+3509, *Astron. Astrophys.* **345**, 414 (1999)
- [9] Nakazawa, K., Kamae, T., Makishima, K., Takahashi, T., Murakami, T., Tashiro, M., Fukazawa, Y., Tamura, T., Iyomoto, N., K. Ebisawa, Ezoe, Y. et al.: Fabrication of the ASTRO-E Hard X-ray Detector, *SPIE*, **3765**, 148
- [10] Tanihata, C., Kataoka, J., Murakami, T., Ota, N., Ozawa, H., Takahashi, T., Tamura, T., Uchiyama, Y., Watanabe, S., Yamaoka, K., Yonetoku, D., Ezoe, Y., Fukazawa, Y., Isobe, N., Iyomoto, N., Kamae, T., Kokubun, M., Kotoku, J., Kubota, A., Makishima, K., Matsumoto, Y., Mizuno, T., Nakazawa, K., Onishi, T., Sugiho, M., Takahashi, I., Tanaka, M., Tashiro, M., Terada, Y. et al.: Preflight Performance of the ASTRO-E Hard X-ray Detector, *SPIE*, **3765**, 645 (1999)
- [11] Nakazawa, K., Makishima, K., Fukazawa, Y. & Tamura, T. ASCA Observations of a Near-by Cluster in the Antlia, *Publ. Astr. Soc. J.* **52**, in press (2000)
- [12] Matsushita, K., Makishima, K., & Ohashi, T.: Metal Abundances in the Hot Interstellar Medium in Early-Type Galaxies Observed with ASCA, *Publ. Astr. Soc. J.* **52**, in press (2000)
- [13] Makishima, K., Kubota, A., Mizuno, T., Ohnishi, T., Tashiro, M. et al.: The Nature of Ultra-Luminous Compact X-ray Sources in Nearby Spiral Galaxies. *Astrophys. J.*, **535**, in press (2000)
- [14] Tamura, T., Makishima, K., Fukazawa, Y., Ikebe, Y., & Xu, H.: X-Ray Measurements of the Gravitational Potential Profile in the Central Region of Abell 1060 Cluster of Galaxies, *Astrophys. J.*, **535**, in press (2000)

(会議抄録(レフェリーつき))

- Proc. 4th ASCA Conference, *The Heating and Accretion in the Universe*, Hachioji, March 1999
- [15] Makishima, K.: Energy Non-Equipartition Processes in the Universe, *Astronomische Nachrichten* **320**, 163 (1999)

- [16] Tashiro, M., Iyomoto, N., Kaneda, H., Makishima, K. & Isobe, N.: ASCA Measurements of Non-Thermal Pressures in the Radio Lobes, *ibid*, 217
- [17] Nakazawa, K., Fukazawa, Y. & Makishima, K.: ASCA Observation of Diffuse X-ray Source RXJ1833.6+6520, a Candidate for Dark Cluster? *ibid*, 294
- [18] Iyomoto, N. & Makishima, K.: Long-Term Variability of the M81 Nucleus, *ibid*, 300
- [19] Sugiho, M., Tashiro, M., Perlman, E. S., Makishima, K. et al.: ASCA Observation of the BL Lac Object PKS 1413+135 Embedded in a Spiral Galaxy, *ibid*, 316
- [20] Kaneda, H., Makishima, K., Yamauchi, S., Sugizaki, M. & Yamasaki, N. Y.: Investigation of the Galactic Ridge X-Ray Emission, *ibid*, 322
- [21] Kubota, A., Marshall, F., Makishima, K., Dotani, T., Ueda, Y. & Negoro, H.: ASCA Observations of the X-ray Transient XTE J1550-564, *ibid*, 353
- [22] Mizuno, T., Ohnishi, T., Kubota, A., Makishima, K. & Tashiro, M.: ASCA Observation of Ultra-Luminous X-Ray Sources and Interpretation of their Nature, *ibid*, 356
- [23] Matsumoto, Y., Nakazawa, K., Kamae, T., Makishima, K., Takahashi, T., Murakami, T., Tashiro, M. & Fukazawa, Y.: Angular Response of the Hard X-Ray Detector (HXD) onboard ASTRO-E, *ibid*, 376
- [24] Terada, Y., Tashiro, M., Takahashi, T., Fukazawa, Y., Kawaguchi, G., Matsuzaki, K., Odagi, I., Tanaka, Y., Makishima, K. & Kamae, T.: The Digital Data Processing System of the ASTRO-E Hard X-Ray Detector, *ibid*, 377
- Proc. 32nd COSPAR Symposium E1.1, *Broad Band Spectra of Cosmic Sources*, Nagoya, July 1998
- [25] Mizuno, T. & Makishima, K.: X-Ray Observations of the Normal Spiral Galaxies with ASCA, *Advances in Space Research* **25**, 395 (2000)
- [26] Kubota, A., Tanaka, Y., Makishima, K. et al.: ASCA Observation of the X-Ray Transient GRS 1009-45, *ibid*, 449
- [27] Matsumoto, R., Valinia, A., Tajima, T., Makishima, K. & Shibata, K.: Formation of Localized Strongly Magnetized Regions in Galaxies and Clusters of Galaxies: *ibid*, 499
- [28] Matsushita, K., Ohashi, T. & Makishima, K.: X-Ray Study of Hot Interstellar Medium in Early-Type Galaxies, *ibid*, 583
- [29] Ohashi, T., Kikuchi, K., Matsushita, K., Yamasaki, N., Ezawa, H., Fukazawa, Y., Makishima, K., Kamae, T. et al.: Metallicity and Temperature Distributions in Clusters of Galaxies, *ibid*, 593
- [30] Nakazawa, K., Makishima, K., Fukazawa, Y. and Tamura, T.: ASCA Observation of a Near-By Cluster, Antlia, *ibid*, 607
- [31] Obayashi, H., Makishima, K. & Tamura, T.: ASCA Observations of the Sculptor supercluster, *ibid*, 625
- [32] Tashiro, M., Makishima, K. & Kaneda, H.: ASCA Measurements of Field-Particle Energy Density Distribution in Radio Lobes, *ibid*, 751
- [33] Ueda, Y., Akiyama, M., Hasinger, G., Inoue, H., Ishisaki, Y., Makishima, K. et al.: Results from the ASCA Large Sky Survey, *ibid*, 839
- [34] Ishisaki, Y., Ogasaka, Y., Ueda, Y., Yamashita, A., Takahashi, T., Inoue, H., Makishima, K., Miura, T. & Hasinger, G.: ASCA Detection of Faint Sources in the Lockmann Hole and its Comparison with ROSAR Sources, *ibid*, 845
- (学位論文)
- [35] Mizuno, T.: ASCA Investigation of Ultra Luminous Compact X-ray Sources in Nearby Spiral Galaxies, 博士論文
- [36] 大西呂尚, 「結晶シンチレータとフォトダイオードを用いた宇宙線検出器の基礎実験」, 修士論文
- [37] 杉保昌彦, 「ASTRO-E 衛星硬 X 線検出器の低エネルギー応答の打ち上げ前最終測定」, 修士論文
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [38] Makishima, K.: New X-ray Insight into Galaxy Clusters and Groups, in the 4th RESCEU International Symposium *The Birth and Evolution of the Universe*, Univ. Tokyo, November 16-19, 1999
- [39] Makishima, K.: Magnetic Reconnections in Large Scale Cosmic Plasmas, in *Magnetic Reconnections in Space and Laboratory Plasmas*, Univ. Tokyo, Feb.29-March 4, 2000
- 一般講演 / ポスター
- [40] Iyomoto, N., Makishima, K., Ezoe, Y.: Long-Term Variability of the LLAGN in M81, *X-Ray Astronomy '99: Stellar Endpoints, AGN and the Diffuse X-ray Background*, September 6-10, 1999, Bologna, Italy
- [41] Tashiro, M. et al.: ASCA measurements of non-thermal pressures in radio lobes, *ibid*
- [42] Kubota, A., Makishima, K., Mizuno, T. & Ebisawa, K.: The Nature of Ultra-Luminous Compact X-Ray Sources in Nearby Spiral Galaxies, *ibid*
- [43] Y. Terada, K. Yamaoka, M. Kokubun, J. Kotoku, T. Mizuno, J. Kataoka, T. Takahashi, T. Murakami, K. Makishima, T. Kamae and the HXD team: Capability of the ASTRO-E Hard X-ray Detector for High-Energy Transients and  $\gamma$ -Ray Bursts, in *Fifth International Compton Symposium Registration*, September 15-17, 1999,

- [44] Tashiro, M.: ASCA measurements of field and particle energy distributions in radio lobes, in it ASCA/ROSAT workshop on AGNs, November 6–8, 1999, ISAS, Japan
- [45] Iyomoto, N: Long-Term Variability of the LLAGN in M81, *ibid*
- [46] Isobe N., Sugiho M, Tashiro M & Makishima K.: ASCA Observations of BL Lacertae Object OJ2871, *ibid*
- (国内会議)
- 日本物理学会・秋の分科会 (9月23~26日、島根大学)
- [47] 深沢泰司、牧島一夫、中澤知洋:「あすか」による銀河群からの硬 X 線放射の検出、25pSD1
- [48] 水野恒史、牧島一夫、田代信、久保田あや、大西呂尚、古徳純一:「あすか」で見た近傍渦巻き銀河中の強 X 線源、25pSD2
- [49] 久保田あや、牧島一夫ほか:「あすか」が観測したブラックホール候補天体について、25pSD3
- [50] 中澤知洋、牧島一夫、高橋勲、深沢泰司:「あすか」衛星を用いた、ダーククラスターの探索、25pSD4
- [51] 太田直美、村上敏夫、高橋忠幸、田村隆幸、牧島一夫、釜江常好、田代信、深沢泰司ほか:ASTRO-E 衛星搭載 PIN 型半導体検出器の開発とフライト品の性能、25pSD8
- [52] 谷畑千春、磯部直樹、伊豫本直子、内山泰伸、江副祐一郎、太田直美、大西呂尚、小澤秀樹、片岡淳、釜江常好、久保田あや、国分紀秀ほか:ASTRO-E 衛星搭載用硬 X 線検出器の地上特性評価試験、25pSD9
- [53] 磯部直樹、釜江常好、牧島一夫、村上敏夫、高橋忠幸、田代信、深沢泰司、杉保昌彦、松本縁、中澤知洋、国分紀秀、高橋勲ほか:ASTRO-E 衛星搭載用硬 X 線検出器の地上特性評価試験、25pSD10
- 日本天文学会・秋の年会 (10月7~9日、九州大学・六本松キャンパス)
- [54] 古徳純一、水野恒史、久保田あや、大西呂尚、牧島一夫、田代信:近傍渦巻き銀河 NGC2403 中の大光度 X 線源の観測、R29a
- [55] 牧島一夫、水野恒史、久保田あや、古徳純一、大西呂尚、田代信ほか:近傍渦巻き銀河に見られる大光度 X 線の Kerr ブラックホール解釈、R30a
- [56] 高橋勲、中澤知洋、牧島一夫:「あすか」による Shakhbazyan のコンパクト銀河群の観測、T18a
- [57] 松本縁、中澤知洋、深沢泰司、田代信、釜江常好、牧島一夫、高橋忠幸、村上敏夫ほか:ASTRO-E 衛星硬 X 線検出器 (HXD) の角度レスポンス、W10a
- [58] 山岡和貴、高橋忠幸、村上敏夫、田村隆幸、釜江常好、牧島一夫、田代信、深沢泰司、能町正治ほか:ASTRO-E 衛星硬 X 線検出器 (HXD) アンチカウンタの地上較正、W11a
- [59] 杉保昌彦、内山泰伸、磯部直樹、高橋勲、牧島一夫、釜江常好、高橋忠幸、村上敏夫、田代信、深沢泰司ほか:ASTRO-E 衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD) のエネルギー応答の地上キャリブレーション、W12a
- 日本天文学会・春の年会 (4月3~5日、東京大学・本郷キャンパス)
- [60] 寺田幸功、牧島一夫、石田学、松崎恵一、今成武:「あすか」による強磁場激変星を用いた共鳴散乱の検証、N11a
- [61] 久保田あや、牧島一夫、水野恒史、古徳純一、海老沢研:「あすか」によるブラックホール降着円盤の X 線スペクトル詳細解析、N16a
- [62] 水野恒史、牧島一夫、久保田あや:近傍渦巻き銀河にある強 X 線源からの放射機構の「あすか」による観測的研究、N17a
- [63] 磯部直樹、杉保昌彦、田代信、牧島一夫:「あすか」による BL Lac 天体 OJ287 の観測、S07a
- [64] 江副祐一郎、伊豫本直子、牧島一夫:The Lockmann Field における AGN の長期時間変動、S08a
- [65] 田代信、深沢泰司、牧島一夫:銀河団中の電波銀河 PKS B2356–611 の X 線観測、S17b
- [66] 中澤知洋、深沢泰司、磯部直樹、牧島一夫:「あすか」による Fornax 銀河団からのハード X 線放射の観測、T07a
- [67] 渡辺伸、内山泰伸、久保信、谷畑千春、高橋忠幸、村上敏夫、釜江常好、牧島一夫、田代信、深沢泰司ほか:ASTRO-E 衛星搭載用硬 X 線検出器 (HXD) の地上最終キャリブレーション (1)、W12b
- [68] 杉保昌彦、釜江常好、牧島一夫、田代信、深沢泰司、国分紀秀、中澤知洋、磯部直樹、松本縁、江副祐一郎ほか:ASTRO-E 衛星搭載用硬 X 線検出器 (HXD) の地上最終キャリブレーション (2)、W13b
- [69] 古徳純一、山岡和貴、寺田幸功、国分紀秀、牧島一夫、釜江常好ほか:ASTRO-E 衛星硬 X 線検出器 (HXD) アンチカウンタの応答関数の構築、W14b
- [70] 松本縁、中澤知洋、深沢泰司、田代信、釜江常好、牧島一夫、高橋忠幸、村上敏夫ほか:ASTRO-E 衛星硬 X 線検出器 (HXD) 有効面積の角度応答、W15b
- [71] 高橋勲、大西呂尚、牧島一夫、田代信、釜江常好:フォトダイオードで読み出す硬 X 線・線検出器、W21b
- その他
- [72] 田代 信:「あすか」時代から戦国時代へ、第2回 NRO「ディスクとジェット」の相互作用」研究会 (国立天文台、2000年3月6–7日)

## 6.3 高瀬研究室

当研究室では磁場により閉じ込められた高温プラズマの研究を行っている。この研究は未来のエネルギー源としての核融合の実現を目指したものであり、そのために不可欠な高温プラズマの物理的理解を目標としている。特に、プラズマを閉じ込めるのに必要な磁場の圧力に対するプラズマの圧力（この比は $\beta$ とよばれる）が従来のトカマクやヘリカル方式に比べ10倍程度も大きくできる球状トカマク（ST）プラズマにおいて、電磁流体（MHD）不安定性、プラズマ乱流による輸送、波動を用いたプラズマ加熱等の研究を行っている。平成11年度には新しい球状トカマク装置 TST-2（トーラスの大半径0.36 m、小半径0.23 m、トロイダル磁場0.3 T、プラズマ電流0.2 MA、巻頭口絵1-A参照）が完成し、これまで用いていた TST-M 装置に比べ格段に高温、高密度のプラズマ実験が可能となった。またこれらの研究に必要な新しいプラズマ計測手法、プラズマ加熱手法の研究開発を行っており、開発した計測・加熱手法を用いて核融合科学研究所、日本原子力研究所、およびプリンストン大学プラズマ物理研究所との共同研究を活用して幅広い研究を行っている。

### 6.3.1 TST-2 装置の建設と実験

平成10年度秋から設計を始めた球状トカマク装置 TST-2 は、11年度秋に装置本体が完成し最初のプラズマ放電を得た。CCDカメラで撮影した典型的な放電の様子を巻頭口絵1-Bに示す。現在までのところ、主要な電磁コイルの設計定格の1/3程度で運転を行っており、得られた最大プラズマ電流は90 kAで最長の放電時間は20 msである。口絵1-C(A)はプラズマ電流が90 kAの放電のプラズマ電流波形である。図6.3 aに TST-M と TST-2 装置のプラズマ電流および半値幅で評価した放電持続時間を示す。電流×放電持続時間で既に1桁の向上があることがわかる。目下、計測器や磁場発生用コイル、電源、高周波加熱装置などの整備を進めながら、目標とするプラズマを生成するための調整を行っている。平成11年度には磁気計測によるプラズマの形状測定、電子密度、イオン温度など基本プラズマパラメータの計測、そして高周波波動加熱・電流駆動の基礎実験としての速波励起実験を中心に行った。

#### プラズマパラメータ計測

プラズマのポロイダル断面に並べられた磁気コイルとフラックス（磁束）ループを用いて、生成したプラズマの位置および形状を測定した。コイル電流と真空容器に流れるうず電流をトロイダル方向に流れる円環電流（フィラメント電流）で近似している。また、プラズマ電流は本来滑らかな空間分布を持っているがこれを数本のフィラメントで近似している。この近似を用いることで、各フィラメントに流れる電流の時間発展はフィラメント間の自己・相互イン

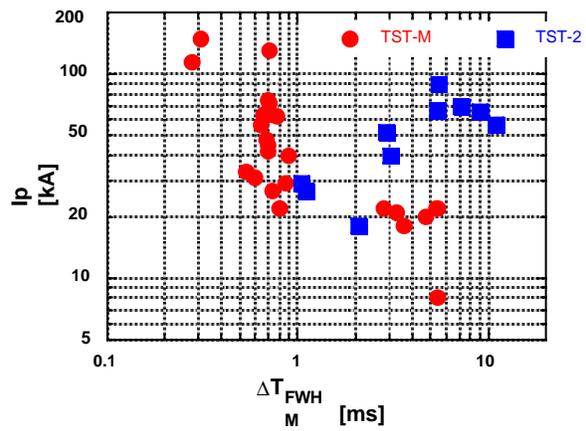


図 6.3 a: Comparison of plasma current  $I_p$  and discharge duration  $\Delta T_{FWHM}$  between TST-M and TST-2.

ダクタンスで決まる。この近似ではプラズマ内部の磁気面は正確に表せないが、プラズマ境界面は精度よく表すことができる。得られた結果の例を図6.3 bに示す。アスペクト比（トーラスの大半径 $R$ と小半径 $a$ の比）1.6、楕円度（プラズマ断面の高さ $2b$ と幅 $2a$ の比）1.5のプラズマが生成されていることが分かる。

電子密度を測定するために50 GHzのマイクロ波干渉計を設置した。導波管をつなぎ変えることによって $z = \pm 200$  mm、 $R = 390$  mmの3つの測定コードで線積分密度を測定することができる。通常の放電の場合には、放電中に密度が高くなりすぎるため位相が測定できなくなるが、放電初期と放電終期では、密度が薄く、測定が可能である。この時の測定からプラズマの密度は $3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 以上であることが確認されている。イオン温度計測のために可視分光器を設置し、酸素の発光（OV）のドップラー広がりを用いて、イオン温度を求めた。プラズマ電流50 kAの放電で、イオン温度は時間とともに50 eV程度から100 eV程度まで上昇することが観測された。表?にパラメータ計測の結果をまとめる。

プラズマ内部の局所的な電子温度、電子密度、電位、磁場などを計測するため、二種類のプローブを製作した。静電プローブでは、前面の4つの電極でトリプルプローブ計測を用いて電子温度、密度、電位を求め、側面の一つずつの電極をマッハプローブとして使い、流速の計測を行う。これより揺動によって生ずる輸送を計測することができる。又、3方向磁気コイルを内蔵し、磁気揺動も観測できる。磁気プローブアレイはプラズマ中の磁場の空間分布を測定することを目的とする。 $(R, z)$ 二方向磁気コイルがそれぞれ2 cmごとに10個ずつ配置されており、各コイルの $NS$ は $4000 \text{ mm}^2 \cdot \text{turns}$ 程度である。

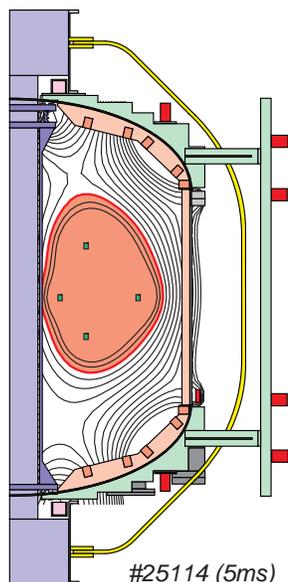


図 6.3 b: Shape of a TST-2 plasma derived from magnetic measurements.

#### 内部磁気再結合現象

内部磁気再結合現象 (IRE) は ST 特有の MHD 現象として知られているが、この現象の物理機構の解明は未だ十分ではない。磁気プローブを用いて IRE の観測を行っている (口絵 1-C 参照)。(A) はプラズマ電流の時間変化である。時刻 6.5 ms と 8.5 ms 付近でプラズマ電流が急激に上昇し、同時に周回電圧に負方向のスパイク (B) および  $H_{\alpha}$  線の発光の急激な増大 (C) が観測され、磁気揺動の振幅が大きくなっている (D) ことがわかる。IRE 前後の磁気揺動の周波数スペクトルよりこの時間帯で 10–20 kHz のコヒーレントな揺動が現れていることがわかる (D)。この MHD 振動のトロイダルモード数は  $n = 1$  であった。ポロイダルモード数  $m$  に関しては計測が不十分であるため、今後更に詳細に測定する必要がある。

#### 圧力勾配による電流駆動

トカマクではプラズマを閉じ込めるのに必要な磁場の一部をプラズマ電流によって作っている。電流を流す手法は、変流器の一次コイルの電流の時間変化で誘導起電力を作る誘導方式と、高周波電力や中性粒子ビーム入射などによる非誘導方式に大別される。ST では変流器の最大磁束を大きくすることができないため、非誘導電流駆動の開発が特に重要である。また、将来的には全く誘導起電力を使わないようなものが望ましく、そのためにはプラズマ電流をゼロから立ち上げる手法が必要となる。そこでプラズマの圧力勾配によって生じる電流 (ブートストラップ電流) を利用したプラズマ電流立ち上げを目標と

して研究を開始し、1992 年に CDX-U 装置において Forest らが行った先駆的実験の再現に成功した。今後、磁場配位の調整などによりプラズマの閉じ込めを改善し、プラズマ電流値を大きくしたうえで、予想されるブートストラップ電流量との整合性を評価する予定である。

#### コムラインアンテナを用いた速波励起実験

ST プラズマは誘電率が高いため、通常トカマクで加熱・電流駆動に用いられる低域混成波、電子サイクロトロン波などはプラズマ中心まで伝播できない。しかし、ICRF 高調波速波 High Harmonic Fast Wave (HHFW) は ST のような高誘電率プラズマでも中心部まで伝播可能で、高  $\beta$ ・高温プラズマでは電子による吸収が強いという性質を持つため、ST における有効な加熱・電流駆動手段として期待される。電流駆動を行う場合にはトロイダル方向に進行波を励起する必要がある。このために新概念の進行波型アンテナであるコムラインアンテナを設計・製作した。コムラインアンテナは、高周波電流を担うストラップをトロイダル方向に櫛状に並べた構造をもち、片方の端のストラップのみに給電すればよいので、従来のアンテナに比べ構造は格段に簡単となる。一本目のストラップに電流が流れると隣のストラップへと順次位相のずれた電流が誘起され、これらの電流が作る高周波磁場によりプラズマ中に進行波が励起される。TST-2 用に製作したアンテナはストラップ 6 本から構成されており、19–27 MHz のパスバンドを実現している。このアンテナを用いて RF パワー 1 kW レベルの波動をプラズマ中に励起し、真空容器内各所に配置した磁気プローブで磁場強度・位相の空間分布を測定して波動物理の解明を目指している。初期結果として非常に強いプラズマへの結合が観測されており、高周波磁場分布は全波コードによる計算結果とよく一致している。

### 6.3.2 JFT-2M における共同研究

#### 速波電流駆動実験

日本原子力研究所の JFT-2M はコムラインアンテナを備えている。今回、電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) で生成した高電子温度標的プラズマに、進行波速波 (FW) を入射し電流駆動実験を行った。軟 X 線波高分析器 Soft X-ray Pulse Height Analyzer (SXPHA) を用いて、各時間帯におけるエネルギースペクトルおよび電子温度の計測を行った。FW 入射により、電子温度の上昇が観測され、エネルギースペクトルの変化から、FW 吸収時の  $N_{||}$  が推定できる。このときの吸収効率は ECH、FW で同程度であった。電流駆動の効果は明確でなかったが、これは FW+ECH の有効な時間が短く周回電圧の定常状態が得られなかったこと、FW 入射時に密度変化や不純物増加の影響を受けてしまったこと等の理由が考えられる。

## プローブ実験

JFT-2M では以前から東大グループが中心となってプローブ計測を行ってきた。特に、高閉じ込めモード（Hモード）プラズマの輸送障壁生成過程における乱流輸送抑制の物理に力点を置いて研究を進めてきた。これまでは時間的に位置が固定されたプローブを用いて計測してきたが、高温のプラズマにさらされることによってプラズマとプローブ双方に悪影響があるため、プラズマの周辺部の限られた範囲（セパトトリックスの内側 2 cm 程度まで）を測定するに留まっていた。今年度は測定範囲を拡大することをねらって、放電時間中に高速移動するレシプロカルプローブを製作した。このプローブは圧縮空気により動作し、500 ms で 300 mm の距離を往復できる。プローブの先端には 4 つのモリブデン製のピン（ピン同士の間隔は 4 mm）を設けた。プローブはセパトトリックスより 6 cm 程度内側まで挿入することができる。

実験結果として、ダブルプローブの高電位側の電極電位が、単独の電極で計測した浮遊電位を下回る結果が得られ、磁気面上に電場が存在していることが示唆された（図 6.3 c）。磁気計測を用いた平衡計算から求められた磁気面に対して、プローブ先端の平面はわずかに傾いているが、その影響ではないことが示された。磁力線方向に電場の成分がないと仮定をして暫定的に電子温度、電子密度、空間電位の空間分布を求めることができた。その値から  $\vec{E} \times \vec{B}$  粒子束を、密度減衰から磁気面に垂直方向の粒子束を評価し、共に  $\sim 3 \times 10^{20} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  程度であることから、電場の存在による粒子束の寄与が大きいことが示された。電場の存在については、今後シングルプローブ測定によって電極間の一様性を仮定せずに電子温度・密度・空間電位を求める必要がある。

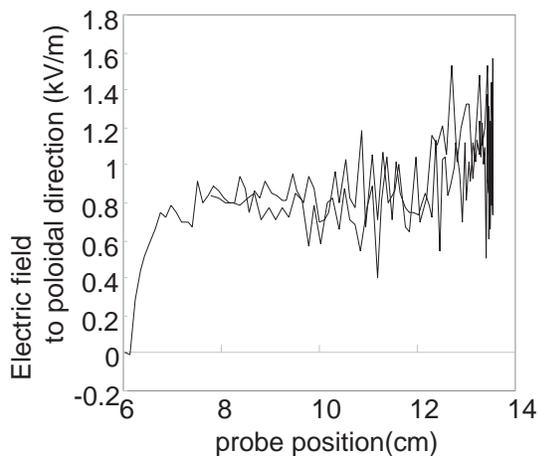


図 6.3 c: Radial profile of the poloidal electric field in the plasma edge region.

## 6.3.3 LHD 装置における共同研究

### LHD 用電流駆動アンテナの開発

ヘリカル型装置はプラズマ電流を必要とせず、外部コイルの作る磁場のみによりプラズマを閉じ込めることができる。しかし高  $\beta$  で安定なプラズマを維持するためには閉じ込め磁場の回転変換の径方向分布を制御する必要がある。これはプラズマ中に少量の電流を駆動することにより達成可能である。このためには高い指向性をもった進行波を励起することが必要である。核融合科学研究所の大形ヘリカル装置 LHD において速波による電流駆動実験を行うため、コムラインアンテナの開発を行っている。周波数は 85 MHz で電子とのランダウ共鳴を利用して電子を一方方向に加速することにより電流を駆動する。

平成 11 年度には東大で行ったモックアップアンテナ測定およびモデル回路計算の結果に基づき、LHD 用のアンテナ設計を行った。このアンテナは 10 本のストラップが櫛状に並んだコムラインアンテナを上下に 2 組重ねた形状をもち（図 6.3 d）、上下 1 本ずつのストラップより成るモジュールをプラズマ境界面に沿って 10 個並べて構成される。11 年度にはこのモジュール 4 個を製作した。12 年度にはこの 4 個のモジュールを並べたプロトタイプの実験的特性を実測し、必要があれば調整を加え 10 モジュールの実機アンテナを完成させる予定である。



図 6.3 d: The LHD combline antenna installed inside the LHD vacuum vessel.

## 6.3.4 CHS 装置における共同研究

## 軟 X 線分光測定

プラズマの電子温度測定、MHD 不安定性の研究、不純物イオンの振る舞い等の研究を目的として、多層膜反射鏡軟 X 線分光器を開発し、核融合科学研究所の CHS ヘリカル装置で測定を行った。本研究で用いた多層膜反射鏡は人工的に作った周期的なシリコン・タングステン膜構造をもち、その膜厚 ( $2d = 6.76 \text{ nm}$ ) は軟 X 線に対してブラッグ反射を起こすように調整されている。またその反射率は高エネルギー研究所 (KEK) の放射光施設で較正されたものである。この分光器は他の軟 X 線測定手法と比較して、中程度のエネルギー分解能と中程度の時間分解能を持ち、エネルギー・スペクトルの速い変動を測定できるという特徴を持つ。図 6.3 e に典型的な軟 X 線のスペクトルを示す。

不純物ラインの影響が少ないときには、スペクトルの対数スケールでの勾配から電子温度を測定することができる。しかしながら得られた温度はトムソン散乱で求めた電子温度よりも数倍低く、また相関も見られなかった。さらに、信号レベルの評価からスペクトルは、不純物ラインの影響を大きく受けていると考えられる。従って、現在の測定エネルギーレンジ ( $0.6\text{--}1.1 \text{ keV}$ ) では電子温度の測定は難しいと考えられ、次年度はこれを不純物計測に活用するための改造を検討している。ピンホールの縮小やソーラスリット (入射角に対する垂直成分の広がりを抑えるスリット) などを用いることでエネルギー分解能を改善し、また、長波長領域を制限するフィルターを変更して光量を増すことで不純物線スペクトルのプロファイルを精度よく計測する予定である。

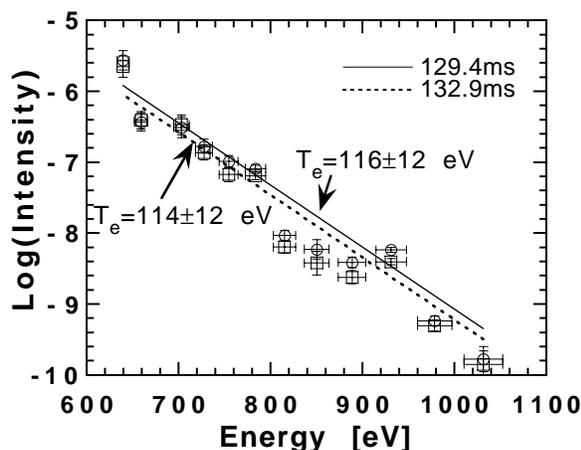


図 6.3 e: Soft X-ray spectra during an MHD burst. Solid and dashed lines show the spectra before and after the crash.

## 6.3.5 マイクロ波計測の開発

マイクロ波を用いたプラズマの密度測定は最も標準的で信頼度の高い手法とされる。その一方で、より詳細な密度の情報を得るために、新手法、多チャンネル化などの計測の高性能化が求められている。

### マイクロ波透過計

厚みの薄いシートプラズマ、特にダイバーターレグの密度測定として、透過計を提案、検討した。これは、カットオフ条件でもマイクロ波がトンネル効果によって厚みの薄いプラズマを透過することを利用したものである。1次元波動方程式を用いて検討した結果、透過率の周波数依存性からプラズマの厚み、最大密度の情報が得られることがわかった。現実的な測定精度を想定すると、厚いプラズマは測定できない。測定できる厚みは密度とともに減少するが、LHD プラズマのダイバーターレグを対象とした場合、十分測定可能だと考えられる。

### PIN Switch による多チャンネル化

多チャンネルを比較的低コスト、簡単なシステムで実現する手法のひとつに PIN スイッチを利用する方法がある。これは、システムの発振部と検出部を 1 チャンネル分用意して、各送信アンテナ、各受信アンテナへのマイクロ波を切り替えて多チャンネルを実現する方法である。この方法の有効性を実証するために PIN スイッチのテストを行い 2 チャンネル反射計を組み立てて模擬実験を行った。その結果、数  $\mu\text{s}$  の時間分解能で位相測定が可能であることを確認できた。同時に、高精度測定のためには PIN スイッチの分離度 (isolation) をさらに良くする必要があることがわかった。

## 6.3.6 NSTX 装置における共同研究

日本国内では TST-2 は最大規模の ST 装置であるが、米国プリンストン大学プラズマ物理研究所の NSTX ならびに英国 UKAEA Fusion の MAST は TST-2 より一回り規模の大きな ST 装置であり、どちらも平成 11 年に実験を開始した。当研究室はこれらの研究グループと緊密な協力関係をもっている。特に NSTX の実験には直接参加しており、12 年度には HHFW を用いた高周波加熱および電子パーンシュタイン波 (EBW) の輻射を利用した新電子温度計測法の開発で共同研究を行う予定である。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] J.A. Goetz, B. LaBombard, B. Lipschultz, C.S. Pitcher, J.L. Terry, C. Boswell, S. Gangadhara,

- D. Pappas, J. Weaver, B. Welch, R.L. Boivin, P. Bonoli, C. Fiore, R. Granetz, M. Greenwald, A. Hubbard, I. Hutchinson, J. Irby, E. Marmor, D. Mossessian, M. Porkolab, J. Rice, W.L. Rowan, G. Schilling, J. Snipes, Y. Takase, S. Wolfe, S. Wukitch: High confinement dissipative divertor operation on Alcator C-Mod, *Phys. Plasmas* 6, 1899-906 (1999).
- [2] M. Greenwald, R. Boivin, P. Bonoli, R. Budny, C. Fiore, J. Goetz, R. Granetz, A. Hubbard, I. Hutchinson, J. Irby, B. LaBombard, Y. Lin, B. Lipschultz, E. Marmor, A. Mazurenko, D. Mossessian, T. Sunn Pedersen, C.S. Pitcher, M. Porkolab, J. Rice, W. Rowan, J. Snipes, G. Schilling, Y. Takase, J. Terry, S. Wolfe, J. Weaver, B. Welch, S. Wukitch: Characterization of enhanced D-alpha high-confinement modes in Alcator C-Mod, *Phys. Plasmas* 6, 1943-9 (1999).
- [3] Y. Takase, M. Katsuragi: Spherical Tori (Report on the Joint Meeting of the IAEA Technical Committee and the Fourth International Workshop held at Tokyo, Japan, 26-28 October 1998), *Nucl. Fusion* 39, 1057-68 (1999).
- [4] J. Reardon, P.T. Bonoli, M. Porkolab, Y. Takase, W.J. Wukitch: Fast wave transmission measurements on the Alcator C-Mod tokamak, *Phys. Lett. A* 264, 407-411 (2000).
- [5] J.A. Snipes, A. Fasoli, P. Bonoli, S. Migliuolo, M. Porkolab, J.E. Rice, Y. Takase and S.M. Wolfe: Investigation of fast particle driven modes on Alcator C-Mod, *Plasma Phys. Contr. Fusion* 42, 381-388 (2000)
- [6] S. Lee, S. Duorah, A. Ejiri, H. Iguchi, A. Fujisawa, E. Ishiyama, Y. Takase, H. Toyama, M. Aramaki, M. Kojima, S. Okamura, K. Matsuoka: Multilayer mirror soft x-ray spectrometer for fast electron temperature measurement on the compact helical system, *Rev. Sci. Instrum.* 71, 1671-1674 (2000).
- [7] A. Fujisawa, H. Iguchi, H. Idei, S. Kubo, K. Matsuoka, S. Okamura, K. Tanaka, T. Minami, S. Ohdachi, S. Morita, H. Zushi, S. Lee, M. Osakabe, R. Akiyama, Y. Yoshimura, K. Toi, H. Sanuki, K. Itoh, A. Shimizu, S. Takagi, A. Ejiri, C. Takahashi, M. Kojima, S. Hidekuma, K. Ida, S. Nishimura, M. Isobe, N. Inoue, R. Sakamoto, S-I Itoh, Y. Hamada and M. Fujiwara: Electric pulsation and profile quatization in CHS heliotron/torsatron, *Plasma Phys. Contr. Fusion*, 41, A561-568 (1999).
- [8] A. Iiyoshi, A. Komori, A. Ejiri, M. Emoto, H. Funaba, M. Goto, K. Ida, H. Idei, S. Inagaki, S. Kado, O. Kaneko, K. Kawahata, T. Kobuchi, S. Kubo, R. Kumazawa, S. Masuzaki, T. Minami, J. Miyazawa, T. Morisaki, S. Morita, S. Murakami, S. Muto, T. Mutoh, Y. Nagayama, Y. Nakamura, H. Nakanishi, K. Narihara, K. Nishimura, N. Noda, S. Ohdachi, N. Ohyabu, Y. Oka, M. Osakabe, T. Ozaki, B. J. Peterson, A. Sagara, S. Sakakibara, R. Sakamoto, H. Sasao, M. Sasao, K. Sato, M. Sato, T. Seki, T. Shimozuma, M. Shoji, H. Suzuki, Y. Takeiri, K. Tanaka, K. Toi, T. Tokuzawa, K. Tsumori, K. Tsuzuki, K. Y. Watanabe, T. Watari, H. Yamada, I. Yamada, S. Yamaguchi, M. Yokoyama, R. Akiyama, H. Chikaraishi, K. Haba, S. Hamaguchi, M. Iima, S. Imagawa, N. Inoue, K. Iwamoto, S. Kitagawa, J. Kodaira, Y. Kubota, R. Maekawa, T. Mito, T. Nagasaki, A. Nishimura, C. Takahashi, K. Takahata, Y. Takita, H. Tamura, T. Tsuzuki, S. Yamada, K. Yamauchi, N. Yanagi, H. Yonezu, Y. Hamada, K. Matsuoka, K. Murai, K. Ohkubo, I. Ohtake, M. Okamoto, S. Satoh, T. Satow, S. Sudo, S. Tanahashi, K. Yamazaki, M. Fujiwara, O. Motojima: Overview of the Large Helical Device Project, *Nucl. Fusion*, 39, 1245-1256 (1999).
- [9] A. Ejiri, K. Kawahata: Feasibility of Microwave Transmissivity Measurement to Obtain Density Profile of Sheet Plasmas, *Jpn. J. Appl. Phys.* 39 (2000), in press.
- (会議抄録)
- [10] E. Marmor, P. Acedo, O. Batishchev, R. Bengtson, R.L. Boivin, F. Bombarda, X. Bonnin, P. Bonoli, C. Boswell, R. Bravenec, N. Bretz, C. Chang, C. Christensen, G. Cima, W. Dorland, J. Drake, E. Eisner, G. Esser, M. Finkenthal, C. Fiore, K. Fournier, T. Fredian, R. Gandy, S. Gangadhara, K. Gentle, J. Goetz, R. Granetz, M. Greenwald, H. Griem, G. Hallock, J. Harker, J. Heard, J. Hosea, A. Hubbard, I. Hutchinson, J. Irby, D. Johnson, J. Ke, J. Kesner, S. Krasheninnikov, B. LaBombard, H. Lamela, B. LeBlanc, Y. Lin, B. Lipschultz, S. Lisgo, R. Maqueda, M. May, A. Mazurenko, S. Migliuolo, E. Nelson-Melby, G. Miller, D. Mossessian, R. Nachtrieb, R. Nazikian, R. Neu, H. Ohkawa, P. O'Shea, T.S. Pedersen, D. Pappas, C.K. Phillips, A. Pigarov, C.S. Pitcher, M. Porkolab, J. Ramos, J. Reardon, J. Rice, B.N. Rogers, J.C. Rost, W. Rowan, J. Schachter, G. Schilling, H. Scott, C. Skinner, J. A. Snipes, V. Soukhanovskii, P. Stangeby, P. Stek, J. Stillerman, Y. Takase, G. Taylor, J. Terry, T. Tutt, M. Umansky, W. Wampler, A. Wan, C. Watts, L. Weathers, J. Weaver, B. Welch, J.R. Wilson, S. Wolfe, K.-L. Wong, A. Wootton, S. Wukitch, G. Wurden, Y. In, H. Yuh, S. Zweben: Overview of Recent Results from the Alcator C-Mod Tokamak, in *Fusion Energy 1998 (Proc. 17th Int. Conf., Yokohama, Japan, 1998) (IAEA, Vienna, 1999)*, pp. 71-81.
- [11] M. Greenwald, J. Rice, R. Boivin, P. Bonoli, R. Budny, C.S. Chang, D. Ernst, C. Fiore, J. Goetz, R. Granetz, A. Hubbard, I. Hutchinson, J. Irby, B. LaBombard, B. Lipschultz, E. Marmor, D. Mossessian, M. Porkolab, W. Rowan, J. Snipes, G. Schilling, Y. Takase, H. Terry, S. Wolfe, J. Weaver, B. Welch, S. Wukitch: H-Mode Regimes and Observations of Central Toroidal Rotation in Alca-

- tor C-Mod, in Fusion Energy 1998 (Proc. 17th Int. Conf., Yokohama, Japan, 1998) (IAEA, Vienna, 1999), pp. 281-288.
- [12] R. Kaita, R. Majeski, J. Menard, T. Munsat, H. Kugel, P. Efthimion, M. Ono, D. Jens, B. Jones, D. Stutman, M. Finkenthal, T. Intrator, R. Fonck, W.-H. Choe, Y.-S. Hwang, V. Gusev, Y. Petrov, T. Seki, Y. Takase: High frequency fast wave results from the CDX-U spherical torus, in Fusion Energy 1998 (Proc. 17th Int. Conf., Yokohama, Japan, 1998) (IAEA, Vienna, 1999), pp. 663-666.
- [13] P.T. Bonoli, M. Porkolab, J.J. Ramos, Y. Takase, S.J. Wukitch, R.L. Boivin, C.L. Fiore, J.A. Goetz, R.S. Granetz, M.J. Greenwald, A.E. Hubbard, I.H. Hutchinson, J.H. Irby, B. LaBombard, B. Lipschultz, E.S. Marmor, A. Mazurenko, D. Mossessian, E. Nelson-Melby, C.S. Pitcher, J. Reardon, J.E. Rice, W. Rowan, J.A. Snipes, J.L. Terry, J. Weaver, S.M. Wolfe: Modelling of Advanced Tokamak Physics Scenarios in Alcator C-Mod, in Fusion Energy 1998 (Proc. 17th Int. Conf., Yokohama, Japan, 1998) (IAEA, Vienna, 1999), pp. 671-674.
- [14] H. Toyama, K. Hanada, H. Totsuka, E. Ishiyama, S. Shiraiwa, S. Duorah, I. Nakajima, M. Ushigome, N. Uetake, K. Tanji, N. Kasuya, Y. Nagashima, K. Yamagishi, A. Ejiri, Y. Takase: Comparative studies of spherical tokamak and conventional tokamak: Magnetic turbulence-induced transport, in Fusion Energy 1998 (Proc. 17th Int. Conf., Yokohama, Japan, 1998) (IAEA, Vienna, 1999), pp. 813-816.
- [15] J.A. Snipes, A. Fasoli, P. Bonoli, S. Migliuolo, M. Porkolab, J.E. Rice, Y. Takase, S.M. Wolfe, Z. Zhang: Fast Particle Driven Modes in Alcator C-Mod, in Controlled Fusion and Plasma Physics (Proc. 26th European Conference, Maastricht, The Netherlands, 1999) (Eur. Phys. Soc., Geneva, Switzerland, 1999) Vol. 23J, p. 293-296.
- [16] S. Shiraiwa, Y. Takase, A. Ejiri, K. Yamagishi, Y. Nagashima, N. Kasuya: Construction, operational scenarios, and research plan of TST-2, in Controlled Fusion and Plasma Physics (Proc. 26th European Conference, Maastricht, The Netherlands, 1999) (Eur. Phys. Soc., Geneva, Switzerland, 1999) Vol. 23J, p. 441-444.
- [17] S. Duorah, A. Ejiri, S. Lee, H. Iguchi, A. Fujisawa, M. Kojima, K. Matsuoka, E. Ishiyama, K. Hanada, H. Toyama, Y. Takase: Temperature measurements on CHS with a multi-layer mirror soft X-ray spectrometer, in Controlled Fusion and Plasma Physics (Proc. 26th European Conference, Maastricht, The Netherlands, 1999) (Eur. Phys. Soc., Geneva, Switzerland, 1999) Vol. 23J, p. 493-496.
- [18] K. Tanaka, K. Kawahata, T. Tokuzawa, S. Okajima, A. Ejiri, H. Yamada, O. Kaneko, K. Y. Watanabe, K. Narihara, R. Sakamoto, S. Murakami, K. Yamazaki, A. Komori, K. Ida, H. Idei, S. Inagaki, S. Kado, S. Kubo, S. Masuzaki, T. Minami, J. Miyazawa, T. Morisaki, S. Morita, T. Motoh, H. Nakanishi, S. Ohdachi, M. Osakabe, B. J. Peterson, S. Sakakibara, K. Tsumori, O. Motojima, M. Fujiwara, and LHD Experiment Group: Temporal Evolutions of Electron Density Profiles and its Transport Aspects on LHD, (Proc. 26th European Conf. Contr. Fusion Plasma Phys., Maastricht, Netherlands, 1999) ECA 23J, 1329-1332 (1999).
- (国内雑誌)
- [19] 福山淳、高瀬雄一、井手俊介、牛草健吉:「加熱・電流駆動の物理」プラズマ・核融合学会誌 76, 127-137 (2000).
- (学位論文)
- [20] S. Duorah: Soft X-ray spectroscopy using a multi-layer mirror on the Compact Helical System, (博士論文)
- [21] 糟谷直宏:「コムラインアンテナを用いた速波励起実験」(修士論文)
- [22] 永島芳彦:「静電プローブによるトカマク周辺プラズマ計測」(修士論文)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [23] Y. Takase, N. Kasuya, G. Sato, A. Ejiri, S. Shiraiwa, K. Yamagishi, T. Watari, R. Kumazawa, T. Mutoh, T. Seki, K. Saito, C.P. Moeller: Development of Comblin Antennas for LHD and TST-2, US-Japan Workshop on RF Heating Technology and 2nd EU-Japan Workshop on RF Antenna/Source and Related Technology, Oh-arai, October 6-9, 1999.
- [24] Y. Takase, N. Kasuya, G. Sato, A. Ejiri, S. Shiraiwa, K. Yamagishi, T. Watari, R. Kumazawa, T. Mutoh, T. Seki, K. Saito, C.P. Moeller: FWCD Antenna for LHD, 2nd IAEA Technical Committee Meeting on Steady-State Operation of Magnetic Fusion Devices Fukuoka, October 25-29, 1999.
- [25] Y. Takase, A. Ejiri, S. Shiraiwa, M. Ushigome, N. Kasuya, Y. Nagashima, T. Mashiko, H. Nozato, K. Yamagishi: Initial Results from the TST-2 Spherical Tokamak, Bull. Am. Phys. Soc. 44, 271(1999), (Proc. 41st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Seattle, Nov. 15-19, 1999).
- [26] S. Shiraiwa, A. Ejiri, Y. Takase, M. Ushigome, N. Kasuya, Y. Nagashima, T. Mashiko, H. Nozato, K. Yamagishi: Magnetic Measurements on TST-2, Bull. Am. Phys. Soc. 44, 271-272 (1999), (Proc. 41st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Seattle, Nov. 15-19, 1999).

