Ι

研究室別 2009年度 研究活動報告

目 次

Ι	研究	究室別	2009年度研究活動報告	3
1	1 1	原子核	で素粒子理論	11
	1.1	原ナ核	《理論研究室(天塚:初田·半野)	11
	1.2	系私士	- 論	30
		1.2.1		30
		1.2.2		31
2		百 子枝	7· 表粒子宝略	35
4	21	凉」 10 百子核	、 泉村 」 天殿 定 1111 - プ【 洒井・早野・小沢 】	35
	2.1	211	(スペック) 2 11/1 11/1 11/1 11/1 11/1 11/1 11/1 1	35
		2.1.1 2.1.2		36
		2.1.2 2.1.2		37
		2.1.0 2.1.1	K (中間) K) O 相当 D (中野 D E) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	30
		2.1.4 9.1.5		30
		2.1.0 2.1.6		30
		2.1.0		- <u>10</u>
		2.1.7		40
		2.1.8	尿丁核甲のφ甲间丁貝里刀Ͳの向統計測定夫鞅(小爪饼九至) 「「「「」」、「」」、「」「」」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」	40
		2.1.9		41
	0.0	2.1.10 Factor	Gas Electron Multiplier(GEM) 検山器の基礎開発研究(小沢研究室)	42
	2.2	> 列呂切		47
		2.2.1	電士・ 「S電士リーアコフ1 ター ILC 計画	47
		2.2.2		48
		2.2.3		49
		2.2.4	BES 実験	50
	2.3	衰輪 欨		53
		2.3.1	原子炉ニュートリノモニター	53
		2.3.2	Sumico, アクシオンヘリオスコープ実験	54
		2.3.3	太陽 Hidden photon 探索実験	54
		2.3.4	暗黒物質探索検出器の開発....................................	55
	2.4	相原・	横山研究室....................................	57
		2.4.1	<i>B</i> 中間子のフレーバー変換中性カレント崩壊の精密測定	57
		2.4.2	Super-KEKB 計画のための衝突点近傍デザイン	58
		2.4.3	T2K 長基線ニュートリノ振動実験....................................	58
		2.4.4	ニュートリノ-原子核反応断面積の測定	60
		2.4.5	次世代水チェレンコフ検出器のためのハイブリッド光検出器開発........	61
		2.4.6	観測宇宙論によるダークエネルギーの研究	62
		2.4.7	国際リニアコライダー用検出器の開発	63
	2.5	浅井研	究室	66
		2.5.1	LHC・ATLAS 実験での研究	66
		2.5.2	小規模実験で探る標準理論を超えた新しい素粒子現象の探索	68

3 物性理論

	3.1	青木研究室	72
		3.1.1 超伝導	72
		3.1.2 磁性	73
		3.1.3 量子ホール系	73
		3.1.4 非平衡・非線形現象	74
		3.1.5 周期的ナノ構造の電子状態	75
		3.1.6 Zero-point analogue によるフォトニック・バンドの設計	75
		3.1.7 子の他	75
	32	宮下研究室	79
	0.2	321 長距離相互作用のもとでの協力現象の研究	79
		3.2.1 後距離相互作用のもとその個別が家の個別、	79
		3.2.2 重了, MGH75子のM72 ····································	81
	22	3.2.9 非十寅ノイノミソノス、制込坑家 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	85
	0.0	1970年11月1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日	85
		3.3.1 同価担囚等の注册	85
		9.9.2 利胆仏等件, 軟靴系ホ胆仏等に対する注調	00
		3.3.3 1913 1994 - 初仁道はの理論	00
		3.3.4 超広导体の理論	81
		3.3.5 アイフツノ电ナ系	87
		3.3.6 ノフストレーションのめる糸での電子状態、スピン状態・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	88
		3.3.7 里い電子糸に関する埋誦	88
		3.3.8 2次元 ³ He に関する埋論	89
		3.3.9 磁壁駆動の微視的埋論 	89
	3.4		93
		3.4.1 シミュレーション手法の開発	93
		3.4.2 第一原理電子状態計算の応用	94
1		物性宝驗	00
4	4.1	物性実験	99
4	4.1	物性実験 藤森研究室	99 99
4	4.1	物性実験 藤森研究室	99 99 99
4	4.1	物性実験 藤森研究室	99 99 99
4	4.1	物性実験 藤森研究室 4.1.1 高温超伝導体 4.1.2 酸化物ヘテロ界面 4.1.3 スピントロニクス材料 1.1.1 ロロロの定	99 99 99 100
4	4.14.2	物性実験 藤森研究室 4.1.1 高温超伝導体 4.1.2 酸化物ヘテロ界面 1 4.1.3 スピントロニクス材料 1 内田研究室 1 1 2 0.00555701	99 99 100 100
4	4.14.2	物性実験 藤森研究室 4.1.1 高温超伝導体 4.1.2 酸化物ヘテロ界面 4.1.3 スピントロニクス材料 月田研究室 1 4.2.1 2009年度の研究その1 1 1	99 99 100 100 108
4	4.14.2	物性実験 藤森研究室 4.1.1 高温超伝導体 4.1.2 酸化物ヘテロ界面 4.1.3 スピントロニクス材料 月田研究室 4.2.1 2009年度の研究その1 4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相 4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相	99 99 99 100 100 108 108
4	4.14.2	物性実験 藤森研究室	99 99 99 100 100 108 108
4	4.1	物性実験 藤森研究室 4.1.1 高温超伝導体 4.1.2 酸化物ヘテロ界面 4.1.3 スピントロニクス材料 内田研究室 1 4.2.1 2009年度の研究その1 4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相 4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現 4.2.4 T _c は上がるか?	<pre>99 99 99 100 100 108 108 108 108 100</pre>
4	4.14.24.3	物性実験 藤森研究室 4.1.1 高温超伝導体 4.1.2 酸化物ヘテロ界面 4.1.3 スピントロニクス材料 内田研究室 1 4.2.1 2009年度の研究その1 4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相 4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現 4.2.4 T _c は上がるか? 長谷川研究室 1	99 99 100 100 108 108 108 100 110
4	4.14.24.3	物性実験 藤森研究室 4.1.1 高温超伝導体 4.1.2 酸化物ヘテロ界面 4.1.3 スピントロニクス材料 内田研究室 1 4.2.1 2009年度の研究その1 4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相 4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現 4.2.4 T _c は上がるか? 4.3.1 表面電子輸送	99 99 100 100 108 108 108 100 110 113
4	4.14.24.3	物性実験 藤森研究室 4.1.1 高温超伝導体 4.1.2 酸化物ヘテロ界面 4.1.3 スピントロニクス材料 内田研究室 1 4.2.1 2009年度の研究その1 4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相 4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現 4.2.4 T _c は上がるか? 長谷川研究室 1 4.3.1 表面電子輸送 4.3.2 表面車ノ人構造	99 99 99 100 100 108 108 100 110 113 113
4	4.14.24.3	物性実験 藤森研究室4.1.1高温超伝導体4.1.2酸化物ヘテロ界面4.1.3スピントロニクス材料内田研究室14.2.12009年度の研究その14.2.2高温超伝導体の擬ギャップ相4.2.3鉄化合物高温超伝導体の出現4.2.4T _c は上がるか?長谷川研究室14.3.1表面電子輸送4.3.3新しい装置・手法の開発	99 99 99 100 108 108 108 108 110 113 113 114
4	 4.1 4.2 4.3 4.4 	物性実験 藤森研究室	<pre>99 99 99 100 100 108 108 108 108 110 113 113 114 115 119</pre>
4	 4.1 4.2 4.3 4.4 	物性実験 藤森研究室	99 99 100 100 108 108 108 108 110 113 113 113 114 115 119
4	 4.1 4.2 4.3 4.4 	物性実験 藤森研究室 4.1.1 高温超伝導体 4.1.2 酸化物ヘテロ界面 4.1.3 スピントロニクス材料 内田研究室 1 4.2.1 2009年度の研究その1 4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相 4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現 4.2.4 T _c は上がるか? 1 4.3.1 表面電子輸送 4.3.2 表面ナノ構造 1 4.3.3 新しい装置・手法の開発 福山研究室 1 4.4.1 2次元フェルミ粒子系の強相関効果 4.4.2 エピタキシャル・グラフェンの試作と STS 観測	99 99 100 108 108 108 108 110 113 113 114 115 119 119
4	4.14.24.34.4	物性実験 藤森研究室 4.1.1 高温超伝導体 4.1.2 酸化物ヘテロ界面 4.1.2 酸化物ヘテロ界面 1 4.1.3 スピントロニクス材料 内田研究室 1 4.2.1 2009年度の研究その1 4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相 4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現 4.2.4 T _c は上がるか? 日 4.3.1 表面電子輸送 4.3.3 新しい装置・手法の開発 福山研究室 1 4.4.1 2次元フェルミ粒子系の強相関効果 4.4.3 超伝導超薄膜の作成と輸送特性	99 99 100 108 108 108 100 113 114 115 119 121
4	 4.1 4.2 4.3 4.4 	物性実験 藤森研究室 4.1.1 高温超伝導体 4.1.2 酸化物ヘテロ界面 4.1.3 スピントロニクス材料 内田研究室 1 4.2.1 2009年度の研究その1 4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相 4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現 4.2.4 T _c は上がるか? 4.3.1 表面電子輸送 4.3.1 表面電子輸送 4.3.3 新しい装置・手法の開発 福山研究室 1 4.4.1 2次元フェルミ粒子系の強相関効果 4.4.3 超伝導超薄膜の作成と輸送特性 4.4.4 超伝導近接効果の STS 実験の準備	99 99 100 108 108 108 108 110 113 113 114 115 119 121 121 121
4	 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 	物性実験 藤森研究室 4.1.1 高温超伝導体 4.1.2 酸化物ヘテロ界面 4.1.3 スピントロニクス材料 内田研究室 1 4.2.1 2009年度の研究その1 4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相 4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現 4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現 4.2.4 T _c は上がるか? 長谷川研究室 1 4.3.1 表面電子輸送 4.3.2 表面ナノ構造 4.3.3 新しい装置・手法の開発 福山研究室 1 4.4.1 2次元フェルミ粒子系の強相関効果 4.4.3 超伝導超薄膜の作成と輸送特性 4.4.4 超伝導近接効果の STS 実験の準備 阿本 研究室 1	99 99 100 100 108 108 108 108 110 113 114 115 119 121 121 122 124
4	 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 	物性実験 藤森研究室 4.1.1 高温超伝導体 4.1.2 酸化物ヘテロ界面 4.1.3 スピントロニクス材料 内田研究室 1 4.2.1 2009年度の研究その1 4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相 4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現 4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現 4.2.4 T _c は上がるか? 長谷川研究室 1 4.3.1 表面電子輸送 4.3.3 新しい装置・手法の開発 福山研究室 1 4.4.1 2次元フェルミ粒子系の強相関効果 4.4.3 超伝導超薄膜の作成と輸送特性 1 4.4.4 超伝導近接効果のSTS 実験の準備 1 4.5.1 強相関 2次元電子系	99 99 100 100 108 108 108 100 113 114 115 119 121 121 121 122 124
4	 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 	物性実験 藤森研究室 4.1.1 高温超伝導体 4.1.2 酸化物ヘテロ界面 4.1.3 スピントロニクス材料 内田研究室 1 4.2.1 2009年度の研究その1 4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相 4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相 4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現 4.2.4 T _c は上がるか? 月 4.3.3 新しい装置・手法の開発 4.4.1 2次元フェルミ粒子系の強相関効果 4.4.1 2次元フェルミ粒子系の強相関効果 4.4.3 超伝導超薄膜の作成と輸送特性 4.4.4 超伝導近接効果の STS 実験の準備 阿本 研究室 1 4.5.1 強相関2次元電子系 4.5.2 劈開表面に形成された2次元電子系	99 99 100 108 108 108 108 110 113 113 114 115 119 121 121 121 122 124 124 126
4	 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 	物性実験 藤森研究室 4.1.1 高温超伝導体 4.1.2 酸化物ヘテロ界面 4.1.3 スピントロニクス材料 内田研究室 1 4.2.1 2009年度の研究その1 4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相 4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現 4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現 1 4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現 1 4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現 1 4.2.4 T _c は上がるか? 月 長谷川研究室 1 4.3.1 表面電子輸送 4.3.2 表面ナノ構造 4.3.3 新しい装置・手法の開発 1 4.4.1 2次元フェルミ粒子系の強相関効果 1 4.4.2 エピタキシャル・グラフェンの試作と STS 観測 1 4.4.3 超伝導超薄膜の作成と輸送特性 4.4.4 超伝導近接効果の STS 実験の準備 1 4.5.1 強相関 2次元電子系 4.5.2 劈開表面に形成された 2次元電子系 1 4.5.2 劈開表面に形成された 2次元電子系	99 99 100 108 108 108 108 113 113 114 115 119 121 121 122 124 124 124 124 124