- [27] Y. Takase, A. Ejiri, S. Shiraiwa, N. Kasuya, T. Mashiko, Y. Nagashima, H. Nozato, M. Ushigome, K. Yamagishi: Initial Results from the TST-2 Spherical Tokamak, 6th International ST Workshop and US-Japan ST Workshop, Seattle, Nov. 19-21, 1999.
- [28] S. Shiraiwa, A. Ejiri, Y. Takase, N. Kasuya, T. Mashiko, Y. Nagashima, H. Nozato, M. Ushigome, K. Yamagishi: Magnetic Measurements on TST-2, 6th International ST Workshop and US-Japan ST Workshop, Seattle, Nov. 19-21, 1999.
- [29] Y. Takase, N. Kasuya, T. Mashiko, H. Wada, A. Ejiri, S. Shiraiwa, K. Yamagishi, T. Seki, T. Watari, R. Kumazawa, T. Mutoh, K. Saito, C.P. Moeller, K. Teruyama: RF Wave Experiments on TST-2 and Compline Antenna Development, US-Japan Workshop on RF Physics, Princeton, Mar. 14-16, 2000.
- [30] A. Ejiri, K. Tanaka, K. Kawahata, Y. Ito and T. Tokuzawa: New Applications of Microwave, 5th Australia-Japan W.S. on Plasma Diagnostics, Dec. 1999 (Naka)
- [31] A. Ejiri: Some Activities in NIFS and Universities, ITER Expert Group on Diagnostics Eleventh Meeting, Oct. 1999 (Cadarache)

(国内会議)

一般講演

- [32] 高瀬雄一、江尻晶、白岩俊一、牛込雅裕、糟谷直宏、永島芳彦、益子岳史、野里英明、山岸健一、Smita Duorah、石山英二: 「TST-2 球状トカマクの現状と計画」日本物理学会 1999 年秋の分科会 岩手大学 1999 年 9 月 24-27 日
- [33] 白岩俊一、高瀬雄一、江尻晶、牛込雅裕、糟谷直宏、永島芳彦、益子岳史、野里英明、山岸健一: 「TST-2 球状トカマクの初期実験」日本物理学会 1999 年秋の分科会 岩手大学 1999 年 9 月 24-27 日
- [34] 糟谷直宏、高瀬雄一、佐藤悟朗、山岸健一、江尻晶、石山英二、Smita Duorah、白岩俊一、牛込雅裕、永島芳彦、野里英明、益子岳史: 「TST-2 における RF 波動実験」日本物理学会 1999 年秋の分科会 岩手大学 1999 年 9 月 24-27 日
- [35] 永島芳彦、高瀬雄一、江尻晶、山岸健一、石山英二、スミタ・ドゥオラ、白岩俊一、牛込雅裕、糟谷直宏、野里英明、益子岳史: 「TST-2 球状トカマクにおけるプローブ実験」日本物理学会 1999 年秋の分科会 岩手大学 1999 年 9 月 24-27 日
- [36] 高瀬雄一: 「NSTX 球状トカマクにおける日米共同プロジェクトの提案」プラズマ・核融合学会第 16 回年会 仙台 1999 年 11 月 23-26 日
- [37] 江尻晶、白岩俊一、高瀬雄一、牛込雅裕、永島芳彦、糟谷直宏、野里英明、益子岳史、山岸健一: 「TST-2 球状トカマクのオペレーション領域」プラズマ・核融合学会第 16 回年会 仙台 1999 年 11 月 23-26 日
- [38] 江尻晶、白岩俊一、高瀬雄一、牛込雅裕、永島芳彦、糟谷直宏、野里英明、益子岳史、山岸健一: 「TST-2 球状トカマクの初期プラズマ特性」日本物理学会 2000 年春の分科会 関西大学 2000 年 3 月 22-25 日
- [39] 白岩俊一、江尻晶、高瀬雄一、牛込雅裕、永島芳彦、糟谷直宏、野里英明、益子岳史、山岸健一: 「TST-2 球状トカマクにおけるプラズマ電流立ち上げ最適化実験」日本物理学会 2000 年春の分科会 関西大学 2000 年 3 月 22-25 日
- [40] 高瀬雄一、糟谷直宏、和田浩史、江尻晶、白岩俊一、永島芳彦、益子岳史、野里英明、山岸健一: 「TST-2 球状トカマクにおける ICRF 速波波動実験」日本物理学会 2000 年春の分科会 関西大学 2000 年 3 月 22-25 日
- [41] 江尻晶: マルチアンテナ反射計による密度揺動の空間的構造の再構成 (数値的、実験的シミュレーション)、画像計測研究会、1999 年 8 月 (土岐)
- [42] 江尻晶、山田琢磨、川端一男: マルチアンテナ方式マイクロ波反射計の開発、日本物理学会、1999 年 9 月 (盛岡)
- [43] Smita Duorah、江尻晶、李成珠、井口春和、藤澤彰英、小嶋護、松岡啓介、石山英二、花田和明、遠山潤志、高瀬雄一: Soft X-ray spectroscopy and fast electron temperature measurement using a MLM based soft X-ray spectrometer、日本物理学会、1999 年 9 月 (盛岡)
- [44] 徳沢季彦、R.O.Pavlichenko、川端一男、田中謙治、江尻晶: 大型ヘリカル装置用パルス反射計、プラズマ核融合学会、1999 年 11 月 (仙台)
- [45] 秋山毅志、佐藤栄治、村山博英、野澤豪生、飯尾俊二、嶋田隆一、高橋正雄、寺井清寿、中山和也、岡島茂樹、江尻晶、田中謙治、長山好夫、川端一男: フェラデー回転を利用した LHD の電子密度計測 III、プラズマ核融合学会、1999 年 11 月 (仙台)

招待講演

- [46] 高瀬雄一: 「球状トカマクの現状と将来展望」原子力委員会核融合会議第 18 回開発戦略検討分科会 通産省別館 1999 年 11 月 8 日
- [47] 高瀬雄一: 「ST (球状トカマク)」プラズマ・核融合学会第 16 回年会 シンポジウム II 「新方式核融合研究の展望」 仙台 1999 年 11 月 23-26 日
- [48] 高瀬雄一: 「ST (球状トカマク)」インフォーマルミーティング「ITER 物理 R&D」 仙台 1999 年 11 月 23 日
- [49] 高瀬雄一: 「第 6 回国際 ST ワークショップの報告」研究会「高ベータトロイダルプラズマの平衡と安定性」 核融合研 1999 年 12 月 17-18 日
- [50] 高瀬雄一: 「NSTX 日米協力の経過報告」研究会「高ベータトロイダルプラズマの平衡と安定性」 核融合研 1999 年 12 月 17-18 日

(セミナー)

- [51] 高瀬雄一: 「核融合研究の新たな展開: 球状トカマクの利点」京都大学物理学教室談話会 京都大学 1999 年 12 月 17 日
- [52] 江尻晶: プラズマを閉じ込める、第 38 回プラズマ若手夏の学校、1999 年 8 月 (東京)

## 6.4 坪野研究室

重力と相対論に関する実験的研究を進めている。特にその中でも、重力波検出は一貫して私達の研究室の中心テーマとなっている。また、空間の等方性検証は物理学の根幹に関わる課題である。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。

重力波がもっとも期待されるのは、新しい天文学としての役割である。重力波によって得られる情報は、これまでの電磁波による情報に比べて、全く異質で相補的であると考えられている。これが「重力波天文学」であり、私たちはこれによって新しい宇宙像を手に入れることができると予想している。技術的困難によって、未だ重力波検出には成功していないが、最近、世界的に研究が進み、その実現が近づいている。

日本の TAMA300 は、世界に先駆けて装置の運転が可能となった。現在、本格的な観測に向けて、技術的な調整を進めている。2000 年度には数ヶ月間の連続観測を計画している。欧米の装置が完成するまでの数年の間、TAMA300 は唯一の高感度重力波検出器として貴重な観測データを提供するだろう。既に、数日間レベルの観測運転が行われており、そこで得られたデータの解析も進んでいる [44, 45]。

また、TAMA の次の大型計画についても、東大宇宙線研を中心に検討が進められている [2, 41, 46]。今後数年の間に、世界的なネットワークの中で重力波観測が実現すると予想される。

ある。重力波をとおして宇宙を見る「重力波天文学」は、われわれに全く新しい目を与えるものとして期待されている。これまでの電磁波を用いた伝統的な観測によって得られる情報と、「重力波天文学」によって明らかにされるであろう宇宙の姿は完全に相補的な関係にある。つまり透過性が非常によいという重力波の特性により、超新星爆発や連星中性子星の合体等の激しい天体現象に際して、中心核付近の内部の情報を知ることが可能になる。また世界各地で、大型レーザー干渉計を用いた重力波検出器の建設が進み、装置の完成と観測開始が近づいている。これらが本格的に動き始めれば、「重力波天文学」の幕開けは近いと確信している。これらの大型装置の中でも日本の TAMA300 は、他に先駆けて 2000 年から観測を開始する予定である。欧米の装置が完成するまでの数年の間、TAMA300 は唯一の高感度重力波検出器として貴重な観測データを提供するだろう。らぶ、日本の大型重力波検出器計画であり、国立天文台三鷹キャンパスにおいて 300m 基線長のレーザー干渉計 (TAMA300) の建設が進められている。干渉計の設置は予定通りに終了しており、現在は、観測開始に向けて装置の技術的調整をおこなっている段階である。2000 年からは、世界に先駆けて重力波の本格的観測を始める予定である。

### 6.4.1 レーザー干渉計を用いた重力波の検出

#### TAMA プロジェクトの現状

TAMA プロジェクトは、日本国内の各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が、TAMA では他計画より 1~2 年先駆けて、2000 年度より本格的な観測を開始する予定である。現在までに、TAMA では、パワーリサイクリングを除くほぼ全ての要素技術を組み込んだ状態での動作が実現されており、感度や動作の安定度の向上が進められている。

TAMA300 は基線長 300m のファブリー・ペロー共振器を両腕に持つマイケルソン干渉計である。主干渉計を構成する光学素子は、それぞれ防振装置によって独立に懸架されている。また、干渉計は、大気の揺らぎによる光路長変動や音の影響を避けるために真空装置内に収められている。光源としては出力 10 W の Nd:YAG レーザーを用い、基線長 10 m のモードクリーナによって、レーザー光の空間モード整形と周波数安定化を行っている。[1, 4, ?, 12, 19, 25, ?, 27, 35, ?, 43, 48]

現在までに TAMA では、重力波振幅  $h_c \sim 10^{-19}$  という感度 (感度スペクトル  $h \sim 5 \times 10^{-18} 1/\sqrt{\text{Hz}}$ ) が実現されている (図 6.4 a)。これは、TAMA で目標とする最終感度には 2 桁程度及ばないものの、現在稼働中のレーザー干渉計としては世界最高のものである。また、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検出可能な感度である。感度を制限する雑音源はほぼ特定されており (散乱光による雑音、鏡の姿勢制御による雑音等)、これらを改善していくことによって目標感度に到達できると考えられる。

一方、TAMA では、干渉計の長期安定度の評価・向上、また、データ解析手法の確立のために、数日程度の試験観測も何度か行なわれている。その結果、夜間であれば、干渉計は数時間程度、連続動作するという結果が得られている。動作時の干渉計は非常に安定であり、干渉計の共振器内部光強度の変動は 1% 程度に抑えられている。また、外乱の影響等で動作状態から外れても、10 分以内に観測に復帰できることが確認されており、長期観測に十分な安定度が得られているということが出来る。ただ、昼間は、外乱が大きいと長時間の安定動作には至っていない。これは、防振・懸架系の改良により本格観測前には改善される見込みである。[6, 7, 13, 22, 24, 33, 34, 49, ?]

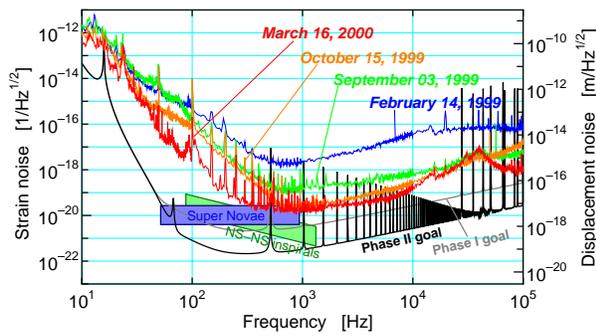


図 6.4 a: Achieved sensitivity curves of TAMA300.

### 高調波復調を用いたパワーリサイクリング干渉計の信号取得

Fabry-Peort-Michelson(FPM) 干渉計のパワーリサイクリングに関して、昨年に引き続き、高調波復調法を用いた制御信号取得法の研究を行った。[14, 28]

干渉計型重力波検出器を安定に動作させるには、反射鏡間の光路長の変化をフィードバックによって制御する必要がある。この光路長変動の情報を取得する手法として、変調の高調波による復調を用いる方法(高調波復調法)を考案し、これまでに、3m プロトタイプ干渉計型重力波検出器のこの手法による安定動作や手法の原理的な検証を行ってきた。

今年度は、3m 干渉計を利用した実験により、この高調波復調法の詳細な検証を行った。透過率が可変の光学素子により干渉計内部の損失を変化させたところ、従来の手法で取得された信号が符号反転を起こしたり、振幅が大きく変化することがあったのに対し、高調波復調法の信号ではそのようなことが起こらないことを確認した。

また、高調波復調法を使えば干渉計内部から光を取り出すためのピックアップ鏡を使用しなくとも干渉計を動作させることが可能になるため、リサイクリングによる光量の利得(リサイクリングゲイン)の向上が期待できる。3m 干渉計では、実際にピックアップ鏡を取りのぞいた状態での干渉計制御に成功した。このときには、リサイクリング鏡の反射率を最適値に近いものに交換したことにより、リサイクリングゲインとして 3m 干渉計の光学構成でのほぼ限界値である 5.4 を達成した。

### 多段懸架干渉計の開発

当研究室では、多段懸架された干渉計の開発を進めている。これは、制御によって安定化された上段干渉計によって下段干渉計を懸架したものであり、地面振動による外乱を除去するとともに、より安定かつ低雑音な制御系を構成できる可能性を持っている。

地面振動は、干渉計の安定度を損ねる最大の外乱であり、地球上に建設されたレーザー干渉計重力波検出器の感度を低周波数で制限する雑音源でもある。

従って、干渉計を地面振動の影響から守るための防振・懸架装置の開発は重力波検出器開発の要となる部分である。現在世界で建設中の干渉計では、振り子やスタックなどを用いた防振装置が用いられており、その共振周波数付近の大きな変動は、近くに置かれた変位センサー(または加速度センサー)を用いた制御や、強力磁石による渦電流によってローカルに抑圧されている。しかし、これらの手法では、変位センサーの雑音やセンサー等の局所的な振動によって防振比が制限されてしまう。

多段懸架干渉計では、干渉計において最も感度の良いセンサーである干渉計自身の信号を用いてグローバルに制御を行うため、センサーの雑音やローカルな変動による振動の混入の問題を避けることが可能となる。また、下段干渉計は上段干渉計からさらに防振されるため、上段干渉計制御に課せられる制約が緩和され、より安定な動作を実現することが期待できる。現在、基線長数 10cm 程度の多段懸架干渉計を試作し、その動作原理の確認実験を行っている。

### GEO600

ドイツの重力波検出器プロジェクトである GEO プロジェクトとの研究協力の一環として、Max-Planck-Institut für Quantenoptik において、30m プロトタイプ干渉計を使った狭帯域干渉計の研究を行っている。パワーリサイクリングとシグナルリサイクリングを同時に行った場合の干渉計の振舞い、アライメントの安定化等をテーマに実験を行っている。

### 6.4.2 宇宙空間重力波検出実験

#### 宇宙空間レーザー干渉計の研究

21 世紀の重力波天文学を考えた場合、宇宙空間が実験観測の重要な舞台になることは必然である。NASA/ESA による LISA 計画では、2010 年前後に、宇宙空間に巨大なレーザー干渉計を作り、低周波での重力波観測を開始する。低周波において、もっとも興味深いのは、宇宙論的な起源をもつ背景重力波放射である。ビッグバンがマイクロ波の背景放射を残したように、重力波の背景放射も残っているはずである。られたときの情報を維持していると思われる。ビッグバン後  $10^{-25}$ s に生じた重力波が、ストカスティックな背景放射として、今でも残っている可能性がある。このほかにも、インフレーションに起因するものや、宇宙紐などのトポロジー的欠陥から生じる背景放射が考えられている。だろう。

スペース実験は長期的視野にたつ必要があるが、実り豊かな重力波天文学の実現には宇宙空間実験は不可欠である。しかし残念ながら、これまで日本には、宇宙空間での重力波実験の基盤はまったくなかった。そこで昨年度より、スペース実験の手がかりを得るため、研究会などを開き議論を始めている。また、宇宙研などに働きかけて、スペース実験具体化の方策を練っている。[23]

### 6.4.3 相対論の基礎実験

#### 空間の等方性検証

特殊相対性理論で仮定されている空間の等方性、すなわち光速の等方性を検証するために、2台のレーザと光共振器を用いた光学的手法による、光速の方向依存性測定システムを開発している。実験システムの基本概念は、「Brillet-Hallの実験」のものと同様であるが、1桁の感度向上を図るため、本実験では以下の雑音抑制措置をとる。

(a) 温度変化抑制: 共振器のスペーサとして、ある温度で線膨張率が0になる特殊ガラス ClearCeram 55を採用する。温度調整器として Peltier 素子を用いて、その温度に共振器温度を PID 制御する。これにより、温度変化に伴う共振器長変化を抑制する。(b) 傾き変化抑制: 水平面に対する共振器の傾きを、油に浮かせた鏡を参照水平面とする光てこを用いた高感度傾斜計を用いて検出し、積層圧電アクチュエータによって制御する。これにより、傾きの変化に伴う共振器の重力による変形を抑制する。(c) 回転に伴う雑音の抑制: 動作をコンピュータプログラムにより制御できる回転台を用いて、共振器を光源などの光学系とともに回転させる。また、その際  $\pm 180^\circ$  の範囲を離散的に回転させ、観測は静止中に行う。これにより、回転速度の変化に伴う共振器長の変化、Doppler 効果などの周波数変動要因を抑制する。

今年度は、以下の開発を行った。

- レーザ周波数の共振ロック機構の安定化
- 真空中での共振ロック
- 真空中での共振器温度制御過渡特性の向上
- ビート周波数取得系の構築

これらにより、ClearCeram Z をスペーサとした試験用共振器を用いてビート周波数観測による実験システムの評価をすることができた。

上述の成果のほか、当研究室の大石によって、傾き検出器の開発実験が行われ、昨年度からの感度向上がなされた。また、同じく高森によって、共振器回転機構の開発が進められた。[10, 32, 37]

### 6.4.4 熱雑音の研究

#### 機械コンダクタンスの直接測定による熱雑音の推定

干渉計型重力波検出器では、干渉計を構成する鏡の熱振動が、検出器の感度を制限する深刻な問題となることが予想されている。しかし、このような機械系の共振周波数から離れた周波数における熱振動は非常に小さいため、実際に測定することはたいへん困難である。したがって、従来はモード展開を使って熱振動の大きさを推定していた。

しかし、モード展開を使った推定法には、散逸が非一様に分布した系での熱振動を正確に推定できないという欠点がある。一方、干渉計型重力波検出器、TAMA300 に用いられる鏡では、非一様な散逸が無

視できないことがわかってきた。そこで、当研究室では、散逸が非一様な場合にも正しい推定をするために、反共振を使って機械コンダクタンスを直接測定し、これに揺動散逸定理を適用して熱振動を推定するという方法を提案し、研究してきた [3, 9]。

これまでに、小さな機械振動子を用いて、実際に反共振周波数で機械コンダクタンスを直接測定できることを確認した。また、測定されたコンダクタンスを使った推定値と、実際に測定された熱振動が一致することを確認し、この方法の有用性を確認した [38]。更に、この方法を干渉計に用いる鏡への応用することも検討している [30, 16]。

#### 非一様な散逸による熱雑音の研究

懸架系や鏡の熱雑音は干渉計型重力波検出器の観測帯域の感度を最終的に制限すると考えられている。このため熱雑音の大きさを推定することは重要なことである。従来はモード展開という方法を用いて推定を行ってきたが、この方法は散逸が非一様に分布しているときは正しい結果を与えないと予想されている。事実昨年度報告した新しい推定方法は異なる結果を与える。そこで非一様な散逸を持つ系の熱雑音についての研究を昨年にひきつづき行った。

まず非一様な散逸を持つ系の熱雑音を実際に測定することによりモード展開が破綻するか否かを調べた。アルミで出来た板バネの一部分にのみ強力な永久磁石を利用して eddy current damping をかけて熱振動を Michelson 干渉計で測定した。結果の一例を図 6.4 b にあげる。明らかにモード展開と実測値がずれている。これは実験的にモード展開の破綻が確認された初めてのケースである。また新しい方法で計算したスペクトルは実験と一致した [8, 18, 31]。

モード展開の破綻と新しい方法の妥当性が実験的に確認されたので、従来のモード展開に頼った検出器の熱雑音の推定は見直さなければならない。そこで非一様な散逸を持つ鏡の熱雑音を、新しい方法を有限要素法で実行することにより推定した。その結果以下のようなことが判明した。干渉計を安定に動作させるために鏡に磁石を接着する必要があるが、モード展開によるとこの接着により熱雑音が著しく大きくなることが知られており、大きな問題となっていた。しかし新しい方法で推定しなおしたところ、磁石の接着による熱雑音の増加はほとんど問題にならないことがわかった。これにより重力波検出器に関する要求の1つが大幅に緩和されることになった [40]。

#### 鏡材料の機械損失に関する研究

TAMA300 の最終感度を定める鏡の熱雑音の下限の推定のため、低損失鏡材料の機械損失を測定する実験を行った。試料の支持系により導入される損失によって、測定される損失の大きさが制限を受けないようにするため、材料の振動モードの不動点を点接触で支える装置を開発し、測定を行った。[11, 47]

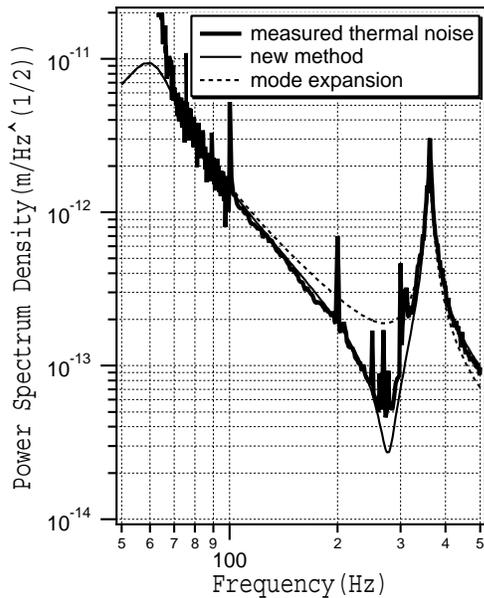


図 6.4 b: The measured spectrum of thermal noise and the estimation of the new method and mode expansion. It is obvious that the measured noise is consistent with the new method.

TAMA300 で用いられる溶融石英鏡の測定では、全てのモードで周波数に依らない一定の  $Q$  値  $3 \times 10^6$  を得た。この  $Q$  値は TAMA300 の目標感度を達成するには不足していた。[?] サファイア単結晶の測定では、円柱側面部での損失により鏡の  $Q$  値が制限されていることが確認された。 $Q$  値の最高値は  $6 \times 10^7$  であった。シリコン単結晶の測定では、 $Q$  値の最高値は  $1 \times 10^8$  に達した。これは室温でのシリコン単結晶での  $Q$  値の測定値としては最高のものである。サファイアやシリコンを用いれば、TAMA300 の目標感度の達成見込みがあることが示された。これら、結晶による異方性を含む材料の振動モードは、有限要素法によって詳細に解析された。[15, 29]

低損失の鏡材料の機械損失を直接測定する手法は、これらによって確立されたといえる。今後はこの手法を応用して、鏡に加わる付加的な損失の定量的な評価、内部摩擦の研究に応用する予定である。

## 6.4.5 精密計測の研究

### 低周波防振装置 SAS の開発

次世代レーザー干渉計型重力波重力波検出器のための R&D として、当研究室ではカリフォルニア工科大学と共同で低周波防振装置 SAS (Seismic Attenuation System) の開発を行っている [39, 17]。

SAS は次世代重力波検出器の低周波での感度と動

作の安定性を向上させることを目的とした機械フィルターである。

SAS は受動的な機械系と能動制御の 2 つの要素から成り立っている。受動的な機械系では系の共振周波数よりも十分高い帯域で有意な防振効果が得られるため、SAS では全自由度にわたって超低周波 (10 mHz ~ 100 mHz) の共振周波数を実現する。

従来、このような受動的な低周波防振装置においては、鉛直方向に働く機械系の開発が困難とされていた。鉛直方向の防振装置は、干渉計の鏡懸架装置などを支持しつつ、低周波で共振するようなものでなくてはならない。例えば線形バネを利用すると 100 mHz の共振周波数はバネの伸び 25 m に対応し、非現実的なスケールになってしまう。この問題を解決するために、SAS 開発グループでは非線形バネを用いた防振装置 (GASF: Geometric Anti-Spring Filter) を開発した。GASF は非常にコンパクトな装置でありながら、100 kg 以上の荷重を支え、300 mHz 以下の共振周波数を実現した [20]。現在、改良を重ねより単純で優れた防振特性を持つ装置の開発を行っている [47]。GASF によって、鉛直面内での 3 自由度の低周波防振が実現可能である。

光軸を含む水平面内での 3 自由度については、重力による Anti-Spring 効果を用いた倒立振り子により、10 mHz 前後の共振周波数を達成した。

SAS は、倒立振り子と超低周波に設定された GASF を土台とし、そこから目標とする防振性能に応じて複数の GASF を懸架する。鏡懸架装置は最終段の GASF に取り付けられる。

SAS における能動防振は、低周波に存在する機械系の共振をダンピングすることを目的としたものであり (Inertial Damping)、重力波の観測帯域 (10 Hz 以上) では制御ゲインをもたない。また、Inertial Damping のための振動検出、フィードバックはすべてもっとも鏡から遠い初段 GASF および倒立振り子で行われるため、制御系からの雑音の混入を防ぐことが可能である [17, 21]。

また、当研究室では、LIGO のシミュレーショングループと共同で SAS をはじめとする機械系のシミュレーションプログラムの開発も行っている [21]。

現在、その有効性を実際の干渉計で評価するために、SAS を当研究室の 3m プロトタイプ干渉計に組み込むための実験を進めている [39]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] A. Araya, S. Telada, K. Tochikubo, S. Taniguchi, R. Takahashi, K. Kawabe, D. Tatsumi, T. Yamazaki, S. Kawamura, S. Miyoki, S. Moriwaki, M. Musha, S. Nagno, M.-K. Fujimoto, K. Horikoshi, N. Mio, Y. Naito, A. Takamori, and K. Yamamoto, Absolute-length Determination of a Long-baseline Fabry-Perot Cavity by Means of Resonating Modulation Sidebands, *Appl. Opt.* **38** (1999) 2848.
- [2] K. Kuroda, M. Ohashi, S. Miyoki, D. Tatsumi, S. Sato, H. Ishizuka, M.-K. Fujimoto, S. Kawamura, R. Takahashi, T. Yamazaki, K. Arai, M.

Fukushima, K. Waseda, S. Telada, A. Ueda, T. Shintomi, A. Yamamoto, T. Suzuki, Y. Saito, T. Haruyama, N. Sato, K. Tsubono, K. Kawabe, M. Ando, K. Ueda, H. Yoneda, M. Musha, N. Mio, S. Moriwaki, A. Araya, N. Kanda, M. Tobar, Large-scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope, *Int. J. Mod. Phys. D* **8** (1999) 557.

- [3] N. Ohishi, S. Otsuka, K. Kawabe, and K. Tsubono, Estimation of Thermal Noise by a Direct Measurement of the Mechanical Conductance, *Phys. Lett. A* **266** (2000) 228.
- [4] Masaki Ando, Koji Arai, Keita Kawabe, and Kimio Tsubono, Signal-separation experiments for a power-recycled Fabry-Perot-Michelson interferometer by sideband elimination, *Physics Letters A* **268** (2000) 268.

#### (会議抄録)

- [5] K. Tsubono: TAMA300 laser interferometer for gravitational wave detection, *Proc. Interferometry '99 Techniques and Technologies*, Pultusk, Poland 1999 (SPIE Vol. 3744) Eds. M. Kujawińska and M. Takeda, p.11-p.17.
- [6] Masaki Ando, Kimio Tsubono, and the TAMA collaboration: TAMA Project: Design and Current Status, *Proceedings of the 3rd Amaldi Meeting* (in press).
- [7] Masaki Ando and the TAMA collaboration: Current Status of the TAMA300 Interferometer, *Gravitational Wave Detection II, Proceedings of the 2nd TAMA Workshop* (in press).
- [8] K. Yamamoto, S. Otsuka, K. Kawabe, and K. Tsubono: Thermal noise of inhomogeneous loss, *Gravitational Wave Detection II*, (Universal Academy Press, 2000) (in press).

#### (学位論文)

- [9] 大石奈緒子: 機械コンダクタンスの直接測定による熱雑音の推定, 博士論文, 1999年12月.
- [10] 関谷淳: 空間の等方性検証実験, 修士論文, 2000年1月.
- [11] 沼田健司: 鏡材料の機械損失に関する研究, 修士論文, 2000年1月.

#### < 学術講演 >

#### (国際会議)

##### 一般講演

- [12] K. Kawabe and K. Tsubono: TAMA300 laser interferometer for gravitational wave detection, *Interferometry '99* (September, Pultusk, Poland 1999).
- [13] Masaki Ando, S. Nagano, K. Arai, S. Taniguchi, Gerhard Heinzl, R. Takahashi, S. Kawamura, D. Tatsumi, S. Telada, A. Okutomi, S. Moriwaki, T. Kanda, M. Fukushima, T. Yamazaki,

M. Ohashi, N. Mio, K. Kawabe, A. Araya, M. Musha, K. Tochikubo, N. Ohishi, K. Yamamoto, A. Takamori, A. Sekiya, K. Numata, S. Ohtsuka, A. Ueda, S. Miyoki, S. Sato, K. Ueda, M.-K. Fujimoto, K. Tsubono, K. Kuroda, and the TAMA collaboration: Current status of the TAMA300 interferometer, *The 2nd TAMA Workshop* (October 20, 1999, Tokyo, Japan).

- [14] K. Arai, M. Ando, K. Kawabe, K. Tsubono, S. Moriwaki, *New Signal Extraction Scheme with Harmonic Demodulation for Power-recycled Fabry-Perot Michelson Interferometers*, 2nd TAMA Workshop, National Olympics Memorial Youth Center (Tokyo, Japan), Oct. 1999.
- [15] K. Numata: Measurement of intrinsic quality factors of low loss materials, *The 2nd TAMA Workshop*, (Tokyo, Japan, Oct. 1999).
- [16] N. Ohishi, S. Otsuka, K. Kawabe, K. Tsubono: Estimation of the thermal noise by direct measurement of the mechanical conductance at an anti-resonant frequency *The 2nd TAMA Workshop on Gravitational Wave Detection*, (Tokyo, Japan, Oct. 1999).
- [17] A. Takamori *et al*, *Development of the Seismic Attenuation System (SAS) for Advanced Gravitational Wave Detectors*, 2nd TAMA Workshop, National Olympics Memorial Youth Center (Tokyo, Japan), Oct. 22, 1999.
- [18] K. Yamamoto, S. Otsuka, K. Kawabe, and K. Tsubono: Thermal noise of inhomogeneous loss, *The second TAMA Workshop on Gravitational Wave Detection* (Tokyo, Japan, Oct. 1999).
- [19] K. Tsubono, *Summary Talk*, 2nd TAMA Workshop, National Olympics Memorial Youth Center (Tokyo, Japan), Oct. 1999.
- [20] A. Takamori, *Status Report on Geometric Anti-Spring Filter (GASF)*, LIGO SEI-SUS Meeting, University of Glasgow (Glasgow, UK), Dec. 17, 1999.
- [21] A. Takamori, *SAS Simulation for LIGO II*, LIGO Scientific Collaboration Council (LSC) Meeting 6, LIGO Livingston Observatory (Louisiana, USA), Mar. 16, 2000.

#### 招待講演

- [22] Masaki Ando, Kimio Tsubono, and the TAMA collaboration: Current Status of the TAMA Interferometer, *The 3rd Amaldi Meeting* (July 13, 1999, California Institute of Technology, U. S. A.).

#### (国内会議)

##### 一般講演

- [23] 坪野公夫, スペース重力波実験の可能性, 第2回フォーメーションフライト研究会、(宇宙研相模原、1999年12月)

- [24] 安東正樹, 長野重夫, 谷口信介, 新井宏二, Gerhard Heinzl, 高橋竜太郎, 川村静児, 辰巳大輔, 寺田聡一, 奥富聡, 森脇成典, 神田展行, 福嶋美津広, 山崎利孝, 大橋正健, 三尾典克, 河邊径太, 新谷昌人, 武者満, 朽久保邦治, 大石奈緒子, 山元一広, 高森昭光, 関谷淳, 沼田健司, 大塚茂巳, 上田暁俊, 三代木伸二, 佐藤修一, 植田憲一, 藤本眞克, 坪野公夫, 黒田和明, 他 TAMA グループ: レーザー干渉計重力波検出器 TAMA300 の開発 IV, 日本物理学会 1999 年秋の分科会 (島根大学, 1999 年 9 月)
- [25] 長野重夫, 安東正樹, 谷口信介, 寺田聡一, 関谷淳, 森脇成典, 河邊径太, 武者満, 辰巳大輔, 奥富聡, 新井宏二, 山元一広, 高橋竜太郎, 福嶋美津広, 山崎利孝, 神田展行, 大橋正健, 坪野公夫, 黒田和明, 三尾典克, 植田憲一, 川村静児, 藤本眞克, 他 TAMA Collaboration レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 の開発 V, 日本物理学会 1999 年秋の分科会 (島根大学, 1999 年 9 月)
- [26] 谷口信介, 安東正樹, 長野重夫, Gerhard Heinzl, 寺田聡一, 関谷淳, 川村静児, 高橋竜太郎, 森脇成典, 河邊径太, 新谷昌人, 朽久保邦治, 高森昭光, 山元一広, 新井宏二, 大石奈緒子, 三尾典克, 大橋正健, 山崎利孝, 福嶋美津広, 辰巳大輔, 沼田健司, 大塚茂巳, 神田展行, 三代木伸二, 藤本眞克, 坪野公夫, 黒田和明, TAMA collaborations, レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 の開発 VI, 日本物理学会 1999 年秋の分科会 (島根大学, 1999 年 9 月)
- [27] 辰巳大輔, 神田展行, 奥富聡, 森脇成典, 安東正樹, 寺田聡一, 川村静児, TAMA collaboration, TAMA 300 における干渉計較正について, 日本物理学会 1999 年秋の分科会 (島根大学, 1999 年 9 月)
- [28] 新井宏二, 安東正樹, 森脇成典, 河邊径太, 坪野公夫, 3m Fabry-Perot-Michelson 型重力波検出器のパワーサイクリング IX, 日本物理学会 1999 年秋の分科会 (島根大学, 1999 年 9 月)
- [29] 沼田 健司, 関谷 淳, 大石 奈緒子, 大塚 茂巳, 河邊 径太, 坪野 公夫: 低損失材料の intrinsic Q 値測定 II, 日本物理学会 1999 年秋の分科会 (島根大学, 1999 年 9 月)
- [30] 大石奈緒子, 大塚茂巳, 河邊径太, 坪野公夫: 反共振を利用した熱雑音の推定-干渉計型重力波検出器に用いる鏡への応用-, 日本物理学会 1999 年秋の分科会 (島根大学, 1999 年 9 月)
- [31] 山元一広, 大塚茂巳, 河邊径太, 坪野公夫: 非一様な散逸による熱雑音の研究 III, 日本物理学会 1999 年秋の分科会 (島根大学, 1999 年 9 月)
- [32] 関谷淳, 上田晃三, 高森昭光, 大石奈緒子, 河邊径太, 坪野公夫, 2 台のレーザーによる空間の等方性の検証, 日本物理学会 1999 年秋の分科会 (島根大学, 1999 年 9 月)
- [33] 安東正樹, TAMA グループ: 300m レーザー干渉計重力波検出器 (TAMA300) 開発の現状, 宇宙線シンポジウム: TAMA と重力波研究の最新の成果, 日本物理学会 2000 年春の分科会 (近畿大学, 2000 年 3 月)
- [34] 新井宏二, 安東正樹, 長野重夫, Gerhard Heinzl, 高橋竜太郎, 川村静児, 辰巳大輔, 寺田聡一, 森脇成典, 神田展行, 谷口信介, 河邊径太, 関谷淳, 朽久保邦治, 新谷昌人, 山元一広, 大石奈緒子, 高森昭光, 上田晃三, 三尾典克, 大橋正健, 山崎利孝, 福嶋美津広, 沼田健司, 大塚茂巳, 三代木伸二, 武者満, 植田憲一, 藤本眞克, 坪野公夫, 黒田和明, 他 TAMA Collaboration, レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 の開発 VII, 日本物理学会 2000 年春の分科会 (近畿大学, 2000 年 3 月)
- [35] 長野重夫, 安東正樹, 新井宏二, Gerhard Heinzl, 谷口信介, 寺田聡一, 関谷淳, 森脇成典, 河邊径太, 武者満, 辰巳大輔, 奥富聡, 三代木伸二, 山元一広, 大石奈緒子, 沼田健司, 新谷昌人, 高橋竜太郎, 福嶋美津広, 山崎利孝, 神田展行, 大橋正健, 坪野公夫, 黒田和明, 三尾典克, 植田憲一, 川村静児, 藤本眞克, 他 TAMA Collaboration, レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 の開発 VIII, 日本物理学会 2000 年春の分科会 (近畿大学, 2000 年 3 月)
- [36] 沼田健司, 関谷淳, 大石奈緒子, 大塚茂巳, 河邊径太, 安東正樹, 坪野公夫: 低損失材料の intrinsic Q 値測定 III, 日本物理学会 2000 年春の分科会 (近畿大学, 2000 年 3 月)
- [37] 関谷淳, 上田晃三, 高森昭光, 大石奈緒子, 河邊径太, 坪野公夫: 2 台のレーザーによる空間の等方性の検証 II, 日本物理学会 2000 年春の分科会 (近畿大学, 2000 年 3 月)
- [38] 大石奈緒子, 大塚茂巳, 河邊径太, 安東正樹, 坪野公夫: 反共振を利用した熱雑音推定法の検証-熱雑音の直接測定- 日本物理学会 2000 年春の分科会 (近畿大学, 2000 年 3 月)
- [39] 高森昭光, David Akhavan, Alessandro Bertolini, Giancarlo Cella, Erika D'Ambrosio, Riccardo DeSalvo, Joe Kovalik, Henry Lubatti, Szabolcs Marka, Virginio Sannibale, Hareem Tariq, Nicolas Viboud, Hiroaki Yamamoto, 安東正樹, 坪野公夫: *Seismic Attenuation System (SAS) for gravitational wave detectors*, 日本物理学会 2000 年春の分科会 (近畿大学, 2000 年 3 月)
- [40] 山元一広, 大塚茂巳, 安東正樹, 河邊径太, 坪野公夫: 非一様な散逸による熱雑音の研究 IV, 日本物理学会 2000 年春の分科会 (近畿大学, 2000 年 3 月)
- [41] 黒田和明, LCGT Collaboration: km スケール低温重力波望遠鏡計画の進展, 日本物理学会 2000 年春の分科会 (近畿大学, 2000 年 3 月)
- [42] 宗宮健太郎, 森脇成典, 三尾典克, 山元一広: デジタル制御による干渉計の Beam Centering 実験, 日本物理学会 2000 年春の分科会 (近畿大学, 2000 年 3 月)
- [43] 新井宏二, 他 TAMA グループ: TAMA300 の現状 (6), 日本天文学会 2000 年春季年会 (東京大学, 2000 年 4 月)
- [44] 神田展行, 他 TAMA グループ: TAMA300 重力波検出器のデータ取得と解析, 日本天文学会 2000 年春季年会 (東京大学, 2000 年 4 月)
- [45] 田越秀行, 田中貴浩, 神田展行, 大橋正健, 寺田聡一, 他 TAMA グループ: TAMA300 による合体するコンパクト連星からの重力波探査, 日本天文学会 2000 年春季年会 (東京大学, 2000 年 4 月)

- [46] 黒田和明、他 LCGT グループ : km スケール低温重力波望遠鏡 (LCGT) 計画、日本天文学会 2000 年春季年会 (東京大学, 2000 年 4 月)

(セミナー)

- [47] K. Numata: *Measurement of quality factors of low loss materials*, Special LIGO scientific seminar, (California Institute of Technology, California, Mar. 2000)
- [48] A. Takamori, *Development of the Suspension System for TAMA300*, VIRGO seminar, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (S. Piero a Grado, Italy), Jun 16, 1999.
- [49] 安東正樹, TAMA グループ, 300m レーザー干渉計重力波検出器 (TAMA300) 開発の現状, LCGT 計画に関する研究会 (2000 年 2 月 3 日, 神岡宇宙素粒子研究施設).
- [50] 新井宏二, TAMA グループ, TAMA300 の高感度化, LCGT 計画に関する研究会 (2000 年 2 月 3 日, 神岡宇宙素粒子研究施設).