		4.6.2 4.6.3 4.6.4	擬1次元有機導体1 量子ホール系における光学ホール効果の観測1 高強度テラヘルツ波発生1	28 29 30
_		<u>ф</u> П.4/m [.]		
5	51	一般物:		33 ??
	0.1	于田埕;	跚妍九至(須膝 $/$ · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	აა იი
		0.1.1 5 1 0	観測的十田調	33 96
	5.0	0.1.2 ₩₽₽₩\$	、大体核・系植丁初珪	30 41
	0.2	11月1年10月:	九至	41
		0.2.1 5.0.0		42
		0.2.2 5.0.2	エノダノグルアノド 年冊	40
		5.2.5 5.9.4	里丁トモグフノイ	43
	۳۵	0.2.4 μπτπ	里丁用瓜尔	44
	5.3	上田研:		40
		5.3.1		40
		5.3.2	重于情報・重于測正・情報紙刀字	46
6		一般物	理実験 1	51
	6.1	牧島研究	究室 + 中澤研究室	51
		6.1.1	科学衛星の運用と稼働状況1	51
		6.1.2	質量降着するブラックホール 1	52
		6.1.3	強磁場コンパクト天体の研究 1	52
		6.1.4	星間空間における高エネルギー現象 1	53
		6.1.5	銀河団および銀河群の研究1	54
		6.1.6	雷活動に伴う静電加速現象の研究1	54
		6.1.7	<i>ASTRO-H</i> 衛星計画 1	55
		6.1.8	将来の衛星計画 (ASTRO-H 以外)	57
	6.2	高瀬研	究室	.63
		6.2.1	TST-2 実験	.63
		6.2.2	UTST 実験	.66
		6.2.3	CHS 装置の閉じ込め遷移現象の実験解析1	.67
	6.3	坪野研?	究室	.69
		6.3.1	 地上レーザー干渉計重力波検出器1	.69
		6.3.2	宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO	.70
		6.3.3	磁気浮上型重力波検出器の開発1	71
		6.3.4	非古典光を用いたレーザー干渉計の高感度化	72
		6.3.5	超高安定レーザー光源の開発	72
	6.4	佐野・	原田研究室	76
	-	6.4.1		77
		6.4.2	非平衡ソフトマターの物理 1	78
		643	4 合現象の物理 1	80
	65	山本研	字室	85
	0.0	651		86
		652	<u>2</u> パルの (1) パパー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	88
		653	スペットルボジー、トー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	88
	66	5.5.5 洒井広・		Q1
	0.0	лалт <i>і</i> а. 661	へwノンレエ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	01
		662		00
		662	1月1300 nm 乃7 800 nm パルフを田いた配列公子由からの宣次宣調は発生 1	94 09
		664		90 04
		665	里」11/120月10日10日110日111日11日11日11日11日11日11日11日11日11	94 95
		0.0.0		50

	6.7	能瀬研究室
		6.7.1 シナプス形成の生物物理 197
		6.7.2 回路構造と神経機能の発生機構 198
		6.7.3 神経回路の活動ダイナミクス 200
		6.7.4 その他
	6.8	樋口研究室
		6.8.1 マウス側脳室繊毛のナノメートル運動解析 203
		6.8.2 マウス内がん分子のイメージング装置の開発 203
		6.8.3 マウス内がん細胞結合分子のイメージング 203
7		技術部門 207
	7.1	技術部門
		7.1.1 実験装置試作室(大塚、南城、阿部) 207
		7.1.2 安全衛生(佐伯)
		7.1.3 IT 関連業務(藤代)
		7.1.4 学生実験(佐伯、八幡、藤代、樫村) 208
		7.1.5 CE タンク管理(八幡) 208
тт	S1	immary of activities in 2000 200
11	1	Theoretical Nuclear Devices Croup
	1 9	Theoretical Partials and High Energy Dhysics Croup 215
	2	Havana Croup
	3	
	4 5	Ozawa Gloup
	5 6	Vememine group
	07	Minawa Chaup
	0	Aihana /Valaarama Chaum
	0	Amara/ Tokoyama Group
	9 10	Asar group
	10	AOKI Group
	11 10	Miyashita Group
	12	Ugata Group
	13	Isuneyuki Group
	14	Fujimori Group
	10	Ucinida Group
	10	Fulture Croup
	10	Olemete Croup
	10	Shimano Croup
	20	Theoretical Astrophysics Croup
	20 91	Murao Croup
	21	Mulao Group 234 Uada Croup 221
	22	221 Opentum States of Illeregold Atoms
		22.1 Quantum Information Quantum Magguement and Information Thermodynamics 226
	0.0	22.2 Quantum Information, Quantum Measurement, and Information Thermodynamics . 250 Making Crown & Nakazawa Crown
	∠ર ગ્ર	Takaca Croup
	24 2⊑	Takase Group
	⊿0 26	Sana Harada Croup
	∠0 97	Vamamoto Croup
	21 28	Tamamoto Group
	20 20	Sakai (Inforum) Group
	$_{29}$	Nose Group $\ldots \ldots \ldots$

30	Higuchi Group	245
III	2009 年度 物理学教室全般に関する報告	247
1 1.1	 学部講義概要 2年生 冬学期 1.1.1 電磁気学 I: 坪野 公夫 1.1.2 解析力学・量子力学 I: 常行 真司、上田正仁 1.1.3 物理実験学: 早野 龍五、岡本 徹 1.1.4 物理数学 I: 青木 秀夫 1.1.5 物理数学 II: 浜口幸一 3年生 夏学期 	 249 249 249 249 250 251 251 251
1.3	1.2.1 電磁気学 II: 酒井広文. 1.2.2 量子力学 II: 宮下精二 1.2.3 現代実験物理学 I: 長谷川修司, 溝川貴司 1.2.4 物理数学 II: 松尾 泰 3年生 冬学期	251 252 252 253 253 253 254
1.4	1.3.3 流体刀子、高旗 雄一、 1.3.4 電磁気学 III : 蓑輪 眞	254 255 256 256 256 256 256
1.6	1.5.1 場の量子論:柳田勉	256 256 257 257 258 258 258 258 259 259 259 259
1.7	1.6.5 プラズマ物理学: 牧島一夫 1.6.6 物性物理学特論 (大学院「表面物理学」共通): 長谷川修司, 小森文夫、 1.6.6 第4年生 冬学期 1.7.1 固体物理学 II: 福山 寬 1.7.2 1.7.2 化学物理学: 藤森 淳 1.7.2 化学物理学: 藤森 淳	260 260 260 261 261
2 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7	各賞受賞者紹介 山崎敏光 名誉教授:文化功労者 小林孝嘉 名誉教授(現 電気通信大学 特任教授):島津賞 早野龍五 教授:第 62 回中日文化賞 平野哲文講師:平成21年度文部科学大臣表彰「若手科学者賞」および第24回西宮湯川記念 坂井南美助教(山本研究室):第26回井上研究奨励賞 日下暁人博士(相原研:現シカゴ大学):平成21年度文部科学大臣表彰「若手科学者賞」. 池田陽一博士(初田研):第4回日本物理学会若手奨励賞	262 262 263 263 263 263 264 264

	2.8	中浜優博士 (相原研:現 パリ第 11 大学 LAL オルセー研究所):第 11 回高エネルギー物理学	
		奨励賞、および第4回日本物理学会若手奨励賞	264
	2.9	小林未知数 氏 (上田研): 第 4 回 (2010 年) 日本物理学会若手奨励賞 (領域 6)	264
	2.10	竹内 一将氏 (佐野研): 平成 2 1 年度 理学系研究科研究奨励賞 (博士)	265
	2.11	山崎 雅人氏 (柳田研): 平成21年度 理学系研究科研究奨励賞(博士)	265
	2.12	山本直希氏 (初田研): 平成 2 1 年度 理学系研究科研究奨励賞 (博士)	265
	2.13	市川豪君(駒宮研): Student Paper Award	266
	2.14	出田真一郎君 (藤森研): Student Poster Award	266
	2.15	森 貴司君 (宮下研): 平成 21 年度理学系研究科研究奨励賞 (修士)	266
	2.16	鈴木 剛 君 (島野研): 平成 21 年度理学系研究科研究奨励賞 (修士)	266
	2.17	角田 直文君 (大塚研): 平成 21 年度理学系研究科研究奨励賞 (修士)	266
	2.18	平野 照幸君 (宇宙理論研):平成 21 年度理学系研究科研究奨励賞 (修士)	267
3		人事異動	268
4		役務分担	269
5		教室談話会	271
6		物理学教室コロキウム	272

1 原子核・素粒子理論

1.1 原子核理論研究室(大塚·初田 ·平野)

原子核理論研究室の概要

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

「核構造」は主に大塚孝治教授・清水助教及び博 士研究員と大学院学生らにより行なわれた。「量子八 ドロン物理学」は主に初田哲男教授・佐々木助教及 び博士研究員と大学院学生らにより行なわれた。「高 エネルギーハドロン物理学」は主に平野哲文講師及 び大学院生らにより行われた。以下に先ずそれぞれ の分野での研究内容の概要を述べ、後で各々のテー マについて個別に説明する。

原子核構造

原子核構造と言われる分野には色々な問題が含ま れるが、我々の研究室では

- 1) 不安定核の構造と核力
- 2) モンテカルロ殻模型による原子核の多体構造の 解明
- 3) 原子核の表面の運動や、時間に陽に依存する現 象(反応、融合、分裂)
- 3)他の量子系の多体問題、量子カオス

の4つのテーマを主に追求している。研究室のメン バーによる研究は後で述べられているので、ここで は背景と概略を述べ、共同研究者によって後で述べ られている研究についてはほとんど省略する。ここ で参照される文献、講演も後で出て来ないものが主 である。