## 6.5 山本研究室

星間分子雲は恒星が形成される場所であり、宇宙における物質循環の主要経路にあたる。本研究室では、星間分子雲に存在する原子や分子に着目し、電波望遠鏡による観測的研究と、実験室での分子分光実験を行っている。特に、天文学において未開拓の波長領域であるサブミリ波（波長 1 mm から 0.1 mm の電磁波）の検出技術の開拓に力を入れており、わが国唯一のサブミリ波望遠鏡を富士山頂に設置して観測を行っている。特に、中性炭素原子の放つ 492 GHz のスペクトル線の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と比較することで、星間分子雲の詳細構造や形成過程を明らかにしつつある。また、同時に国立天文台野辺山宇宙電波観測所の 45 m ミリ波望遠鏡をはじめとする内外の電波望遠鏡を用いて、星間分子雲の物理・化学状態と星形成過程の研究を推進している。

### 6.5.1 観測装置の開発・改善

#### 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、サブミリ波（周波数にして 300 GHz から 1 THz の電波）を観測するわが国で初めての望遠鏡である。富士山頂は冬季に気温が低く乾燥するので、サブミリ波天体観測の邪魔になる水蒸気が少なく、観測には絶好の場所である。その優れた観測条件を活かして、中性炭素原子 (CI) のスペクトル線 ( $^3P_1 - ^3P_0$ ; 492 GHz,  $^3P_2 - ^3P_1$ ; 809 GHz) や一酸化炭素分子 (CO) のサブミリ波スペクトル線 ( $J = 3 - 2$ ; 345 GHz) の観測を行い、星間分子雲の形成と進化や、そこでの星形成過程を研究している。

富士山頂サブミリ波望遠鏡は 1995 年度より製作を行い、1998 年 7 月に富士山頂に設置された。その後、商用衛星通信を用いた遠隔操作によって観測を行っている。2 回の冬季のシーズンで 35 平方度にのぼる領域のサーベイを CI のスペクトル線で行うことができた。これは、これまでの CI の観測規模を 1 桁上回るものであり、近傍星間分子雲における CI の分布の全貌を描き出しつつある。1999 年-2000 年のシーズンには、345GHz/ 492 GHz/ 809 GHz の 3 バンドを観測できる超伝導受信機を搭載し、CI の 809 GHz のスペクトル線の観測も行うことができるようになった。1999 年 11 月から観測を開始し、途中、落雷による観測中断があったものの、最終的には 2000 年の 3 月まで観測を行うことができた。また、他機関・グループの研究者との共同研究を公募し、3 件を実施した。

本研究は初期宇宙研究センター（代表：佐藤勝彦教授）のプロジェクトの 1 つとして推進しており、国立天文台野辺山観測所の関本裕太郎氏、立松健一氏、野口卓氏、宮澤敬輔氏、福井大学の齋藤修二氏、宇宙開発事業団の尾関博之氏、稲谷順司氏、国立天文台天文学データ解析センターの大石雅寿氏、東大工学部の藤原英夫氏らとの共同研究である。

受信機システムの改善 富士山頂サブミリ波望遠鏡用 SIS 超伝導受信機の改良を行なった。我々はこれまで、345 GHz、492 GHz 帯の Nb-Base の SIS ミキサの開発を行ってきた。今期は、CI ( $^3P_1 - ^3P_0$ ; 492 GHz) のもう一つ上の遷移輝線である CI ( $^3P_2 - ^3P_1$ ; 809 GHz) を観測するため、まず 492-GHz SIS ミキサをスケールダウンし、809-GHz SIS ミキサの製作を行なった。Nb-base の SIS ミキサはギャップ周波数（約 700 GHz）以上の周波数に対しては検出感度が大幅に低下する。しかしながら、実験室で測定した 809-GHz SIS ミキサの受信機雑音温度は 580 K と実用的な性能を達成したため [18]、今期は、345/492/809 GHz の 3 バンド対応の受信機を望遠鏡に搭載した（ミキサはすべて DSB ミキサ）。345 GHz、492 GHz 帯受信機の雑音温度は昨年のもとのほぼ同じである。これらの SIS 素子はいずれも、国立天文台野辺山のクリーンルームで製作されたもので、809-GHz SIS ミキサの素子の tuning circuit は parallel connected twin junctions (PCTJ) を採用している。

今期の受信機システムは 3 バンド対応にしたため、その分、熱流入・発熱量が増加する。そこで受信機が十分冷えるように、冷凍機 (GM2 段式 4K 冷凍機 (無調整)) は 4 K ステージが 0.5 W の冷却能力を持つ冷凍機に交換した。そのうえで、IF 系の雑音温度を下げるため、492 と 809 GHz 用の冷却 HEMT 増幅器を 4 K-stage に取り付けた。このような改善の結果、今期の観測時の 492 GHz 帯、809 GHz 帯のシステム雑音（大気、レドームの損失込み）は、比較的天気の良い時で、それぞれ約 1800 K (DSB)、6300 K (DSB) を得た。

3 バンド受信機光学系の開発 345GHz /492GHz/ 809GHz の 3 バンド受信機光学系の開発を行い、富士山頂サブミリ波望遠鏡に搭載した。この 3 バンド光学系では、アンテナからの RF 信号はまず、45° の角度で設置された偏波グリッドで 492 GHz ミキサ方向と 345GHz/ 809GHz ミキサ方向に分離される。345GHz/ 809GHz 方向に分岐したほうは 30° の角度で設置されたローパス・フィルタで 345 GHz ミキサ方向（透過）と 809 GHz ミキサ方向（反射）に分離される。それぞれの周波数に分離された RF 信号は、ミキサ前方に設置された LO カップリング・グリッドによりデューア上窓から導入される LO 信号と混合され、ミキサのホーンに入る。

この 3 バンド受信機の搭載により、CO  $J=3-2$  (345 GHz) 輝線、CI  $^3P_1 - ^3P_0$  (492 GHz) 輝線、および CI  $^3P_2 - ^3P_1$  (809 GHz) 輝線の観測が、リモート切替で行えるようになった。

On-the-fly マッピング観測法の確立 広域マッピングを効率的に行なうために、On-the-fly Mapping Mode (OTF) の手法を確立した。高速なデータ積分が可能な積分機システムには Pentium Processor を使用し、ホストコンピュータへはイーサケーブルを介して圧縮したデータを転送するようにした。これら積分機システムと同期したアンテナ制御を開発し、データ転送時間に対する観測効率の低下がない状態

で、1分角を1秒の割合でスキャンするモードでの動作を確認した。

**OTF 対応新積分器の開発** 富士山頂サブミリ波望遠鏡に搭載されている音響光学型分光器 (AOS) から出力されるデータに対して高速な積分処理を行い、将来実装予定の on the fly (OTF) 方式の観測に対応可能な積分器の開発を行った。AOS の CCD から出力されたビデオ信号はこの積分器に送られ、16bit の AD 変換器によってデジタル化された後、クロック周波数 200MHz の CPU をもつ計算機上で積算される。AD 変換器は 12bit の分解能を実現し、AD 変換の量子化雑音を CCD 雑音と比較して十分小さくすることができた。実験室における仮想的な信号に対する実験では、データの取得に成功した。

**チョッピング副鏡の開発** 微弱かつコンパクトなサブミリ波源に対する感度を向上させるため、富士山頂サブミリ波望遠鏡用のチョッピング副鏡の開発を行っている。開発中のチョッピング副鏡の駆動機構としては、従来の複数のアクチュエータで副鏡を支持する方式ではなく、向かい合う歯車の付いた電磁石と永久磁石から成る全く新しい方式を採用した。このチョッピング副鏡の導入により、実際の観測における感度向上はもちろん、惑星からの連続波を受信して望遠鏡の指向観測ができるようになるため、望遠鏡の指向精度にも格段の向上が見込まれる。

現段階で実験室における第一号試作機の性能試験が終了し、5 Hz の振動周期で duty cycle  $\approx$  90% が実現可能であることが確認された。現在この結果をふまえて、10 Hz で duty cycle  $>$  95% を安定して実現すべくさらに改良を加えた第二号試作機を製作中である。

### 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中である。この望遠鏡の利点は、世界中至る所にあるサブミリ波観測の適地に持ち込むことが出来、しかも口径が小さい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。主要な観測周波数は、富士山頂サブミリ波望遠鏡と同じ、492 GHz と 809GHz である。

**受信機システムの開発** 可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡に搭載する 492 GHz 受信機のみキサ・ブロックおよびフィード・ホーン的设计、製作を行った。みキサには国立天文台野辺山で作られた SIS 超伝導素子を使用している。汎用性を考慮して、IF サーキットはみキサ・ブロック外部 (Bias-Tee box) に装備した。受信機の冷却には、住友重機製の消費電力 1 kW の GM 2 段式 4K 冷凍機を使う予定である。フィード・ホーンにはダイアゴナル・ホーンを採用した。18cm サブミリ波望遠鏡の光学系の制限から、フィード・ホーンは出来るだけデューワーの窓に近づける必要があり、このためホーンは最短にはなっていない。

制御システムの開発 可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡の制御システムの開発を行なった。OS に Windows NT を用いたマルチタスク処理を行ない、これまでにない価格と手軽さで安定した望遠鏡制御システムを構築することができた。

### Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE)

本研究室では、野辺山天文台、東京大学天文学科、名古屋大学のグループと共同で ASTE (Atacama Submillimeter Telescope Experiment) 計画を推進している。ASTE 計画とは、電波天文学における次期大型プロジェクトである LMSA 計画のプロトタイプアンテナを LMSA 建設予定地であるチリのアタカマ砂漠 (標高 4800 m) に設置する計画である。現在、望遠鏡は野辺山でのテスト段階にある。

本研究室では野辺山のグループと共同で、この望遠鏡に搭載する 345 GHz 帯サブミリ波受信機の開発を行った。観測効率の向上には、受信機雑音温度の低減が重要となる。そこで、SIS 素子の性能評価、光学系でのノイズ成分の評価などをくり返し、受信機を組みあげ、受信機システムの低雑音化をはかった。その結果、受信機雑音温度は 345 GHz で約 60 K (DSB) と非常に高い性能を実現している。

### 6.5.2 星間分子雲の観測的研究

**オリオン KL 領域における CI ( $^3P_2 - ^3P_1$ ; 809GHz) 輝線の観測** 富士山頂サブミリ波望遠鏡に搭載した 345 GHz / 492 GHz / 809 GHz 3バンド受信機を用いて、オリオン KL を中心とした  $3' \times 3'$  領域を CI の 809 GHz のスペクトル線で観測した。観測は周波数スイッチモードで行い、大気込みシステム雑音温度は 6500 K (DSB) であった。観測の結果、809 GHz のスペクトル線の強度分布は、対応する 492 GHz のスペクトル線の強度分布とよく対応していることがわかった。2本のスペクトル線の強度から求めた励起温度は 30-60 K でほぼ一様であり、オリオン KL のホットコア方向でも励起温度の上昇は特に認められなかった。このことは、この領域の CI の放射が分子雲表面の光解離領域におもに由来していることを示している。このように CI の 809 GHz のスペクトル線の観測は CI 放射領域の物理状態を探るのに非常に有効であることが示された。

#### 富士山頂サブミリ波望遠鏡による

**Orion B 分子雲の CI 広域観測** 昨年度の Orion A 巨大分子雲 [2] に引続き、そのコンパニオンである Orion B 分子雲に対して、そのほぼ全領域、約 7 平方度に対して  $3'$  グリッドで CI (492 GHz) の広域観測を富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて行なった。Orion A 分子雲同様、CI は分子雲全体にわたって広がっていて、全体としてその分布は  $^{13}\text{CO}(1-0)$  とよい相関を示した。分子雲コアにおける CI/CO 比

は、0.1-0.2 程度とほぼ同じ値を示すが、全体としては Orion B 分子雲では Orion A 分子雲 (特に南部) に比べて CI/CO 比が低くなっていることが分かった。その原因のひとつとして、分子雲の化学的年齢の違いを反映している可能性が考えられる [17]。

牡牛座分子雲複合体における元素組成のばらつき 昨年度までの、NRAO 12 m 電波望遠鏡 (Kitt Peak) と野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いた、 $H^{13}CN(1-0)$ 、 $HC^{15}N(1-0)$  の観測の結果、 $^{13}C/^{15}N$  比が牡牛座分子雲複合体内において 3.4 から 12.8 と、3 倍以上ものばらつきを示すことが明らかになっていた。これらは分子雲複合体を形成しているガスの組成自体が一樣ではないという可能性を示唆しており、そのことを確かめるために、さらに野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて数点の牡牛座分子雲コアにたいして同様の観測を高感度で行なった。その結果、空間的に近い点における比は近い値を示すことが明らかになり、上記の可能性を再確認する結果となった [15][16]。

牡牛座暗黒星雲の Heiles' Cloud 2 (HCL2) 周辺領域における CI の広域観測 牡牛座分子雲にある HCL2 領域は 150pc と距離が近く、内部には TMC-1 のような高密度分子雲コアが存在する典型的な暗黒星雲である。またこの領域は、OB 型星などの紫外線源が近くに存在しないため、分子雲や分子雲コア自身の物理・化学進化のメカニズムを調べるには絶好のターゲットである。

昨年度は、富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて、この HCL2 領域の CI 輝線のマッピング観測を行ない、HCL2 領域の南部分に CI と CO 分子の存在量比 ( $N(CI)/N(CO)$ ) の高い領域 (0.8) が存在することを発見した。この領域は、可視減光  $A_V$  が  $A_V > 6$  と高いため、このような高い比を PDR モデルで説明することが難しく、むしろまだ年齢の若い分子雲 (CI rich cloud) を捉えていると考えられる [1]。今期の観測では、この HCL2 領域の東側へとさらに観測領域を広げた (2 平方度、観測点数 750 点)。その結果、CI は CI rich cloud から東側へと連続的に伸びており、 $^{13}CO$  や IRAS 100  $\mu m$  の分布と大局的に似ていることが分かった。さらに、この CI の分布のうち代表的な場所 (14 箇所) で、国立天文台野辺山の 45m 望遠鏡を用いて  $^{13}CO$  と  $C^{18}O$  分子輝線の観測を行ない、 $N(CI)/N(CO)$  比を詳しく調べたところ、いずれの場所でも比が 0.5 ~ 1.5 となり、CI rich cloud と同程度もしくはそれ以上の高い値を示した。一方、この領域の可視減光は、IRAS 100  $\mu m$  と 60  $\mu m$  の強度比から  $A_V < 4$  と低いことが分かる。これらのことから、この HCL2 領域の東側に広がる CI は translucent cloud に付随するものと推察され、そこでの高い  $N(CI)/N(CO)$  比は PDR モデルでも説明が可能であると考えられる [18]。

昨年度と今年度の結果から、HCL2 領域周辺には 3 つの異なる進化段階、すなわち、translucent cloud 的な領域、CI rich cloud のように分子雲が形成されつつある領域、TMC-1 のように分子雲コアがすでに形成されている領域、が連なって存在していることが分かった。

暗黒星雲 Lynds134 の  $CI\ ^3P_2-^3P_1$  輝線観測 Lynds134 (L134) は L183 (L134N) 複合分子雲を構成する L183, L169, L134 の 3 つの主な分子雲のうちの一つであり星形成が進んでいない代表的な暗黒星雲である。我々はこの領域の分子雲の構造や形成過程を調べる目的で昨年の L183, L169 に続いて L134 について富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて CI 輝線 ( $^3P_1-^3P_0$ , 492 GHz, ビーム幅 2'.2) の広域観測を行なった。観測点数は 240 点約 1 平方度にわたりこれにより L134 全体の CI の分布を明らかにすることができた。

また上記 3 つの分子雲について IRAS 衛星による波長 100  $\mu m$  と 60  $\mu m$  の赤外線分布から星間ダストの分布を表す可視減光を求めて、CI 分布と比較することによりすることにより、分子雲ごとにその性質が異なることを見出した。すなわち、L169 が希薄な分子雲であるのに対し L183, L134 は高密度分子雲、L183 においては可視減光量と CI 分布がよく一致するが L134 では一致しない部分が存在している。このことは分子雲の進化段階に差があることを示唆している可能性がある。

NGC1333, Barnard1 領域の CI 観測 富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて NGC1333 領域、Barnard1 領域を約 2 平方度に渡って 3' グリッドで観測した。その結果、NGC1333 領域のコア部分では CI/CO 比は 0.1 - 0.4 と他の代表的分子雲コアと比較して大きい値をとることが分かった。B1 領域では北部に CI/CO 比が南部 CO コアに比べて高い領域が新しく発見された [20]。

銀河面の CI によるサーベイ Solomon et al.(1987) によって発見された銀経  $8^\circ - 9^\circ$ 、銀緯  $-1^\circ - +1^\circ$  に存在する 273 個の CO クラウドのうち、アンテナ温度が 15K 程度以上クラウドの 28 個に対して富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて CI ラインによる観測を行なった。結果、25 個のクラウドについて CI ラインを検出した。

$\rho$  Oph 領域の CI 広域観測 へびつかい座領域 ( $\rho$  Oph) の暗黒星雲 L1688 のほぼ全領域、約 1.7 平方度に対して CI(492 GHz) の広域マッピング観測を行い、この暗黒星雲全体における CI の分布を初めて明らかにした (図 6.5 a)。CI の広がりには  $^{13}CO(1-0)$  とおおむね良い相関を示すが、南の CI ピークには対応する  $^{13}CO$  のピークはみられなかった。一方 CII はこの領域の主な紫外線源である B2 型星 HD147889 を中心として分布しており、CI の分布とは大きく異なっていた。また、HD147889 と南の CI ピークの間には  $C^{18}O$  でトレースされる分子雲コアがある。従って、HD147889 から南の CI ピークにかけて CII/CO/CI の順に並んでおり、PDR モデルによる予想 (CII/CI/CO) に反する結果になった。また、南の CI ピークでは柱密度比  $N(CI)/N(CO)$  が 0.4 と他の部分より大きい値を示す。その原因の一つとして、化学的に比較的若い領域である可能性が考えられる [22]。

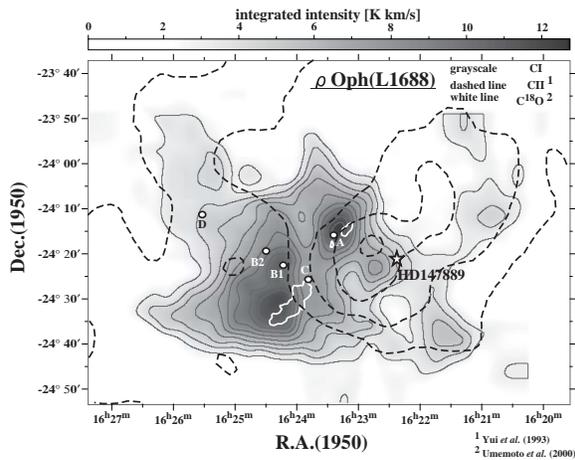


図 6.5 a: 富士山頂サブミリ波望遠鏡で得られた  $\rho$  Oph 領域の暗黒星雲 L1688 周辺の CI  $^3P_1-^3P_0$  輝線積分強度図。グレースケールが CI、破線の等高線が Yui *et al.*(1993) による CII、白線の等高線が Umemoto *et al.*(2000) による  $C^{18}O$  の分布を示す。星印はこの領域の主な紫外線源である B2 型星 HD147889。丸印は分子雲コア。

**Maddalena cloud の CI 広域観測** Maddalena cloud は、Orion 分子雲の倍程度の質量をもつにもかかわらず活発な星形成の起こっていない特殊な巨大分子雲である。その中心領域約 1 平方度に対して CI の分布を明らかにした。この天体では CI の強度は  $T_{mb}$  で 1.5 K 以下と非常に弱く、1 点あたり 100-400 s の積分時間を要した。観測の結果、CI の分布は  $^{13}CO$  の分布とほぼ同じような分布を示した。この分子雲における CI/CO 柱密度比は 0.2-1.8 であり、典型的な巨大分子雲や暗黒星雲で観測されている値 (cf. Orion A  $\sim 0.03$  宙 0.2, L134N  $\sim 0.1$ ) よりも translucent cloud で観測されている値 (0.4- 6) に近いことがわかった [23]。

**中間赤外暗黒星雲周辺の CI 輝線観測** MSX (Midcourse Space Experiment) 衛星により、中間赤外域 (8-25  $\mu m$ ) で数分角の広がりを持つ patchy な暗黒星雲状の天体が銀河面上に約 2000 個発見された。これらは非常に高い可視減光 ( $> 100$  等) を有し、その後のミリ波分子輝線観測の結果より、星形成の始まっていない、あるいは非常に初期にある高密度分子雲コアであることが分かっている。

これらの中間赤外暗黒星雲のうち、HII 領域 DR15 に付随する 2 つの中間赤外暗黒星雲 G79.34+0.33, G79.34+0.38 について、富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いた中性炭素 (CI)  $^3P_1-^3P_0$  (492GHz) および一酸化炭素 (CO)  $J=3-2$  (345GHz) 輝線によるマッピング観測、および野辺山宇宙電波観測所 45m 望遠鏡を使用した一酸化炭素の同位体 ( $^{13}CO$ ,  $C^{18}O$ )  $J=1-0$  (110GHz) 輝線によるマッピング観測を行い、以下のような結果を得た (図 6.5 b)。[1] CO  $J=3-2$  輝線強度ピークは、HII 領域 DR15 方向に一致する。[2] CI 輝線強度ピークは、DR15 方向の約 5' (1.5 pc) 北西、

二つの中間赤外暗黒星雲を挟んで HII 領域 DR15 とは反対側に位置する。[3]  $^{13}CO$  および  $C^{18}O$   $J=1-0$  輝線強度ピークは、中間赤外暗黒星雲 G79.34+0.33, G79.34+0.38 の位置に一致する。上記の HII/CO/CI の空間的配列は、古典的な光解離領域 (Photodissociation Region) モデルの予測とは相容れず、早期型星からの紫外光が中性炭素分布を決定する支配的要素ではない事を示唆すると同時に、紫外光の入り込めない分子雲の奥深くまで CI が存在する可能性を示している [13]。

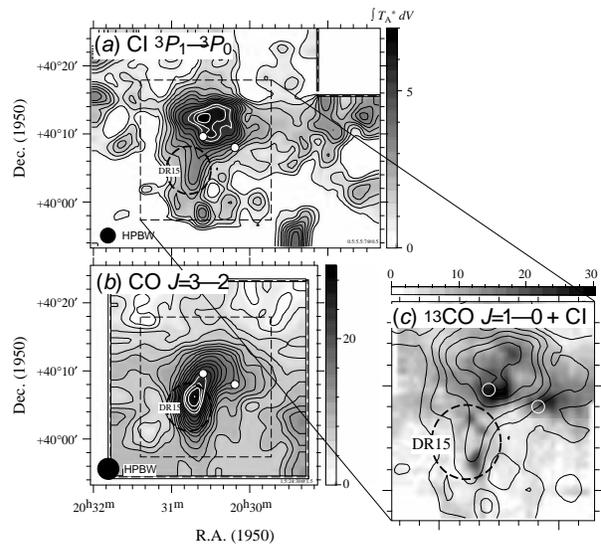


図 6.5 b: (a) 富士山サブミリ波望遠鏡で得られた DR15 周辺の CI  $^3P_2-^3P_1$  輝線積分強度図。(b) 同じく CO  $J=3-2$  輝線積分強度図。(c) 野辺山宇宙電波観測所 45m 望遠鏡で得られた  $^{13}CO$   $J=1-0$  輝線積分強度図。それぞれ白丸はカタログされた中間赤外暗黒星雲の位置。

**低銀緯未同定 線源周辺の CO 輝線観測** Compton  $\gamma$  線天文衛星の EGRET 検出器によって  $E > 100$  MeV の高エネルギー領域で銀河面上に検出された  $\gamma$  線点源は 35 個にのぼるが、そのうち回転駆動型パルサーに同定された 5 つ以外は他波長で未同定な天体である。それら未同定天体の正体および  $\gamma$  線放射機構の解明は高エネルギー天文学の重要な課題である。我々は、位置の良く決定された低銀緯未同定  $\gamma$  線源 2EG J1811-2339 方向の X 線撮像観測およびミリ波分子輝線観測を行い、それが回転駆動型パルサー+星間分子雲というシステムである事を見出した。このシステムでは、パルサーによって加速された高エネルギー荷電粒子が星間分子雲中のバリオンに衝突し、制動放射  $+\pi_0$  崩壊過程によって高エネルギー  $\gamma$  線が放射されていると考えられる [4]。

今回我々は、上記の 2EG J1811-2339 のような線天体の普遍性を調べる目的で、同様にパルサーらしき X 線源およびダスト雲が付随している低銀緯未同定  $\gamma$  線源の一つ GEV J1837-0610 について、野辺山宇宙電波観測所 45 m 望遠鏡を使用した CO  $J=1-0$  輝線観測を行い、この領域の分子ガス分布が軟 X 線

放射を取り囲むように直径約 20 pc のアーク状構造を示すことを見出した。この結果により、この GEV J1837-0610 がおそらくはパルサー/超新星残骸/分子雲システムであること、この超新星残骸と分子雲の相互作用および超新星爆発の結果誕生したパルサーが高エネルギー荷電粒子を供給していること、そしてその高エネルギー荷電粒子と分子雲中のバリオンの相互作用によって線が放射されている事が示唆される [12]。

### 6.5.3 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の短いフリーラジカルなどの「短寿命分子」が数多く含まれている。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ので、星間分子雲に存在することが予想されていても、スペクトルの周波数が知られておらず、探索ができていないものが少なくない。そこで、本研究室では、「短寿命分子」の回転スペクトルを実験室での高感度ミリ波サブミリ波分光によって研究している。

**DSC ラジカルのマイクロ波分光** 昨年の HSC ラジカルのマイクロ波分光による検出に引き続いて、その重水素化物である DSC ラジカルの回転スペクトルをマイクロ波領域にて測定した (図 6.5 c)。D<sub>2</sub>S と CO を放電して DSC を生成した。HSC と DSC の解析を合わせて HSC の分子構造を  $r(\text{HS}) = 1.390(3)$  Å,  $r(\text{CS}) = 1.6403(5)$  Å,  $\alpha(\text{HSC}) = 104.2(2)^\circ$  と決定した。

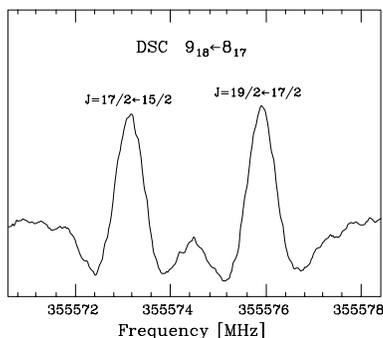


図 6.5 c: 355.6 GHz 付近に観測した DSC ラジカルの  $9_{18}-8_{17}$  回転遷移を示す。重水素核による超微細構造分裂は、小さいため分離して観測できなかったが、対電子スピンによる微細構造分裂が観測できた。

**CS、SO の振動励起状態のフーリエ変換ミリ波分光** 基本的な 2 原子分子である CS( $X^1\Sigma^+$ )、SO( $b^1\Sigma^+$ ) に着目し、実験室でフーリエ変換ミリ波分光計を用いて振動励起状態の回転スペクトルの測定を行った。CS については希ガスに希釈した CS<sub>2</sub> をパルス放電ノズルを通して生成した。生成した CS は強く振動励

起しており、34 - 49 GHz の範囲で  $v = 39$  までの  $J = 1-0$  の回転スペクトルを測定できた。また、C<sup>34</sup>S、<sup>13</sup>CS、C<sup>33</sup>S、C<sup>36</sup>S のスペクトルも振動励起状態を含めて測定できた。<sup>13</sup>CS の場合、核スピンによる超微細構造分裂を測定することができ、核スピン回転相互作用定数が求められた。同様に SO( $b^1\Sigma^+$ ) についても  $v = 22$  までの  $J = 1-0$  の回転スペクトルを 33 - 42 GHz の範囲で測定できた。以上の結果からフーリエ変換ミリ波分光によって分子の高励起状態を調べることができることがわかった。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Tomofumi Umemoto, Hitomi Mikami, Satoshi Yamamoto, Naomi Hirano, "The Ortho-to-para Ratio of Ammonia in the L1157 Outflow", *Astrophys. J.* 525, L105-L108 (1999).
- [2] Tomoya Hirota, Satoshi Yamamoto, Kentarou Kawaguchi, Akihiro Sakamoto, and Nobuharu Ukita, "Observations of HCN, HNC, and NH<sub>3</sub> in Comet Hale-Bopp", *Astrophys. J.* 520, 895-900 (1999).
- [3] Yutaro Sekimoto, Satoshi Yamamoto, Masafumi Ikeda, Hiroyuki Maezawa, Tetsuya Ito, Gaku Saito, Ken'ichi Tatematsu, Yuji Arikawa, Yoshiyuki Aso, Takashi Noguchi, Keisuke Miyazawa, Sheng-Cai Shi, Shuji Saito, Hiroyuki Ozeki, Hideo Fujiwara, Junji Inatani, Masatoshi Ohishi, Kazufusa Noda, and Yuichi Togashi, "The Mt. Fuji Submillimeter-wave Telescope", *Rev. Sci. Instr.* in press.
- [4] T. Oka, N. Kawai, T. Naito, T. Horiuchi, M. Namiki, Y. Saito, R. W. Romani, & T. Kifune, "A Dark Cloud Associated with an Unidentified EGRET Source", *The Astrophysical Journal*, 526, 764 (1999)
- [5] Hideta Habara and Satoshi Yamamoto, "Microwave spectrum and molecular structure of the HSC radical", *Journal of Chemical Physics*, Jun 2000 in press.
- [6] M. Ikeda, H. Maezawa, T. Ito, G. Saito, Y. Sekimoto, S. Yamamoto, K. Tatematsu, Y. Arikawa, Y. Aso, T. Noguchi, S. Shi, K. Miyazawa, S. Saito, H. Ozeki, H. Fujiwara, M. Ohishi, and J. Inatani "Large-scale mapping observations of the CI ( $^3P_1 - ^3P_0$ ) and CO ( $J = 3 - 2$ ) lines toward the Orion A molecular cloud" *Astrophysical Journal*, 527, L59-L62 (1999)
- [7] H. Maezawa, M. Ikeda, T. Ito, G. Saito, Y., Sekimoto, S. Yamamoto, K. Tatematsu, Y. Arikawa, Y. Aso, T. Noguchi, S.C. Shi, K. Miyazawa, S. Saito, H. Ozeki, H. Fujiwara, M. Ohishi, & J. Inatani, "Large-Scale Mapping Observations of the C<sub>7</sub>  $^3P_1 - ^3P_0$  Line toward Heiles Cloud 2 in the Taurus Dark Cloud", *The Astrophysical Journal*, 254, L129 (1999)

(学位論文)

- [8] 羽原秀太 : Molecular Structures of Sulfur-bearing Free Radicals As Studied by Microwave Spectroscopy (マイクロ波分光によるイオウを含むフリラジカルの分子構造の研究) (博士論文)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [9] Satoshi Yamamoto : Atomic Carbon As a Probe of Galaxies, 4th RESCEU International Symposium (Tokyo, Nov. 1999)
- [10] H. Habara and S. Yamamoto : Microwave spectra of the HCS and HSC radicals, The 54th Ohio state university international symposium on molecular spectroscopy (Columbus, Ohio USA, June 14-18, 1999)
- (国内会議)
- 一般講演
- [11] 山本 智、前澤裕之、池田正史、伊藤哲也、岡朋治、齋藤岳、岩田充弘、亀谷和久、酒井剛、関本裕太郎、立松健一、有川裕司、麻生善之、野口卓、史生才、齋藤修二、藤原英夫、大石雅寿、尾関博之、稲谷順司 : 富士山頂サブミリ波望遠鏡による Orion KL 領域の  $\text{CI}(^3P_2 - ^3P_1; 809 \text{ GHz})$  輝線の観測、日本天文学会 (東京大学、2000 年 4 月)
- [12] 岡 朋治、河合誠之、内藤統也、桜井郁也、坂本貴紀、R. Romani : 低銀緯末同定 線源 GEV J1837-0610 方向の CO マッピング観測、日本天文学会 (九州大学、1999 年 10 月)
- [13] 岡 朋治、他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ : 富士山頂サブミリ波望遠鏡による中間赤外暗黒星雲 G79.34+0.33, G79.34+0.38 周辺の  $\text{CI } ^3P_2 - ^3P_1$  輝線観測、日本天文学会 (東京大学、2000 年 4 月)
- [14] 羽原秀太、山本智 : DSC ラジカルのマイクロ波分光、分子構造総合討論会 (大阪大学、1999 年 9 月)
- [15] 池田正史、広田朋也、山本智 : Variation of isotope abundance in the Taurus Molecular Complex, NRO ユーザーズミーティング (野辺山国立天文台、1999 年 7 月)
- [16] 池田正史、山本智 : 牡牛座分子雲複合体における元素組成のばらつき、日本天文学会 (九州大学、1999 年 10 月)
- [17] 池田正史、他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ : 富士山頂サブミリ波望遠鏡による Orion B 分子雲の CI 広域観測、日本天文学会 (東京大学、2000 年 4 月)
- [18] 前澤裕之、伊藤哲也、齋藤岳、酒井剛、岡朋治、山本智、関本裕太郎、野口卓、立松健一、麻生善之、齋藤修二、稲谷順司、他富士山頂サブミリ波グループ : 富士山頂サブミリ波望遠鏡用 809GHz 帯 SIS 超伝導受信機の開発、日本天文学会 (九州大学、1999 年 10 月)
- [19] 伊藤哲也、他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ : 富士山頂サブミリ波望遠鏡による暗黒星雲 L134 の CI 広域観測、日本天文学会 (東京大学、2000 年 4 月)
- [20] 岩田 充弘、他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ : NGC1333 の  $\text{CI}(^3P_1 - ^3P_0)$  及び  $\text{CO}(J=3-2)$  による広域観測、日本天文学会 (東京大学、2000 年 4 月)
- [21] 金銀淑、羽原秀太、山本智 : HCCS、DCCS のフリーエ変換ミリ波分光、分子構造総合討論会 (大阪大学、1999 年 9 月)
- [22] 亀谷和久、他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ : 富士山頂サブミリ波望遠鏡による  $\rho \text{ Oph}$  領域における CI の広域観測、日本天文学会 (東京大学、2000 年 4 月)
- [23] 酒井剛、他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ : 富士山頂サブミリ波望遠鏡による Maddalena cloud の CI 広域観測、日本天文学会 (東京大学、2000 年 4 月)
- 招待講演
- [24] Satoshi Yamamoto : Development of Astrochemistry; Chemical Evolution of Dark Cloud Cores、日本化学会 (日本大学、2000 年 3 月)
- [25] 山本 智 : 富士山頂サブミリ波望遠鏡で探る星の誕生、日本天文学会公開講演会 (東京大学、2000 年 4 月)

## 6.6 酒井広文 研究室

酒井広文研究室は、1999年（平成11年）10月1日付けで発足した、全く新しい研究室である。2000年4月1日付けで、助手の峯本紳一郎が着任した。当研究室では、量子光学および原子分子物理学実験のうち、次の3つのテーマを中心に研究を進める予定である。

高強度レーザー電場による中性分子の配向および偏向とその応用

最近、酒井広文らにより、非共鳴誘起双極子とレーザー電場との相互作用を利用して、分子をレーザー光の偏光方向に配向したり、中性分子を偏向したりすることが可能となった。これらの技術を応用して以下の研究を行いたい。

- enhanced ionization などの、分子の多価イオンの生成メカニズムの研究
- 光解離生成物の選択的制御技術の研究
- 原子+分子、あるいは、分子+分子衝突における配置効果の研究
- 原子光学の要素技術の「分子光学」への移行
- 偏向技術の集束効果を用いた「分子量子細線」や「分子量子ドット」の追究

分子内波束の構造とダイナミクスに関する研究

励起状態にある分子の構造とダイナミクスの完全な理解とその制御は分子物理学の重要課題の一つである。有効な研究手段である、レーザー誘起クーロン爆裂（Coulomb explosion）を用いたイメージング技術を駆使して、以下の様な研究を行いたい。

- pump-probe 法を用いた核波束の構造とダイナミクスの研究
- 量子光学の最も基本的な実験の一つである、連続する2つの励起光で生成された核波束の干渉実験
- 高強度レーザー電場による分子の多光子イオン化における2電子同時イオン化（nonsequential ionization）など、高強度レーザー物理における新現象の研究
- 比較的簡単な分子の屈曲運動のダイナミクスの研究
- ファンデルワールス分子の波動関数の決定と理論との比較

超短パルス高強度レーザー光と原子分子等との相互作用に関する研究

超短パルス高強度レーザー光と原子分子等との相互作用を通じて現れる、高強度レーザー物理、あるいは、超高速現象における新現象の追究および探索を行いたい。主要な研究課題は以下の通りである。

- 原子・分子・イオン・クラスター内の超高速現象の研究
- 高強度レーザー物理における各種の新現象の探索
- 高次高調波を用いた実用度の高いコヒーレント軟X線光源（テーブルトップシンクロトロン）の開発
- 軟X線領域の線形および非線形分光光学実験
- 希ガスクラスターからの（軟）X線放射とそのメカニズムの研究（マイクロプラズマの物理）

### 6.6.1 配向した分子を用いた高効率多価分子イオンの生成

分子中に生成された非共鳴誘起双極子と直線偏光したレーザー電場との相互作用により、分子をレーザーの偏光方向に配向させるトルクが働く。この原理を利用すれば、分子をレーザーの偏光方向に揃えることが出来ると期待される。実際、酒井広文らは、超短パルスレーザー技術と2次元イオンイメージング技術を駆使することにより、この配向効果の最も直接的な証拠を得ると共に配向度を初めて定量的に評価した（これは、1998年度に行われた、デンマーク・オーフス大学化学科のHenrik Stapelfeldt博士のグループとの共同研究の成果である）。

上記の技術の応用として行った、オーフス大学との共同実験で得られたデータを詳細に解析することにより、配向した分子中での高効率多価分子イオンの生成に関して新しい知見を得た。フェムト秒高強度レーザーパルスによる分子の多光子イオン化過程は、レーザー光の偏光方向と分子軸の方向との関係により事情が大きく異なる。レーザー光の偏光方向が分子軸と垂直の時は、イオン化の過程は核間距離にかかわらず原子様である。ところが、偏光方向が分子軸と平行の時は、イオン化の速度は核間距離に強く依存し、いわゆる critical distance では、平衡核間距離の時よりも何桁も増大すると理論的に予想されている。この現象は enhanced ionization と呼ばれている。

酒井広文らは、中性分子の配向技術を用いて、イオン化用レーザー光の偏光方向と分子軸の方向が垂直の時と平行の時のイオン収率の違い等を定量的に評価した。詳細な解析の結果、以下の知見を得た。1) 配向した分子の分子軸がイオン化用レーザーの偏光方向と平行の時、レーザーの強度が同一でもより多価のイオンをより高効率に生成できる。2) このこと

は、enhanced ionization から予想される結果と両立し、今回の実験結果は、同メカニズムの新しい視点からの実証であると考えられる。3) 今回の実験では、イオン化用レーザーパルスへのリーディングエッジが核間距離の増大に寄与していると考えられる。従って、第1パルスで分子を解離し、critical distance 付近でイオン化用レーザーパルスを照射すれば、より一層多価のイオンをより一層高効率に生成出来ると予想される。4) イオン化用レーザー光の偏光方向と分子軸のなす角を調整することにより、分子イオンの価数、即ちプラズマ状態の制御が可能である。

### 6.6.2 2次元イオンイメージング装置の開発

分子の内部状態（励起状態）や光解離生成物の角度分布の観測、さらには、分子の配向度の定量的な評価を行うために不可欠な、MCP、フォスファースクリーン、CCD カメラからなる2次元イメージング機能を備えた実験装置の開発に着手した。装置の設計に当たっては、以下の点を特に考慮した。1) 分子ビームの射出方向は、観測軸と同一とした。これにより、中心対称性の維持された歪みの無いイメージが得られる。2) フラグメントイオンの加速電極部は、静電レンズ効果を用いた velocity map imaging の手法を採用し、大口径（直径 20 mm）、メッシュ無しの構造とした。velocity map imaging の手法を採用すれば、加速電圧の最適化により、初速度ベクトルの等しいフラグメントイオンは、検出器の同一点上に到達する。従って、空間分解能の高い測定を行うことが可能となる。峯本紳一郎と酒井広文は概念設計および詳細設計を終え、現在装置の立ち上げを進めている。

### 6.6.3 中性分子の配列制御に関する数値シミュレーション

上で述べた、中性分子の配向実験では、異核種2原子分子のA-Bの場合、配列A-BとB-Aは区別されていない。分子の配列を制御し、全ての分子をA-BまたはB-Aに揃えることが出来れば、化学反応ダイナミクスにおける配置効果の研究や、光解離生成物の選択的制御等に有効であることは自明である。

金井恒人（学部4年）と酒井広文らは、2波長レーザー光の重ね合わせにより生成される非対称電場（即ち、非対称ポテンシャル）を用いた中性分子の配列制御の可能性について検討した。分子の回転周期に比べて配列がゆっくり進む状況（adiabatic regime）で、シュレーディンガー方程式を数値的に解いて、orientation parameter  $\langle\langle \cos\theta \rangle\rangle$  と alignment parameter  $\langle\langle \cos^2\theta \rangle\rangle$  のレーザー強度依存性やレーザーパルス内の時間発展等を評価した。ここで、 $\theta$  はレーザー電場の偏光方向と分子軸のなす角である。モデル分子とFCN分子について計算を行い、上記のアプローチにより配列制御できる可能性があることが分かっ

た。図6.6 a および図6.6 b にそれぞれFCN分子について計算した、orientation parameter  $\langle\langle \cos\theta \rangle\rangle$  と alignment parameter  $\langle\langle \cos^2\theta \rangle\rangle$  のレーザー強度依存性を示す。

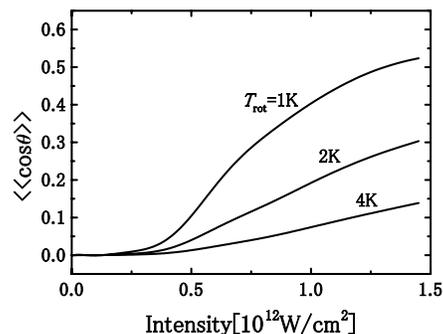


図 6.6 a: FCN 分子について計算した、orientation parameter  $\langle\langle \cos\theta \rangle\rangle$  のレーザー強度依存性。図中の温度は、分子の初期回転温度である。

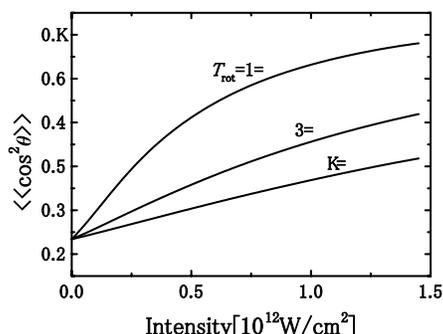


図 6.6 b: FCN 分子について計算した、alignment parameter  $\langle\langle \cos^2\theta \rangle\rangle$  のレーザー強度依存性。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Hirofumi Sakai, C. P. Safvan, Jakob Juul Larsen, Karen Marie Hilligsøe, Kasper Hald, and Henrik Stapelfeldt, "Controlling the alignment of neutral molecules by a strong laser field," *J. Chem. Phys.* **110**, 10235-10238 (1999).
- [2] Jakob Juul Larsen, Hirofumi Sakai, C. P. Safvan, Ida Wendt-Larsen, and Henrik Stapelfeldt, "Aligning molecules with intense nonresonant laser fields," *J. Chem. Phys.* **111**, 7774-7781 (1999).