安定核とは、我々の身のまわりの物質を構成してい る原子核で、陽子の数と中性子の数はほぼ等しいか、 中性子の方が少し多い程度である。名前のとおり、無 限に長いか、十分に長い寿命を持っている。一方、こ れから話題にする不安定核とは、陽子数と中性子数 がアンバランスなものである。そのため様々な特異 な性質を示すことが分かってきたが、研究は始まった ばかりで、未知の性質や現象に満ち溢れたフロンティ アでもある。その例として、魔法数があげられる。原 子の場合と同じように原子核でも(陽子或は中性子 の数としての) 魔法数があり、構造上決定的な役割 を果たす。魔法数は1949年のメイヤー・イェンゼ ンの論文以来、安定核では2,8,20,50,82,126とい う決まった数であった。しかし、不安定核の殻構造 (一粒子軌道エネルギーのパターン)は陽子や中性子 の数によって変わり(殻進化と言う)、不安定核での 魔法数は安定核のそれとは異 x なることが最近判明 しつつある。その原因は核力のスピン・アイソスピン 依存性、特にテンソル力のそれによるものが大きい、 ということも5年位前から分かってきた。実はこれは 我々の研究室から発信された予言であり、その影響す る範囲の広さとインパクトの大きさから世界の原子 核研究に明確な指針を与えてきた。それを受けて、文 献 [16] は、Phys. Rev. Lett. 掲載に際し、重要論文 として Viewpoint 紹介論文に選ばれた。この研究成 果は今後の核構造論研究の方向性を左右し、進める原 動力となり、世界各地でそれに関する実験が多く行わ れている。[1, 2, 4, 5, 6, 7, 14, 15, 16, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153] また、それらを若手研究者に伝えるためにサマース クールでの講義も行った。[145]

核子の間には2体力だけでなく、3体力も働く。テ ンソルカに加えて、3体力が不安定核の殻構造、魔法 数、ドリップライン(存在限界)に特徴的な効果を及 ぼすことをやはり我々のグループが見つけた。藤田-宮沢3体力は50年前からその存在が知られている。 バリオンの一つであるデルタ粒子に核子が転換され るプロセスに起因するものである。この3体力が多 体系に及ぼす効果はほとんど研究されて来なかった。 我々は、その力の効果の中に、強いモノポール斥力が あることを発見した。その定量的な評価は伝統的な 中間子ーデルタ粒子結合からもできるし、有効場 の理論などの核力の最近の研究によっても調べられ、 似た結果を出す。計算の詳細にはよらずに、極めて特 徴的な効果を生むことが示せるので、不安定核の構 造の(中性子数などの変化の関数としての)進化に 新しいパラダイムを提供するものとして注目されつ つある。このように、核力の果たす役割の重要性が 「再発見」されており、極めて複雑な核力の理解を高 める研究活動を始めている。[139,140,141,142,144, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 54, 55, 56]

不安定核では、安定核とは異なり、過剰な中性子 が糊の役割を果たして、幾つかのアルファクラスター をつなげる事を示してきた。このようなクラスター 構造の「結晶的安定化」メカニズムについて、糊の 役目の中性子が1個の場合について研究してきた。 不安定核に関しては、束縛されてはいないが、低 い励起エネルギーを持ち、束縛状態と強く結合して いる核子の状態の理論的扱いの研究を進め、不安定 な中性子過剰酸素同位体などに応用している。特に、 上述の殻構造の変化が、正エネルギーの連続状態で起 こるとどのようになるか、従来のものとは異なる「連 続状態に結合した殻模型 (Continuum-Coupled Shell Model)」を提唱して研究している。放出される中性 子のエネルギー分布などから議論を進めている。

我々が1994年頃からオリジナルな理論手法と して提唱・発展させてきたモンテカルロ殻模型を中 心にした研究も展開している。[143] この方法は原子 核に於ける量子多体系の解法における大きなブレー クスルーとなり、不安定核攻略の重要な武器である。 この手法により、多数の一粒子軌道からなるヒルベ ルト空間に多数の粒子を入れて相互作用させながら 運動させる事が可能になった。殻構造がどんどん変 わっていく不安定核では特に重要になっており、世 界の10箇所以上のグループと、それぞれの研究対 象である原子核に関して理論計算を受け持って共同 研究をしている。多くの新しい知見が得られており、 最近は中性子数が18や19の原子核でも、不安定 核であればN=20の魔法数構造が普遍的に壊れて いることを示した。これは旧来の平均ポテンシャル 描像や Warburton らの「Island of Inversion」模型 では理解できないもので、重要なものである。さら に、通常の考えでは二重閉殻原子核のはずの 42Si が オブレートに大きく変形していることなども示した。 [4, 6, 15] また、モンテカルロ殻模型は多数の核子が コヒーレントに運動する集団運動の微視的な解明を、 平均場理論の壁を越えて行うことも可能にしている。 ごく最近、モンテカルロ殻模型を第一原理計算に使 う研究を開始した。同時に、計算機用プログラムを 並列計算機用に大幅に改良し、又、外挿による厳密 解の予知も行えるようになりつつある。それらによ る、スーパーコンピューターによる計算を行い、次 世代スパコンでのさらに大きな計算に備えている。 ニュートリノと原子核の反応なども引き続き研究の 対象であり、天体核現象への応用を行っている。[3] さらに、ダブルベータ崩壊の核行列要素の計算を行 い、ニュートリノ質量の測定に備えている。

原子核には表面が球形から楕円体に変形し、楕円 体に固定されて回転したり、変形の度合が時間とと も変化する振動が起こったりする。これらには多数 の核子がコヒーレントに関与しているので集団運動 と呼ばれる。集団運動と表面の変形は密接に関係し ており、核子多体系の平均場理論によって記述され る。一方、集団運動をボソンによって記述する相互 作用するボソン模型も成功を収めてきた。前者は、 核子系から原子核の固有座標系での密度分布は出し やすいが、励起状態のエネルギーなどは出しにくい。 後者は現象論的であるが、励起エネルギーなどは実 験をよく説明するものを出せる。この2つを結びつ ける方法を考案し、その論文が出版された。これに より、相互作用するボソン模型に予言能力が付与さ れて実験のない不安定核への応用が可能になり、ま た、平均場理論との関連があきらかになって理解の 深化が可能になるなど、発展の道が開かれた。[146] 核子多体系どおしの反応や、時間とともに自発的に 変化する状態を扱うために時間依存ハートリーフォッ ク法を展開、発展させる研究を行なっている。今年 度の成果の例としては、エネルギーの高い反応での 荷電平衡化の抑制現象を理論的に見つけ、その意義 を議論した。また、ウランと鉛というような巨大な 原子核どおしの反応を計算してあらたな現象を探索 している。[13]

特に、4番目のテーマについては、第一原理的ア プローチによる殻模型計算を提唱してきたが、モン テカルロ殻模型を使っての計算を行うべく準備して いる。量子カオスに関しては、カオスがある規則性 の源になる、という新しい概念を導入して現在論文 準備中である。これらと並行して、ボーズアインシュ タイン凝縮でスピンが有限な場合について、その代 数構造に注目した研究を進めている。これは原子核 の相互作用するボゾン模型の応用にもなっており、解 析的に見通しのいい方法論になっている。

原子核殻模型による中重核の研究

近年、スズの同位体の E2 遷移が実験的に計測され、陽子数と中性子数が近い領域では、E2 遷移確率 が異常に大きくなることが確認された。この現象を、 粒子数と角運動量の変分前射影法によるハートリー フォックボゴリウボフ計算をおこなうことによって、 原子核殻模型の観点から微視的に研究し、スズ 100 を閉殻とせず、ジルコニウム 80 を閉殻とするような より広い模型空間をとる計算によって、スズ 100 か らの粒子ホール励起が重要な役割を果たすことを示 唆した。[90]

また、10年来有用に使われていたモンテカルロ殻 模型法のプログラムをまったくの0から書き直し、 最新のスーパーコンピュータに使えるよう移植した。 さらにこれを用いて、モンテカルロ殻模型によるエ ネルギー分散による外挿法を開発した。モンテカル ロ殻模型法の計算精度の向上や、計算速度の改善に より、適用範囲がひろがりつつある。中重核領域の みならず、軽い核の閉殻を仮定しない計算にも新た な進展が期待できる。[91,92]

有効場の理論を用いた格子計算による低密度中性子 物質の研究

低密度中性子物質における¹S₀ 超流動ペアリング ギャップの密度依存性、相図(相転移温度の密度依存 性)の2点について有効場の理論を用いた格子計算 により定量的に解析した。有効場の理論の枠組みと しては、中性子の自由度だけを顕わに取り扱い、摂 動の1次までを考慮した。摂動の0次と1次までの 数値計算結果をマッチングすることにより、我々の 格子による正則化において power counting rule が 摂動1次まで成り立っていることを数値的に示した。 格子計算の手法としては、物性物理学の分野で高温 超伝導を記述する有力な模型として期待されている Hubbard 模型における数値計算で用いられるグラン ドカノニカル量子モンテカルロ法を採用した。さら に、現実的な物理量を導出するために、連続極限、 及び、熱力学極限を取った。我々の得た結果として は、零温度付近において低密度中性子物質の $^{1}S_{0}$ 超 流動ペアリングギャップは、BCS による平均場近似 解の70%程度であるということ、また、相図に関し て低密度領域においても短距離の対相関に起因する 擬ギャップが存在することを示唆した。これらの結 果から、平均核子密度の $10^{-1} \sim 10^{-4}$ 倍程度の低密 度領域でさえ中性子物質では量子多体効果の寄与が 重要であることを明らかにした。さらに、低密度中 性子物質における格子計算の結果をユニタリー極限 へ外挿することにより、ユニタリーフェルミ気体に おける普遍的な物理量を導出した。[18, 19]

軽い原子核におけるモンテカルロ殻模型による第一 原理計算

近年、計算機性能と核子多体系における数値計 算手法の飛躍的発展により、現実的核力を用いた核 子多体系における第一原理計算が実現可能になって きた。しかしながら、芯を仮定しない殻模型などに代 表される第一原理手法による大規模数値計算は、現 在のスーパーコンピュータをもってしても、その適 用領域は軽い原子核領域に限られる。そこで、従来 の芯を仮定する殻模型計算において、より重い核へ と適用領域拡大へ多大な成功を収めたモンテカルロ 殻模型を第一原理手法のひとつである芯を仮定しな い殻模型へと応用する試みを始めた。相互作用とし ては、3体力の効果を出来る限り2体力に取り込ん でいると期待される JISP16 という現実的核力を用 いた。現在、対象とした軽い原子核(⁴He, ⁶He, ⁶Li, ⁷Li, ⁸Be, ¹⁰B, ¹²C) において、束縛エネルギー、平 一粒子軌道占有数、電気四重極モーメ 均自乗半径、 ント、磁気双極子モーメントなどの物理量に対して ベンチマーク計算の結果が得られつつあり、今後、さ らに重い原子核へ適用可能であることが検証されれ ば、現実的核力に基づいた原子核における多体構造 の系統的理解へ向け、有力な手法のひとつとしてモ ンテカルロ殻模型による第一原理計算に対する期待 がさらに広がるといえる。 [93, 94, 95, 181, 182]

Nuclear three dimensional rotation in timedependent Hartree-Fock theory

The nuclear shape is intimately connected with rotational motion, among which the triaxial shape has become one of the central matters of concern in recent years in nuclear physics. Since the triaxial nucleus can share its angular momentum among the three axes of the intrinsic frame, its rotational motion causes diverse interests in nuclear collective motion.