(会議抄録)

- [3] Hirofumi Sakai, Jakob Juul Larsen, C. P. Safvan, Ida Wendt-Larsen, Karen Marie Hilligsøe, Kasper Hald, and Henrik Stapelfeldt, "Alignment of neutral molecules by a strong nonresonant laser field," Proceedings of US-Japan Workshop on the Quantum Control of Molecular Reaction Dynamics, in press.

## (国内雑誌)

- [4] 酒井広文、「レーザー光で分子を操る—レーザー光による分子の偏向・配向と今後の展望—」, 科学, (2000) 印刷中。

## &lt; 学術講演 &gt;

## (国際会議)

## 招待講演

- [5] Jakob Juul Larsen, Hirofumi Sakai, C. P. Safvan, Ida Wendt-Larsen, Henrik Stapelfeldt, "Alignment of neutral molecules using a nonresonant laser field," 1st Cross-Border Workshop on Laser Science, Ottawa, Ontario, Canada, May 1999.
- [6] Hirofumi Sakai, Jakob Juul Larsen, Ida Wendt-Larsen, Johannes Olesen, Henrik Stapelfeldt, and Paul B. Corkum, "Collisional double ionization of D<sub>2</sub> molecules with intense 20 fs pulses," 1st Cross-Border Workshop on Laser Science, Ottawa, Ontario, Canada, May 1999.
- [7] Hirofumi Sakai, C. P. Safvan, Jakob Juul Larsen, Karen Marie Hilligsøe, Kasper Hald, and Henrik Stapelfeldt, "Alignment of neutral molecules by a strong nonresonant laser field," US-Japan Workshop on the Quantum Control of Molecular Reaction Dynamics, Honolulu, Hawaii, U.S.A., December 1999.
- [8] Hirofumi Sakai, Jakob Juul Larsen, C. P. Safvan, Ida Wendt-Larsen, Karen Marie Hilligsøe, Kasper Hald, and Henrik Stapelfeldt, "Alignment of neutral molecules by intense nonresonant laser fields," The 3rd NIMC International Symposium on Photochemical Control and Photofunctional Materials, Tsukuba, Ibaraki, Japan, March 2000.

## 一般講演

- [9] Hirofumi Sakai, C. P. Safvan, Jakob Juul Larsen, Karen Marie Hilligsøe, Kasper Hald, and Henrik Stapelfeldt, "Alignment of neutral molecules by a strong laser field," QELS '99 (Quantum Electronics and Laser Science Conference), Baltimore, Maryland, U.S.A., May 1999.
- [10] Jakob Juul Larsen, Ida Wendt-Larsen, Hirofumi Sakai, C. P. Safvan, and Henrik Stapelfeldt, "Laser induced alignment of molecules with applications towards control of photochemical reactions," XVIII International Symposium on Molecular Beams, Ameland, the Netherlands, June 1999.

## (国内会議)

## 招待講演

- [11] 酒井広文、「高強度非共鳴レーザー光を用いた中性分子の配向とその観測」, 「分子及び分子小集団の超高速動力学」研究会、岡崎コンファレンスセンター、1999年6月。
- [12] 酒井広文、C. P. Safvan, Jakob Juul Larsen, Karen Marie Hilligsøe, Kasper Hald, and Henrik Stapelfeldt, 「非共鳴レーザー電場による中性分子の配向とその観測」, 立体ダイナミクス研究会、東北大学科学計測研究所、1999年7月。
- [13] 酒井広文、「高強度非共鳴レーザー電場による中性分子の配向とその観測」, 物性研究所研究会シリーズ「物性研究の展望」, 「先端分光物性研究の現状と将来展望」, 東葛テクノプラザ、1999年10月。
- [14] 酒井広文、「非共鳴レーザー光による中性分子の配向制御とその応用」, 化学反応の量子制御研究会、物質工学工業技術研究所、1999年11月。
- [15] 酒井広文、「フェムト秒レーザーを用いた分子物理学実験」, 第5回フェムト秒光エレクトロニクス研究会、上智大学、1999年12月。
- [16] 酒井広文、「高強度レーザー電場による中性分子の配向制御」, 理研シンポジウム第3回コヒーレント科学—光から物質系へ—、理化学研究所・大河内記念ホール、2000年1月。
- [17] 酒井広文、「レーザー光による中性分子のマニピュレーション」, 第3回CRESTレーザー化学部門研究会「強レーザー光子場中の化学」, 東京大学山上会館、2000年3月。

## 一般講演

- [18] 酒井広文、C. P. Safvan, Jakob Juul Larsen, Karen Marie Hilligsøe, Kasper Hald, Henrik Stapelfeldt, 「非共鳴レーザー電場による中性分子の配向」, 日本物理学会 1999年秋の分科会、岩手大学、1999年9月。
- [19] 酒井広文、Jakob Juul Larsen, C. P. Safvan, Ida Wendt-Larsen, Henrik Stapelfeldt, 「配向した分子を用いた高効率多価イオン生成」, 日本物理学会 1999年秋の分科会、岩手大学、1999年9月。
- [20] 酒井広文、Jakob Juul Larsen, C. P. Safvan, Ida Wendt-Larsen, Henrik Stapelfeldt, 「配向した分子を用いた enhanced ionization の観測」, 2000年春季第47回応用物理学関係連合講演会、青山学院大学、2000年3月。
- [21] 金井恒人、酒井広文、Jakob Juul Larsen, Henrik Stapelfeldt, 「中性分子の orientation に関する考察」, 2000年春季第47回応用物理学関係連合講演会、青山学院大学、2000年3月。

ことが可能となった。

## 7 生物物理

### 7.1 若林研究室

生命現象について、生命を構築するタンパク質分子の立体構造と状態と生命機能との関係を明らかにすることを通して、分子レベルでのメカニズムを解くことを目的としている。特に、モーター蛋白質システムにおけるエネルギー変換とその制御の分子メカニズムを追求している。そのために、

- 1) ナノ構造解析のための電子顕微鏡法と画像解析法の開発
- 2) ホログラフィック像再構成法とクライオ電子顕微鏡法を用いた分子モーター構造研究
- 3) タンパク質工学を用いた研究
- 4) X線結晶解析と電子顕微鏡法を組み合わせた原子レベルでの研究

を行っている。

97年度から特別推進研究「蛋白工学とホログラフィック・クライオ電子顕微鏡法によるモーター蛋白質機能の研究」による研究の機会に恵まれ、電子波による生きたタンパク質の新しい観察法の開発を図り、エネルギー変換機構について分子構造変化に基づいた新しいメカニズムの提唱を目指している。

#### 7.1.1 ナノ構造解析のための電子顕微鏡法と画像解析法の開発

CCD カメラを用いた電子顕微鏡撮影 (安永、若林)

単一分子の像から、高分解能情報を得るためには、多くの分子を撮影し、それらを相互に関連させて画像処理する必要がある。この際には、出発点となる電子顕微鏡像の質が重要であり、そのため電子像を直接デジタル化できる slow scan CCD カメラ (ss-CCD) の開発との改良を続けている。その結果、ナイキスト周波数 ( $1/48 \mu\text{m}^{-1}$ ) に至るまで十分な MTF (modulation transfer function) の値を持つカメラとなった。また、電源周りの改良により雑音を抑えることができた。32万倍で  $3.4 \text{ \AA}$  のカーボンの格子縞や 56万倍で金の  $2 \text{ \AA}$  の格子縞を観察でき、十分な分解能を得ることができたといえる。

また、信号雑音比が向上し、CCD カメラの画素サイズ以下の細かさまで、同一視野の位置合わせが可能であった。これまで画像がドリフト等により劣化していたが、撮影時間を分割し複数撮影した後、位置合わせして平均像を求めドリフトの影響を避ける

エネルギーフィルタを備えた冷電界放出型電子顕微鏡の性能評価 (安永、若林)

タンパク質分子は軽原子からなるので、電子はタンパク質分子により非弾性散乱を受ける確率が弾性散乱の約4倍となり、像質は劣化する。この非弾性散乱電子を結像以前に除くためのエネルギーフィルタと冷電界放出型電子銃を備えた電子顕微鏡 (EF-2000) の性能を評価した。電子線のコヒーレンスは、エネルギーフィルタを通した後も保たれており、ホログラフィック電子顕微鏡法を行う事が可能である事が分かった。クライオ電子顕微鏡やネガティブ染色法等の観察により、像質が改善し、一分子の認識に有効であることが分かった。今後、モータータンパク質の構造解析に適用する予定である。

#### 7.1.2 ホログラフィック像再構成法とクライオ電子顕微鏡法を用いた分子モーター構造研究

クライオ電子顕微鏡法と逆投影法を用いた細いフィラメントの三次元構造解析 (成田、石川、真柳、安永、若林)

筋肉のカルシウム制御のあり方を探るためには、細いフィラメントの構造解析が必要不可欠である。特にカルシウムを結合、解離することによって制御の中核をなすトロポニンの細いフィラメント内における位置や構造は、ほとんど分かっていない。今回、クライオ電子顕微鏡写真を単粒子解析を用いた新しい画像処理法により、はじめてトロポニンの細いフィラメント内の構造を  $28 \text{ \AA}$  の分解能で解くことに成功した。その結果トロポニンヘッドは、カルシウム有り状態ではアクチンの inner domain 正面にアクチンからやや離れて存在していた。一方、カルシウム無し状態ではアクチンの前面全体にわたってアクチンに張り付きアクチンのC端領域と結合している。このトロポニンヘッドの大きな動きに基づき、カルシウム制御の分子モデルを構築することができた。[21], [13]

アクチン・トロポミオシン・トロポニン (C+I) の  $\text{Ca}^{2+}$  濃度による構造変化 (石川 (理研)、若林)

トロポニンは筋収縮のカルシウム制御能を担っているが、そのコンポーネントの三次元構造は明らかでない。トロポニンはアクチンのラセン対称性に従わず、三次元再構成が出来なかったが、トロポニン (C+I) をアクチンに 1 : 1 に結合させることによりラセン対称性を持つようにして、三次元構造を決定

した。細いフィラメントの中でトロポニン (C+I) は、 $\text{Ca}^{2+}$  濃度が低いときにはアクチンのN端からC端にかけての領域に強く結合しているが、高  $\text{Ca}^{2+}$  濃度では、アクチンのC端から解離するがN端への結合は保たれていた。トロポミオシンの低  $\text{Ca}^{2+}$  濃度での位置はアクチンの第4ドメインから離れるように変化していることを、クライオ電子顕微鏡法により初めて明らかにした。[1]

クライオ電子顕微鏡法によるアクトミオシン硬直複合体の高分解能解析 (安永、阿部、佐伯、須藤 (総合文化)、若林)

アクトミオシン硬直複体に含まれるアルファ・ヘリックスを含めてその三次元像を明らかにするには  $9 \text{ \AA}$  より良い分解能が必要である。15-20  $\text{ \AA}$  の分解能まで向上させることにより、ミオシンとアクチンの相互作用部位にあたる Lower50K と Upper50K のドメイン構造をそれぞれに分離して認識出来た。アクチンと結合することにより二つのドメインの相対配置が変化するように見える。この変化は、リン酸の解離に必要と考えられるバックドアの開放と一致している。したがって、アクチンによるリン酸解離のステップの活性化に関与している可能性がある。更なる高分解能化を目指している。[29], [15], [24], [18], [17]

MgAMPPNP 存在下でのアクチン - ミオシン複合体の3次元構造解析 (井上、安永、若林)

収縮のサイクルのうちで、弱い相互作用から強い相互作用への遷移は重要なステップであるが、弱い相互作用状態でのアクチン・ミオシン複合体の構造情報は乏しい。そこで、弱い相互作用状態の一つである MgAMPPNP を結合したミオシンとアクチンとの複合体の三次元構造解析を行った。その結果、ミオシンはアクチンフィラメントの前面全体に結合している像を得た。特に、第4ドメインにも結合が観察された。この部分はカルシウム制御に重要な領域であり興味深い。さらに構造を精密化していくことにより、弱い相互作用から強い相互作用への遷移の過程を明らかにしたい。[12]

クライオ電子顕微鏡法によるカエル骨格筋の太いフィラメントの構造研究 (橋場、安永、若林)

クライオ電子顕微鏡法で弛緩状態におけるカエル骨格筋の太いフィラメントの構造を解析した。ミオシン頭部中の二つのミオシン S1 は、ほぼ同じ方向を向き、その向きは Z 線方向であることが分かった。この結果は、筋収縮中に軽鎖結合部位がレバーアームとして細いフィラメントをこれまでに考えられてきたよりも長い距離をストローク出来ることを意味する。太いフィラメントのバックボーンにはサブフィ

ラメントの束が三本あることが示された。さらに、太いフィラメントに付属する C タンパク質の太いフィラメント上での構造が初めて示された。C タンパク質はバックボーンを中心から表面にかけて動径方向に幅広く分布しつつリングを形成している可能性がある。[8], [16], [28]

*Tetrahymena thermophila* 22S 外腕ダイニン  $\alpha$  head のクライオ電子顕微鏡法による三次元再構成 (竹内、安永、佐伯、若林)

22S 外腕ダイニンは *Tetrahymena thermophila* の繊毛運動に使われているモーター蛋白質であり、3つの重鎖で構成されているのが特徴である。抽出した 22S 外腕ダイニンを電子顕微鏡で見たところその特徴的な構造が確認できた。現在 22S 外腕ダイニンから3つの重鎖の1つである  $\alpha$  重鎖のモーター部位を分離・精製する方法を検討しており、精製でき次第クライオ電子顕微鏡法で撮影し、画像処理して三次元構造を解析したい。

トロポニンのらせん状結晶の作成 (村上、安永、佐伯、若林)

トロポニン T,I,C のチューブ状結晶のクライオ電子顕微鏡写真から、らせん対称性を用いた三次元再構成によってトロポニンの構造解析を行うためトロポニン T の欠失ミュータント (His-156-262) を含むトロポニンを大腸菌で大量発現させ精製する事に成功した。Reinach らによるトリ骨格筋のトロポニンを大腸菌 BL21 (DE3) plysS で発現できるとの報告に基づいて、そのプラスミドを作り変えてトロポニン T の N 末端にヒスタグをつけた欠失ミュータント (His-156-262) を同じ系で発現し、ニッケルカラムとゲル濾過によって精製した。そしてそれらのミュータントでも、トロポニン T,I,C が複合体をつくることを電気泳動で確認した。またカルシウムによるミオシン S1 の ATPase の制御能があることを確認した。現在、結晶化条件を探索している。

### 7.1.3 タンパク質工学及び生化学的手法を用いたモータータンパク質の研究

筋収縮の制御に影響を及ぼす変異アクチン (佐伯、安永、松浦、若林)

細胞性粘菌を用いて変異アクチンを作製し、サブドメイン 4 の Ala 230 を Tyr に変えた変異アクチン (チロシン変異体) が、トロポミオシン・トロポニンとカルシウムイオン存在下で野生型アクチンよりも強くミオシン ATPase を活性化する。しかし、これらの変異アクチンはトロポミオシン存在下では野生型と同様に振る舞う。松浦らによってチロシン変

異体アクチンの結晶構造が解かれ、変異の影響は局所的であり、ロイシン 236 番の側鎖の位置が変化していることが分かった。そこで新たにチロシン変異とロイシン 236 をアラニンに変えたチロシン・ロイシン二重変異体を作製した。この変異アクチンはトロポミオシン存在下でも、野生型アクチンより活性化の程度が強かった。in vitro 滑り運動測定を行ったところ、二重変異アクチンはトロポミオシン非存在下では野生型アクチンと同様な速度で滑ったがトロポミオシン存在下では野生型アクチンが滑れない低濃度ミオシン条件でもあまり速度が低下しなかった。これらの結果をアロステリック説に照らし合わせてみると、低いミオシン濃度で野生型アクチンよりも良く滑り運動をするので、二重変異アクチンは野生型アクチンよりも R-state(三状態モデルでは"open state")になりやすいと思われる。これらの結果からアクチンサブドメイン 4 の 230~236 のループは T-state(三状態モデルでは"closed state")から R-state へアロステリック遷移する際に重要な部位であると結論した。[4], [20], [27]

アクチン変異の筋収縮制御への効果 (深澤、佐伯、安永、若林)

チロシン変異体の一つであるハーフ・キメラ 1 について  $Ca^{2+}$  濃度を变化させたときの ATPase 活性とその協同性を調べた。その結果、同じチロシン変異体であるキメラ・アクチンと同様に高  $Ca^{2+}$  濃度では野生型の約 4 倍の活性を示した。しかし、Hill 係数と  $K_m$  は、wild type  $5.40 \pm 0.08$ ,  $1.6 \pm 0.3$  に対し、half chimera-1  $5.30 \pm 0.03$ ,  $1.8 \pm 0.2$  とそれほど違わなかった。従って、この変異は三状態モデルにおける"blocked state"から"closed state"への遷移に影響を及ぼさない。ミオシン ATPase の活性化は"closed state"から"open state"への遷移を促すことによると推論できる。pH を下げると野生型に比べて活性が下がることがわかった。このことからチロシン 230 の  $H^+$  の解離が活性に影響するのではないかとの考えからアクチンの紫外吸光スペクトルを測り、チロシンの状態を調べた。得られたスペクトルからチロシンの  $pK$  が単体のアミノ酸に比べて野生型では約 3 ほど下がったものが 1 つあり、ハーフ・キメラ 1 では約 2 下がったものが 2 つ観測された。pH 変化による ATPase とチロシンの解離には明らかな相関を見出せなかったが、42 kDa の大きなタンパク質でも局所的な変化であれば吸光スペクトルでチロシン 1 残基程度の違いが検出出来ることが示された。[11]

変異アクチンの higher  $Ca^{2+}$  activation の原因の解明 (岡田、佐伯、若林)

チロシン変異アクチンの一つであるハーフ・キメラ 1 は、トロポミオシン・トロポニン複合体と  $Ca^{2+}$  存在下で野生型に比べてミオシン ATPase を強く活性化する。トロポミオシン・トロポニン複合体の濃

度の効果を検討した。高濃度では、野生型ではカルシウム存在下でも ATPase の阻害が僅かながら観測されたが、ハーフ・キメラ 1 ではこの阻害が観察されなかった。この阻害はミオシンの濃度が低い場合に起こり、T-state(三状態モデルでは"closed state")の存在を示し、ハーフ・キメラ 1 ではミオシン濃度が低いときでも既に R-state("open state")にあると解釈した。この活性化への TnT の寄与を検討するために、ウサギ TnT を用いてトロポミオシン存在下で ATPase を測ったところ、顕著な差はなく、R-state への遷移にはトロポニン ( $C+I$ ) も必要と考えた。

蛍光エネルギー移動法を用いたミオシンレバーアームの動きの検出 (安永、鈴木(総合文化)、須藤(総合文化)、若林)

蛍光エネルギー移動を用いたレバーアームの動きに関してさらに検討を行った。ミオシンの第三の構造が X 線結晶解析により報告されたので、その構造についても考慮したところ、蛍光エネルギー移動の結果は第三の構造を説明できなかった。この事は、第三の構造は、蛍光エネルギー移動では測定にかけられない様な過渡的な遷移状態であることを示唆している。[7]

アクチンの N 末端アセチル化はアクチン・ミオシン間の弱い相互作用を強める (阿部、佐伯、安永、若林)

アクチンの N 末端アセチル化の機能的な重要性を明らかにするために、N 末端がアセチル化されていないアクチン(非アセチル化アクチン)の特性を調べた。非アセチル化アクチンの調製は、まず、N 末端にヒスチジンタグ、factor Xa の切断部位を付加したアクチンを細胞性粘菌から精製し、次に、factor Xa による切断でヒスチジンタグを取り除くことにより行った。得られた非アセチル化アクチンは重合して正常なフィラメントを形成し、正常に脱重合した。重合の速度に関しては、核形成速度は変化せず、伸長速度が約 1.5 倍になった。また、ATP 非存在下において、ミオシン S1 と正常に強く結合した。さらに、非アセチル化アクチンはヘビーメロミオシン(HMM)の ATPase を活性化した。しかし、野生型アクチンとの比較の結果、アクチン・ミオシン間の弱い結合の解離定数を表す  $K_{app}$  は約 3.6 倍になった(最大速度  $V_{max}$  は変化しなかった)。この結果は、アクチンの N 末端アセチル化が ATP 存在下におけるアクチン・ミオシン間の弱い相互作用を強めることを示している。そのうえ、in vitro motility assay から、非アセチル化アクチンのフィラメントはメチルセルロース(MC)の非存在下において ATP の添加により HMM から解離するという結果も得られ、これは ATPase 活性測定の結果を支持している。なお、MC 存在下では滑るフィラメントが観察され、滑り速度を測った結果、野生型と比較して、約 0.7

倍だった。[2], [9],[23], [25], [26]

アクチンの負電荷クラスターループの重要性 (阿部、佐伯、安永、若林)

アクチン上のミオシン相互作用部位の一部として三カ所の負電荷クラスターが明らかになっているが、このうち D24/D25 はアクチン分子の表面に露出したループ (負電荷クラスターループ) 22-28 上に位置している。このループに含まれるグリシン残基 (G23) を他のアミノ酸残基に置換すると、このループの構造が変化したり、動きやすさが低下したりする可能性がある。負電荷クラスター D24/D25 とミオシンとの相互作用が影響を受けると予想できる。そこで、細胞性粘菌から調製した変異アクチン G23A/E360H による HMM ATPase の活性化をコントロールアクチン E360H の場合と比較したところ、catalytic efficiency ( $V_{max}/K_{app}$ ) がほぼ半減していた。このことから、G23 はアクトミオシン ATPase サイクルがより効率よく回転するのに役立っていると考えられる。なお、G23A/E360H は正常に重合してフィラメントを形成したが、重合速度に関しては E360H の場合と比較して、核形成が速く、伸長が遅かった。この結果は、G23A 変異の位置が重合部位から離れているにもかかわらず、重合速度に影響を与えていることを表している。[22]

#### 7.1.4 原子レベルでの構造研究 (X線結晶解析・電子顕微鏡法)

変異アクチンのX線結晶解析 (松浦、佐伯、安永、若林: Murray Stewart 博士 (MRC 分子生物学研究所)、河本正秀博士 (JASRI)、神谷信夫博士 (理研播磨) との共同研究)

アクチンサブドメイン 4 にある  $\alpha$ -helix の 5 残基 (228-232) を細胞性粘菌アクチンの配列からテトラヒメナアクチンの配列に置換した変異アクチン full chimera (Q228K / T229A / A230Y / A231K / S232E / E360H) について、ゲルゾリンセグメント 1 との複合体として結晶化に成功した。この変異アクチンは昨年度結晶構造を報告した変異アクチン half chimera-1 (Q228K / T229A / A230Y / E360H) と性質がよく似ており、細胞性粘菌野生型アクチンの場合よりもカルシウムによる細いフィラメントの活性化の度合いが高くなることが佐伯らにより示されている。高エネルギー加速器研究機構放射光実験施設のビームライン BL6B で X 線回折データを収集し、half chimera-1 を初期モデルとして分子置換法により 2.4 Å 分解能で構造を解いた。Half chimera-1 の場合と同じく、full chimera の構造は全体としては野生型アクチンとほぼ同じであり、唯一変異部位近傍においてのみ局所的構造変化がみられた。A230Y 変異によって導入されるチロシンの側鎖の位置や、こ

の変異の影響で L236 の側鎖が疎水性ポケットから追い出されている点は half chimera-1 と full chimera で共通している。この知見は A230Y の点変異だけでも half chimera-1 や full chimera においてみられた効果と同じ効果が出たという佐伯らの生化学的知見と対応していると思われる。Half chimera-1 にさらに L236A 変異を追加することによって細いフィラメントのカルシウムによる活性化の度合いがさらに高くなった (佐伯ら、未発表) ことなどから考えて、これらの変異アクチンでは A230Y 変異により導入されたチロシンの側鎖が直接トロポミオシンと相互作用し、その結果カルシウムとミオシン頭部の存在下で細いフィラメントが "open-state" に遷移しやすくなっている可能性があると思われ。また、ここで推測しているチロシンの側鎖とトロポミオシンの相互作用は単に疎水的であるという漠然としたものではなくチロシンに特異的なものである可能性があり、芳香環をもつアミノ酸残基側鎖の  $\pi$  電子の重要性など物理学的興味をも喚起している。[3], [10], [14],[19]

#### 7.1.5 電子顕微鏡法を使ったタンパク質の構造研究

古細菌 ATP 合成酵素 VoV1ATPase の構造解析 (安永、横山 (金沢大)、若林)

古細菌 ATP 合成酵素である VoV1ATPase の構造を電子顕微鏡法により明らかにした。V1ATPase の活性部位はミオシンなどの構造と類似しており、ミトコンドリア上での ATP 合成酵素 FoF1ATPase と同様の構成であることから、回転モーターの可能性はある。特に、V1ATPase は、A3B3dg からなる複合体であるが、そのサブユニット構造を明らかにするために、A3B3, A3B3g, A3B3gd の三種の構造について電子顕微鏡像を撮影した。その結果、A3B3 構造が六角形上の環状構造をつくり、その内部に gd が存在することが分かった。この gd が環状の内部に存在することを統計学的に検定し、99.7 % の信頼度で内部に存在することが分かった。[5] また、VoV1ATPase 全体構造も撮影し、V1ATPase から Vo 部分へのストーク構造や Vo 部分のローター構造が可視化された。

古細菌シャペロニンの構造解析 (安永、吉田 (海洋バイオ)、若林)

古細菌シャペロニンである KS-1 は alpha 及び beta の 2 種が存在し、8 ないし 9 個からなる環状の構造をとることが知られている。本年度は、alpha, beta の生化学的研究により beta がシャペロン活性を持つことが示されたので、beta からなる環状構造と、その基質として蛍光タンパク質を結合したものに関して電子顕微鏡写真を撮影した。今後、構造解析を行い、結合様式についての知見を得ることを目的とする。また、フィラメント構造を作成することが知られており、古細菌の細胞骨格の可能性もありおもし

ろい。そのフィラメント構造のフーリエ変換パターン及びフィルタ像はシャペロニンが層状構造をなす事を示している。今後、さらに解析を進めたい。

### 7.1.6 計算機を使ったモータータンパク質の構造機能連関の研究

モータータンパク質の分子動力学計算 (安永、森、鳥居、(以上2名、4年生特別実験)、若林)

NAMD というプログラムを用いて、水やイオンの影響を考慮して、アクチン、ミオシン、small G-protein(ras)等の分子動力学計算を行った。アクチンでは、第4ドメインアルファヘリックスの動きが顕著に見られた。この部分は筋収縮制御にも関与していることが佐伯等([4])により示されていることから、興味深い。ミオシンでは、活性部位と動きをもたらすレバーアームとをつなぐリレー領域であるアルファヘリックスの折れ曲がり観察され、この領域がミオシンの活性部位からレバーアームへの allosteric な構造変化の源である可能性があり、今後、さらに計算を進める必要がある。

タンパク質間相互作用と分子動力学計算 (安永、武田、高橋(以上2名、4年生特別実験)、若林)

NAMD というプログラムを用いて DNase I-アクチン、small G-protein(ras)-Gap 等の二つのタンパク質が結合した状態での結晶構造が解かれているものに関して分子動力学計算を行った。二つのタンパク質の距離を 5-10 Å 程離れた後、分子動力学により計算を行った。特に、DNaseI とアクチンの場合に、アクチンの inner domain と outer domain の動きが結合への引き金となることが分かった。モノマーアクチンでのエネルギー最小状態の構造では、DNaseI と結合できず、前述の動きの後に結合が可能となる事が示唆された。この事は、タンパク質-タンパク質の相互作用にとって重要な示唆を与えており、今後、さらに検討しく予定である。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Ishikawa, T. & Wakabayashi, T.: Calcium-Induced Changes in the Location and Conformation of Troponin in Skeletal Muscle Thick Filaments. *J. Biochem.* **126**, (1999)
- [2] Abe, A., Saeki, K., Yasunaga, T., and Wakabayashi, T.: Acetylation at the N-terminus of actin strengthens weak interaction between actin and myosin. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **268**, (2000) 14-19.
- [3] Matsuura, Y., Stewart, M., Kawamoto, M., Kamiya, N., Saeki, K., Yasunaga, T. and

Wakabayashi, T.: Structural basis for the higher  $Ca^{2+}$ -activation of the regulated actin-activated myosin ATPase observed with *Dictyostelium/Tetrahymena* actin chimeras. *J.Mol.Biol.* **296** (2000) 579-595.

- [4] Saeki, K. and Wakabayashi, T.: A230Y mutation of actin on subdomain 4 is sufficient for higher calcium activation of actin-activated myosin adenosinetriphosphatase in the presence of tropomyosin-troponin. *Biochemistry* **39** (2000) 1324-1329.
- [5] Yokoyama, K., Ohkuma, S., Taguchi, S., Yasunaga, T., Wakabayashi, T. & Yoshida, M.: V-Type H<sup>+</sup>-ATPase/Synthase from a Thermophilic Eubacterium, *Thermus Thermophilus*. *J. Biol. Chem.* **275**, (2000)

(国内雑誌)

- [6] 若林健之、安永卓生: 筋収縮と弛緩の際の超微細構造の変化 臨床神経科学 **17**, 10, (1999)
- [7] 安永卓生、鈴木良和: ミオシンの構造生物学—構造—機能連関の謎に迫る 細胞工学 **18**, 11, (1999)

(学位論文)

- [8] 橋場周平: クライオ電子顕微鏡法によるカエル骨格筋の太いフィラメントの構造研究 (博士論文)
- [9] 阿部亮敦: Study on the Function of the Acetylation at the N-terminus of Actin (アクチンの N 末端アセチル化の機能に関する研究)(生物化学専攻博士論文)
- [10] 松浦能行: X-ray crystallography of mutant actins which affect calcium regulation of muscle contraction (博士論文)
- [11] 深沢総一: アクチン変異の筋収縮制御への影響 (修士論文)
- [12] 井上知己: MgAMPPNP 存在下におけるアクチン-ミオシン複合体の三次元構造解析 (修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [13] Akihiro NARITA, Takashi Ishikawa, Kota MAYANAGI, Takuo YASUNAGA & Takeyuki WAKABAYASHI: Three-dimensional reconstruction of actin-tropomyosin-troponin complex by electroncryo-microscopy and single particle analysis. (Gordon Research Conference, U. S. A., June, 1999)

一般講演

- [14] Matsuura, Y., Stewart, M., Kawamoto, M., Kamiya, N., Saeki, K., Yasunaga, T. & Wakabayashi, T.: The 2.0 Å resolution crystal structure of a mutant actin that hyperactivates thin filaments. Gordon Conference on Muscle: Contractile Proteins (New Hampshire, USA, June 1999).

- [15] Yasunaga, T., Abe, A., Saeki, K., Sutoh, K. & Wakabayashi T.: Actin-S1 structure revealed by electron cryo-microscopy and a holographic image reconstruction. Gordon Conference on Muscle: Contractile Proteins (New Hampshire, USA, June 1999).
- [16] Hashiba, S., Yasunaga, T. & Wakabayashi, T.: Structure of native thick filaments revealed by electron cryomicroscopy and holographic image reconstruction technique. Gordon Research Conference on 3D Electron Microscopy, June. (1999) NH
- [17] Yasunaga, T., Abe, A., Saeki, K., Sutoh, K. & Wakabayashi T.: Actin-S1 structure revealed by electron cryo-microscopy and a holographic image reconstruction. Gordon Research Conference on 3D Electron Microscopy, June. (1999) NH
- [27] Saeki, K., Yasunaga, T., Matsuura, Y., and Wakabayashi, T.: *Dictyostelium* mutant actins which affect regulatory mechanism of muscle contraction. 第2回細胞性粘菌研究会 バイオニックデザインワークショップ「モデル生物：細胞 性粘菌」(つくば市、茨城、2000年3月)
- [28] Hashiba, S.: Structure of native thick filaments revealed by electron cryomicroscopy and holographic image reconstruction technique (Dept. of Molecular Structural Biology, Max-Planck-Institute for Biochemistry, Germany, July, 1999)
- [29] 安永卓生、佐伯喜美子、若林健之: 三次元電子顕微鏡法で探るタンパク質・構造-機能連関の分子メカニズム (海洋バイオテクノロジー研究所、釜石市、岩手、2000年3月)

(国内会議)

一般講演

- [18] 安永卓生、阿部亮敦、佐伯喜美子、須藤和夫、若林健之: クライオ電子顕微鏡によるミオシンS1の硬直複合体の高分解能構造、第37回日本生物物理学会年会 (和光市、埼玉、1999年10月)
- [19] 松浦能行、Murray Stewart、河本正秀、神谷信夫、佐伯喜美子、安永卓生、若林健之: 筋収縮制御に影響を及ぼす変異アクチンの結晶構造、第37回日本生物物理学会年会 (和光市、埼玉、1999年10月)
- [20] 佐伯喜美子、若林健之: アクチンのA230Y変異はトロポミオシン・トロポニンとカルシウムイオン存在下ミオシンATPaseをより強く活性化する、第37回日本生物物理学会年会 (和光市、埼玉、1999年10月)
- [21] 成田 哲博、石川 尚、真柳 浩太、安永 卓生、若林 健之: クライオ電子顕微鏡法と逆投影法による細いフィラメントの三次元再構成 (第37回日本生物物理学会年会、和光市、埼玉、1999年10月)
- [22] 阿部亮敦、佐伯喜美子、安永卓生、須藤和夫、若林健之: アクチンの負電荷クラスターループの動きやすさはミオシンとの相互作用サイクルに必要なか (第37回日本生物物理学会年会、和光市、埼玉、1999年10月)
- [23] 阿部亮敦、佐伯喜美子、安永卓生、須藤和夫、若林健之: アクチンのN末端アセチル化はミオシンATPaseの活性化を促進する (第72回日本生化学会大会、横浜市、神奈川、1999年10月)
- [24] 安永卓生、阿部亮敦、佐伯喜美子、須藤和夫、若林健之: クライオ電子顕微鏡によるアクチン-ミオシン複合体の構造解析 (生体運動合同班会議、豊中市、大阪、2000年1月)
- [25] 阿部亮敦、佐伯喜美子、安永卓生、須藤和夫、若林健之: アクチンのN末端アセチル化はアクチン・ミオシン間の弱い相互作用を促進する (生体運動合同班会議、豊中市、大阪、2000年1月)
- [26] 阿部亮敦、佐伯喜美子、安永卓生、若林健之: アクトミオシン相互作用からみたアクチンN末端アセチル化の機能的な重要性 (第2回細胞性粘菌研究会、つくば市、茨城、2000年3月)

(セミナー)

## 7.2 桑島研究室

桑島研究室では、球状タンパク質の天然立体構造構築（フォールディング）の物理原理に関する研究を行なっている。研究内容は、(1) タンパク質工学を用いたタンパク質のフォールディング研究、(2) 細胞内でのタンパク質フォールディングに関与する分子シャペロンの作用機構、(3) 新しい高速反応測定技術を利用したタンパク質のフォールディング研究の三つに大別される。

### 7.2.1 タンパク質工学を用いたタンパク質のフォールディング研究

球状タンパク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。多くのタンパク質で、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、タンパク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タンパク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、タンパク質工学の手法を用いて、対象とするタンパク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タンパク質の構造安定性や巻き戻り速度過程にどのような影響を及ぼすかを調べることが有効なアプローチとなる。また、分子動力学などの計算機シミュレーションによるタンパク質のアンフォールディング過程の解析も有効なアプローチと考えられる。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タンパク質を対象に、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。

#### $\alpha$ -ラクトアルブミンの高温における分子動力学シミュレーションとフォールディング反応の解析

(依田、桑島：斎藤教授(弘前大)、熊谷教授(東北大)、松島博士(山之内製薬)らとの共同研究)

昨年度に引き続き、ヤギ  $\alpha$ -ラクトアルブミン ( $\alpha$ LA) の高温での分子動力学シミュレーションを行うとともに、シミュレーションの結果をもとに、 $\alpha$ LA のフォールディング反応の速度論的解析に使用する変異タンパク質を作成した。各タンパク質の大腸菌による発現と抽出精製を行った。

クーロン相互作用のカットオフ距離を 12Å と 16Å にした twin-range cut-off の条件下で 600 K のシミュレーション (100 から 250 ピコ秒) を 6 回行った。6 回のシミュレーションは、それぞれ、室温におけるシミュレーション時間が 300, 320, 340, 360, 400, 420 ピコ秒の異なった構造を出発構造とした。各シミュレーションにおける分子の振る舞いを昨年度行なった

400 K、6 ナノ秒のシミュレーションの結果と比較し共通に見いだされる特徴を調べた。N 末端近傍の構造と Thr29 の周りの疎水性領域がシミュレーションの初期に壊れることが共通して見いだされた。これらは、現在までの速度論的な実験結果と良い対応を示す。一方、 $\alpha$ LA 分子の  $\alpha$  ドメインと  $\beta$  ドメインの境界に位置する芳香族クラスターの領域はシミュレーションを通して安定であり、この構造領域にフォールディング反応の開始部位があると期待される。

上記のシミュレーションの結果を実験的に検証するため、ドメイン境界の芳香族クラスター領域と他の構造領域に変異を導入した変異タンパク質を作成し、フォールディング反応の予備的な実験を行った。

#### グリーン蛍光タンパク質のフォールディング

(福田、新井、桑島)

グリーン蛍光タンパク質 (Green Fluorescent Protein, GFP) は発光オワンクラゲ (*Aequorea victoria*) の持つ、アミノ酸残基数 238 の球状タンパク質である。このタンパク質は、天然条件下で他の基質の作用なしに緑色の蛍光を発するため、近年の分子生物学の分野において、遺伝子マーカーとして盛んに利用されている。われわれは GFP をモデルタンパク質として、タンパク質の巻き戻り過程の解析を行なった。

GFP が遺伝子マーカーとしての役割を果たすためには、*in vivo* で発現したタンパク質が正しく天然構造に折り畳まることが必要である。しかし、多くの生体内環境はクラゲが通常生息している環境よりも高温であり、しばしば、野生型の GFP が正しく折り畳まらないことがある。これに対し、Cramer ら (Cramer *et al.* (1996) *Nat. Biotechnol.* 14, 315-319) は、PCR 法を用いてランダムにアミノ酸変異を導入することで、Cycle3 と呼ばれる、高温でも正しく折り畳まる GFP 変異体を作成した。その後、多くの研究者らにより、同様の GFP 変異体がたくさん作成され、これらは、いずれも高温でも正しく折り畳まるという意味で、フォールディング変異体と呼ばれている。

本研究では、野生型 GFP と Cycle3 変異体の *in vitro* でのフォールディング挙動を調べた。CLONTECH 社より得た GFP 遺伝子を大腸菌プラスミド pSCREEN-1b(+) に接続し野生型 GFP と Cycle3 変異体の大量発現プラスミドを作成した。各 GFP タンパク質の *in vitro* での巻き戻り反応を蛍光スペクトルを用いて調べるとともに、天然条件下でのペプチド・アミド基水素の水素 - 重水素交換反応を FTIR スペクトルを用いて調べた。その結果、予想に反し、野生型と Cycle3 変異体の間で、フォールディングの挙動と水素交換反応によるアミド基水素保護度のいずれにおいても差のないことが明らかとなった。巻き戻り反応にともなう不可逆的会合体形成を光散乱により調べたところ、Cycle3 変異体では野生型に比べ会合体形成が顕著に少なくなっていた。したがって、両タンパク質の *in vivo* での振る舞いの違いは、フォールディング挙動の違いによるのではなく、フォールディング中間体の会合体形成の程度の違いによって

もたらされていることが明らかとなった。

### イヌ・ミルク・リゾチームのフォールディング

(中尾、新井、桑島：小柴氏(北大)、新田教授(北大)との共同研究)

イヌ・ミルク・リゾチーム (CLZ) は、分子量が約 14,500 の球状タンパク質である。ニワトリやヒトのリゾチームとは異なり、ウマやハトのリゾチームの様にカルシウムイオンに対して結合能を持っている。また、平衡条件下での熱および変性剤によるアンフォールディングを行うと、カルシウム非結合型のものが天然状態とアンフォールドした状態間の二状態で転移するのに対して、CLZ では安定な中間体が確認できることが知られている。この結果は、他のカルシウム結合型リゾチームや、構造に相同性があり、カルシウム結合能を持つタンパク質、 $\alpha$ -ラクトアルブミンの結果に通じるものがある。したがって、CLZ は速度過程における中間体の構造について考察する際のモデルタンパク質として有用であるだけでなく、構造上同一ファミリーとして分類されるタンパク質のフォールディング過程の変化について議論する上でも重要なタンパク質である。CLZ を大腸菌による発現系を用いてインクルージョンボディとして発現させ、正しいジスルフィド結合の形成を促すため、チオレドキシンを用いた系による巻き戻しを行った。現在、巻き戻ったタンパク質を精製するための条件を決定して、精製タンパク質の収集を行っている。