The rotational motion is usually connected with symmetry property of the nuclear mean field. The nucleus rotates about a principal axis of density distribution, about which the moment of inertia is the largest. There are, however, possibilities for a nucleus to rotate about an axis which is not any of the principal axes, called tilted axis rotation (TAR). Another class of non-uniform rotational motion is called wobbling motion in which angular velocity is not uniform but time-dependent and the rotational axis is tilted away from the principal axes. Recently experimental data of band spectra which correspond to the wobbling motion have been found.

Since an investigation of the mechanism of the evolution of the shape change may reveal some new physics and surely receives much interests in nuclear physics, we have studied the microscopic mechanism of the nuclear three-dimensional rotation, such as the stability of wobbling motion and tilted axis rotation, in exotic nuclei of r-process and super heavy nuclei.[157, 20]

核力に基づく核構造の記述

原子核の呈する様々な現象を核力に基づいて記述 することは理論的な重要性を持つだけでなく、基本的 対称性の検証や物質の存在限界の決定などその応用 性も大きい。核力はエネルギースケールに依存する。 高エネルギーでは強い相互作用を記述する理論は量 子色力学であるが、低エネルギーにおいては短距離 の詳細は分解されず、典型的には核子とパイオン等の 中間子を有効な自由度として記述され、様々な有効理 論や現象論的模型が存在する。それらは核子散乱の実 験データの高精度の再現性を持つ意味で現実的核力 と呼ばれる。現実的核力は一般に低運動量と高運動量 の結合を含むため非摂動的であり、核力に基づく第一 原理的な原子核の記述を困難にしている。また、多体 問題において、原子核内で誘起される多体力を考慮す ることも不可欠である。Similarity Renormalization Group (SRG) は核力の低運動量モードと高運動量 モードを分離し核子に対する低エネルギーの有効理 論を与えると同時に、多体力を統一的に取り扱うこ とができ有用である。我々は通常自由空間で行われ る SRG 変換を原子核多体系に応用した (In-medium SRG)。In-medium SRG は核子系の Hamiltonian に 関するユニタリー変換を与え、多体系内における核 子相関と誘起される多体力の効果を取り入れて、閉 殻原子核の基底状態とバレンス核子間の有効相互作 用、有効演算子を統一的に求めることができる。こ の方法は非摂動的であり、また Size extensivity であ るため理論の誤差を質量数に比例する程度に抑える ことができる。このような側面から In-medium SRG が第一原理の手法として核構造計算に適応できるこ とをを示した。[96, 97, 98, 99, 100, 101, 205]

ドリップ線近傍の不安定核の微視的な記述

物質の存在限界であるドリップ線近傍における物理は実験技術の進歩と共に発展し、天体核物理にお

ける応用の意味でも重要である。ドリップ線近傍で重 要となる連続状態の効果を、数学的に厳密に定義さ れたGamow基底を導入して記述し、また現実的2体 核力から出発して、一種の摂動展開であるQ-box展 開法を用い、模型空間における有効相互作用を微視 的に導出した。酸素同位体のドリップ線や励起状態の 実験的性質を系統的に再現し、ドリップ線近傍におけ る連続状態の重要性を示した[21,60,102,103,104]。

From UCOM potential to Shell Model and Monte Carlo Shell Model calculation

The advent of realistic nucleon-nucleon (NN) potentials has created an opportunity to investigate nuclear structure starting from the first principle. In a simple approach, the many-body state is described in a subspace spanned by some trial states, e.g. Slater determinants. Those states cannot describe the strong short-range correlations induced by the realistic *NN*-potential. A Unitary Correlation Operator Method (UCOM) could treat this repulsive core by transforming a realistic *NN* potential (e.g. AV18) to an effective one unitarily so that this transformed potential could be applied into nuclear many-body problem.

We applied this UCOM potential to Monte Carlo Shell Model calculation, as MCSM describe more wide variety of the states and large variation of nucleon number. ⁴He, as an example, has been calculated to investigate the MCSM convergence in different model space (up to *spsdpf* shell) by using UCOM potential. We compare MCSM results with experiment data and no-core direct diagnolization shell model calculation. The results show good accordance between MCSM calculation and conventional shell-model calculation up to *spsd* shell. And we still need solve ⁴He in bigger model space to get experiment data.

We also investigate energy levels in light nuclei. The excitation spectra show a problem. For example, the ordering of $\frac{1}{2}^{-}$ and $\frac{3}{2}^{-}$ splitting in ⁷Li when just a *NN* potential is used is different with experiment data. But this ordering of states can be changed by *NNN* potential. We reproduce the correct ordering in MCSM by using UCOM interaction.

[105, 106]

スピノール BEC における Bogoliubov 理論及び Lee-Huang-Yang 補正

冷却原子気体を用いたボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) は非常に操作性の高い系であり、光学的