### 7.2.2 細胞内でのタンパク質フォールディングに關与する分子シャペロンの作用機構

細胞内でのタンパク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、細胞内でのタンパク質の構造形成とアセンブリーに關係するのみならず、タンパク質の細胞内輸送、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關与しており、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) に關する研究を行っている。特に、タンパク質の巻き戻りの速度過程に及ぼすシャペロニンの影響、シャペロニンの機能発現にとって必要なヌクレオチドとの相互作用などを *in vitro* のモデル系を用いて調べている。

ATPase 活性を失った GroEL 変異体 (D398A) と  $\alpha$ -ラクトアルブミン巻き戻り中間体との相互作用

(槇尾、高須、桑島)

GroEL は細胞内において ATP を加水分解しコ・シャペロニン GroES を結合・解離しながらタンパク質の巻き戻りを助けていることが知られている。GroEL の機能を理解するためにはヌクレオチドや GroES との關わりについて理解することが必要である。今回われわれは ATP の加水分解が GroEL にもたらす効果に注目した。GroEL の 398 番目のアスパラギン酸をアラニンに置換した変異体 (D398A) では ATP の加水分解が抑えられることが知られている。この変異体を用いることで、GroEL への ATP の結合と、ATP の加水分解の効果を分離することができるかと期待される。

GroEL の変異体 D398A による  $\alpha$ -ラクトアルブミン ( $\alpha$ LA) の巻き戻り反応の変化を様々なヌクレオチド (ADP, AMP-PNP, ATP) 存在下で測定し、スキームに基づく数値解析により D398A と  $\alpha$ LA の巻き戻り中間体との相互作用の強さを求めた。結果、ヌクレオチドの存在しないときと比較して ADP や ATP の存在下で D398A と  $\alpha$ LA の巻き戻り中間体との親和性が低下し、その程度は ATP と ADP とでほぼ等しかった。一方野生型においては ATP のみが標的タンパク質との親和性に顕著な低下をもたらし、ADP による効果は小さかった。野生型 GroEL に見られた ATP と ADP による効果の差は、主に ATP の加水分解によるものであると示唆される。また AMP-PNP 存在下では、D398A と  $\alpha$ LA の巻き戻り中間体との親和性の低下がほとんど見られなかった。

ヌクレオチドによる GroEL の構造変化の分子機構

(伊野部、槇尾、高須、桑島)

GroEL に介助されたタンパク質が効率的に巻き戻するには、ATP の結合、加水分解による GroEL の大きな構造変化が重要である。しかし、この大きな構造変化を引き起こすメカニズムは未だ明らかにされていない。昨年までの等温滴定量熱計 (ITC) を用いた研究により、GroEL への ADP や ATP アナログ (ATP $\gamma$ S) の結合は非協同的に起こるという結果が得られている。しかし、ピレニル化 GroEL の蛍光スペクトルを用いた過去の研究では、ヌクレオチドの結合は協同的に起こることが定説 (アロステリックモデル) となっており (例えば、Jackson *et al.* (1993) *Biochemistry* **32**, 2554-2563) われわれの結果と一致しない。この矛盾点を解決するため、ITC の実験と蛍光スペクトルの実験ではタンパク質濃度が 100 倍以上も違うことに注目して、われわれは、ヌクレオチド結合に伴う協同的な構造転移には GroEL 二重リングの解離が必要であるとするモデルを提示した。今回、このモデルおよび従来のアロステリックモデルの妥当性を検討するため、GroEL の単一リング変異体である SR1 を用いた実験を行うとともに、ピレニル化 GroEL の蛍光スペクトルによる実験も行った。

滴定実験の結果、GroELのみならず、その単一リング変異体 SR1 においても協同的な構造変化が観測されたのは、ATP を加えたときのみであった。ADP や非加水分解性 ATP アナログ (AMP-PNP, ATP $\gamma$ S) では、ITC を用いても蛍光ラベル GroEL を用いても、GroEL への結合は非協同的であることが明らかとなった。ADP や ATP アナログを精製せずに市販の標品をそのまま使用した場合、過去の報告にあるようなピレニル化 GroEL の協同的な蛍光スペクトルが観測されたので、少なくともこれらのヌクレオチドに関する過去の研究報告は精製不十分な標品を用いたためにもたらされた誤りであることがわかった。したがって、われわれの実験結果は、現在一般的に信じられている GroEL のヌクレオチド結合に関するアロステリックモデルそのものに疑問を投げかけることとなる。加水分解可能な ATP を添加した場合には協同的な構造転移が観測されるので、この構造転移が ATP の結合によりもたらされるのか、あるいは、ATP の加水分解を必要とするのが現在の問題点となる。また、今回のピレニル化 GroEL の実験から、GroEL には非協同的で互いに独立な二種類のヌクレオチド結合部位があることも明らかとなった。

次に、ATP による GroEL の構造変化の分子機構を解き明かすため、野生型 GroEL と同様に ATP と結合するが、ATP 加水分解活性は野生型の 5% である GroEL 変異体 D398A を用いて更に実験を行った。ピレンで蛍光ラベルした D398A に ATP を滴定したところ、やはり協同的な蛍光変化が観測された。しかしその蛍光変化の速度は野生型 GroEL に比べ遅くなり、加水分解活性と同じく 10% 以下にまで低下した。このことは GroEL の協同的な構造変化は ATP の結合ではなく、それに続く過程で起こっていることを示唆している。

### ヌクレオチドによる GroEL の構造変化の X 線小角散乱法による解析

(伊野部、新井、中尾、桑島：伊藤博士 (筑波大・物質工)、木原教授 (関西医大)、雨宮教授 (東大・新領域) との共同研究)

ヌクレオチドによる GroEL の構造変化は、その機能発現には欠かせないものである。現在までヌクレオチド存在下の GroEL の構造変化を特徴付けようと X 線小角散乱法などによる実験が多くなされてきたが、一次元の PSPC 型 X 線検出器では有意な変化を検知できなかった。今回、われわれは、KEK の放射光研究施設にて、2 次元 CCD 型 X 線検出器を用いることにより、高い精度で広角領域のタンパク質の X 線溶液散乱パターンを観測することに成功している。この手法を GroEL-ヌクレオチドの系に適用した。その結果、ATP 存在下で加水分解反応の定常状態にある GroEL の散乱パターンが広角領域で大きく変化していることが明らかとなった。ADP や ATP $\gamma$ S 存在下でも散乱パターンの変化は観測されたが、ATP 存在下で観測された大きな変化は見られなかった。昨年度報告したゲルろ過クロマトグラフィーを用いた実験では、ATP を加水分解している

ときのみ、低濃度 (50 nM 以下) で、GroEL が単一リングに解離する現象が観測されたが、これも ATP 存在下での GroEL の構造変化に由来すると考えられる。

### 7.2.3 新しい高速反応測定法を利用したタンパク質のフォールディング研究

タンパク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タンパク質の例がいくつも明らかとなりつつあり、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。また、ストップフロー X 線散乱の実験では、検出器自身の S/N 比が低いため、より高感度の検出器を用いた研究も必要となっている。われわれは、このような観点から新しい高速反応測定法を利用したタンパク質のフォールディング研究を行っている。

### CCD 型 X 線検出器を用いたストップフロー X 線溶液散乱法による $\alpha$ -ラクトアルブミンのフォールディング反応の解析

(新井、伊野部、中尾、桑島：伊藤博士 (筑波大)、雨宮教授 (東大・新領域)、木原教授 (関西医大) との共同研究)

タンパク質の構造形成機構を理解するためには、フォールディング反応の途中に過渡的に形成される中間体の構造を特徴づけることが必要である。この巻き戻り中間体の分子サイズと形状を直接的に観測するには、シンクロトロン放射光を用いたストップフロー X 線溶液散乱法が有効な方法である。従来の 1 次元 PSPC 型検出器を用いた時分割 X 線散乱実験ではデータの S/N 比が低く、測定が困難であったが、2 次元 CCD 型 X 線検出器を用いて測定を行い、データを円周積分することによって、S/N 比を飛躍的に向上することができるようになった。しかし、昨年度までの実験では、散乱ベクトル  $0.15 \text{ \AA}^{-1}$  以上の広角領域では散乱曲線が歪み、PSPC 型検出器により観測された散乱曲線と一致しない難点があった。今回、CCD 型 X 線検出器で得られたデータに対して画像歪み補正、感度補正、およびコントラスト補正を行うことによって、小角から広角領域にわたって信頼できるデータが得られるようになった。そこで我々はこの方法を用いて、 $\alpha$ -ラクトアルブミン ( $\alpha$ LA) の

巻き戻りに伴うタンパク質分子のコンパクト化の速度過程の測定を行った。その結果、慣性半径の二乗の減少の速度過程は、以前にストップフロー円二色性スペクトル法で求められた速度過程と一致していた。また、巻き戻り初期に形成される中間体の慣性半径は  $17.9 \pm 0.4 \text{ \AA}$  であると見積もられた。この値は、平衡条件下で既に測定されている  $\alpha$ LA のモルテン・グロビュール (MG) 状態の慣性半径 ( $17.2 \pm 0.2 \text{ \AA}$ ) と一致していた。さらに、Kratky plot から、巻き戻り中間体と MG 状態の分子形状が類似していることがわかった。以上のことから、巻き戻り中間体の分子サイズと形状は MG 状態と類似していることが明らかとなり、 $\alpha$ LA のフォールディング反応の初期に MG 状態様の構造が形成されることが裏付けられた。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Koshiba, T. Hayashi, I. Miwako, I. Kumagai, T. Ikura, K. Kawano, K. Nitta, and K. Kuwajima: Expression of a synthetic gene encoding canine milk lysozyme in *Escherichia coli* and characterization of the expressed protein. *Protein Eng.* **12** (1999) 429-435.
- [2] T.P. Terada, and K. Kuwajima: Thermodynamics of nucleotide binding to the chaperonin GroEL studied by isothermal titration calorimetry: evidence for noncooperative nucleotide binding. *Biochim. Biophys. Acta* **1431** (1999) 269-281.
- [3] T. Makio, M. Arai, and K. Kuwajima: Chaperonin-affected refolding of  $\alpha$ -lactalbumin: Effects of nucleotides and the Co-chaperonin GroES. *J. Mol. Biol.* **293** (1999) 125-137.
- [4] T. Koshiba, M. Yao, Y. Kobashigawa, M. Demura, A. Nakagawa, I. Tanaka, K. Kuwajima, and K. Nitta: Structure and thermodynamics of the extraordinarily stable molten globule state of canine milk lysozyme. *Biochemistry* **39** (2000) 3248-3257.
- [5] F. Motojima, T. Makio, K. Aoki, Y. Makino, K. Kuwajima, and M. Yoshida: Hydrophilic residues at the apical domain of GroEL contribute to GroES binding but attenuate polypeptide binding. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **267** (2000) 842-849.
- [6] V. Forge, M. Hoshino, K. Kuwata, M. Arai, K. Kuwajima, C.A. Batt, and Y. Goto: Is folding of  $\beta$ -lactoglobulin non-hierarchical? Intermediate with native-like  $\beta$ -sheet and non-native  $\alpha$ -helix. *J. Mol. Biol.* **296** (2000) 1039-1051.
- [7] M. Arai, P. Hamel, E. Kanaya, K. Inaka, K. Miki, M. Kikuchi, and K. Kuwajima: Effect of an alternative disulfide bond on the structure, stability, and folding of human lysozyme. *Biochemistry* **39** (2000) 3472-3479.
- [8] T. Ikura, T. Hayano, N. Takahashi, and K. Kuwajima: Fast folding of *Escherichia coli* cyclophilin

A: a hypothesis of a unique hydrophobic core with a phenylalanine cluster. *J. Mol. Biol.* **297** (2000) 791-802.

- [9] M. Arai, and K. Kuwajima: Role of the molten globule state in protein folding. *Adv. Protein Chem.* **53** (2000) 209-282.
- [10] Y. Kobashigawa, M. Demura, T. Koshiba, Y. Kumaki, K. Kuwajima, and K. Nitta: Hydrogen exchange study of canine milk lysozyme: Stabilization mechanism of the molten globule. *Proteins* (2000) in press.  
and the Cycle3 mutant. *Biochemistry* (2000) in press.

(会議抄録)

- [11] M. Arai, K. Ito, K. Maki, T. Ikura, T. Inobe, H. Kihara, Y. Amemiya, and K. Kuwajima: Structural analysis of protein folding intermediates by solution X-ray scattering. In *Old and New Views of Protein Folding*, eds. K. Kuwajima & M. Arai (Elsevier Science, Amsterdam, 1999) pp. 31-40.
- [12] K. Kuwajima, M. Arai, M. Mizuguchi, T. Koshiba, and K. Nitta: The folding mechanisms of  $\alpha$ -lactalbumin and  $\text{Ca}^{2+}$ -binding lysozyme. In *Old and New Views of Protein Folding*, eds. K. Kuwajima & M. Arai (Elsevier Science, Amsterdam, 1999) pp. 135-144.
- [13] T. Yoda, M. Saito, M. Arai, K. Horii, K. Tsumoto, M. Matsushima, I. Kumagai, T.K. Chaudhuri, and K. Kuwajima: Kinetic folding reactions and molecular dynamics simulations of  $\alpha$ -lactalbumin. In *Old and New Views of Protein Folding*, eds. K. Kuwajima & M. Arai (Elsevier Science, Amsterdam, 1999) pp. 155-162.
- [14] K. Maki, T. Ikura, A. Mohs, and K. Kuwajima: Equilibrium and kinetics of folding of staphylococcal nuclease and its proline mutants. In *Old and New Views of Protein Folding*, eds. K. Kuwajima & M. Arai (Elsevier Science, Amsterdam, 1999) pp. 271-278.

(国内雑誌)

- [15] 桑島邦博: タンパク質のフォールディングの分子機構、東京大学大学院理学系研究科・理学部 廣報 31 巻 1 号 (1999) 16-17.
- [16] 桑島邦博: シャペロニン: 蛋白質立体構造形成の分子機械、*パリティ* 14 (1999) 78-81.
- [17] 桑島邦博: タンパク質の構造はひとりでに形成される: フォールディング、第 14 回「大学と科学」公開シンポジウム『生物の働きを生み出すタンパク質のかたち』講演収録集、(株)クバプロ、(2000) 印刷中。

(学位論文)

- [18] 依田隆夫: Experimental and simulation studies on folding of goat  $\alpha$ -lactalbumin (博士論文)

- [19] 伊野部智由: Thermodynamic studies of nucleotide binding to the chaperonin GroEL (修士論文)
- [20] 福田宏幸: The folding of green fluorescent protein and its mutant (修士論文)
- (著書)
- [21] K. Kuwajima: Molten globule. In *The Encyclopedia of Molecular Biology*, ed. T.E. Creighton (Wiley, 1999) pp. 1531-1534.
- [22] K. Kuwajima, and M. Arai: The molten globule state—the physical picture and biological significance. In *Mechanisms of protein folding 2nd ed.*, ed. R.H. Pain (Oxford Univ. Press, Oxford, 2000) in press.
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [23] T. Koshihara, Y. Kobashigawa, M. Yao, M. Demura, A. Nakagawa, I. Tanaka, K. Kuwajima and K. Nitta: Structural and thermodynamic responses of a protein with an extraordinary stability of molten globule state, *XIII International Biophysics Congress* (New Delhi, September 19-24, 1999) (Poster).
- 招待講演
- [24] K. Kuwajima: Molecular mechanisms of target recognition by the chaperonin GroEL/ES, *NCBS Symposium on Frontiers in Structural Biology* (Bangalore, India, August 25-27, 1999).
- [25] K. Kuwajima: Folding mechanism of  $\alpha$ -lactalbumin and Ca(II)-binding lysozyme, *Symposium on Protein Structure and Folding* (Bose Institute, Calcutta, India, August 30, 1999).
- [26] K. Kuwajima: Molecular mechanism of the target recognition by *E. coli* chaperonin GroEL/ES, *Japan-China Joint Symposium on Molecular Biophysics "Protein Physics and Hydration Effects"* (14th Japan China Science and Technology Symposium) (Tokyo, November 19-21, 1999).
- (国内会議)
- 一般講演
- [27] 新井宗仁、伊藤和輝、槇互介、伊野部智由、木原裕、雨宮慶幸、桑島邦博: 2次元 CCD 型検出器を用いた時分割 X 線溶液散乱法によるタンパク質のフォールディング反応の解析、蛋白質合同年会 (第 50 回タンパク質構造討論会、第 11 回日本蛋白質学会年会) 横浜 99 (横浜、1999 年 6 月 15 日 - 17 日)
- [28] 堀井克紀、依田隆夫、津本浩平、斎藤稔、松島正明、桑島邦博、熊谷泉: 安定化したヤギ  $\alpha$  - ラクトアルブミン変異体の解析、蛋白質合同年会 (第 50 回タンパク質構造討論会、第 11 回日本蛋白質学会年会) 横浜 99 (横浜、1999 年 6 月 15 日 - 17 日)
- [29] 依田隆夫、斎藤稔、堀井克紀、津本浩平、松島正明、熊谷泉、桑島邦博:  $\alpha$  - ラクトアルブミンの高温分子動力学シミュレーションで観察された立体構造変化、蛋白質合同年会 (第 50 回タンパク質構造討論会、第 11 回日本蛋白質学会年会) 横浜 99 (横浜、1999 年 6 月 15 日 - 17 日)
- [30] 小柴琢己、姚閔、中川敦史、小橋川敬博、田中勲、桑島邦博、新田勝利: カルシウム非結合型イヌミルクリゾチーム (apo 型 CML) の X 線結晶構造解析、蛋白質合同年会 (第 50 回タンパク質構造討論会、第 11 回日本蛋白質学会年会) 横浜 99 (横浜、1999 年 6 月 15 日 - 17 日)
- [31] 新井宗仁、伊藤和輝、槇互介、伊野部智由、木原裕、雨宮慶幸、桑島邦博: 2次元 C C D 型検出器を用いたストップフロー X 線溶液散乱法によるタンパク質のフォールディング反応の解析、日本物理学会 1999 年秋の分科会 (岩手大学、1999 年 9 月 24 日-27 日)
- [32] 斎藤誠、奥村泰志、下村武史、伊藤耕三、早川禮之助、新井宗仁、桑島邦博: 分子ナノチューブと線状高分子の包接ダイナミクス、日本物理学会 1999 年秋の分科会 (岩手大学、1999 年 9 月 24 日-27 日)
- [33] 新井宗仁、伊藤和輝、槇互介、伊野部智由、木原裕、雨宮慶幸、桑島邦博: 時分割 X 線溶液散乱法によるリゾチームのフォールディング反応の研究、日本生物物理学会第 37 回年会 (埼玉県和光市、1999 年 10 月 2 日 - 5 日)
- [34] 依田隆夫、斎藤稔、堀井克紀、津本浩平、松島正明、熊谷泉、桑島邦博: 高温分子動力学によるヤギ  $\alpha$  - ラクトアルブミンのアンフォールディングの構造変化の観察、日本生物物理学会第 37 回年会 (埼玉県和光市、1999 年 10 月 2 日 - 5 日)
- [35] 福田宏幸、新井宗仁、桑島邦博: 緑色蛍光タンパク質 (GFP) のフォールディング、日本生物物理学会第 37 回年会 (埼玉県和光市、1999 年 10 月 2 日 - 5 日)
- [36] 堀井克紀、依田隆夫、津本浩平、斎藤稔、松島正明、桑島邦博、熊谷泉: 安定化したヤギ  $\alpha$  - ラクトアルブミン変異体の解析、日本生物物理学会第 37 回年会 (埼玉県和光市、1999 年 10 月 2 日 - 5 日)
- [37] 槇尾匡、高須悦子、桑島邦博: ATPase 活性を失った GroEL 変異体 (D398A) と  $\alpha$  ラクトアルブミン巻き戻り中間体との相互作用、日本生物物理学会第 37 回年会 (埼玉県和光市、1999 年 10 月 2 日 - 5 日)
- [38] 伊野部智由、寺田智樹、桑島邦博: 大腸菌シャペロニンへの非協同的ヌクレオチド結合、日本生物物理学会第 37 回年会 (埼玉県和光市、1999 年 10 月 2 日 - 5 日)
- [39] 小柴琢己、山本宏子、小橋川敬博、桑島邦博、新田勝利: イヌミルクリゾチームのモルテン・グロビュール状態に関するタンパク質工学的研究、日本生物物理学会第 37 回年会 (埼玉県和光市、1999 年 10 月 2 日 - 5 日)
- [40] 斎藤誠、奥村泰志、下村武史、伊藤耕三、早川禮之助、新井宗仁、桑島邦博: 分子ナノチューブと線状高分子の包接ダイナミクス、高分子学会討論会 (新潟、1999 年 10 月 6 日 - 8 日)

- [41] 桑島邦博：シャペロニンの標的タンパク質認識の分子機構、文部省科学研究費特定領域研究「分子シャペロンによる細胞機能制御」班会議（京都、1999年12月16日 - 17日）
- [42] 新井宗仁、伊藤和輝、伊野部智由、槇互介、中尾正治、木原裕、雨宮慶幸、桑島邦博：2次元 CCD 型検出器を用いたストップフロー X 線溶液散乱法によるタンパク質のフォールディング反応の解析、第 13 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム（岡崎、2000年1月7日-9日）
- [43] 新井宗仁、伊藤和輝、伊野部智由、槇互介、中尾正治、木原裕、雨宮慶幸、桑島邦博：CCD 型 X 線検出器を用いたストップフロー X 線溶液散乱法によるタンパク質のフォールディング反応の研究、日本物理学会 2000 年春の分科会（関西大学、2000年3月22日 - 25日）
- [44] 槇尾匡、高須悦子、桑島邦博：大腸菌シャペロニン GroEL の変異体 D398A と標的蛋白質との相互作用、日本物理学会 2000 年春の分科会（関西大学、2000年3月22日 - 25日）
- [45] 伊野部智由、槇尾匡、寺田智樹、新井宗仁、桑島邦博：シャペロニン GroEL へのヌクレオチド結合の熱力学的研究、日本物理学会 2000 年春の分科会（関西大学、2000年3月22日 - 25日）
- [46] 福田宏幸、新井宗仁、桑島邦博：緑色蛍光蛋白質における熱力学的安定性と生体内での巻き戻り、日本物理学会 2000 年春の分科会（関西大学、2000年3月22日 - 25日）

## 招待講演

- [47] 桑島邦博：タンパク質フォールディングにおけるモルテン・グロビュール状態の役割、第 6 回「タンパク質立体構造の構築原理」ワークショップ（主催：「タンパク質立体構造の構築原理」研究会）（横浜、1999年6月14日）
- [48] 桑島邦博：時分割 X 線溶液散乱による球状タンパク質のフォールディング研究、VSX ビームライン検討会「生命科学・硬 X 線利用研究」（VSX 利用者懇談会主催）（東大工学部、1999年10月22日）
- [49] 新井宗仁：タンパク質フォールディングの実験的研究、大阪大学蛋白質研究所セミナー「タンパク質のフォールディング問題 - その物理学的基礎と生物学的意義」（大阪、1999年11月25日-26日）
- [50] 桑島邦博：タンパク質のフォールディング機構、分子科学研究所共同研究セミナー「物理化学の現状と将来」（第 2 回）（岡崎、1999年12月6日）
- [51] 桑島邦博：「タンパク質の構造はひとりで形成される：フォールディング」、第 14 回「大学と科学」公開シンポジウム『生物の働きを生み出すタンパク質のかたち』（神戸、1999年12月11日 - 12日）
- [52] 新井宗仁：蛋白質フォールディング中間体の構造、第 13 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム（岡崎、2000年1月7日-9日）
- [53] 桑島邦博：シャペロニン機能の分子機構、未来開拓プロジェクト研究会「蛋白質の折り畳み問題における実験と理論」（岡崎、2000年1月10日-12日）

- [54] 新井宗仁：タンパク質のフォールディング中間体の構造、第 182 回基礎科学セミナー・中性子構造生物学ワークショップ「溶液散乱によって開かれる蛋白質構造研究の新しい地平」（東海村、原子力研究所東海研究所、2000年2月9日-10日）

## 7.3 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。脳・神経系は、その構成単位である神経細胞が軸索突起を介して他の神経細胞と連絡し、ネットワークを形成することにより成り立っている。われわれの精神活動もつきつめれば、このネットワークにおける情報の流れととらえることができ、その形成機構を明らかにすることは深遠な学問的興味を提起する。

脳神経系の設計図は基本的に遺伝子にコードされている。発生過程において個々の神経細胞は、遺伝情報にしたがって、特定の経路に沿って軸索を伸ばし、適切な標的細胞とシナプス結合する。したがって、この過程に関わる遺伝子を同定し、それらがコードする蛋白分子の作用機構を解析することにより、神経ネットワーク形成のメカニズムを明らかにできると期待できる。しかしながら、ヒトなどの高等動物を用いた研究においては、神経系の複雑さが解析を困難にしている。また新たな機能分子を同定するための方法論も限られている。そこで当研究室ではショウジョウバエの神経系、特に神経-筋結合系をモデル材料として、神経ネットワーク形成のメカニズムを探っている。当面の目標は、神経ネットワークの素子である1個の神経細胞がどのようにしてその配線のパターンを決定し、シナプスを形成するのかを明らかにすることである。将来的には、そこから得られた知見をもとに、この素子がつながってできる複雑なネットワークがどのように形成され機能するのかという問題にアプローチしたいと願っている。神経発生の基本的なメカニズムは種をこえて保存されていることが最近明らかになってきており、得られた成果は一般性をもつものと期待される。

ショウジョウバエの神経-筋結合系は約30個の運動神経細胞が末梢神経路に沿って軸索を伸ばし30本の筋肉と特異的にシナプス結合することによって成り立っている。この神経結合は胚期に形成され、幼虫期を通じ基本的なパターンは維持される。この系は以下の優れた特徴から、神経ネットワーク研究のモデルとして注目されている。1. 個々の運動神経細胞が識別可能で、それらが軸索を伸ばし、シナプスを形成する過程を追跡することができる。2. 発達した遺伝学を利用し、分子の生体における機能を調べたり、新たな機能分子を見つけ出すことが可能である。当研究室では、この系を利用し、生物物理学的、分子生物学的手法を駆使した以下の研究を展開している。

### 7.3.1 神経配線形成の分子機構

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出すのだろうか。最近の研究によって、軸索経路や標的細胞に存在する特異分子(軸索ガイド分子)が神経の正確な配線形成に関与していることが分かってきた。われわれは遺伝学的手法を用い、ショウジョウバエ神経系形成過程に関わる軸索ガイド分子を多数同定し、その機能を調べるこ

とにより、神経配線形成の分子機構を探っている。これまでにエンハンサー・トラップ法を用い、神経-筋標的認識に関わる分子、コネクチン、カプリシャスを同定することに成功している。本年度はこれら分子の機能に関するより詳細な解析を進めるとともに、さらに新たな軸索ガイド分子を同定するための試みとして異所発現トラップ法を用いた新規軸索ガイド分子の探索を行った。

カプリシャスの細胞内ドメインの役割の検討(谷口弘樹(基生研)、能瀬聡直)

カプリシャスは leucine-rich repeat とよばれる繰り返し構造を細胞外にもつ膜貫通型蛋白質で、特定の運動神経細胞とその標的筋肉の表面において発現している。これまでに我々は、この遺伝子を壊したり、本来発現しない筋肉において強制発現する実験により、カプリシャスが特定の運動神経と筋肉間の結合に関わる軸索ガイド分子として働くことを示した。カプリシャスを介した神経筋特異認識が起る際、その情報はいかにして細胞内に伝えられるのか。この問いに答えるための第一歩として、細胞内ドメインの役割を以下の実験により検討した。

カプリシャスは RP5 神経細胞とその標的である筋肉 12 において発現している。これに対し隣の筋肉 13 においては発現しない。遺伝子操作により、筋肉 13 において人工的にカプリシャスタンパク質を発現させると、多くの RP5 神経が、軸索を枝分かれさせ、本来結合しないはずの筋肉 13 へも結びつくようになる。この系を利用し、細胞内ドメインを欠失したカプリシャス分子を筋肉 13 において発現させ、その活性を調べることににより、細胞内ドメインの役割を検討した。その結果、細胞内を欠失したカプリシャスを筋肉 13 に発現しても、RP5 神経による異所的なシナプスの形成を全く誘導しないことが分かった。このことは、カプリシャスが筋肉において標的認識分子として働くためには、細胞内ドメインの機能が必須であることを示している。本結果は標的細胞における細胞内情報伝達が特異的シナプス形成過程において重要な役割を果たしていることを示唆しており興味深い。

カプリシャスと結合する分子の同定(新座麻記子、宍戸恵美子(基生研)、能瀬聡直)

カプリシャスを介した細胞内情報伝達の機構を明らかにするため、カプリシャス細胞内ドメインと結合する分子の存在を検討した。このため培養細胞 S2 にカプリシャス cDNA を導入し、強制発現させる系をまず確立した。次に、カプリシャスを大量に発現させた S2 細胞より分子間の相互結合を損なわない形で蛋白質を分離し、カプリシャスに対する抗体で沈降させる(免疫共沈法)ことにより、カプリシャス蛋白質と結合する分子を単離できないかを検討した。単離した共沈物を SDS ゲル電気泳動により分離したところ、約 40 kd の蛋白質が、カプリシャスを

発現する S2 細胞において特異的に検出された。この分子はカプリシャス結合分子の良い候補であり、さらに精製、同定を試みている。

カプリシャスの下流因子の遺伝学的解析（新座麻記子、能瀬聡直）

既知のシグナル伝達関連分子について、カプリシャスの下流において働く可能性を検討した。上述のようにカプリシャスを本来発現しない筋肉 13 において発現すると、運動神経 RP5 による異所的シナプス形成を誘導する。もしある遺伝子がこの過程においてカプリシャスの下流において働いたら、その分子の機能を低下させたり活性化することが、カプリシャスによる異所的シナプスの誘導の頻度に影響をあたえるはずである。そこで既知のシグナル系に関わる分子、カルモジュリンキナーゼ、C キナーゼ（カルシウム系）、A キナーゼ（cAMP 系）、低分子量 G 蛋白質 Dcdc42、Drac1、D rhoA（細胞骨格制御系）、D-raf、ras1（MAP キナーゼ系）について、構成的活性化型（constitutive active）および阻害型（dominant negative）の作用を検討した。その結果、Dcdc42、A キナーゼの構成的活性化型をカプリシャスと同時に発現するとカプリシャスによる異所的シナプスの誘導頻度を増加させること、逆にこれら分子の阻害型を発現すると、異所的シナプスの誘導頻度が減少することが明らかとなった。このことは、これら分子を介したシグナル伝達系がカプリシャスの下流で働いていることを強く示唆している。

特異的シナプス形成過程におけるカプリシャス分子の挙動の可視化（高坂洋史（4 年生特別実験）、能瀬聡直）

特異的シナプス誘導過程におけるカプリシャス分子の挙動を詳細に解析することを目的として、クラゲの蛍光蛋白質である GFP とカプリシャスとの融合蛋白質を発現する cDNA をデザインした。今後、作製した cDNA をショウジョウバエ個体へに導入し、特定の筋肉において発現することにより、生きた胚においてカプリシャス分子の挙動を可視化することを試みる予定である。

異所発現トラップ法を用いた新規軸索ガイド分子の探索：幼虫におけるスクリーニング（梅宮猛、高須悦子、相垣敏郎博士（都立大）、能瀬聡直）

異所発現トラップ法は最近開発された実験手法で、未知の遺伝子を本来発現しない組織や細胞で異所発現させ、その効果を調べることにより、新たな機能分子を見つけ出す遺伝学的スクリーニングである。その原理は以下の通りである。酵母由来の転写因子 GAL4 はショウジョウバエにおいても標的配列 UAS

に結合し下流遺伝子の転写を活性化する。異所発現トラップ法では、トランスポゾン P 因子を用い UAS 配列をゲノムの様々な遺伝子領域に挿入した“標的株”を多数作製し、GAL4 を特定のパターンで発現する“パターン株”に掛け合わせることにより、“標的”近傍遺伝子の異所発現を誘導する。我々はこの手法を用いゲノム中の多数の遺伝子を筋肉全体や神経全体において強制発現させ、その神経配線形成への影響を調べることにより、新たな軸索ガイド分子を単離できないかと考えた。このためまずパターン株として 24B-GAL4 を用い、標的株約 500 系統とを掛け合わせることにより、近傍遺伝子の筋肉全体における異所発現を誘導し、幼虫における運動神経の配線のパターンを調べた。その結果、7 つの系統について神経の走行に特異的な異常が観察された。これらについて、近傍の原因遺伝子のクローニング、RNA in situ 法による原因遺伝子の組織分布の解析等を行った。その結果、2 系統（1085、1092）の原因遺伝子が神経系内の特定の細胞で発現する新規遺伝子であることが分かった。（本研究は異所発現トラップ法を開発した都立大・相垣敏郎博士との共同研究である。）

1092 系統の解析：軸索誘導に関わる新規の膜蛋白質の同定（梅宮猛、鳥居宏在（4 年生特別実験）、高須悦子、能瀬聡直）

上記スクリーニングで単離された 1092 系統の原因遺伝子について、さらに詳細な解析を進めた。本遺伝子を筋肉全体において発現すると筋肉 12 を支配するはずの運動神経が近傍の筋肉 13 にもシナプスを形成するという上述のカプリシャスとよく似た表現系を示す。またその転写産物は中枢神経内の一部の細胞において特異的に発現していた。その分子構造を明らかにするため、全長の cDNA を単離し、塩基配列を決定した。その結果、1092 遺伝子は新規の膜タンパク質をコードすることが判明した。また、この分子の機能をより詳細に調べるため機能欠失体の作製を行った。鳥居は 1092 蛋白質分子に対する抗体を作製するために、大腸菌において 1092 蛋白質を大量に発現させる実験を試みた。

異所発現トラップ法を用いた新規軸索ガイド分子の探索：胚におけるスクリーニング（高須悦子、梅宮猛、田中宏昌、鈴木隆敏（4 年生特別実験）、本田元就（4 年生特別実験）、相垣敏郎博士（都立大）、能瀬聡直）

さらに多くの系統について、同様のスクリーニングを胚で行った。胚においては幼虫のように神経走行の細かいパターンまでは解析できないが、大量の系統を比較的容易に観察することができるという長所を持つ。2000 系統について神経全体および筋肉全体における異所発現を誘導するスクリーニング

を行った結果、神経結合のパターンに特異的な変化を起こす系統が約30単離された。これらについて原因遺伝子をRT-PCR法により回収し末端DNA配列を決定した。その結果多くの系統が既知遺伝子への挿入であることが分かった。鈴木、本田は、新規遺伝子への挿入であると考えられたいくつかの系統について、神経全体あるいは特定の領域での異所発現の効果を詳細に解析した。

#### G6系統の解析（田中宏昌、高須悦子、能瀬聡直）

上記の胚におけるスクリーニングで得られたG6系統について詳細な解析を進めた。本系統を筋肉において強制発現させると一部の運動神経の軸索走行に異常が生じた。また中枢神経内のすべての細胞、あるいは一部の細胞において発現した際にも、特定の軸索の走行パターンに異常を生じた。原因遺伝子の候補をクローニングし、発現パターンを調べたところ神経系の多くの細胞における発現が見られた。原因遺伝子の構造を決定するため、cDNAを単離しシークエンスを行った。その結果、この遺伝子はformin homology (FH) とよばれるドメインをもつ新規蛋白質をコードすることが判明した。FHドメインをもつ多くの蛋白質は細胞骨格系を制御することにより、細胞分裂、細胞極性の形成、形態形成等の過程に関与することが知られている。軸索誘導に関わるガイド分子は細胞骨格に情報を伝えることにより、軸索伸長のパターンを制御すると考えられており、本分子がこの過程において重要な役割を果たしている可能性が示唆された。

### 7.3.2 シナプス形成の分子機構

シナプスは神経細胞が他の神経細胞や筋肉と接合、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。このため生物物理学的、光学的、電気生理学的諸技術を用い、シナプスの形成過程を容易に解析できる方法を開発している。さらに、開発した方法と遺伝学的手法を組み合わせることにより、シナプス形成に関わる遺伝子を網羅的に探索することを計画している。

トランスニューロナルマーカーWGAを用いたシナプス形成過程の測定方法の確立（谷藤（森本）高子、徳本貴久、吉原良浩博士（理研）、岡野栄之博士（阪大）、能瀬聡直）

小麦胚芽レクチン（WGA）は、シナプスを介して特異的に一方から他方へと移ることが報告されてい

る蛋白質である。この、シナプス間の移動は、神経細胞の活動の大きさに依存して起こることが示唆されている。我々はショウジョウバエの筋肉細胞においてWGAを発現させると、前シナプスの運動神経細胞へとWGAが移動することを見だし、このWGAのシナプスを介した移動が、シナプス形成が正しく起こっているかどうかの指標として使えるのではないかと考えた。

これまでWGAの検出は、抗WGA抗体を用いた免疫染色法により行なっていたが、大規模なスクリーニングには効率的でないので、本年度はクラゲの蛍光蛋白質であるGFPとWGAを融合させた蛋白質を筋肉で発現するようなショウジョウバエを作成し、GFP-WGA融合蛋白質がWGAと同様に、筋肉細胞から神経細胞へと移動するかについて検討した。その結果、GFPはWGAとの融合蛋白質として安定であり、WGAの局在を反映することが確認できた。この方法を利用し、WGAの移動に異常がある（すなわちシナプスの機能に異常がある）変異体を容易にスクリーニング可能になると期待される。本手法の有効性をさらに検討するため、シナプス形成に異常のある突然変異体におけるGFP-WGA融合蛋白質のシナプスを介した移動を現在解析中である。

WGAを用いた運動神経回路の同定（徳本貴久、谷藤（森本）高子、能瀬聡直）

運動神経細胞と筋肉間のシナプス形成時に働く標的認識機構については、上で述べたように次第に明らかになってきたが、運動神経の上位の介在神経についてはその同定すらされていない。将来的にこの系を用い神経回路レベルでの研究を行うためには、まず関わる神経細胞を同定し、その神経結合のパターンを調べるのが必須である。WGAの移動はシナプスを介して起こるため、筋肉細胞にWGAを発現させると、その筋肉細胞を支配する運動神経、さらにその上位の介在神経にまで、WGAが移動する可能性が考えられる。そこで、この方法を用いて運動神経を支配する介在神経を同定し、運動神経・介在神経間でのシナプス形成の分子機構を解明することを目的とする研究を開始した。本年度は少数の筋肉で発現するGAL4株やflipaseを介したクローン形成法などを用い特定の筋肉においてWGAを発現することを試みた。

電気生理学的解析方法の確立（谷藤（森本）高子、能瀬聡直）

シナプスの機能を調べる上で、シナプス伝達の応答の大きさを直接電氣的に測定することが不可欠である。我々は、得られた突然変異体で、さらに詳しい電気生理学的解析を行なうために、パッチクランプ法による筋肉細胞からの後シナプス電流を測定する系の確立を行なった。さらに、この手法を用いて、標的細胞（筋肉細胞）による逆行性のシナプス伝達調節機構を明らかにすることを目的とした研究を開

始した。このようなシナプス伝達を調節する逆行性因子は成熟したシナプスを形成するために働いていると考えられている。本年度は、ある特定の筋肉細胞に活性化型カルモジュリン・キナーゼを発現させたショウジョウバエの神経・筋シナプスを用いて、筋肉細胞内の情報伝達機構を変化させた時のシナプス伝達に対する影響を調べた。すると、活性化型カルモジュリン・キナーゼを発現させた筋肉細胞では自発的シナプス応答の増加が見られた。引き続き、更に詳しい影響について検討している。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Feinstein, Y., Borrell, V., Garcia, C., Burstyn-Cohen, T., Tzarfaty, V., Frumkin, A., Nose, A., Okamoto, H., Higashijima, S., Soriano, E & Klar, A.: F-spondin and mindin: two structurally and functionally related genes expressed in the hippocampus that promote outgrowth of embryonic hippocampal neurons. *Development* 126, 3637-3648 (1999).
- [2] Taniguchi, H., Shishido, E., Takeichi, M. & Nose, A.: Functional dissection of *Drosophila* Capricious: its novel roles in neuronal pathfinding and selective synapse formation. *J. Neurobiol.* 42, 104-116 (2000).
- [3] Tabuchi, K., Sawamoto, K., Suzuki, E., Ozaki, K., Sone, M., Hama, H., Tanifuji-Morimoto, T., Yuasa, Y., Yoshihara, Y., Nose, A. & Okano, H.: The GAL4/UAS-WGA system as a powerful tool for tracing *Drosophila* transsynaptic neuronal pathways. *J. Neurosci. Res.* 59, 94-99 (2000).

(国内雑誌)

- [4] 能瀬聡直: 神経発生の共通プラン: ショウジョウバエ・脊椎動物間の分子レベルでの保存性 *実験医学* 17, 2046-2051 (1999).
- [5] 谷口弘樹、能瀬聡直: ショウジョウバエを用いた特異的神経認識の分子遺伝学 *蛋白質・核酸・酵素* 45, 286-293 (2000).

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [6] Umemiya, T., Takasu, E., Takeichi, M. and Nose, A.: A novel transmembrane protein whose ectopic expression in muscles alters neuromuscular specificity, identified by misexpression screening. 1999 meeting on "Neurobiology of *Drosophila*" (Cold Spring Harbor, U.S.A., October 6-10, 1999).

(国内会議)

一般講演

- [7] 能瀬聡直: ショウジョウバエ神経筋特異結合の分子遺伝学的解析、第22回日本神経科学大会、シンポジウム (大阪、1999年7月)
- [8] 森本(谷藤)高子、徳本貴久、田淵克彦、岡野宏之、吉原良浩、能瀬聡直: WGAトランスジーンを用いたショウジョウバエ神経筋接合部におけるシナプス形成機構の解析、日本ショウジョウバエ研究集会第4回研究集会(名古屋、1999年8月)
- [9] 梅宮猛、高須悦子、田中宏昌、竹市雅俊、相垣敏郎、能瀬聡直: 異所発現トラップ法を用いた神経結合特異性に関わる新規遺伝子の探索、日本ショウジョウバエ研究集会第4回研究集会(名古屋、1999年8月)

招待講演

- [10] A. Nose: Molecular genetics of neuromuscular development in *Drosophila*. 文部省特定領域研究B「脳のパターン形成」公開シンポジウム"Brain Pattern Formation" (仙台、1999年11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

1999年4月から2000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        | 50件  |
| 2. 設計及び部品等の問い合わせ | 97件  |
| 3. 外注発注          | 134件 |
| 4. 他教室の問い合わせ     | 3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14日から7月9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、タツプ、ダイス、の使い方
  4. 材質による刃物の使用方法
  5. 旋盤、フライス盤、ボール盤の使用方法

## II

# Summary of group activities in 1999



# 1 Theoretical Nuclear Physics Group

**Subjects:** Stochastic approach to many-body problems, Structure and reactions of unstable nuclei, Interacting Boson Model (IBM)  
Relativistic Many-Body Approach, Models of Hadrons and Hadron-Hadron Interactions

**Member:** Takaharu Otsuka, Wolfgang Bentz, and Takahiro Mizusaki

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 Intermediate Energy Physics.

## Nuclear Structure Physics

Among various subjects of the Nuclear Structure Physics, we have studied mostly, during the past one year, (1) Monte Carlo approach to many-body problems, (2) Structure and reaction of unstable nuclei, (3) Interacting Boson Model (IBM).

(1) 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* [1]. 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.

(2) 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 above [2]. We are also developing a new theoretical framework for describing unstable nuclei in terms of many Slater determinants (with proper projections) composed of Gaussian single particle bases.

(3) Our group has been one of the major research groups on the algebraic approach to the nuclear structure. In recent years, major efforts have been made in the study of the so-called Q-phonon structure in various situations including supersymmetric systems and proton-neutron mixed-symmetry states, etc. This study contributed to the first measurement of electromagnetic transition between mixed-symmetry  $2^+$  states [3].

In addition, an application of nuclear structure calculation has recently been carried out successfully for the study of fractional quantum Hall effect [4].

## Intermediate Energy Physics

The field of intermediate energy physics covers (a) a broad range of nuclear phenomena outside of conventional nuclear structure and low energy nuclear reaction physics, like matter at high temperatures and densities and high energy nuclear reactions, (b) internal structure of hadrons and microscopic description of hadron-hadron interactions, and (c) fundamental problems in field theory. After Professor Yazaki has left in March, 1999, studies have been continued.

< References >

[1] T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Honma: Monte Carlo shell model calculations, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **25**, 699-715 (1999).

[2] Y. Utsuno, T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Honma: Varying shell gap and deformation in  $N \sim 20$  unstable nuclei studied by the Monte Carlo shell model, Phys. Rev. **C60**, 011304-1 - 011304-5 (1999).

[3] N. Pietralla, C. Fransen, D. Belic, P. von Brentano, C. Friessner, U. Kneissl, A. Linnermann, A. Nord, H.H. Pitz, T. Otsuka, I. Schneider, V. Werner, I. Wiedenhoever, Transition Rates between Mixed Symmetry States: First Measurement in  $^{94}\text{Mo}$ , Phys. Rev. Lett. **83**, 1303 (1999).

[4] M. Onoda, T. Mizusaki, T. Otsuka, and H. Aoki, Excitation spectrum and effective mass of the even-fraction quantum Hall liquid, Phys. Rev. Lett. **84**, 3942-3945 (2000).

## 2 Theoretical Particle and High Energy Physics Group

**Research Subjects:** The Unification of Elementary Particles and Fundamental Interactions

**Member:** Kazuo Fujikawa, Tohru Eguchi, Tsutomu Yanagida, Yutaka Matsuo, Atsushi Yamada, Ken-Ichi Izawa, Yuji Sugawara, Teruhiko Kawano

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. Superstring Theory.
  - 1.1 Brane Dynamics and Matrix Theory [1]–[3]
  - 1.2 Non-BRS States and Tachyon Condensation [4, 5]
  - 1.3 Noncommutative Geometry [6]–[10]
  - 1.4 *AdS/CFT* Correspondence [11]–[14]
  - 1.5 Calabi-Yau Manifolds [15]–[17]
2. Quantum Gravity [18]
3. High Energy Phenomenology
  - 2.1 Phenomenology of Supersymmetric Models [19]–[22]
  - 2.2 Particle Cosmology [23]–[31]
  - 2.3 Lepton Flavor Physics [32, 33]
4. Quantum Field Theory
  - 3.1  $\mathcal{N} = 2$  Supersymmetric Gauge Theory [34]
  - 3.2 Lattice Gauge Theory [35]–[37]
  - 3.3 The Others [38]–[40]

## References

- [1] K. Hosomichi, “On Branes Ending on Branes in Supergravity”, hep-th/0002069 .
- [2] Y. Shibusa: “11-dimensional curved backgrounds for supermembrane in superspace”, hep-th/9905071
- [3] Y. Shibusa: “A configuration of 11-dimensional curved superspace as backgrounds for supermembrane”, Mod.Phys.Lett. A14 (1999) 2767-2782
- [4] Y. Matsuo: “Fate of unoriented bosonic string after tachyon condensation”, UT-838, hep-th/9905044.
- [5] T.Takayanagi: “String Creation and Monodromy from Fractional D-branes on ALE spaces”, JHEP **0002**(2000)040.
- [6] S. Terashima: “U(1) instanton in Born-Infeld action and noncommutative gauge theory,” Phys. Lett. **B477** (2000) 292

- [7] S. Terashima: “On the equivalence between noncommutative and ordinary gauge theories,” JHEP **02** (2000) 029
- [8] S. Terashima: “A note on superfields and noncommutative geometry,” hep-th/0002119.
- [9] Y. Okawa and S. Terashima: “Constraints on effective Lagrangian of D-branes from non-commutative gauge theory,” hep-th/0002194.
- [10] T. Kawano and T. Takahashi: “Open String Field Theory On Noncommutative Space,” UT-870, hep-th/9912274.
- [11] “Multi-Strings on  $AdS_3 \times S^3$  from Matrix String Theory”, K. Hosomichi and Y. Sugawara: JHEP 9907(1999)027
- [12] “ $N = (0, 4)$  Quiver  $SCFT_2$  and Supergravity on  $AdS_3 \times S^2$ ”, Y. Sugawara: JHEP 9906(1999)035
- [13] “Topological String on  $AdS_3 \times \mathcal{N}$ ”, Y. Sugawara: UT-859, hep-th/9909146, to be published in Nucl. Phys. B
- [14] T. Kawano and K. Okuyama: “Spinor Exchange In  $AdS_{D+1}$ ,” Nucl.Phys. **B565**, 427 (1999), hep-th/9905130.
- [15] T. Eguchi and M. Jinzenji: “Generalization of Calabi-Yau/Landau-Ginzburg Correspondence”, **JHEP 02** (2000) 028, hep-th/9911220.
- [16] T. Eguchi and Y. Sugawara: “Modular Invariance in Superstring on Calabi-Yau  $n$ -fold with  $A - D - E$  Singularity”, UT-875, hep-th/0002100 to be published in Nucl. Phys. B
- [17] M. Naka and M. Nozaki: “Boundary states in Gepner models”, hep-th/0001037.
- [18] H. Terashima: “Entanglement Entropy of the Black Hole Horizon”, Phys. Rev. **D61** (2000) 104016.
- [19] K.I. Izawa, Y. Nomura and T. Yanagida: “Cosmological Constants as Messenger between Branes”, Prog. Theor. Phys. **102** (1999) 1181.
- [20] J. Hisano, K. Kurosawa and Y. Nomura: “Natural Effective Supersymmetry”, hep-ph/0002286.
- [21] K.I. Izawa, K. Kurosawa, Y. Nomura and T. Yanagida: “Grand Unification Scale Generation through the Anomalous U(1) Breaking”, Phys. Rev. **D60** (1999) 115016.
- [22] K. Kurosawa, Y. Nomura and K. Suzuki: “A Relation on Gaugino Masses in a Supersymmetric  $SO(10)_{GUT} \times SO(6)_H$  Unified Model”, Phys. Rev. **D60** (1999) 117701.
- [23] T. Asaka, K. Hamaguchi, M. Kawasaki and T. Yanagida: “Leptogenesis in inflaton decay”, Phys. Lett. **B464**, 12 (1999) hep-ph/9906366.
- [24] T. Asaka, K. Hamaguchi, M. Kawasaki and T. Yanagida: “Leptogenesis in inflationary universe,” Phys. Rev. **D61**, 083512 (2000) hep-ph/9907559.
- [25] T. Asaka, M. Kawasaki and T. Yanagida: “Superheavy dark matter and thermal inflation”, Phys. Rev. **D60**, 103518 (1999) hep-ph/9904438.
- [26] T. Asaka and M. Kawasaki: “Cosmological moduli problem and thermal inflation models”, Phys. Rev. **D60**, 123509 (1999) hep-ph/9905467.
- [27] T. Asaka, M. Kawasaki and M. Yamaguchi: “Initial condition for new inflation in supergravity”, Phys. Rev. **D61**, 027303 (2000) hep-ph/9906365e.
- [28] K.-I. Izawa and T. Yanagida: “Dynamical Inflation and Vacuum Selection”, Prog. Theor. Phys. 103 (2000).
- [29] T. Kanazawa, M. Kawasaki, N. Sugiyama and T. Yanagida: “Double Inflation in Supergravity”, Phys. Rev. **D61** (2000) 023517.
- [30] T. Kanazawa, M. Kawasaki, and T. Yanagida: “Double Inflation in Supergravity and the Primordial Black Hole Formation”, hep-ph/0002236.
- [31] Y. Nomura, T. Watari and T. Yanagida, “Mass generation for an ultralight axion,” Phys. Rev. **D61**, 105007 (2000) hep-ph/9911324.
- [32] M. Tanimoto, T. Watari and T. Yanagida, “Democratic mass matrices from broken  $O(3)(L) \times O(3)(R)$  flavor symmetry,” Phys. Lett. **B461**, 345 (1999) hep-ph/9904338.
- [33] M. Koike and J. Sato : “Effects of Matter Density Fluctuation in Long Baseline Neutrino Oscillation Experiments”, Mod. Phys. Lett. A14:1297-1302, 1999.
- [34] J. Hashiba and S. Terashima: “Geometry and  $N = 2$  Exceptional Gauge Theories”, JHEP **9909** (1999) 020.
- [35] K. Fujikawa: “A continuum limit of the chiral Jacobian in lattice gauge theory”, Nucl.Phys. B546 (1999)480-494.
- [36] K. Fujikawa: “Relation  $\text{Tr}\gamma_5 = 0$  and the index theorem in lattice gauge theory”, Phys. Rev. **D60** (1999) 074505.

- [37] M. Ishibashi, Y. Kikukawa, T. Noguchi and A. Yamada: “One-loop analyses of lattice QCD with the overlap Dirac operator”, hep-lat/9911037.(to appear Nucl. Phys. B)
- [38] K. Fujikawa and H. Terashima: hNote on the gauge fixing in gauge theory”, Nucl. Phys. B (in press). hep-th/9912253.
- [39] K. Ogure and J. Sato : “Critical Exponents of the O(N) Scalar Model at Temperatures below the Critical Value using the Auxiliary Mass Method”, Prog. Theor. Phys. 102:209-213, 1999.
- [40] K.-I.Izawa: “On Nonlinear Gauge Theory from a Deformation Theory Perspective”, Prog. Theor. Phys. 103 (2000) 225-228.

### 3 Ishihara Group

**Research Subjects:** Structures and Reactions of Extremely Neutron-rich Nuclei, and Nuclear Reactions Related with Astrophysical Phenomena

**Member:** Masayasu Ishihara, Nori Aoi

Current Activities of our laboratory are concerned with a particular domain of experimental nuclear physics, i.e., the field brought out by the advent of the radioactive nuclear beams. The recent development of the radioactive beam has opened an access to a drastically enlarged range of nuclear species and to nuclear reactions involving such radioactive isotopes. Our research programs are coordinated to exploit these new opportunities and are directed to subjects related to unique properties of nuclear structures and reactions of extremely neutron-rich nuclei, such as neutron halos and skins. The nuclear reaction rates concerning the stellar nuclear synthesis are also studied as our chief subject.

The experiments are mainly performed using the radioactive beam facility RIPS (RIKEN Projectile-fragment Separator) installed at RIKEN. This facility has been developed earlier by our group to yield projectile-fragment beams with strong intensities. Part of the experiments on nuclear astrophysics are carried out using SF cyclotron and magnetic spectrograph at CNS (Center for Nuclear Study, University of Tokyo). This year our program has covered the following subjects:

1. Detailed study of Coulomb dissociation mechanism of neutron halo nucleus  $^{11}\text{Be}$ .
2. Proton inelastic scattering and Coulomb excitation of  $^{10,12}\text{Be}$  and disappearance of the  $N = 8$  shell gap at  $^{12}\text{Be}$ .
3. Gamma-ray spectroscopy of  $^{32,34}\text{Mg}$  via RI beam fragmentation.
4. Coulomb excitation of  $^{32,34}\text{Mg}$  and disappearance of the  $N = 20$  shell structure at  $^{32}\text{Mg}$ .
5. Systematic study of fragment-momentum distributions in projectile fragmentation reactions of  $^{40}\text{Ar}$  at intermediate energies.
6. Systematic study of sub-barrier fusion reactions of neutron-skin nuclei  $^{6,8}\text{He}$ .
7. Coulomb dissociation of  $^8\text{B}$  to study the solar nuclear reactions concerning the so-called solar neutrino problem.
8.  $^7\text{Be}(d,n)^8\text{B}$  reaction to deduce the solar nuclear reaction  $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$  through ANC (Asymptotic Normalization Constant) of  $^8\text{B}$ .

## 4 Sakai (Hideyuki) Group

**Research Subjects:** Experimental Nuclear Physics

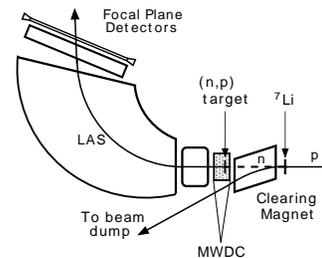
**Member:** Hideyuki Sakai, Atsushi Tamii

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 “polarizations”: polarized proton and deuteron beams ( $\vec{p}$  and  $\vec{d}$ ), polarized  $^3\text{He}$  target ( $^3\vec{\text{He}}$ ), and polarization analysis of reaction products ( $\vec{p}$ ,  $\vec{n}$  and  $\vec{d}$ ).

In this year, we have constructed a polarized neutron beam facility. Two experiments are scheduled: investigation of Gamow-Teller (GT) strengths in the  $(n, p)$  channel and study of three-nucleon force by measuring the  $n$ - $d$  elastic scattering.

Major activities of this year are summarized below.

1. A new neutron beam facility has been constructed at the research center for nuclear physics (see the figure). A polarized neutron beam is produced by the  $^7\text{Li}(p, n)$  reaction. The  $(n, p)$  reaction point is detected by the MWDC, and the emitted protons are momentum analyzed by the large acceptance spectrometer (LAS). A commissioning run is performed by measuring the  $n$ - $p$  scattering. The obtained energy resolution was 2.5 MeV, which is determined by the energy loss in the target. We have confirmed that the measured absolute cross section is consistent with the known value. In the next year, measurements of  $(n, p)$  reaction and  $n$ - $d$  elastic scattering are scheduled. For the latter measurement, deuterized polyethylene targets, with thicknesses of 0.3–4.0 mm and a uniformity of  $\pm 20 \mu\text{m}$ , were produced.
2. How the effect of three-nucleon force appears in nuclear reactions is one of interesting subjects in nuclear physics. We have measured the  $d$ - $p$  elastic scattering with high precision at 270 MeV for various observables: differential cross sections, deuteron analyzing powers, induced proton polarization, and deuteron to proton polarization transfer coefficients. A clear signature of three-nucleon force is obtained. Faddeev calculation without three-nucleon force underestimates the measured cross sections by 30% in the region where the cross section becomes minimum. This discrepancy is almost perfectly explained by introducing three-nucleon force. However, there still remains discrepancies in the other spin observables indicating some ambiguities in the spin-dependent part of the three-nucleon force.
3. The  $^{11}\text{Be}$  nucleus is considered to have a structure called neutron-halo. Theoretical calculations predict an increase of the transition strength and a low energy shift of excitation energy distribution for spin-flip dipole (SFD) resonances due to effect of the neutron halo. The  $^{11}\text{B}(d, ^2\text{He})^{11}\text{Be}$  reaction has been measured at  $E_d=270$  MeV using the spectrometer SMART at RIKEN and the SFD strengths are extracted. The low energy shift was confirmed. The calculation with the halo effect better describes the transition strengths although it still underestimates the data.
4. The resonances at 7 MeV on  $^{12}\text{N}$  and  $^{12}\text{B}$ , which are mirror nuclei, were assigned as the  $1^-$  component of spin-flip dipole resonance (SDR). Recently it has been reported from the measurement of the  $^{12}\text{C}(d, ^2\text{He})$  reaction that the strength on  $^{12}\text{B}$  mainly consists of the  $2^-$  component. A  $^{12}\text{C}(^{13}\text{C}, ^{13}\text{N})$  measurement supports the  $1^-$  assignment. We have measured a complete set of polarization transfer coefficients in the  $^{12}\text{C}(p, n)^{12}\text{N}$  reaction at 300 MeV. The resonances are decomposed under the plane wave impulse approximation as  $1^-$  GDR (8%),  $1^-$  SDR (17%), and  $2^-$  SDR (75%). We conclude that the 7 MeV resonance on  $^{12}\text{N}$  consists mainly of the  $2^-$  component of the SDR.
5. The spin-dependent term of the  $^3\text{He}$ - $n$  interaction was studied by measuring the spin-flip probability of the  $^{26}\text{Mg}(^3\text{He}, t)^{26}\text{Al}(1^+)$  reaction applying the Bohr theorem. The data are not reproduced by a calculation with distorted wave Born approximation using phenomenological  $^3\text{He}$ - $n$  potential. The reason of the discrepancy is considered to be in the description of the  $^3\text{He}$ - $n$  potential and in the treatment of  $^3\text{He}$  and  $t$  as a point-like nucleus.



## 5 Hayano Group

### Research Subjects:

- (1) Laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms.
- (2) ASACUSA project (Atomic Spectroscopy and Collisions Using Slow Antiprotons) at CERN.
- (3) Study of deeply bound pionic atoms in  $^{207}\text{Pb}$  and  $^{205}\text{Pb}$  nuclei at GSI.
- (4) Gamma-ray spectroscopy of  $\Lambda$ -hypernuclei.
- (5) Search for quark-gluon plasma with the PHENIX detector using the RHIC facility at BNL.

**Member:** Ryugo S. Hayano, Takashi Ishikawa, Eberhard Widmann, Hansjörg Gilg, Nobuhiro Yamanaka and Makoto Fujiwara

The subjects of our research activity are summarized in the list given above.

As a main subject we study basic properties of elementary particles, nuclei and atoms experimentally by producing so-called exotic atoms (antiprotonic atoms, pionic atoms etc.) and hypernuclei (nuclei containing strange baryons ;  $\Lambda, \Sigma$  etc.). We also participate in an international collaboration –PHENIX project– at Brookhaven National Laboratory in USA which uses the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC).

The ASACUSA project is an international collaboration aiming at high precision spectroscopy of exotic atoms containing antiprotons (antiprotonic helium atom –three body system consisting of an antiproton, an electron and an alpha particle–, the protonium –bound state of an antiproton and a proton– and so on). For this and other two projects which aim at the spectroscopy of antihydrogen (bound state of an antiproton and a positron), a new facility AD (Antiproton Decelerator) was constructed at CERN.

In December 1999, the AD succeeded to produce slow antiprotons for a few days after three years of preparation. In spite of the poor beam quality, we could immediately observe the 597.259 nm laser resonance line in antiprotonic helium atom clearly with our newly constructed detection system. This resonance was discovered in 1993 by using the LEAR facility at CERN. After LEAR was shutdown in the end of 1996, there was no available machine to utilize slow antiprotons.

From systematic analysis of data on the antiprotonic helium atoms obtained previously at the LEAR facility, the population distribution as a function of binding energy and angular momentum was studied. It was shown that most of the antiprotons are localized in orbitals with principal quantum number  $n = 37-40$ . This work was reported in Masaki Hori's doctor thesis.

Another highlight of our research in 1999 was successful determination of the transition energies of two lines of gamma-ray from  $^7_{\Lambda}\text{Li}$ . These lines were identified as  $M1(3/2^+ \rightarrow 1/2^+)$  transition and  $E2(5/2^+ \rightarrow 1/2^+)$  transition. The energy of the first line was determined as  $691.7 \pm 0.6 \pm 1.0$  keV. From these data, strength of spin-spin interactions between  $\Lambda$  and nucleon could be deduced. The energy of the second one was determined as  $2050.1 \pm 0.4 \pm 0.7$  keV. The precision of the determination of energy levels of hypernuclei is better than the previous world record by more than one order of magnitude. This result was reported in Kiyoshi Tanida's doctor thesis.

Preparation of the PHENIX experiment at the RHIC collider is in final stage. Construction of the second ring-imaging cherenkov counter (RICH) made by the University of Tokyo group was completed and was installed in the PHENIX laboratory in 1999. Final test of readout electronics for the RICH is in progress.

## 6 Kamae Group

**Subjects:** High Energy Astrophysics with Astronomy. Development of cosmic X-ray/ $\gamma$ -ray detectors, and cosmic X-ray/ $\gamma$ -ray observations of high energy astronomical objects.

**Member:** Tsuneyoshi Kamae, Yasushi Fukazawa, and Mitsuaki Tanaka

### Instrumental Development

We have been working on the development of the Well-type Phoswich Counter, mounted on the next Japanese X-ray Observational satellite, Astro-E, as a Hard X-ray Detector (HXD). The HXD has a wide energy range of 10–700 keV, and much higher sensitivity in this energy band than the previous missions. The development is performed in cooperation with Makishima-group, the Institute of Space and Astronomical Science, and so on. We are performing improvements and calibrations of scintillators and electronics, and environmental tests such as vibration/shock and thermal cycles. This year we constructed and tested Flight model of HXD.

Moreover, we are now developing basic experiments of Si-strip detectors for the next generation MeV/GeV  $\gamma$ -ray satellite GLAST, GSO plus photo-diode or photomultiplier MeV  $\gamma$ -ray detector, and Si-strip detectors for hard X-ray and MeV  $\gamma$ -ray.

### High Energy Astrophysics

On the other hand, we have been taking part in the calibration and data analysis of ASCA, the fourth Japanese X-ray Astronomy satellite, and BeppoSAX. We studies high energy phenomena in the universe as follows.

- (1) We analyzed systematically all the data of clusters of galaxies, to study statistical properties of clusters of galaxies and obtain information about cosmic structure formation.
- (2) We detected nonthermal hard X-ray emission from groups of galaxies, indicating that particle accelerations take place in clusters of galaxies. We also searched hard X-ray emission from rich clusters of galaxies with strong radio synchrotron emission.
- (3) We observed North Polar Spur, which is located at the edge of Local Hot Bubble. We detected soft thermal emission, suggesting that North Polar Spur is the shock front between supernova remnant and Local Hot Bubble.
- (4) We detected heavily obscured active galactic nuclei in nearby galaxy M51 with BeppoSAX, indicating that some nearby galaxies contain such obscured massive black holes.

### Papers

- Kokubun, M., Fukazawa, Y., Idesawa, E., Kataoka, J., Kamae, T. et al.: “Activation of the ASTRO-E Hard X-ray Detector in Low Earth Orbit”, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1999, **NS-46**, 371
- Kamae, T.: ”Developments in semiconductor detector technology and new applications - symposium summary”, Nucl. Instr. And Methods In Phys. Res. A, 1999, 436 (1-2), 297-303
- Fukazawa, Y., Makishima, K., Tamura, T., Nakazawa, K., Ezawa, H., Ikebe, Y., Kikuchi, K., and Ohashi, T.: “Statistical Properties of Metal Abundances of the Intracluster Medium at the Cluster Center Region”, 2000, MNRAS 313, 21
- Michelson et al.: “Response to NASA AO 99-055-03 ”GLAST Large Area Telescope””, Nov. 1999, Stanford University

## 7 Orito group

- Research Subjects:** (1) OPAL experiment at LEP  $e^+e^-$  collider and preparation for Japan Linear  $e^+e^-$  Collider;  
 (2) Research on antiparticle physics with balloon-borne high resolution spectrometer (BESS experiment);  
 (3) Studies on possible future particle physics experiments.

**Member:** Shuji Orito, Koji Yoshimura

1) OPAL experiment:

Precision tests of the Standard Model have been further performed based on 5 million  $Z^0$  events collected since 1989. In '99, data were taken at an increased energy of 202 GeV with an integrated luminosity of 202  $\text{pb}^{-1}$ . Based on the accumulated  $W^+W^-$  events, the  $W$  mass is determined to be  $80.446 \pm 0.051 \pm 0.039$  GeV. The further search for the Higgs particle gave the mass lower limit of 110 GeV. The super-symmetric particles have been searched for, providing various constraints on their masses and couplings.

2) BESS experiment:

The spectrum of cosmic antiprotons is measured in a wide energy range based on about 900 antiprotons obtained in the '95, '97 and '98 BESS flights. A new upper limit (95 % confidence level) on antihelium to helium ratio of  $9 \times 10^{-7}$  is obtained.

The BESS detector had its sixth successful flight at Canada in August '99, and was safely recovered after 34 hours science observation. In the flight, data were taken during balloon ascent for the first time. Electrons and muons, which can be well separated with the newly developed shower counter, were measured at different atmospheric depths. These data, together with the data taken at the top of Mt. Norikura (2700 m, 720 mb), help us understand the detailed air shower models, which are crucial for the atmospheric neutrino calculation.

R&D works started on the new tracking system and electronics for the precision measurement of proton flux up to 1TeV (BESS-TeV project).

3) MEG experiments:

Possible experimental set-ups are examined for the search for  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  decay down to  $10^{-14}$ .

Further R&D works on the liquid Xe photon detector have been done using a prototype counter with the 32 newly-developed photomultipliers. From the result on the timing resolution based on the data obtained using gamma-ray source, we should be able to achieve 50 ps timing resolution for the 52.8 MeV gamma-rays. The prototype counters for  $e^+$  timing measurement is tested by using proton/pion beam. Timing resolution of 21 ps for 0.5 GeV/c proton is obtained, which is sufficient to reduce the accidental background to a level well below  $10^{-14}$ .

In July '99, the proposal was submitted and approved by PSI Laboratory. International collaboration has started with the aim of commissioning in 2003.

## 8 Komamiya group

**Research Subjects:** (1)OPAL experiment at LEP  $e^+e^-$  collider; (2) preparation for experiment at the linear  $e^+e^-$  collider JLC; (3)research on astroparticle physics with balloon-borne high resolution spectrometer(BESS experiment); (4) Detector researches and developments for future particle physics experiments.

**Member:** Sachio Komamiya, Tomoyuki Sanuki

1) OPAL experiment: The elementary particle physics experiment of a large international collaboration using the highest energy  $e^+e^-$  collider LEP is running at CERN. In 1999 data were taken at increased energies in the range from 192 GeV to 202 GeV. 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, and we set the lower mass limit of the Standard Model Higgs Boson to be 102 GeV from the data taken in 1999. 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 31.6 GeV. This limit is quite independent of the models. The W boson mass was determined to be  $80.446 \pm 0.051 \pm 0.039$  GeV. Anomalous interactions of the W boson was searched for, and strict limits were set for these interactions.

2) Preparation for the  $e^+e^-$  linear collider JLC: JLC is the energy frontier machine for  $e^+e^-$  collisions in the near future. We have been studying the possible physics and experiments at JLC.

3) BESS experiment: In order to identify electron/muon, a thin and compact shower counter was developed for the BESS spectrometer. The BESS spectrometer was flown from Lynn Lake, Manitoba, Canada in August, 1999. In the experiment, data were taken during the balloon ascent and at floating altitude (37 km). Electrons and muons were clearly separated with the newly developed shower counter. We are analyzing the muon spectra at different atmospheric depths. These data will help us to further understand the interaction models of cosmic-ray particles and atmospheric neutrino oscillation phenomena.

4) Detector R&D: We are starting research and development for possible detectors in the future experiments. To begin with this project prototypes of positron timing counters for the  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  decay experiment were studied.

## 9 Minowa Group

**Research Subjects:** Experimental Particle Physics without Accelerators

**Member:** MINOWA, Makoto and INOUE, Yoshizumi

The direct experimental search for supersymmetric particle dark matter previously operated in the Nokogiri-yama underground cell has been moved to a newly caved underground cell in the Kamioka Observatory in November 1999.

The detector consists of 8 pieces of 20-gram lithium fluoride bolometers, and has an inside shield with very old lead which contains very little radioactivities. The fluorine is estimated to be one of the best nuclide for the detection of spin-dependently interacting neutralinos.

The underground laboratory is equipped with a small helium liquefier for the helium recycling and a liquid nitrogen generator. With these instruments, the bolometer can be continuously operated for months without any cryogen supply.

Status of the bolometer operation in Kamioka can be monitored via the Internet. The monitor is usually done by a computer in the university campus at Tokyo as well as by an Internet-accessible cellular phone at any place.

The measurement started in January 2000 and is accumulating data to study environmental radioactivity background. Once the background is eliminated to a preliminarily estimated level, we will be able to reach the sensitivity which is enough to examine the predicted MSSM SUSY neutralino detection rates.

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 if its mass is a few electronvolts. 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.

After the first stage experiment with sensitivity in the low axion mass region, we have been preparing the second stage experiment in which the cold conversion gas is to be filled. We should have sensitivity in  $m_a$  range around 0.03 eV.

## 10 Aihara Group

**Research Subjects:** Study of CP-Violation in the  $B$  Meson System, Precise Measurements of CKM Matrix Elements, Search for Physics Beyond the Standard Model in the  $B$  Meson and  $\tau$  Lepton, R&D for Silicon Detectors

**Member:** H. Aihara, H. Tajima

The main research activity of our group is to study CP-violation in the  $B$  meson system using the KEK  $B$ -factory (KEKB). Because CP-violating effect in the  $\Upsilon(4S) \rightarrow B^0 \overline{B}^0$  system appears as *time-dependent* asymmetry between the decay widths of  $B^0 \rightarrow f$  and  $\overline{B}^0 \rightarrow f$  ( $f$  is a common CP eigenstate), precise measurements of the decay distance between  $B^0$  and  $\overline{B}^0$  is essential. The flight length of the  $B$  meson at the KEKB is only  $\sim 200\mu\text{m}$ , and, therefore, the BELLE collaboration at the KEKB employs the Silicon Vertex Detector (SVD) to measure the decay vertices. We have been leading a group responsible for design, fabrication and operation of the SVD. We completed fabrication of the SVD in October 1998 and tested its performance with cosmic ray muons. Our group is also responsible for Data Acquisition of the SVD and have developed programs for detector alignment. In JFY99 we collected  $\sim 0.25 \text{ fb}^{-1}$  with the SVD.

We are also leading "Indirect CP-violation" physics group, one of four physics analysis groups formed within the BELLE collaboration. This group focuses on extraction of CP violating effects due to  $B^0-\overline{B}^0$  mixing, the central subject at KEKB. Our goal is to observe CP violation in  $B \rightarrow J/\psi K_S$  and  $B \rightarrow J/\psi K^*$  decay modes. In addition, we also making precise measurement of  $D$  and  $B$  mesons. The above activity resulted in the following 2 Master's theses:

T. Tomura : Measurement of Charmed Meson Lifetimes at the KEK B Factory.

T. Nakadaira : A Study of B Meson Lifetime at the KEK B Factory.

The goal of our instrumentation R&D program is to develop the 2nd generation vertex detector for the Belle experiment. We investigated radiation-hardness of CMOS preamplifier based on deep sub-micron technology. We fabricated VA1 amplifier chip based on 0.35 micron process. This is a commercially available process without any requirement of special layout rules. We verified that the 0.35 micron VA1 chip is radiation hard up to 20 Mrad, which is well beyond the total radiation dose expected for several years of the KEK B operation. Following this result we developed a conceptual design of "pseudo-pixel" detector, which consists of silicon strip sensors with very short strip readout using flex circuits on which VA1-chip hybrids are mounted. The use of flex circuits enables us to install amplifier hybrids outside the active volume and to connect short strips to VA1 inputs without the use of double metal structure of DSSD. Fabrication of prototype flex circuits has started and design of the short strip double sided silicon detector (DSSD) is also well underway. We expect to complete the first prototype of the pseudo pixel detector in JFY2000. Based on the pseudo-pixel detectors we came up with the design of the 4-layer silicon vertex detector as a 2nd generation silicon vertex detector. The minimum radius of the innermost layer is 15 mm which is a factor of two smaller than that of the current SVD at the KEK B. Accordingly the impact parameter resolution is expected to improve by a factor of two. This new SVD is scheduled to be installed in the beam in 2001.

## 11 Wadati Group

**Research Subjects:** Nonlinear Physics, Statistical Mechanics, 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 1999 are listed in the followings.

1. Bose–Einstein Condensation
  - (1) Collapse of BEC under Magnetic Trap
  - (2) Soliton Propagation in an Elongated BEC
  - (3) Stability of Multi-Component BEC
2. Non-Equilibrium Statistical Mechanics
  - (1) Reaction-Diffusion Model and Universality Class
  - (2) Asymmetric Exclusion Models and Correlation Functions
3. Nonlinear Waves
  - (1) Inverse Scattering Method for Discrete Systems
  - (2) Multi-Component Nonlinear Schrödinger Equation
  - (3) Bäcklund Transformations for Discrete Systems
  - (4) Lattice  $W$  Algebra and Integrable Systems
  - (5) Cellular Automaton
4. Strongly Correlated Electron System
  - (1) Thermodynamics in the Hubbard Model
  - (2) Fermionic Formulation of Yang–Baxter Relation
5. Quantum Many-Body Problem
  - (1)  $\delta$ -function Bose gas
  - (2) Calogero–Sutherland Model, Exclusion Statistics
6. Quantum Hall Effect
  - (1) Edge State of the Paired Hall States
7. Spin Chain
  - (1) Magnetization, Correlation Function, Riemann–Hilbert Problem

## 12 Tsukada Group

**Research Subjects: Theory of Solid Surface and Interface,  
Theory of Artificial Nano-Structures,  
Development of Computational Material Science**

**Member: Masaru Tsukada, Ryo Tamura**

A new method for the first-principles calculation of electronic structure of surface under strong field and current is developed. The mechanism of atom extraction by the tip and nano-scale point contact formation are clarified by this method. The concept of eigen-channels for the quantum transport through atom bridges is developed by this method. Ultrasoft pseudopotential method for the first-principles molecular dynamics is developed with the implementation of the core orthogonalization and the generalized gradient correction. The method is applied to the problems as the substitutional penetration of adsorbed Ge on Si(001) surface, the molecular chemisorption of acetylene on Si(001) surface, quantum dynamics of dimers of Si(001) surface and a new symmetry broken structure of Si(111)  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag. Interaction of water clusters with clean or hydrogenated Si(001) surfaces is investigated by the first-principles molecular dynamics. An important concept obtained by the calculations is the proton relay dissociation of water molecules on solid surfaces. Structures and properties of atomic wires formed on the hydrogenated Si(001) surface have been also studied by the first-principles molecular dynamics. Quantum transport through molecular bridges sandwiched between metallic electrodes is investigated, and important features such as metalization of the molecules and the induced loop current have been clarified. The large loop current appears at the region close to the degenerate levels of the molecule. The origin of the induced loop current is explained by the phase difference between the coefficients of the degenerate molecular orbitals induced by the tiny source-drain current. The large loop currents have been found in certain classes of larger aromatic molecules as well as C<sub>60</sub>. The mechanisms of dynamic atomic force microscopy is theoretically studied by the detailed analysis of the cantilever dynamics. We developed the method for the numerical simulations of the nc-AFM images and the force-distance curve based on the density functional calculations. Further quantum transport and related properties of nano-structures made of through single and periodical junctions of carbon nano-tubes are clarified. Novel methods for computational physics such as real-space finite element approach, order-N method, and TB scattering wave method are developed. By the use of a transferable tight-binding method, the dynamics of hydrogenated Si(001) surface is investigated, and decay processes of local vibrational excitation are clarified.

K. Tagami, and M. Tsukada : Dihydrides Accelerate Vibrational Relaxation on Si(001)/H Surfaces, J. Phys. Soc. Jpn **68**(1999)3309.

N.Kobayashi, M.Brandbyge and M.Tsukada: Transmission Channels through Na and Al Atom Wire, Surface Sci.**433-435**, (1999) 854.

S. Nakanishi and M. Tsukada: The Theory of Microscopic Current Distribution in Molecular Bridge Structures, Surf. Sci.**438** (1999) 305.

M.Gauthier and M.Tsukada: Theory of non-contact dissipation force microscopy, Phys.Rev.B **60**,(1999) 11716.

Y. Yoshimoto, Y. Nakamura, H. Kawai, M. Tsukada and M. Nakayama: Ge(001) surface reconstruction studied using a first-principles calculation and a Monte Carlo simulation, Phys. Rev. B **61** (2000) 1965.

N. Sasaki, H. Aizawa and M. Tsukada: Fourier Expansion Method for Noncontact AFM Image Simulations — Application to Si(111)  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag Surface, Jpn. J. of Appl. Phys. **39**, (2000) L174.

R.Tamura and M.Tsukada: Relation between the transmission rates and the wave functions in the carbon nanotube junctions, Phys.Rev.B **61**,(2000) 8548.

## 13 Aoki Group

**Subject:** Theoretical condensed-matter physics

**Members:** Hideo Aoki, Kazuhiko Kuroki

We are primarily interested in many-body effects in electron systems:

- Superconductivity in repulsively interacting electron systems
  - Numerical and analytic studies for the Hubbard model in 2D and 3D [1,2] including realistic models for high- $T_C$  cuprates and organic conductors[3],
  - Spin structures in cuprates and organic conductors[4],
  - Tomonaga-Luttinger and numerical studies for ladders and quasi-1D systems.
- Magnetism in repulsively interacting electron systems
  - Ferro- and antiferromagnetism in 2D and 3D correlated electron systems [5],
  - Electron-correlation-originated magnetotransport[6].
- Quantum Hall systems
  - Incompressible and compressible quantum liquids [7]; electron solid [8],
  - Single and double layer fractional quantum Hall systems [9,10],
- Mesoscopic systems
  - Electron-molecule picture for quantum dots [11],
- Crystal structures and electronic properties [12]

[1] R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **60**, 14585 (1999);  
*J. Phys. Soc. Jpn.* **69**, 1181 (2000).

[2] K. Kuroki and R. Arita, cond-mat/0004381.

[3] K. Kuroki and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **60**, 3060 (1999).

[4] K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **60**, 9850 (1999).

[5] R. Arita, S. Onoda, K. Kuroki and H. Aoki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **69**, 785 (2000).

[6] R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **61**, 3207 (2000).

[7] M. Onoda, T. Mizusaki, T. Otsuka, and H. Aoki, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 3942 (2000).

[8] S. Muto and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **59**, 14911 (1999).

[9] H. Imamura, P. A. Maksym and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **59**, 5817 (1999).

[10] K. Asano and T. Ando, *Physica E* **6**, 636 (2000).

[11] P. A. Maksym, H. Imamura, G. Mallon and H. Aoki,  
*J. Phys. Condensed Matter* **12**, R299 (2000).

[12] Hideo Aoki, Yasuhiko Syono and Russell J. Hemley (editors): *Physics Meets Mineralogy*  
 — *Condensed-Matter Physics in Geosciences* (Cambridge Univ. Press, 2000).

## 14 Ogata Group

**Research Subjects:** Condensed Matter Theory

**Member:** Masao Ogata

We are studying strongly correlated electron systems, such as high- $T_c$  superconductivity, Mott metal-insulator transition, low-dimensional electron systems, mesoscopic systems, organic conductors, and one-dimensional Tomonaga-Luttinger liquid theory. Ogata has moved from the Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo, Komaba on October 1, 1999 and joined the Department of Physics. The followings are the current topics in our group.

- High- $T_c$  superconductivity
  - Coexistence of  $d_{x^2-y^2}$  superconductivity and antiferromagnetism in the two-dimensional  $t$ - $J$  model.
  - Extension of the Gutzwiller approximation to clarify the effect of strong correlation.
  - Numerical studies of Stripe states in the two-dimensional  $t$ - $J$  model.
- Vortex core, surfaces, and impurities in  $d_{x^2-y^2}$  superconductivity
  - Antiferromagnetic vortex core and its charge.
  - Quasiparticle states near surfaces.
  - Local density of states around nonmagnetic and magnetic impurities in high- $T_c$  superconductors.
- Tomonaga-Luttinger liquid theory
  - The metal-insulator transition and magnetic states in two-band Fermion system.
- Spin gap system
  - Electronic Green's function in the Tomonaga-Luttinger liquid with spin gap.
- Triplet superconductivity in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ 
  - Microscopic mechanism of triplet superconductivity due to the antiferromagnetic spin fluctuation.
- Organic conductors
  - Coexistence between  $2k_F$  SDW and  $2k_F$  CDW in the quarter-filled organic conductors.
  - Localized spin configuration around the doped impurities in the molecular ladder  $p$ -EPYNN·[Ni(dmit)<sub>2</sub>].

- [1] M. Ishihara and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **68**, 350-353 (1999). "Spectral Functions of One-Dimensional Electron Systems with Ising-like Spin Gap"
- [2] H. Yamase, H. Kohno, H. Fukuyama and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **68**, 1082-1085 (1999). "Effects of Charge Density Modulation on Incommensurate Antiferromagnetism: Ginzburg-Landau Study"
- [3] A. Himeda and M. Ogata: Phys. Rev. B **60**, R9935-R9938 (1999). "Coexistence of  $d_{x^2-y^2}$  superconductivity and antiferromagnetism in the two-dimensional  $t$ - $J$  model and numerical estimation of Gutzwiller factors"
- [4] H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: J. Phys. Soc. Jpn. **68**, 2510-2513 (1999). "Quasiparticle Properties around a Nonmagnetic Impurity in the Superconducting State of the Two-Dimensional  $t$ - $J$  Model"
- [5] Y. Tanuma, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: Phys. Rev. B **60**, 9817-9826 (1999). "Quasiparticle states near surfaces of high- $T_c$  superconductors based on the extended  $t$ - $J$  model"
- [6] Y. Tanuma, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: to appear in J. Phys. Soc. Jpn. **69** (2000). "Local density of states near the surface of a d+s-wave superconductor in the two-dimensional  $t$ - $J$  model"
- [7] H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: to appear in Phys. Rev. Lett. **84** (2000). "Local density of states around a magnetic impurity in high- $T_c$  superconductors based on the  $t$ - $J$  model"
- [8] T. Otsuka, M. Yoshimaru, N. Wada, M. Ogata, K. Awaga, H. Imai, and T. Inabe: preprint. "Magnetic transition induced by paramagnetic lattice defects in the molecular ladder  $p$ -EPYNN·[Ni(dmit)<sub>2</sub>]"

## 15 Suematsu Group

**Research Subjects:** Experimental Solid State Physics,

Structural, electronic and magnetic properties of fullerenes, metallofullerenes and carbon nanotubes.

**Member:** Hiroyoshi Suematsu, Akihiko Fujiwara, and Kenji Ishii

The principal research subject of the laboratory is the solid state physics and materials science of artificial and novel materials.

The current topics are following :

1. Electronic and quantum properties of carbon nanotubes:  
The nanotube is a very attractive material in relation to the quantum transport effects because of its mesoscopic dimension. We have observed the quantum interference effect similar to the Aharonov-Bohm effect in the magnetic field dependence of conductivity at low temperatures. We also investigate electronic and optical properties of single-walled nanotubes, which show unique features of the one-dimensional conductor.
2. Giant magnetoresistance of fullerene compounds:  
The fullerene compounds show various types of electronic (superconducting) and magnetic transitions as well as structural transitions. We have revealed the ferromagnetic transition in Eu-C<sub>60</sub> compounds at low temperatures. A most remarkable feature is the negative giant magnetoresistance below  $T_C$ , which shows the resistivity reduction of three orders of magnitudes on application of high magnetic fields. The phenomenon is discussed in relation to the spin-dependent tunneling effect and the electronic transition effect.
3. The structural stability of endohedral metallofullerene crystals:  
The endohedral metallofullerene is a complex system consisting of a fullerene cage outside and metal atom(s) inside, and shows quite unique features in structural, electronic, magnetic properties. Very recently we have observed a structural phase transition in La@C<sub>82</sub> induced by intense X-ray irradiation, which possibly comes from the competition of electric-dipole and elastic interactions between molecules.

## 16 Nagasawa Group

**Research Subjects:** Study on Fundamental Aspects of Excitons in Semiconductor Crystals by Optical Means

**Member:** Nobukata Nagasawa and Nobuko Naka

Optical and photoelectric phenomena associated with excitons in a semiconductor  $\text{Cu}_2\text{O}$  are studied by laser spectroscopy. Being composed of an electron and a hole, an exciton can be approximately regarded as a Boson. They have attracted our interests as electrically neutral particles which freely move around inside the crystals and show quantum statistical nature in high density regime. In contrast to atomic systems where extensive works have been done on their Bose-Einstein condensation (BEC), no clear evidence of excitonic BEC are reported.

In order to achieve excitons of the density high enough for condensation, usual technique uses intense laser light irradiation. To avoid unfavorable heating of the excitonic gases under high excitation, we developed a new method to produce cold excitons in a stress-induced trap in  $\text{Cu}_2\text{O}$ . The shape and depth of the potential traps and emission of the excitons generated in the trap were examined using two-photon high-precision spectroscopy [1].

Another approach is concerning with photo-voltaic (PV) generation in  $\text{Cu}_2\text{O}$ , that was reported to be applicable for the detection of the ballistic propagation of the excitons. We firstly succeeded in observing structures due to direct generation of 1s excitons and its phonon replicas. From the PV spectral shapes in the 1s exciton region at various temperatures, it was newly found that Rayleigh scattering of the incident light strongly effects on exciton-mediated PV generation, as confirmed by off-axis transmission measurements.

We are also interested in the spatial property and dynamical aspect of the electroluminescence (EL) of excitonic origin in  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Using a fast-gated ICCD camera we obtained time-resolved images of the EL at 77K. The result shows that the EL pulse propagates in the sample at a speed faster than  $8 \times 10^6 \text{m/s}$ . The spectral shape of the excitonic emission in the EL also indicates transport of the EL pulses via photons as an effect of strong reabsorption of the emission.

The current topics are summarized below:

- 1) Two-photon spectroscopy of excitons in a shallow stress-trap
- 2) Diagnostics of potential wells produced by a Hertzian contact
- 3) Measurement of direct emission of para-excitons under two-photon excitation of ortho-excitons
- 4) Excitonic contribution to the photo-voltaic generation
- 5) Spectral shape analysis of photo-voltaic signal and its relation to off-axis absorption spectra
- 6) Effect of reabsorption on the electroluminescence of excitonic origin

[1] N. Naka and N. Nagasawa: Two-photon spectroscopy on cold ortho-excitons in a stress trap in  $\text{Cu}_2\text{O}$  crystals, *J. Lumin.*, **87–89** (2000) 201.

## 17 Tarucha Group

**Research Subjects:** Low-dimensional electron transport, Electronic properties of artificial atoms and molecules, Many-particle interactions in semiconductor nanostructures

**Member:** Seigo Tarucha, Keiji Ono

We carry out experimental studies on electronic properties of semiconductor nanostructures.

1. Electronic properties of artificial atoms: Electronic states in a circular disk-shaped quantum dot show atom-like properties such as shell filling and Hund's rule. We study the effects of direct Coulomb and exchange interactions on spin states by measuring Coulomb oscillations of the disk-shaped dot. Spin-triplet favoured by the two interactions is observed at zero and nonzero magnetic fields. The relative strengths of these interactions are tuned and measured as a function of the number of confined electrons. We find that electrons tend to have parallel spins when they occupy nearly degenerate single-particle states. We use a magnetic field to adjust the single-particle state degeneracy, and find that the spin-configurations in an arbitrary magnetic field are well explained in terms of two-electron singlet and triplet states.
2. Electronic properties of artificial two-dot molecules: We propose and demonstrate spin selective tunneling and spin blockade both associated with a spin singlet and triplet in a vertically weakly coupled two disk-shaped dot system. The vertical single electron tunneling sequentially occurs through the three barriers. We first assume a spin degenerate single orbital state for each dot with one electron only trapped in the lowest state of the right dot, ER1 (configuration "A"). The two dots are referred to "right" and "left" dot. The lowest state of the left dot, EL1, is then above the second lowest state of the right dot, ER2, and the Fermi energy of the left lead is above EL1 and that of the right lead is below ER2. For spinless electrons the tunneling current can flow via three different electronic configurations: "A", "B" and "C". Next to "A" an electron tunneling from the left lead to EL1 leads to "B" having two electrons in ER1 and EL1. Then inelastic tunneling from EL1 to ER2 leads to "C" having two electrons in ER1 and ER2. "C" restores to "A" by an electron tunneling from ER2 to the right lead. However, this is not the case for spinful electrons. "B" is either a singlet or a triplet because the two states are apart only slightly. In contrast, "C" is always a singlet having two electrons in the same orbital. Due to the spin conservation, the tunneling from "B(triplet)" to "C" is forbidden, whereas it is allowed for "B(singlet)". This means that once "B(singlet)" is formed, the current flow is immediately blocked. This is actually observed in our experiment.
3. Tomonaga-Luttinger liquid effects in quantum wires: We measure the Coulomb drag effect in coupled quantum wires. The measured drag resistance is maximal when the Fermi energy is located close to the bottom of the lowest one-dimensional subband for both wires, reflecting the largest density of states. The resistance is nearly one-order of magnitude greater than that observed for a similar system but having short quantum wires. This is probably related to the one-dimensional interaction effect in the quantum wire.
4. Development of scanning probe technologies: A new scanning probe technology is under construction toward direct observation of spatial distribution of electron density in nanostructures.

Tarucha et al: Exchange and direct Coulomb interactions in artificial atoms, Phys. Rev. Lett. 84, (2000) 2485.

Oosterkamp et al: Maximum-density droplet and charge redistribution in quantum dots at high magnetic fields, Phys. Rev. Lett. 82, (1999) 2931.

Y. Tokura, A. A. Odintsov, and S. Tarucha: Interaction effects in semiconductor one-dimensional systems, Springer lecture note series (proceedings 219.WE-Heraeus-Seminar "Interactions and Quantum Transport Properties of Lower Dimensional Systems" Ed. T. Brandes, 2000).

## 18 Fujimori Group

**Research Subjects:** Photoemission Spectroscopy of Condensed Matter, Electronic Structure Studies of Correlated Systems

**Member:** Atsushi Fujimori

The electronic structures of strongly correlated systems and strongly electron-phonon coupled systems are studied using electron spectroscopic techniques (photoemission, inverse-photoemission and x-ray absorption spectroscopies) and subsequent analyses using various theoretical models (cluster-model, Anderson-model, band-structure calculations and phenomenological self-energy analyses). We are investigating metal-insulator transitions, magnetic fluctuations, mass renormalization, spin and charge density modulations, narrow-gap and pseudogap formation, electron-phonon coupling, etc., in  $d$ - and  $f$ -electron systems (transition-metal and rare-earth compounds, respectively) in one, two and three dimensions. Particular emphasis is made on novel phenomena near metal-insulator transitions including high-temperature superconductivity and giant magnetoresistance. Low-energy electronic structures near the Fermi level are studied using high-resolution photoemission. Angle-resolved photoemission is used to study band dispersions and Fermi surfaces. A new photoemission technique using circularly polarized synchrotron radiation is also being developed and applied to study orbital moments in magnetic materials.

A. Ino, T. Mizokawa, K. Kobayashi, A. Fujimori, T. Sasagawa, T. Kimura, K. Kishio, K. Tamasaku, H. Eisaki, and S. Uchida: Doping-Dependent Density of States and Pseudogap Behavior in  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ , Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 2124.

A. Ino, C. Kim, T. Mizokawa, Z.-X. Shen, A. Fujimori, M. Takaba, K. Tamasaku, H. Eisaki, and S. Uchida: Fermi Surface and Band Dispersion in  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ , J. Phys. Soc. Jpn. **68** (1999) 1496.

T. Mizokawa, C. Kim, Z.-X. Shen, A. Ino, A. Fujimori, M. Goto, H. Eisaki, S. Uchida, M. Tagami, K. Yoshida, A. I. Rykov, Y. Siobata and S. Tajima: Angle-Resolved Photoemission Study of Untwinned  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ : Undoped  $\text{CuO}_2$  Plane and Doped  $\text{CuO}_3$  Chain, Phys. Rev. B **60** 12335

## 19 Hasegawa Group

**Research Subject: Experimental Surface Physics**

**Members: Shuji HASEGAWA and Tadaaki NAGAO**

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, covered by a variety of surface superstructures with various kinds of adsorbates. Peculiar atomic arrangements and surface electronic states, characteristic of the surface superstructures, are our platforms for studying physics of atomic-scale low dimensional systems by using ultra-high vacuum experimental techniques such as electron diffractions, scanning electron microscopy, 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:** measurements with micro-4-point probes (under collaboration with Denmark Technical Univ. ), correlation of surface phase transitions or epitaxial growths, development of 4-tips STM for nano-scale 4-point probes.

**(2) Surface phases and phase transitions:** one-dimensional surface superstructures and Peierls transitions (under collaboration with Research Center for Spectrochemistry), 2D and quasi-1D metallic surface-state bands, surface charge-density-wave transitions.

**(3) Surface electronic excitations:** 2D and quasi-1D plasmons in surface-state bands.

**(4) Epitaxial growths of atomic/molecular layers:** perfect layer-by-layer growth of Bi films on Si, 1D islands on a template substrate.

**(5) Surface mass transport:** electromigrations of Ag and In atoms on different surface superstructures

- [1] C.-S. Jiang and S. Hasegawa: Photoconductivity of the Si(111)- $7 \times 7$  and  $-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surfaces, *Surface Science* **427** (1999, Jun) 239-244.
- [2] H. W. Yeom, S. Takeda, E. Rotenberg, I. Matsuda, K. Horikoshi, J. Schaefer, C. M. Lee, S. D. Kevan, T. Ohta, T. Nagao, and S. Hasegawa: Instability and charge density wave of metallic quantum chains on a silicon surface, *Physical Review Letters* **82** (1999, Jun) 4898-4901.
- [3] S. Hasegawa, X. Tong, S. Takeda, N. Sato, and T. Nagao: Structures and electronic transport on silicon surfaces, *Progress in Surface Science* **60** (1999, June) 89-257.
- [4] D. A. Tsukanov, S. V. Ryzhkov, S. Hasegawa, and V. G. Lifshits: Surface conductivity of submonolayer Au/Si system, *Physics of Low-Dimensional Structures* **7/8** (1999, Aug) 149-154.
- [5] X. Tong, K. Horikoshi, and S. Hasegawa: Structures and electrical conductance of Pb-covered Si(111) surfaces, *Physical Review* **B60** (1999, Aug) 5653-5658.
- [6] K. Tsuchie, T. Nagao, and S. Hasegawa: Structure of  $C_{60}$  layers on the Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface, *Physical Review* **B60** (1999, Oct) 11131-11136.
- [7] N. Sato, T. Nagao, and S. Hasegawa: Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface at low temperatures — symmetry breaking and surface twin boundaries, *Surface Science* **442** (1999, Nov) 65-73.
- [8] K. Horikoshi, X. Tong, T. Nagao, and S. Hasegawa: Structural phase transitions of Pb-adsorbed Si(111) surfaces at low temperatures, *Physical Review* **B60** (1999, Nov) 13287-13290.
- [9] N. Sato, T. Nagao, and S. Hasegawa: Two-dimensional adatom gas phase on the Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface directly observed by scanning tunneling microscopy, *Physical Review* **B60** (1999, Dec) 16083-16087.
- [10] X. Tong, C.-S. Jiang, K. Horikoshi, and S. Hasegawa: Surface-state electrical conduction on the Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface with noble-metal adatoms, *Surface Science* **449** (2000, Mar) 125-134.

## 20 Fukuyama Group

**Research Subjects:** Low Temperature Physics:

Low Temperature properties of liquid and solid  $^3\text{He}$ , Ultra-low temperature scanning probe microscope, Superconductivity and charge density waves in low dimensional conductors, Phase transitions.

**Member:** Hiroshi Fukuyama, Hiroshi Kambara

Main theme of our group is to investigate quantum many body phenomena such as nuclear magnetic orderings and superfluidity in liquid and solid  $^3\text{He}$  or  $^4\text{He}$ , especially two-dimensional  $^3\text{He}$  systems, and exotic superconductivity and charge density waves in layered and quasi one dimensional conductors at very low temperatures.

### 1. Nuclear magnetism in 2D and 3D solid $^3\text{He}$

- (a) 2D nuclear magnetism in submonolayer solid  $^3\text{He}$   
Heat capacities ( $C$ ) of  $^3\text{He}$  submonolayer solids adsorbed on graphite surface had been measured. An anomalous temperature dependence,  $C \propto T^n$  ( $-2 \leq n \leq -1$ ), is observed in a wide temperature range at areal densities between  $6.1 \text{ nm}^{-2}$  and  $8.7 \text{ nm}^{-2}$ . This indicates that crystalline structures or domain wall structures in the submonolayer solid may have a complicated density dependence.
- (b) 2D nuclear magnetism of monolayer solid  $^3\text{He}$  in magnetic fields  
We are developing a Faraday magnetometer with which we can measure the tiny magnetization of monolayer  $^3\text{He}$  films in high fields ( $B \geq 10 \text{ T}$ ) at very low temperatures. Also constructing is a nuclear adiabatic demagnetization refrigerator which can cool the  $^3\text{He}$  samples below  $100 \mu\text{K}$ .
- (c)  $^3\text{He}$  melting-curve temperature scale at millikelvin temperatures in high magnetic fields  
High-precision measurements of the  $^3\text{He}$  melting pressure in high magnetic fields ( $B \leq 15 \text{ T}$ ) had been carried out in a temperature range between  $0.5 \text{ mK}$  and  $140 \text{ mK}$ . From these measurements we could establish a new  $^3\text{He}$  melting-curve temperature scale which enables us to calibrate directly other more easily handled thermometers such as resistance thermometers even in high fields at temperatures between  $4 \text{ mK}$  and  $750 \text{ mK}$ .

### 2. Development of a new ultra-low temperature scanning probe microscope (ULT-SPM)

We have finished to design a new ULT-SPM which works at temperatures down to  $20 \text{ mK}$  in magnetic fields up to  $6 \text{ T}$  with an atomic resolution and started its construction. We can transfer samples and STM tips prepared and characterized in an ultra high vacuum (UHV) chamber at room temperature from the bottom of the cryostat keeping the UHV environment with this system. Then it can be cooled back to the base temperature within next few hours.

### 3. Unconventional superconductivity and superfluidity

Tunneling spectroscopy measurements for the  $3 \text{ K}$  phase ( $T_c = 3 \text{ K}$ ) of superconducting  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  are under going with a low temperature STM. Spatial variation of the tunneling gap is being studied near precipitated metallic Ru islands whose presence is known to increase  $T_c$  by a factor of two.

### 4. Phase transitions

Theories predict formation of dense topological defects during rapid second order phase transitions (Kibble-Zurek mechanism). We are studying possible formation of quantized vortex tangles in liquid  $^4\text{He}$  during rapid quenches through the superfluid transition caused by different ways by measuring attenuation of the second sound.

## 21 Kambe Group

**Research Subjects:** Dynamical and Geometrical Study of Fluid Motion, Chaos and Turbulence

**Member:** Tsutomu Kambe, Makoto Umeki

Our research group studies the dynamics of fluid motions and wave motions as nonlinear dynamical systems. Motions of fluid particles, vortex motions, chaos, turbulence, sound waves and water waves are investigated, based on methods of mathematical physics, numerical simulations and laboratory experiments.

The followings are main subjects of our study.

- 1) Study of turbulence: statistical properties of structures turbulence and numerical study of statistics of a turbulent flow.
- 2) Interaction between a vortex ring and a shock wave: experimental study based on shadowgraph visualization and measurement of sound waves, analysis based on scattering theory and geometrical acoustics.
- 3) Study of motion of an ideal fluid and integrable systems based on methods of differential geometry and theory of Lie group: diffeomorphisms, geodesics and curvatures.
- 4) Study of interaction between shallow water waves and a vortex. Dislocated and scattered waves analogous to the Aharonov-Bohm effect in quantum mechanics.

T. Kambe: "Recent findings from Computational Fluid Dynamics: Drag on Cylinders, Vortex Sound and Turbulent Statistics", *AIAA paper* (2000)

T. Kambe and N. Hatakeyama: "Statistical laws and vortex structures in fully developed turbulence", *Fluid Dyn. Res.* 27 (2000) to appear.

T. Kambe: "Statistical Laws governed by Vortex Structures in Fully Developed Turbulence", *Proc. of IUTAM Symposium on Geometry and Statistics of Turbulence*, Edited by T. Kambe, T. Miyauchi and T. Nakano. (Kluwer.)

T. Shimizu, Y. Watanabe and T. Kambe: "Scattered waves generated by shock wave and vortex ring interaction", *Fluid Dyn. Res.* 27 (2000), to appear.

C. Cost, F. Lund and M. Umeki: "Scattering of Dislocated Wave Fronts by Vertical Vorticity and the Aharonov-Bohm Effect. I. Shallow Water", *Phys. Rev. E.* 60(1999) 4908–4916.

## 22 Theoretical Astrophysics Group

**Research Subjects:** Particle Astrophysics, Relativistic Astrophysics, Physics of Supernovae and High Density Matter, Observational Cosmology

**Member:** Katsuhiko Sato, Yasushi Suto, Shoichi Yamada, Tatsushi Suginohara, Takahiko Matsubara & Tetsuya Shiromizu

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;

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),

Thermodynamic properties of nuclear “Pasta” in Super Dense Matter (1999),

Dynamics of cosmological phase transition and evolution of global strings (1998),

The gamma-ray burst as a probe of cosmic star formation history and ultra-high energy cosmic rays (1998)

Imprints of Structure Formation on Cosmic Microwave Background (1998),

Topological Defects in the Early Universe (1998)

Modeling Galaxy Formation in a Hierarchical Universe (1998)

Topological Defects in the Early Universe (1998)

Quantum creation of the universe with the inner space (1998)

- 
- Phase transitions in high-density matter and neutron star evolution (1997)  
Cosmological implications of the abundances of clusters of galaxies (1997)  
Effects of axisymmetric explosion in collapse-driven supernovae (1997)  
Hybrid inflation and axionic isocurvature fluctuations in supergravity (1997)  
Asymptotic structure of time-like infinity (1997)
- Gravitational collapse of cylindrically symmetric space-time (1996)  
Propagation of cosmic rays in extragalactic space (1996)  
Cosmological density probability distribution  
– a numerical study for the future redshift surveys of galaxies – (1996)  
A new method to estimate the cosmological constant from cosmological redshift distortion effect (1996)  
Toward definition of quasi-local energy in non-asymptotically flat spacetime (1996)  
Hydrodynamical simulation of structure formation in the universe (1996)  
Density perturbations and the thermal history of the universe (1996)  
Velocity function and gravitational lensing statistics (1995)  
Implications on cosmology and neutrino physics from supernova neutrinos (1995)  
First order phase transition in the early universe (1995)  
Explosion mechanism of supernovae with rotation and anisotropic neutrino radiation (1995)

## 23 Kobayashi Group

**Research Subjects:** Ultrafast and Nonlinear Optical Processes, Quantum Optics, Quantum Photobiology

**Member:** Takayoshi Kobayashi, Takao Fuji, Akikatsu Ueki

In order to evaluate ultrafast nonlinear optical susceptibilities of optoelectronic device materials, we develop new methods for time-resolved nonlinear spectroscopy and measure time dependence of optical nonlinearities. On the basis of these measurements we clarify mechanisms of nonlinearities, and give guiding principles for designing new optoelectronic devices.

### 1. Development of ultrashort pulse lasers

i) **Generation of shortest 4.7 fs visible pulses by noncollinear optical parametric amplifier (NOPA):** World shortest pulses in the visible was obtained by two sets of carefully designed chirped mirrors and a prism pair.

### 2. Sub-5-fs real-time spectroscopy

i) **Polydiacetylenes:** A high-frequency multi-mode wavepacket motion with the three carbon-carbon stretching modes and chain-deformation modes was observed. The highly vibronic non-equilibrium in the relaxed state characterized by the mode frequency and amplitude modulations is well explained by non-adiabatic coupling of the stretching and bending modes in the butatriene-like backbone. This is the first real-time observation of coupling between normal modes.

ii) **Dye molecules/polymer film:** Self-induced modulation of vibration in dye molecules doped in a polymer film was observed using sub-5-fs pulses. The modulation of potential curves was obtained from the frequency and amplitude modulations of the observed vibrational mode.

iii) **J-aggregates:** Sub-5-fs real-time spectroscopy revealed that coherent molecular vibrations coupled to the Frenkel exciton system. The oscillation in the induced absorption spectrum is interpreted as the modulated transition dipole moment due to the oscillator strength transfer.

iv) **Quasi-one-dimensional halogen-bridged mixed-valence metal complex:** Wave packet motions both in ground and self-trapped exciton (STE) states are observed as oscillatory modulations. The energy relaxation rate of the non-thermal STE is determined. The onset of the wave packet motion is delayed after the photo-excitation on the STE potential surface. This delay time is attributed to the internal conversion between free exciton and STE states.

### 3. Development of new measurement system

i) **Multiplex method for nonlinear susceptibility spectrum measurement:** Continuous spectrum of nonlinear susceptibility can be measured by single shot using this system. The spectrum of the third-order nonlinear susceptibility of polydiacetylenes was measured and the energy of  $2^1 A_g$  level were able to be determined by that spectrum.

ii) **System of time-resolved spectroscopy in mid infra red region:** Ultrashort pulse laser in mid IR was constructed by optical parametric amplifier. The spectrum region was  $5 \mu\text{m} \sim 8 \mu\text{m}$ . The pulse width was determined as 400 fs by pump-probe signal of Si.

iii) **Scanning near-field optical microscope (SNOM):** In order to observe an optical nonlinearity of a single J-aggregate, a SNOM has been constructed. Both fluorescent and absorption spectra are successfully observed with a special resolution more than 100 nm.

### 4. Quantum optics and teleportation

i) **Quantum teleportation:** The goal of our research is to achieve more than 0.58 fidelity which is the current limit of accuracy in quantum teleportation. A 430 nm high intensity light source is being constructed for application in an optical parametric oscillator which generates squeezed entangled states of the light field.

### 5. Quantum photobiology

i) **Bacteriorhodopsin:** Femtosecond dynamics of bacteriorhodopsin was investigated by sub-5-fs optical pulses. The photoexcitation bond alternation was clearly observed with 5-fs time resolution.

## 24 Makishima Group

**Research Subjects:** High Energy Astrophysics using Scientific Satellites, X-Ray Probing of the Universe, Development of Cosmic X-Ray/ $\gamma$ -Ray Instruments

**Member:** Kazuo Makishima, Makoto Tashiro

We study cosmic high-energy phenomena in the X-ray and  $\gamma$ -ray frequencies, under a close collaboration with Kamae group. We utilize scientific satellites launched by the Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), and other foreign missions.

**Instrumental Developments:** We have developed the Gas Imaging Spectrometer (GIS) for the *ASCA* mission launched in February 1993. We have also been developing the Hard X-ray Detector (HXD) to be onboard the ASTRO-E mission. Although ASTRO-E was launched by the M-V-4 rocket of the ISAS, it failed to achieve a satellite orbit because of a malfunctioning in the first stage of the rocket. As a result, ASTRO-E, together with the HXD instrument, has been lost to our great regret.

**Black holes:** Through *ASCA* observations, we have obtained firm evidences that the ultra-luminous compact X-ray sources, found in arm regions of many nearby galaxies, are massive ( $\sim 100 M_{\odot}$ ), accreting, Kerr black holes [5].

**Particle vs. Field Energy Non-Equipartition:** Through the study of inverse-Compton X-rays from lobes of radio galaxies, we have discovered that the particle vs. field energy equipartition is not necessarily realized. In the lobe of the radio galaxy Fornax A, the lobe interior is dominated by particle pressure, whereas the magnetic pressure overwhelms in the lobe periphery [7].

**Physics at the Cluster Core Region:** We have developed a novel view of the cluster core region. The ingredients are; hierarchical dark-matter distribution around the cD galaxy; two-temperature plasma structure; metal escape from galaxies to the intra-cluster space; and magnetohydrodynamic energy transfer from galaxies to the intra-cluster plasma [1,3,4,6].

**Time variability of Active Galactic Nuclei:** Through time-series analysis employing structure function and extensive Monte-Carlo simulations, we have confirmed that the nucleus M81, a typical low-luminosity AGN, and a serendipitous quasar, have nearly the same time scale (several hundred days) of intensity variation. Therefore, both nuclei are inferred to have  $\sim 10^8 M_{\odot}$  in spite of their enormous luminosity difference.

1. Ikebe, Y., Makishima, K., Fukazawa, Y., Tamura, T., Xu, H., Ohahsi, T. & Matshushita, K.: Two-Phase Intracluster Medium in the Centaurus Cluster of Galaxies, *Astrophys. J.* **525**, 58 (1999)
2. Makishima, K., Mihara, T., Nagase, F. & Tanaka, Y.: Cyclotron Resonance Effects in Two Binary X-Ray Pulsars and the Evolution of Neutron Star Magnetic Fields, *Astrophys. J.*, **525**, 978 (1999)
3. Fukazawa, Y., Makishima, K., Tamura, T., Nakazawa, K., Ezawa, H., Ikebe, Y., Kikuchi, K. & Ohashi, T.: Statistical Properties of Metal Abundances of the Intracluster Medium in the Central Region of Clusters, *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* **313**, 21 (2000)
4. Matsushita, K., Makishima, K., & Ohashi, T.: Metal Abundances in the Hot Interstellar Medium in Early-Type Galaxies Observed with ASCA, *Publ. Astr. Soc. J.* **52**, in press (2000)
5. Makishima, K., Kubota, A., Mizuno, T., Ohnishi, T., Tashiro, M. et al.: The Nature of Ultra-Luminous Compact X-ray Sources in Nearby Spiral Galaxies. *Astrophys. J.*, **535**, in press (2000)
6. Makishima, K.: Energy Non-Equipartition Processes in the Universe, *Astronomische Nachrichten* **320**, 163 (1999)
7. Tashiro, M., Iyomoto, N., Kaneda, H., Makishima, K. & Isobe, N.: ASCA Measurements of Non-Thermal Pressures in the Radio Lobes, *Astronomische Nachrichten* **320**, 217 (1999)

## 25 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

**Member:** Yuichi Takase, Akira Ejiri, Syun'ichi Shiraiwa, Kenichi Yamagishi

Experimental studies of high temperature magnetically confined plasmas for fusion application are being pursued. A new spherical tokamak (ST) device, TST-2 (major radius 0.36 m, minor radius 0.23 m, toroidal field 0.3 T, plasma current 200 kA) was constructed and produced its first plasma in September 1999. The ST is a highly promising plasma confinement device because of its potential for stable high  $\beta$  ( $\beta$  = plasma pressure / magnetic pressure) operation with good confinement. TST-2 has a greatly upgraded capability of the central solenoid compared to its predecessor TST-M, and has already produced plasmas with currents of up to 90 kA with less than 1/3 of the full capability of the solenoid. Initial results indicate that plasmas with 50 kA plasma current has an ion temperature of 50–100 eV and a density of greater than  $3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ .

The position and the shape of the plasma can be determined from magnetic measurements. Typical plasmas have an aspect ratio (major radius / minor radius) of 1.6 and an elongation (plasma height / width) of 1.5. An MHD instability peculiar to the ST called the internal reconnection event (IRE) is frequently observed. Magnetic measurements indicate that a coherent rotating mode with a toroidal mode number of  $n = 1$  exists prior to an IRE.

The ST can confine high density plasmas at low magnetic field. Consequently, ST plasmas have unusually high dielectric constants compared to conventional tokamak plasmas. Some waves that are commonly used for heating and current drive, such as the lower hybrid wave and the electron cyclotron wave, cannot propagate to the plasma core. Understanding of wave physics in such a regime is very important. Excitation, propagation, and absorption of the high-harmonic fast wave (HHFW), which has good accessibility to high dielectric constant plasmas, are being studied in TST-2. The HHFW is excited by a combline antenna, and the wave fields are detected using magnetic probes distributed on the vacuum vessel wall. Initial measurements indicate good agreement with the results of a full-wave code calculation.

Noninductive plasma initiation and plasma current ramp-up are critical issues for the eventual success of the ST concept as an attractive fusion reactor. Reliable plasma initiation is achieved by 1 kW of 2.45 GHz microwave power. Ionization is achieved by resonant wave absorption by electrons gyrating in the magnetic field. Noninductively driven currents of up to 1.2 kA was obtained. The generated current increases as the neutral pressure is decreased down to  $1.5 \times 10^{-6}$  Torr, suggesting that this current is driven by the pressure gradient of the plasma.

HHFW heating and current drive experiments were performed on the JFT-2M tokamak at Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). The measured soft X-ray energy spectrum indicated significant electron heating and an upshift of the wavenumber parallel to the magnetic field. A reciprocating Langmuir probe array was used to measure the plasma density, electron temperature, and plasma potential. The measurements indicate the existence of a poloidal electric field. Detailed investigation of the electric field with good spatial and temporal resolutions may clarify the physics of an important bifurcation phenomenon observed as a transition to the high confinement mode (H-mode).

A current drive antenna is being developed for use on the LHD device at National Institute for Fusion Science (NIFS). This antenna will be used to excite a traveling wave in the plasma in order to control the rotational transform profile. Design was made based on the results of mock-up antenna measurements and model circuit analysis. A prototype antenna consisting of 4 modules was fabricated. After final optimization with the prototype antenna, the complete antenna consisting of 10 modules will be fabricated.

A multi-layer mirror soft X-ray spectrometer aimed at making soft X-ray energy spectrum measurement on a fast time scale was developed and tested on the CHS device at NIFS. Novel microwave-based measurements such as a frequency-swept microwave transmission measurement for density profile diagnostic, and a low-cost multiple-channel interferometer system using fast switching instead of multiple oscillators and detectors, are being developed.

NSTX at Princeton University Plasma Physics Laboratory and MAST at UKAEA Fusion are state-of-the-art ST devices which are one rank larger than TST-2. Our group maintains close contact with these groups. In particular, our group is responsible for coordinating US-Japan collaboration activities on NSTX, and participate actively on experiments focusing on RF heating and on the development of a new electron temperature diagnostic based on electron Bernstein wave emission.

## 26 Tsubono Group

**Research Subjects:** Experimental Relativity, Experimental Gravitation, Gravitational Wave Physics, Laser Interferometer

**Member:** Kimio TSUBONO, Keita KAWABE 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. In U.S.A. LIGO(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) project(4-km interferometer) is in progress under the collaboration of Caltech and MIT. Also in Europe French-Italy collaboration team has started the VIRGO project; they are constructing 3-km interferometer in Pisa, Italy.

In Japan we are constructing a 300-m arm-length laser interferometer (TAMA300) in Mitaka. We have already finished the construction of the tunnels and the buildings to hold the vacuum pipes and vacuum chambers. Also we have completed the installation of the optical system of the interferometer into the vacuum chamber. We are now improving the sensitivity of the detector by refining the system. From next year we plan to start the long-term operation of the interferometer to obtain the first data of the possible signals. We have already operated the interferometer for several days and obtained preliminary data. We are now analyzing these data using matched filter technique.

At the University of Tokyo, we are mainly engaged in the study of the vibration isolation and the control of the laser interferometer. Using a 3-m prototype laser interferometer in our laboratory, we are developing techniques of alignment control, fringe control, mirror suspension, recycling scheme, vibration isolation and so on.

We summarize the subjects being studied in our group.

- Laser interferometric gravitational wave detectors
  - TAMA project
  - New signal extraction scheme with harmonic demodulation
  - Suspension point interferometer for vibration isolation
  - GEO600 project
- Space gravitational wave experiment
  - Study of the space laser interferometer
- Experimental study of the relativity
  - Test of the space isotropy
- Study of thermal noise
  - Estimation of thermal noise by a direct measurement of the mechanical conductance
  - Study of the thermal noise due to the inhomogeniously distributed loss
  - Measurement of the intrinsic Q of low-loss materials
- Study of the precise measurement
  - Development of the low-frequency vibration isolation system (SAS)

## 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 triple band superconductor mixer receiver 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) and that of the carbon monoxide (CO) ( $J = 3 - 2$  345 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 carried out as a research project of Research Center for the Early Universe (RESCEU).

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 dark clouds like HCL2, L183, and  $\rho$  Oph, giant molecular clouds like Ori A, Ori B, M17, W3, W28, W44, W51, DR21, and NGC1333, infrared dark clouds, and translucent clouds. Total observing area is about 35 square degrees, which is the largest survey of the CI line so far made.

We are also studying rotational spectra of transient molecules in the laboratory with the submillimeter-wave spectroscopy and Fourier transform millimeter-wave (FTMW) spectroscopy. Recently the rotational spectrum of the DSC radical has been assigned, and the molecular structure of the HSC radical has been determined accurately. Furthermore, the vibrational satellites of the CS  $J = 1 - 0$  transitions are observed up to  $v = 39$  with the FTMW spectrometer combined with a pulsed discharge nozzle, indicating high vibrational excitation in the discharge nozzle system.

- [1] H. Maezawa et al., "Large-Scale Mapping Observations of the CI  $^3P_1 - ^3P_0$  Line toward Heiles Cloud 2 in the Taurus Dark Cloud", *Astrophys. J.* 524, L129 (1999)
- [2] M. Ikeda et al., "Large-Scale Mapping Observations of the CI ( $^3P_1 - ^3P_0$ ) and CO ( $J = 3 - 2$ ) Lines toward the Orion A Molecular Cloud", *Astrophys. J.* 527, L59 (1999)

## 28 Sakai (Hirofumi) Group

**Research Subjects:** Experimental study of quantum optics and atomic and molecular physics

**Members:** Hirofumi Sakai and Shinichirou Minemoto

We do experimental studies of quantum optics and atomic and molecular physics. Our research interests are as follows:

- (1) Alignment and deflection of neutral molecules by strong nonresonant laser fields
- (2) Structures and dynamics of molecular wave packet
- (3) Interaction of atoms and molecules with ultrashort and intense laser pulses.

The summary of our research activities in the academic year of 1999 is as follows:

### (1) Efficient production of multiply-ionized molecular ions using aligned molecules

We investigated the mechanism of efficient production of multiply-ionized molecular ions using aligned molecules. We directly compared the ion yields in different geometries with the molecular axis parallel and perpendicular to the polarization direction of the ionizing laser field. Our findings are as follows: 1) Using aligned molecules whose axis is parallel to the polarization direction, more highly-ionized molecular ions can be produced more efficiently even with the same intensity of the ionizing laser pulse. 2) This is consistent with the so-called "enhanced ionization" mechanism and its experimental evidence from a new point of view. 3) In the present experiments, the leading edge of the ionizing laser pulse seems to have played an important role to increase the internuclear distance of molecules.

### (2) Development of 2-dimensional ion imaging system

2-dimensional ion imaging system is an important and powerful tool to study photodissociation dynamics of molecules and to determine the degree of molecular alignment. We started the development of a newly designed system. We adopted a technique of velocity map imaging so that a high spatial resolution can be obtained. We have already finished the conceptual and detailed design and the development is now in progress.

**(3) Numerical simulation of molecular orientation** We have already developed the technique of molecular alignment using the anisotropic interaction between the induced dipole moment of molecules and the linearly-polarized laser field (this is an achievement of the collaborative study with Prof. Henrik Stapelfeldt's group of Department of Chemistry, University of Aarhus, Denmark). The technique of molecular orientation to arrange polar molecules in a "head-versus-tail" order is also very important for the study of steric effect in chemical reaction dynamics and the selective control of photodissociation products. We examined the possibility of molecular orientation using an asymmetric field, i.e., asymmetric potential created by the superposition of two-color ( $\omega+2\omega$ ) laser fields. We solved the Schrodinger equation numerically in an adiabatic regime where the orientation proceeds slowly compared to the rotational period of molecules and evaluated the laser intensity dependence and the time evolution of both orientation parameter  $\langle\langle \cos\theta \rangle\rangle$  and alignment parameter  $\langle\langle \cos^2\theta \rangle\rangle$ , where  $\theta$  is the angle between the polarization axis of the alignment laser and the internuclear axis. We found that our approach can be applicable to the rotationally well cooled molecules.

[1] Hirofumi Sakai, C. P. Safvan, Jakob Juul Larsen, Karen Marie Hilligsøe, Kasper Hald, and Henrik Stapelfeldt, "Controlling the alignment of neutral molecules by a strong laser field," *J. Chem. Phys.* **110**, 10235-10238 (1999).

[2] Jakob Juul Larsen, Hirofumi Sakai, C. P. Safvan, Ida Wendt-Larsen, and Henrik Stapelfeldt, "Aligning molecules with intense nonresonant laser fields," *J. Chem. Phys.* **111**, 7774-7781 (1999).

[3] Hirofumi Sakai, Jakob Juul Larsen, C. P. Safvan, Ida Wendt-Larsen, Karen Marie Hilligsøe, Kasper Hald, and Henrik Stapelfeldt, "Alignment of neutral molecules by a strong nonresonant laser field," *Proceedings of US-Japan Workshop on the Quantum Control of Molecular Reaction Dynamics*, in press.

## 29 Wakabayashi Group

**Research Subjects:** Molecular Mechanisms of Muscle Contraction and Its Regulation,  
Three-dimensional Image Analysis of Molecular Assemblies

**Member:** Takeyuki Wakabayashi, Takuo Yasunaga,  
Kimiko, Saeki

Our goal is to understand the molecular mechanism of motor proteins on the basis of atomic structure of proteins. To achieve this purpose, we use several approaches including

- (1) the development of new image reconstruction technique from electron cryomicrographs,
- (2) X-ray crystallography and high resolution electron cryomicroscopy,
- (3) the development of an electron microscope system with energy filter and high resolution CCD camera.
- (4) protein engineering and biochemical techniques

The electron cryo-microscopy is the most promising method to visualize proteins under the physiological conditions. Because the amplitude contrast produced by the frozen hydrated proteins is low, phase-contrast should be increased with large defocus. This requires that the spatial coherence of electron beam is good. We could compensate the blurring due to underfocus using the holographic image reconstruction technique (HIRT) we developed. We applied this method to visualize the three-dimensional structure of thin filaments and showed the calcium-induced changes of troponin. We reconstructed three-dimensional structure of actin-tropomyosin-troponin complex from rabbit skeletal muscle by electron cryo microscopy and image analysis using back projection. We found the mass of troponin head over the inner domain of actin in the presence of  $\text{Ca}^{2+}$ . On the other hand, troponin covered the whole frontal surface of actin in the absence of  $\text{Ca}^{2+}$  including the C-terminal region. We proposed a new model of calcium regulation from this new data. The structure of thick filaments of muscle is also solved at 5 nm resolution.

We use protein engineering to produce the mutant actins that activate myosin ATPase in a presence of tropomyosin-troponin and calcium much higher than the wild-type actin. We found that the replacement of single amino acid alanine230 to tyrosine is sufficient to produce this effect. We solved the atomic structure of the wild-type actin and mutant ones and found that the side chain of leucine236 is more exposed to solvent. The water structure in the  $\text{Ca}^{2+}$ -ATP binding site suggests that actin recognizes the hydrated form of the adenine ring of ATP.

(References)

1. Ishikawa, T. & Wakabayashi, T.: Calcium-Induced Changes in the Location and Conformation of Troponin in Skeletal Muscle Thick Filaments. *J. Biochem.* **126**, (1999)
2. Abe, A., Saeki, K., Yasunaga, T., and Wakabayashi, T.: Acetylation at the N-terminus of actin strengthens weak interaction between actin and myosin. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **268**, (2000) 14-19.
3. Matsuura, Y., Stewart, M., Kawamoto, M., Kamiya, N., Saeki, K., Yasunaga, T. & Wakabayashi, T.: Structural basis for the higher  $\text{Ca}^{2+}$ -activation of the regulated actin-activated myosin ATPase observed with *Dictyostelium/Tetrahymena* actin chimeras. *J.Mol.Biol.* **296** (2000) 579-595.
4. Saeki, K. & Wakabayashi, T.: A230Y mutation of actin on subdomain 4 is sufficient for higher calcium activation of actin-activated myosin adenosinetriphosphatase in the presence of tropomyosin-troponin. *Biochemistry* **39** (2000) 1324-1329.
5. Yokoyama, K., Ohkuma, S., Taguchi, S., Yasunaga, T., Wakabayashi, T. & Yoshida, M.: V-Type H<sup>+</sup>-ATPase/Synthase from a Thermophilic Eubacterium, *Thermus Thermophilus*. *J. Biol. Chem.* **275**, (2000)

## 30 Kuwajima Group

**Research Subjects:** Protein Folding, Molecular Chaperones, Protein Stability, Physicochemical Studies of Biological Macromolecules

**Member:** Kunihiro Kuwajima, Munehito Arai, & Teikichi Ikura<sup>1</sup>

We are studying the mechanism of *in vitro* protein folding and the mechanism of molecular chaperone action. Our goals are to elucidate the physical principles by which a protein organizes its specific native structure from the amino acid sequence and to elucidate how these principles are utilized or qualified by the molecular chaperones in a biological cell. For this purpose, we are using various physicochemical and protein engineering techniques including rapid reaction techniques.

Using the W64CC65A mutant of human lysozyme, we investigated the effects of an alternative disulfide bond on the structure, stability and folding of the protein by circular dichroism and fluorescence spectroscopy combined with a stopped-flow technique. Although the mutant should have the different main-chain structure from that of the wild-type protein around a loop region formed by the disulfide bond, the native state of the mutant has tightly packed side-chains and similar secondary structure to the wild-type. Guanidine hydrochloride-induced equilibrium unfolding transition of the mutant is reversible and highly cooperative without accumulation of intermediates, showing that the W64CC65A forms a stably folded structure in the native state. In the kinetic folding reaction, both the mutant and wild-type proteins accumulate a similar burst-phase intermediate having pronounced secondary structure within the dead time of the measurement. The results suggest that the structure around the loop region in the ( $\alpha$ -domain of human lysozyme is formed after the transition state of folding and that the effect of the alternative disulfide bond on the structure, stability and folding of human lysozyme appears mainly in the native state.

We have studied how nucleotides (ADP, AMP-PNP, and ATP) and the co-chaperonin GroES influence the GroEL-affected refolding of apo- $\alpha$ -lactalbumin. The refolding reactions induced by stopped-flow pH jumps were monitored by  $\alpha$ -lactalbumin tryptophan fluorescence. When GroES was absent, the interaction between GroEL and  $\alpha$ -lactalbumin could be well represented by a “cooperative-binding” model in which GroEL has two binding sites for  $\alpha$ -lactalbumin with the affinity of the second site being ten fold weaker than that of the first, so that there is negative cooperativity between the two sites. The affinity between GroEL and  $\alpha$ -lactalbumin was significantly reduced when ATP was present, while ADP and AMP-PNP did not alter the affinity. When GroES was present, not only ATP but also ADP and AMP-PNP were effective in reducing the affinity between GroEL and the refolding intermediate of  $\alpha$ -lactalbumin. The affinity at a saturating concentration of ADP or AMP-PNP was about 10 times lower than with GroEL alone. The ADP concentration at which the acceleration of the GroEL/ES-affected refolding of  $\alpha$ -lactalbumin was observed was higher than the concentration at which the nucleotide-induced formation of the GroEL/ES complex took place. These results indicate that GroEL/ES complex formation itself is not enough to reduce the affinity for  $\alpha$ -lactalbumin, and that further binding of the nucleotide to the GroEL/ES complex is required to reduce the affinity.

- [1] T. Koshihara, T. Hayashi, I. Miwako, I. Kumagai, T. Ikura, K. Kawano, K. Nitta, and K. Kuwajima: Expression of a synthetic gene encoding canine milk lysozyme in *Escherichia coli* and characterization of the expressed protein. *Protein Eng.* **12** (1999) 429-435.
- [2] T.P. Terada, and K. Kuwajima: Thermodynamics of nucleotide binding to the chaperonin GroEL studied by isothermal titration calorimetry: evidence for noncooperative nucleotide binding. *Biochim. Biophys. Acta* **1431** (1999) 269-281.
- [3] T. Makio, M. Arai, and K. Kuwajima: Chaperonin-affected refolding of  $\alpha$ -lactalbumin: Effects of nucleotides and the Co-chaperonin GroES. *J. Mol. Biol.* **293** (1999) 125-137.
- [4] M. Arai, P. Hamel, E. Kanaya, K. Inaka, K. Miki, M. Kikuchi, and K. Kuwajima: Effect of an alternative disulfide bond on the structure, stability, and folding of human lysozyme. *Biochemistry.* **39** (2000) 3472-3479.
- [5] T. Ikura, T. Hayano, N. Takahashi, and K. Kuwajima: Fast folding of *Escherichia coli* cyclophilin A: a hypothesis of a unique hydrophobic core with a phenylalanine cluster. *J. Mol. Biol.* **297** (2000) 791-802.
- [6] M. Arai, and K. Kuwajima: Role of the molten globule state in protein folding. *Adv. Protein Chem.* **53** (2000) 209-282.

---

<sup>1</sup>on leave of absence and currently working at Cambridge in England

## 31 Nose Group

**Research Subjects:** Molecular Mechanism of Neural Network Formation

**Member:** Akinao Nose, Takako Morimoto-Tanifuji

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.

### Molecular Mechanisms of Axon Guidance

#### 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.

#### Gain of function mutant screening

To systematically identify novel genes involved in axon guidance, we adopt 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 hope to identify novel genes that play roles in axon guidance.

### Molecular Mechanisms of Synaptogenesis

#### Wheat germ agglutinin (WGA) as an indicator of synaptogenesis

Wheat germ agglutinin (WGA) is a tracer that undergoes an interneuronal transfer. When WGA is expressed in muscles by transgene techniques, WGA is transported to the axons and cell bodies of motoneurons. Our recent studies showed that this retrograde transfer of WGA is correlated with the activity of neuromuscular synapses. We plan to use this system to screen for novel genes involved in synaptogenesis.

### III

## 1998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 物理数学 I : 松尾 泰

1. 複素関数論
  - 1.1 無限和と収束性
  - 1.2 解析関数
  - 1.3 多価関数とリーマン面
  - 1.4 正則関数の基本定理
  - 1.5 留数積分
  - 1.6 無限級数展開
  - 1.7 ガンマ関数、ベータ関数、ツェータ関数
  - 1.8 漸近展開と最急降下法
  - 1.9 等角写像
2. 微分方程式論
  - 2.1 常微分方程式の基礎
  - 2.2 求積法による解法
  - 2.3 線形微分方程式
  - 2.4 Fourier 変換、Laplace 変換
  - 2.4 確定特異点型微分方程式
  - 2.5 超幾何関数
  - 2.6 直交多項式
  - 2.7 球面調和関数
  - 2.8 円筒関数
  - 2.9 偏微分方程式の基礎

### 1.1.2 物理実験学 : 坪野 公夫

1. 序論
  - 1.1 講義の目的
  - 1.2 理論と実験
  - 1.3 実験例 1:光速度  $c$  の測定
  - 1.4 実験例 2:binary pulsar の発見
2. 実験データの統計処理
  - 2.1 誤差, 母集団, サンプル
  - 2.2 確率分布関数
  - 2.3 最小 2 乗法
  - 2.4  $\chi^2$  検定
  - 2.5 仮説検定
3. 物理単位系
  - 3.1 SI 単位系
  - 3.2 基礎物理定数
4. 論文の書き方
  - 4.1 論文の構成
  - 4.2 文章を書く心得
  - 4.3 論文を書くための計算機環境
5. 線型応答系の基礎
  - 5.1 時間領域および周波数領域での表現
  - 5.2 インパルス応答
  - 5.3 周波数応答
  - 5.4 線型系と因果律
6. 線型系の制御
  - 6.1 フィードバックのメリット
  - 6.2 系の安定, 不安定
  - 6.3 ナイキストの安定条件
7. 信号と雑音の処理
  - 7.1 パワースペクトル
  - 7.2 最適フィルター

### 1.1.3 解析力学・量子論 : 塚田 捷

1. 力学の原理
  - 1.1 つりあいの条件
  - 1.2 ラグランジュの運動方程式
  - 1.3 電磁場中の荷電粒子のラグランジュアン
  - 1.4 ハミルトンの原理 I
  - 1.5 対称性と保存則

- 2. 正準方程式と正準変換
  - 2.1 ハミルトンの正準方程式 II
  - 2.2 正準変換
  - 2.3 正準変換の不変式
  - 2.4 リュ・ビルの定理
  - 2.5 ポアソン括弧式
  - 2.6 無限小正準変換と連続正準変換
  - 2.7 ハミルトン-ヤコビの方程式
- 3. 古典力学から量子力学へ
  - 3.1 古典力学と幾何光学
  - 3.2 相対論

- 3.3 作用変数・角変数と断熱定理
- 3.4 輻射場の記述
- 3.5 古典力学の限界と量子力学の誕生
- 4. 量子力学序論
  - 4.1 シュレーディンガー - 方程式の導入
  - 4.2 不確定性原理
  - 4.3 系の時間発展
  - 4.4 束縛状態と散乱状態
  - 4.5 井戸型ポテンシャル
  - 4.6 トンネル過程

### 1.1.4 電磁気学：相原 博昭

- 1. ベクトル解析の復習
  - 1.1 極座標と円柱座標
  - 1.2 任意の直交曲線座標におけるベクトル解析
  - 1.3 ディラックのデルタ関数
  - 1.4 ヘルムホルツの定理
- 2. マクスウェル方程式
  - 2.1 電場の発散と回転（クーロンの法則、ガウスの法則、静電ポテンシャル、ファラデーの電磁誘導の法則）
  - 2.2 磁場の発散と回転（磁荷、アンペールの法則、マクスウェルの変位電流）
  - 2.3 真空中のマクスウェル方程式（磁荷、光）
  - 2.4 単位系：MKS vs CGS
  - 2.5 エネルギー保存則（ポインティングの定理）
  - 2.6 マクスウェルの応力テンソル
  - 2.7 運動量保存と角運動量保存
  - 2.8 真空中の平面波と偏光平面波
  - 2.9 電磁波のエネルギーと運動量
  - 2.10 マクスウェル方程式のポテンシャル形式
  - 2.11 ゲージ変換
  - 2.12 クーロンゲージとローレンツゲージ
  - 2.13 ローレンツ力のポテンシャル形式
- 3. 特殊相対論とローレンツ共変なマクスウェル方程式
  - 3.1 ローレンツ変換
  - 3.2 速度合成則、時間の遅れとローレンツ収縮
  - 3.3 時空のダイアグラム
  - 3.4 4元ベクトル、スカラー、テンソル
  - 3.5 4元運動量
  - 3.6 連続の方程式と4元カレント
  - 3.7 4元ベクトルポテンシャル、場のテンソルとマクスウェル方程式の共変形
  - 3.8 電磁場の変換
  - 3.9 一定速度で運動する点電荷が作る電場と磁場

- 3.10 導線中を流れる電流の作る場
- 3.11 ローレンツ力の公式の共変形
- 4. 静電場と静電ポテンシャルの計算法
  - 4.1 ポアソン方程式とラプラス方程式
  - 4.2 静電場の境界条件
  - 4.3 グリーンの定理
  - 4.4 境界条件と解の一意性
  - 4.5 グリーン関数による形式的な解
  - 4.6 グリーン関数と鏡像法
  - 4.7 完全導体と静電場のエネルギー
  - 4.8 静電容量
  - 4.9 変数分離法
  - 4.10 多重極展開
  - 4.11 モノポールとダイポール
- 5. 静磁場
  - 5.1 ビオ・サバルの法則
  - 5.2 静磁場の境界条件
  - 5.3 ベクトルポテンシャルの多重極展開
  - 5.4 ダイポールの作る静磁場
  - 5.5 インダクタンスと静磁場のエネルギー
- 6. 物質中の静電場と静磁場
  - 6.1 静電分極
  - 6.2 電気変位
  - 6.3 線形誘電体
  - 6.4 誘電体のエネルギー
  - 6.5 磁化
  - 6.6 磁化した物質中のアンペールの法則
  - 6.7 線形磁性体
  - 6.8 強磁性体
  - 6.9 物質中のマクスウェル方程式

## 1.2 3年生 夏学期

### 1.2.1 統計力学 I : 和達 三樹

1. 熱力学
  - 1.1 熱力学の基本的概念
  - 1.2 熱力学第 1 法則
  - 1.3 熱力学第 2 法則
  - 1.4 熱力学第 3 法則
  - 1.5 熱力学関数
2. 統計力学の手法
  - 2.1 小正準集団
  - 2.2 正準集団
  - 2.3 大正準集団
3. 量子統計力学
  - 3.1 量子統計力学
  - 3.2 黒体輻射
  - 3.3 固体の比熱
  - 3.4 理想フェルミ気体
  - 3.5 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 ゴム弾性
  - 4.4 磁性体
  - 4.5 相転移
5. 非平衡統計力学
  - 5.1 ボルツマン方程式
  - 5.2 ブラウン運動
  - 5.3 線形応答理論

### 1.2.2 物理数学 II : 大塚 孝治

1. 偏微分方程式
2. 1 階偏微分方程式
  - 2.1 完全解と一般解
  - 2.2 準線形方程式
  - 2.3 シャルピーの方法
3. 2 階偏微分方程式
  - 3.1 三つの型
  - 3.2 熱伝導方程式
  - 3.3 グリーン関数
  - 3.4 波動方程式
  - 3.5 ラプラス方程式
4. 群論の基本
  - 4.1 群の定義と例
  - 4.2 部分群
  - 4.3 剰余類
  - 4.4 共役類
  - 4.5 不変部分群、因子群、準同型
  - 4.6 例
5. 群の表現
  - 5.1 線形ベクトル空間
  - 5.2 群の表現
  - 5.3 ユニタリ空間と内積
  - 5.4 既約表現
  - 5.5 シューアの補助定理
  - 5.6 直交関係
  - 5.7 既約の条件
  - 5.8 群の表現の例
6. 連続群
  - 6.1 Lie 群
  - 6.2 Lie 環
  - 6.3 不変積分
  - 6.4  $SU(2)$  の表現
  - 6.5 回転群の表現

### 1.2.3 量子力学 I : 江口 徹

1. 重ねあわせの原理
  - 1.1 重ねあわせの原理
  - 1.2 数学的定式化
  - 1.3 正準交換関係
2. Schrödinger 方程式
  - 2.1 Schrödinger 方程式
  - 2.2 確率の流れ
  - 2.3 時間発展, 空間並進の演算子
  - 2.4 1 次元のポテンシャル問題
3. 角運動量
  - 3.1 軌道角運動量
  - 3.2 一般の角運動量
  - 3.3 角運動量の行列要素

- 3.4 回転の演算子
- 3.5  $SO(3)$  と  $SU(2)$  の関係
- 3.6 角運動量の合成
- 3.7 Clebsch-Gordan 係数
- 4. 3次元の Schrödinger 方程式
  - 4.1 Landau 準位
  - 4.2 時間に依存しない摂動 (縮退の無い場合)
  - 4.3 縮退がある場合の摂動論

- 4.4 時間に依存する場合の摂動論
- 4.5 Fermi の golden rule
- 5. WKB 近似
  - 5.1 WKB 近似
  - 5.2 WKB の接続公式と Airy 関数
- 6. 生成消滅演算子
  - 6.1 生成消滅演算子

### 1.2.4 現代実験物理学 I : 長谷川修司、福山寛、桑島邦博

- 1. 序論
  - 1.1 現代物理学の分野と周辺
  - 1.2 ノーベル賞の実験
  - 1.3 物理学で扱う長さ・エネルギー
- 2. 実験環境をつくる
  - 2.1 真空の生成
    - 気圧、真空技術と物理学の発展の歴史、真空の生成・計測、気体分子運動論
  - 2.2 低温の生成
    - 寒剤の性質、 $3\text{He}$ - $4\text{He}$  希釈冷却と断熱消磁冷却の原理
  - 2.3 温度測定
    - 温度スケール、各種の温度計
  - 2.4 基礎的な実験技術
    - 熱伝達と熱絶縁、除振と電磁シールド、超伝導マグネット、SQUID
  - 2.5 低温での物性実験
    - 超伝導、超流動、磁性体の実験
- 3. 物質の多様性
  - 3.1 構造による分類
    - 3.2 物性による分類
  - 4. 物質の構造・状態を調べる
    - 4.1 X線の利用
      - X線の発見・発生、分光、散乱・回折、透過、CT、光電子分光、X線天文学、X線リソグラフィ
    - 4.2 電子線の利用
      - 電子線の発生、散乱・回折
    - 4.3 顕微鏡法
      - 光学顕微鏡、電子顕微鏡、トンネル顕微鏡
  - 5. 生物物理実験学
    - 5.1 生物物理学概論
    - 5.2 タンパク質・核酸の立体構造解析法
      - 分光学的測定法
      - X線溶液散乱
    - 5.3 生体分子反応の解析法
      - 反応の熱力学的解析法、速度論的解析法
      - 酵素反応解析法
    - 5.4 遺伝子実験法
      - 制限酵素、遺伝子クローニング

### 1.2.5 電磁波物理学 : 山本 智

- 1. 電磁波の発生
  - 1.1 電磁ポテンシャルと双極子放射
  - 1.2 高速で運動する電荷からの電磁波
- 2. 電磁波の伝播
  - 2.1 導体と誘電体中の電磁波
  - 2.2 境界面での反射と屈折
  - 2.3 全反射とエバネッセント波
  - 2.4 導波管
- 3. 電磁波の偏光
  - 3.1 直線偏光と円偏光
  - 3.2 ストークスパラメーター
    - 3.3 準単色光の偏光、可干渉行列
- 4. 電磁波の干渉
  - 4.1 波面分割による干渉
  - 4.2 振幅分割による干渉
  - 4.3 van Cittert-Zernike の定理
  - 4.4 電波干渉計と開口合成
- 5. 電磁波の回折
  - 5.1 ホイヘンス・フレネルの原理
  - 5.2 キルヒホッフの積分定理
  - 5.3 フラウンフォーファー回折とフレネル回折

## 1.2.6 流体力学：神部 勉

1. 流体運動の例
  - 巨視的運動と微視的運動
  - オイラー的記述とラグランジュ的記述
2. 相対運動
  - 変形速度テンソル、渦度ベクトル、
  - 応力テンソル、
3. 保存方程式
  - 質量保存、運動量保存、エネルギー保存
4. 完全流体の運動
  - ベルヌーイの定理、ケルビンの循環定理、
  - 速度ポテンシャル、非圧縮・渦なし流
5. 2次元非圧縮・渦なし流れと複素関数
6. 水波
  - 表面波と分散関係式、KdV 方程式
  - ソリトン解
7. 音波と衝撃波
  - 波動方程式、非線形波動、衝撃波
8. 渦運動
  - 渦糸、渦輪、バーガース渦、
  - 渦度のダイナミクス
9. 熱対流とカオス
  - レーリー・ベナール対流、ローレンツ系、
  - 状態の分岐とカオスへの遷移
10. 粘性流体の運動
  - ナビエ・ストークス方程式、
  - レイノルズの相似法則
11. 非線形ダイナミクス
  - 常微分方程式の解の安定性とカオス
12. 乱流
  - 状態の遷移、発達した乱流

## 1.3 3年生 冬学期

### 1.3.1 現代実験物理学 II (前半): 牧島 一夫

- |   |   |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 片対数グラフに慣れよう           <ol style="list-style-type: none"> <li>1.1 金属の熱伝導度と電気抵抗</li> <li>1.2 大気の大気圧分布と宇宙の暗黒物質</li> <li>1.3 水の状態変化と蒸気圧</li> </ol> </li> <li>2. 両対数グラフに慣れよう           <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1 黒体放射とシュテファン-ボルツマンの法則</li> <li>2.2 太陽の温度、地球の温度</li> <li>2.3 宇宙マイクロ波背景放射と膨張宇宙の観測</li> </ol> </li> <li>3. 可視光           <ol style="list-style-type: none"> <li>3.1 なぜ光は「可視光」なのか</li> <li>3.2 なぜ金属は不透明なのか</li> </ol> </li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>3.3 半導体と赤外線</li> <li>4. X線と原子           <ol style="list-style-type: none"> <li>4.1 X線・紫外線と大気</li> <li>4.2 物質によるX線の吸収</li> <li>4.3 放射線検出器(その1)</li> </ol> </li> <li>5. 光子と自由電子           <ol style="list-style-type: none"> <li>5.1 自由電子による光の散乱</li> <li>5.2 古典電子半径とコンプトン波長</li> <li>5.3 放射線検出器(その2)</li> </ol> </li> </ol> |
|---|---|

### 1.3.2 現代実験物理学 II (後半): 駒宮 幸男

- |  |   |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Introduction (単位, 物理定数)</li> <li>2. 相対論的運動学 (ローレンツ変換, 粒子の散乱と崩壊)</li> <li>3. 粒子と物質の相互作用 (荷電粒子, 光子と物質の反応)</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>4. 粒子検出器 (飛跡測定器, カロリメーター, 粒子識別など)</li> <li>5. 加速器 (サイクロトロンからコライダーへ)</li> <li>6. 歴史と展望</li> </ol> |
|--|---|

### 1.3.3 量子力学 II: 藤川 和男

- |  |   |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 量子力学の原理           <ul style="list-style-type: none"> <li>S-行列とユニタリー性、相互作用表示と Fermi の黄金律</li> </ul> </li> <li>2. ポテンシャル散乱の一般論           <ul style="list-style-type: none"> <li>光学定理、Coulomb 散乱 (Born 近似)</li> </ul> </li> <li>3. 部分波展開と位相のずれ           <ul style="list-style-type: none"> <li>T-行列の Legendre 展開、位相のずれの物理的な意味</li> </ul> </li> <li>4. 低エネルギーでの S 波散乱           <ul style="list-style-type: none"> <li>散乱半径 (scattering length) <math>a</math> と有効距離 (effective range) <math>r_0</math></li> </ul> </li> <li>5. 時間反転不変性と S 行列           <ul style="list-style-type: none"> <li>詳細つりあい (detailed balance) 統計力学の原理との関係</li> </ul> </li> <li>6. 同一粒子と統計性 (スピンと統計)</li> </ol> | <p>粒子の置換と波動関数の対称性、散乱への応用</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>7. 原子の構造と周期律表           <ul style="list-style-type: none"> <li>Hartree の近似</li> </ul> </li> <li>8. Thomas-Fermi の統計模型</li> <li>9. 2原子分子           <ul style="list-style-type: none"> <li>Born-Oppenheimer 近似、<math>H_2</math> 分子</li> </ul> </li> <li>10. 第二量子化           <ul style="list-style-type: none"> <li>Bose 場と Fermi 場、非相対論的量子力学との同等性</li> </ul> </li> <li>11. 電磁場と荷電粒子の相互作用           <ul style="list-style-type: none"> <li>ゲージ不変性と Aharonov-Bohm 効果</li> </ul> </li> <li>12. 電磁場と荷電粒子の相互作用           <ul style="list-style-type: none"> <li>Dipole 近似、Einstein の A 係数と B 係数、自然幅</li> </ul> </li> </ol> |
|--|---|

### 1.3.4 生物物理学: 若林健之、桑島邦博、能瀬聡直

- |  |   |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 生物物理学とは? (桑島)</li> <li>2. タンパク質の生物物理学 (桑島)           <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1 化学構造と立体構造               <ul style="list-style-type: none"> <li>タンパク質の化学構造</li> <li>タンパク質の立体構造</li> </ul> </li> </ol> </li> </ol> | <p>タンパク質構造ファミリー</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>2.2 立体構造の安定化因子           <ul style="list-style-type: none"> <li>静電相互作用、van der Waals 相互作用、水素結合</li> <li>水の性質と疎水性相互作用</li> <li>イオン水溶液中での静電相互作用</li> </ul> </li> </ol> |
|--|---|

### 2.3 構造転移の分子機構

ポリペプチドのヘリックス-コイル転移  
タンパク質のアフォールディング転移

### 2.4 タンパク質のフォールディング

熱力学仮説

フォールディングの分子機構

タンパク質の細胞内フォールディングと分子シャペロン

## 3. タンパク質分子集合体の生物物理学（若林）

### 3.1 生物構造の階層性（タンパク質分子・分子集合体・細胞）

タンパク質学事始め

生物進化の年代記

真核細胞の特徴

機能タンパク質でのATP分解との共役反応

### 3.2 モータータンパク質と細胞骨格

アクチン・フィラメントの構造とその形成、セルフ・アセンブリ

ミオシン・フィラメント構造とその形成、ATPとの相互作用

ミオシン・スーパーファミリーと遺伝子解析

### 3.3 モータータンパク質の原子構造とエネルギー変換機構

電子顕微鏡像からの三次元構造再構成

X線結晶解析（エバルト球，バターソン関数，多重同型置換法）

ミオシンとキネシン、FoF1-ATPase（回転モーター）

## 4. 脳神経系の生物物理学（能瀬）

### 4.1 神経系における信号の生成と伝達機構

脳神経系における情報の流れ

神経細胞の電気的性質

イオンチャンネル

活動電位、神経興奮の伝達

### 4.2 脳と遺伝子

脳の設計図

脳神経系の発生

神経細胞の生成と特異化

### 4.3 神経ネットワーク形成機構

神経ネットワークの概念

軸索誘導およびシナプス形成の分子機構

### 4.4 脳高次機能

視覚における情報処理

記憶の分子メカニズム

## 1.3.5 光学：長澤 信方

### 1. CD プレイヤーに光学をみる

### 2. レンズの公式：幾何光学の原理、「光線解析入門」

### 3. 光ファイバー：Wood の話

### 4. 幾何光学の限界：波動論へ

### 5. 波動光学：ホイヘンスの原理と Maxwell 方程式：レンズの公式の導出

### 6. 回折理論：周期パターンとランダムパターンによる回折と関連事項（SOR のコヒーレンスの話題など）

### 7. 回折理論とその限界、物質科学へ：境界条件の妥当性の実験的検証など

### 8. 光の干渉とホログラフィーの原理：C60 分子の干渉

### 9. 新しい概念の融合：原子のホログラフィー

### 10. 偏光の理論：基礎理論抄と位相子

### 11. 量子光学抄

### 12. レーザー入門

### 13. 光物性と光学

### 14. 光学の展望

## 1.3.6 統計力学 II：小形正男

### 1. 相転移現象

#### 1.1 対称性の自発的破れ

#### 1.2 ランダウの2次相転移理論

#### 1.3 平均場近似

#### 1.4 厳密に解けるモデル

#### 1.5 GL 理論

### 1.6 くりこみ群の基礎

### 2. 非平衡統計力学

#### 2.1 線形応答理論

#### 2.2 ボルツマン方程式

#### 2.3 種々の輸送係数

## 1.4 4年生 夏学期

### 1.4.1 固体物理 I : 青木 秀夫

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1. 固体の凝縮メカニズム           <ul style="list-style-type: none"> <li>1.1 原子から固体へ</li> <li>1.2 化学結合と結晶構造</li> </ul> </li> <li>2. 結晶構造           <ul style="list-style-type: none"> <li>2.1 点群と空間群</li> <li>2.2 Bravais 格子と Brillouin 帯</li> </ul> </li> <li>3. 電子のバンド構造とフェルミ面           <ul style="list-style-type: none"> <li>3.1 Bloch の定理</li> <li>3.2 バンド・ギャップとフェルミ面</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>3.3 強結合模型</li> <li>4. 半導体           <ul style="list-style-type: none"> <li>4.1 バンド構造と電子物性</li> <li>4.2 電子と正孔</li> </ul> </li> <li>5. 金属と絶縁体           <ul style="list-style-type: none"> <li>5.1 Wilson の理論</li> <li>5.2 金属・絶縁体転移</li> </ul> </li> </ul> |
|---|---|

### 1.4.2 原子核物理学 : 酒井 英行

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1. 原子核の大きさ           <ul style="list-style-type: none"> <li>1.1 電子散乱と電荷分布</li> </ul> </li> <li>2. 質量公式と安定性           <ul style="list-style-type: none"> <li>2.1 半実験的質量公式</li> <li>2.2 超重元素 (<math>Z=114</math>) 発見へ</li> <li>2.3 中性子星の大きさを見積もる</li> </ul> </li> <li>3. 核力と中間子           <ul style="list-style-type: none"> <li>3.1 二核子系</li> <li>3.2 交換力とスピン軌道力</li> </ul> </li> <li>4. 重陽子           <ul style="list-style-type: none"> <li>4.1 テンソル力と D 状態</li> <li>4.2 磁気モーメントと四重極モーメント</li> </ul> </li> <li>5. 魔法数と殻模型</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>6. 原子核のハートリー・フォック理論</li> <li>7. 原子核の集団運動           <ul style="list-style-type: none"> <li>7.1 回転運動モデル</li> <li>7.2 振動モデル</li> </ul> </li> <li>8. 核反応と巨大共鳴           <ul style="list-style-type: none"> <li>8.1 和則</li> <li>8.2 電気双極巨大共鳴と TDA</li> <li>8.3 スピン振動巨大共鳴とクオーク自由度</li> </ul> </li> <li>9. 最近の話題           <ul style="list-style-type: none"> <li>9.1 スピン偏極現象の核物理</li> <li>9.2 原子核とクオーク模型</li> </ul> </li> </ul> |
|--|--|

### 1.4.3 一般相対論 : 須藤 靖

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1. 特殊相対論           <ul style="list-style-type: none"> <li>1.1 Newton 力学と Galilei の相対性原理</li> <li>1.2 Maxwell 方程式と Lorentz 変換</li> <li>1.3 光速度の測定とエーテル仮説</li> <li>1.4 Minkowski 時空</li> <li>1.5 Minkowski 時空におけるスカラー、ベクトル、テンソル</li> <li>1.6 物理法則の共変形式</li> </ul> </li> <li>2. 一般相対性原理とその数学的表現           <ul style="list-style-type: none"> <li>2.1 特殊相対論の限界</li> <li>2.2 一般相対論の概念構成</li> <li>2.3 一般座標変換とテンソル</li> <li>2.4 共変微分</li> <li>2.5 リーマン接続とクリストッフェル記号</li> </ul> </li> <li>3. 重力場における粒子の運動</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>3.1 測地線方程式</li> <li>3.2 Newton 理論との比較</li> <li>3.3 接続係数と相互作用: <math>\Gamma_{\alpha\beta}^{\mu}</math> と <math>A^{\mu}</math></li> <li>3.4 エネルギー運動量テンソル</li> <li>4. 重力場の方程式           <ul style="list-style-type: none"> <li>4.1 Mach の原理</li> <li>4.2 Einstein 方程式</li> <li>4.3 宇宙定数</li> <li>4.4 変分原理による定式化</li> <li>4.5 座標変換に対する不変性: Bianchi の恒等式とエネルギー運動量保存則</li> </ul> </li> <li>5. Schwarzschild 時空           <ul style="list-style-type: none"> <li>5.1 球対称重力場の計量</li> <li>5.2 導出の概略</li> <li>5.3 一般相対論の検証</li> </ul> </li> </ul> |
|---|--|

- 5.4 Schwarzschild black hole
- 5.5 Black hole 近傍での質点の運動
- 5.6 Black hole 近傍からの輻射: Eddington luminosity
- 6. 重力波
  - 6.1 Einstein 方程式の弱場近似
  - 6.2 重力波の平面波解

- 6.3 重力波の偏光
- 6.4 測地線偏差の方程式と重力波検出原理
- 6.5 保存則とエネルギー運動量擬テンソル
- 6.6 弱い重力波に対するエネルギー運動量擬テンソル
- 6.7 重力波輻射の四重極公式

#### 1.4.4 プラズマ物理学 : 高瀬 雄一

##### 0. プラズマとは?

##### 1. 単一荷電粒子の運動

- 1.1 一様電磁場中の粒子ドリフト
- 1.2 非一様磁場中の粒子ドリフト
- 1.3 時間変化する電磁場中の粒子ドリフト
- 1.4 マッピング

##### 2. 流体としてのプラズマ

- 2.1 プラズマの流体方程式
- 2.2 流体方程式と粒子ドリフトの関係
- 2.3 一流体電磁流体力学
- 2.4 電磁流体力学的平衡

##### 3. プラズマ中の衝突過程

- 3.1 完全電離と非完全電離プラズマ

##### 3.2 完全電離プラズマ中の衝突

##### 3.3 プラズマの拡散

##### 4. 流体プラズマ中の波動と不安定性

- 4.1 非等方分散媒体中の小振幅波動
- 4.2 磁場のないプラズマ中の波動
- 4.3 磁場のあるプラズマ中の波動
- 4.4 流体プラズマの不安定性

##### 5. プラズマの運動論

- 5.1 ヴラソフ方程式
- 5.2 プラズマ波動の運動論的效果
- 5.3 速度空間不安定性と非線形理論

#### 1.4.5 場の量子論 : 柳田 勉

##### 1. 相対論的量子力学

- 1.1 Dirac 方程式
- 1.2 Dirac 方程式の非相対論的極限
- 1.3 Dirac 方程式の Lorentz Covariance
- 1.4 Lorentz 群の Spinor 表現
- 1.5 自由粒子の Dirac 方程式の解
- 1.6 波束の負のエネルギー解
- 1.7 負のエネルギー解と Hole 理論
- 1.8 負のエネルギー解の問題と場の量子論

##### 2. 場の量子論

- 2.1 場のカノニカル量子化 (一般論)
- 2.2 対称性と保存則
- 2.3 自由場の量子化 (スピンゼロの実場)
- 2.4 場の量子論の非相対論的量子力学への応用
- 2.5 複素自由場の量子化
- 2.6 Dirac 場の量子化

#### 1.4.6 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。

##### 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

## 1.5 4年生 冬学期

### 1.5.1 宇宙物理学 : 佐藤 勝彦

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1. 膨張宇宙と観測</li> <li>1.1 宇宙の階層構造</li> <li>1.2 Friedmann 宇宙モデル</li> <li>1.3 膨張則</li> <li>1.4 宇宙のエネルギー密度</li> <li>1.5 宇宙の年齢</li> <li>1.6 3K 宇宙背景放射</li> <li>2. 標準ビッグバン宇宙モデル</li> <li>2.1 輻射に満ちた初期宇宙モデル</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>2.2 宇宙初期におけるニュートリノ相互作用</li> <li>2.3 宇宙初期における元素合成</li> <li>2.4 銀河、超銀河団等宇宙の大構造の形成</li> <li>3. 宇宙の創生</li> <li>3.1 相互作用の統一理論と自発的対称性の破れ</li> <li>3.2 宇宙における相転移と宇宙膨張</li> <li>3.3 物質反物質非対称性の起源</li> <li>3.4 時空多様体の創生</li> </ul> |
|---|--|

### 1.5.2 素粒子物理学 : 蓑輪 眞

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1. 自然単位系と物理量の次元</li> <li>2. 断面積と崩壊率</li> <li>3. 崩壊率と質量の幅</li> <li>4. レプトンの現象と2種の弱い相互作用</li> <li>5. レプトン数保存則・レプトンユニバーサルティ</li> <li>6. クォークの現象と2種の弱い相互作用</li> <li>7. 電子・陽電子衝突実験とクォークの色</li> <li>8. 4次元 vector と Mandelstam 変数</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>9. 状態の混合とニュートリノ振動</li> <li>10. 電磁相互作用、Dirac 方程式と Feynman diagram</li> <li>11. 素粒子の発生と検出</li> <li>12. spin と parity とヘリシティ</li> <li>13. ベータ崩壊と弱い相互作用</li> <li>14. GIM 機構と charm の発見</li> <li>15. ゲージ変換と相互作用、weak boson と電・弱統一理論</li> </ul> |
|---|--|

### 1.5.3 固体物理学 II : 樽茶 清悟、壽榮松 宏仁

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1. 電子間相互作用<br/>誘電関数、スクリーニング、プラズマ振動など</li> <li>2. 格子運動と電子・格子相互作用<br/>コーン異常、パイエルス移転、ポーラロンなど</li> <li>3. 磁性<br/>反磁性と常磁性、スピン間相互作用、磁気秩序と近</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>似理論、磁気共鳴</li> <li>4. 超伝導<br/>超伝導現象、BCS 理論、磁束の量子化、ジョセフソン効果</li> </ul> |
|--|---|

### 1.5.4 物性物理学特論 : 塚田捷、長谷川修司、小森文夫

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1. 表面物理とは</li> <li>1.1 現状と展望</li> <li>2. 表面における電子</li> <li>2.1 表面のバンドの特徴</li> <li>2.2 表面状態</li> <li>2.3 仕事関数</li> <li>3. 密度汎関数法</li> <li>4. 表面構造再構成と電子論的機構</li> <li>4.1 再構成構造とは</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>4.2 表面電子状態と構造</li> <li>5. 吸着現象の基礎</li> <li>5.1 物理吸着</li> <li>5.2 化学吸着</li> <li>5.3 解離吸着</li> <li>6. 表面の電子過程</li> <li>6.1 トンネル効果による表面現象</li> <li>6.2 走査トンネル顕微鏡の理論</li> <li>7. 表面超構造</li> </ul> |
|---|--|

- 8. 表面原子配列の解析
  - 8.1 回折法
  - 8.2 顕微鏡法
  - 8.3 動的過程
- 9. 表面電子状態の解析
  - 9.1 表面電子状態
  - 9.2 (逆)光電子分光法
  - 9.3 トンネル分光法
- 10. 走査トンネル顕微鏡
  - 10.1 走査トンネル顕微鏡の原理
  - 10.2 表面原子構造観察
  - 10.3 局所電子状態測定
  - 10.4 表面バンドの観測
- 11. 電子分光
  - 11.1 光電子分光によるバンド分散測定
  - 11.2 光電子分光による原子結合状態の観測
  - 11.3 レーザー光を用いた電子分光測定
  - 11.4 電子エネルギー損失分光
- 12. 表面電子輸送
  - 12.1 表面空間電荷層の2次元電子系
  - 12.2 表面電子バンドの2、1次元電子系
  - 12.3 原子マニピュレーション
- 13. 表面超薄膜磁性
  - 13.1 強磁性相転移
  - 13.2 スピン分解光電子分光測定
  - 13.3 磁気カー効果測定

## 2 各賞受賞者紹介

### 2.1 江橋節郎名誉教授：国際生物学賞受賞

江橋節郎名誉教授は、第十五回国際生物学賞を受賞された。これは筋肉収縮制御機構に関してカルシウム・イオンが果たす役割を発見し、その物質的基礎として、筋小胞体へのカルシウムのATP依存的取り込みの発見、細いフィラメントを構成するカルシウム受容タンパク質であるトロポニンの発見などの業績に対する高い評価によるものであり、1999年11月29日に日本学士院において天皇皇后両陛下ご臨席のもとに、ご夫人生御同席の上で受賞された。

### 2.2 堀田凱樹名誉教授：紫綬褒章

堀田凱樹名誉教授は、生物物理学における優れた業績に対して、平成11年度の紫綬褒章を受賞された。堀田先生は遺伝学の研究にショウジョウバエを利用した先駆者であり、行動遺伝学の開発、筋肉・感覚器の分子生理学、神経回路形成の分子機構の解析、神経細胞とグリアとの分化運命決定機構の解明など多くの研究成果をあげてこられた。また、わが国におけるショウジョウバエを用いた分子遺伝学研究の推進に大きな貢献をされた。

### 2.3 塚田捷教授：表面科学学会学会賞

走査トンネル顕微鏡および原子間力顕微鏡の理論的な基礎を解明した塚田捷教授の研究に対して、表面科学学会学会賞が与えられた。塚田教授は第一原理電子状態理論によって探針の原子尺度の構造までも取り入れたSTM像の理論シミュレーション法を開発し、これを種々の興味深い表面系に応用して、STMの原子尺度分解能の機構を始めて明らかにした。他、探針の構造や原子種が像やSTSスペクトルにどのような効果を与えるかを実証的に明らかにした。非平衡開放系の電子状態計算法を開発し、表面およびナノ構造の理論分野に貢献した。

### 2.4 大野圭司助手（樽茶研究室）：井上研究奨励賞

樽茶研究室の大野助手は、「Enhanced Magnetic Valve Effect and Magneto-Coulomb Oscillations in Ferromagnetic Single Electron Transistor」の論文に対して、井上研究奨励賞を受賞された。この論文では、強磁性体電極を持つ単一電子トランジスタを作成し、その電気伝導に関して、トンネル型磁気抵抗比の増大、及び磁場によるクーロン振動が見出されている。この結果は、それぞれ、クーロンブロッケイドに伴う高次トンネルの効果、強磁性体のスピン分極に伴う化学ポテンシャルの磁場変調の効果に起因するもので、新しい単一電子トンネル現象の物理として注目されている。

### 2.5 藤貴夫助手（小林研究室）：日本光学会奨励賞

小林研究室の藤助手は「Constructive and destructive two-pulse excitation investigated with a white-light Michelson interferometer」の論文に対して平成11年度日本光学会奨励賞を受賞された。この論文では、白色光を光源としたマイケルソン干渉計を用いて、2つの超短光パルス励起に対する試料の応答の様子を観測した実験について述べられている。この実験は、同位相の2パルス励起が互いに強めあって、その結果大きな励起効果をもたらすのに対し、逆位相の2パルス励起では、互いに相殺し合って結果的に励起効果が打ち消されることを実験的に示したもので、光波の位相制御による量子状態の制御の観測法を実証したものである。

### 3 人事異動

[物理教室に来られた方々]

駒宮幸男	教授	1999年8月1日	配置換(素粒子セ)
酒井広文	助教授	1999年10月1日	転入(電総研)
岡 朋治	助手	1999年4月1日	採用
藤 貴夫	助手	1999年4月1日	採用
安東正樹	助手	1999年8月1日	採用
麻生邦仁子	物理事務室	1999年4月1日	転入(京都大学)
広瀬真弓	事務分室	1999年5月10日	採用
志村政子	物理図書室	1999年6月1日	採用

[物理教室から移られた方々]

石原正泰	教授	2000年3月31日	定年退職
釜江常好	教授	2000年3月31日	定年退職
神部 勉	教授	2000年3月31日	定年退職
ベンツ・ヴォルフガング	講師	2000年3月31日	退職(4.1 東海大学)
八木隆多	助手	1999年5月31日	退職(物性研究所)
河野 浩	助手	1999年6月16日	転出(大阪大学)
石山英二	助手	1999年6月30日	退職
小林研介	助手	1999年8月16日	配置換(物性研究所)
中村隆司	助手	2000年3月31日	転出(4.1 東京工業大)
深沢泰司	助手	2000年3月31日	転出(広島大学)
水崎高浩	助手	2000年3月31日	退職(専修大学)
山田篤志	助手	2000年3月31日	転出(千葉大学)
田中光明	技官	2000年3月31日	定年退職
加藤喜子	事務室主任	1999年3月31日	配置換(工学部)
大島大輔	物理事務室	1999年3月31日	配置換(法学部)
島田淳子	物理図書室	1999年3月31日	配置換(教養学部)
白砂美香子	ネットワーク	2000年2月29日	地球惑星物理
三沢直子	事務分室	2000年3月31日	法学部
広瀬真弓	事務分室	2000年3月31日	退職

## 4 役務分担

役務	担当教官	技官・事務官・事務補佐官
専攻長・学科長	佐藤	後藤、麻生、小野瀬、新沼、 武田、小沢、小原
幹事	塚田、酒井（英）	後藤、麻生、小野瀬、新沼、 武田、小沢、小原
専攻主任	牧島	武田、小沢、小原
理系委員（専攻副主任）	早野	
常置委員	青木、折戸、江口、樽茶	
教務係	大塚（孝）（理学部教務委員） 籾輪、松尾、樽茶（大学院）	武田、小沢、小原
学生実験	藤森、相原、高瀬	櫻村
就職係	壽榮松、折戸	横山、後藤、武田
奨学金	長澤	沢田
会計係	長谷川、柳田	後藤
号館長	1号館：若林、4号館：和達	後藤
部屋割（電話）	山本、藤川	沢田、井上
技術部門	坪野	田中、大塚（茂）
試作室（ガラス）	坪野	
回路	籾輪	
低温	福山	
研究材料	石原	
電顕	若林	
計算機・ネットワーク	早野、相原	白砂、櫻村
図書係	小林（理図書委員） 神部、桑島、松尾	柿沼、大木
複写係	桑島	麻生、小野瀬
談話会	青木、藤川、和達	江本
年次報告	須藤	横山
記録係	能瀬、福山	
物品供用官	石原	後藤
環境安全	山本	
放射線管理	籾輪	
人事係	折戸	後藤
事務室担当	長澤	
事務分室	第1：酒井（英）、第2：須藤、第3：塚田	後藤
理交会	能瀬	後藤
教職員親睦会	若林	
建物	福山、長谷川	後藤、櫻村
進学指導担当	江口	

## 5 教室談話会

< 1999 年 >

- 5月7日(金) 樽茶清吾  
人工二原子分子のコヒーレント状態
- 5月14日(金) 柳田勉  
ニュートリノ質量の発見の大きな衝撃
- 5月21日(金) 上田正仁(広島大学工学部)  
レーザー冷却された中性原子気体のボーズ・アインシュタイン凝縮
- 6月4日(金) Francois Vannucci (University of Paris 7)  
Neutrino physics, where do we stand?
- 6月25日(金) 古沢明(ニコン)  
量子テレポーテーション
- 7月2日(金) 木下一彦(慶応大学理工学部)  
分子1個でできた効率100%で働ける回転スッテッパモーター
- 7月16日(金) 佐藤勝彦  
宇宙は第2インフレーションを始めたのか?—宇宙定数と宇宙論—
- 10月22日(金) Itamar Procaccia (Weizmann Institute of Science)  
Anisotropy in Turbulence
- 11月19日(金) 駒宮幸男  
高エネルギー  $e^+e^-$  衝突実験の歴史・現状・展望
- 11月30日(火) P.W. Anderson (Princeton 大学)  
Emergence, reductionism and seamless web — When and why is science right?
- 12月10日(金) 海部宣男(国立天文台ハワイ観測所)  
すばる望遠鏡と新しい宇宙観測
- 12月17日(金) 小形正男  
有機物伝導体での金属絶縁体相転移とスピン電荷分離

< 2000 年 >

- 1月21日(金) 飯島澄男(NEC)  
ナノチューブの発見と期待
- 2月10日(木) Douglas D. Oscheroff(Stanford University)  
The Nature of Discovery in Physics
- 2月18日(金) 釜江常好  
加速器実験からのガンマ天体観測への転進
- 2月18日(金) 神部 勉  
流体物理の研究を振り返って
- 3月3日(金) 石原正泰  
原子核物理と遊ぶ