に原子集団をトラップすることで各原子のスピン自由 度を保持したまま凝縮体を生成することが可能となっ ている。このような凝縮体はスピノール BEC と呼ば れており、スピン自由度のない凝縮体にはない新奇な 性質を呈することが分かっている。我々はスピノール BEC において半古典的な Gross-Pitaevskii(GP) 近似 では記述されない量子揺らぎ効果が重要となる現象を 探求するため、Bogoliubov 理論を適用し、励起スペ クトルや物理量の最初の量子補正である Lee-Huang-Yang(LHY) 補正についてスピン 1 及びスピン 2BEC の実験で検証可能な全ての相で議論した。我々は実験 で有意な2次 Zeeman 効果の影響についても考慮し スピノール BEC における LHY 補正が各相ごとに非 自明な磁場応答を示すことを明らかにした。我々が 導出した LHY 補正の磁場応答は光学格子を用いた実 験で検証可能であると考えられる。この他にも、 ピン 2BEC の nematic 相において量子揺らぎ効果が 1次相転移を誘発することを解析的に示した。これは biaxial-uniaxial nematic 相間の転移であり、GP 近 似では予言することができない現象である。この量子 揺らぎ効果により誘発される相転移は、素粒子物理 学において Coleman-Weinberg(CW) 機構と呼ばれ ているものであり、BEC を用いた CW 機構の検証へ 繋がるものと期待される。さらに、Bogoliubov 理論 により解析可能な自発的対称性の破れに伴う Nambu-Goldstone(NG) モードについても議論した。特に、 スピン 2BEC の nematic 相において、NG モードと は解釈されないゼロモードが現れることを示した。

これは nematic 相の平均場解が偶発的に持つ SO(5) 対称性に関係したゼロモードであることを我々は指 摘した。[22, 183, 220]

変形核における相互作用するボソン模型の導出

平均場理論と相互作用するボソン模型 (IBM) の関 連性という観点から、中重核の4重極集団運動を研 究した。平均場理論では原子核の内部固有状態の物 理量を計算できるが、励起状態のエネルギーと波動 関数を計算するのは一般に難しい。一方 IBM は励 起状態の物理量をうまく記述できるが現象論的であ る。そこで、両者の利点を生かす形で、平均場理論 から出発して IBM ハミルトニアンの相互作用強度 を導出する方法を近年開発した。4 重極集団運動に 関わる相互作用強度は、核子系から IBM 系へのポテ ンシャルエネルギー面の写像によって導出する。 こ の方法を主として質量数 100-150 領域の広い範囲の 偶々核に適用した結果、実験で示唆される、4 重極変 形した原子核の持つ対称性とそれらの間の遷移「形 の相転移」をほぼ再現した。また、基底状態のエネ ルギーに含まれる量子揺らぎの寄与を系統的に調べ、 それが球形核から変形核への遷移状態で最も顕著で ある事を示した。これは、IBM ハミルトニアンの対 角化によって平均場を越えた相関が正しく取り込ま れる事を裏付けている。さらに、回転に対する核子系 のレスポンスを IBM 系に写像する方法を考察した。 従来の IBM では現象論的にしか扱われなかった回 転の質量項 (LL 項) に注目して、平均場理論と IBM の両方でクランキング模型を用いて慣性モーメント (moment of inertia; MOI) を計算し、後者の MOI が 前者を再現しうるように LL 項のパラメータの値を 微視的に決定した。いくつかのケースでこの方法を 応用したが、LL項にはSm(サマリウム)同位体など の強く軸対称変形した原子核においてイラスト状態 のエネルギーを大きく下げる効果がある一方、Ba(バ リウム)同位体などのガンマ不安定核ではその寄与 が小さいことを示した。特に重要な結果として、強 く変形した Sm・Gd(ガドリニウム) 同位体の回転バ ンドの実験値を正確に再現できた事などが挙げられ **3**, [23, 61, 118, 119, 120, 121, 122, 184]

核力の有効相互作用におけるテンソル力

核力の有効相互作用におけるテンソル力について 研究した。一般に、核力は近距離に強い斥力芯を持つ ので、原子核構造を核力に基づいて探求するために は核力の有効相互作用を用いる必要がある。我々は、 殻模型有効相互作用におけるテンソル力のモノポー ル成分が繰りこみの影響をほとんど受けず、元の現 実的核力におけるテンソル力とほぼ等しいことを示 した。同時に、近距離のテンソル力は強い中心力と して繰りこまれることを示した。この結果は、単純化 されたモデルとして、殻模型有効相互作用のテンソ ル力成分を + 中間子の交換によって生じるもの として近似することを正当化するとともに、テンソ ル力の繰りこみに対するより深い理解を与える。我々 は、殻模型有効相互作用をモデルを用いることなく、 微視的な理論を用いて現実的核力に基づいて構築し た。現実的核力から出発し、まず低運動量領域での み定義される有効相互作用を構築する。この相互作 用は、低運動量の観測量を不変に保ちながら低運動 量領域と高運動領域の相関を零にすることによって 得られる。得られた低運動量相互作用では、核力の持 つ近距離での強い斥力は繰りこまれている。こうし て得られた低運動相互作用を用い、core-polarization を代表とする媒質効果を Q-box 展開と折れ線ダイア グラムを用いて取り入れることにより、殻模型有効 相互作用を構築する。これらの二段階の繰り込みに より、テンソル力は少なくともモノポールの成分に 対してはほとんど影響を受けず、もとの現実的核力 のテンソル力とほぼ等しいことを示した。

[24, 123, 124, 125, 126, 127, 185, 186, 221]

格子量子色力学による核力の研究

格子量子色力学により原子核理論の基礎となる核 子間相互作用の核力を導出することは純粋理論的な 関心を越えて、実験的情報が少なく現象論的決定が 非常に困難なテンソル力等の近距離成分や三体力、八 イペロン間力等の決定を可能にし、その応用は中性 子性の内部構造や超新星爆発等、原子核物理に止ま らず宇宙物理へも及ぶ。我々は2007年に格子量 子色力学によって理論的に核力を計算する方法を提 案し、その後継続的に進化させてきた。2009年度 は、核力のエネルギー依存性や N間のテンソル力 の計算を発展させた。バリオン間相互作用のフレー バー SU(3) 構造を概観するため、フレーバー SU(3) 極限でのバリオン間力を研究し、フレーバー1重項 において斥力芯が消えるという重要な事実を得た。 実験的に関心がもたれている H 粒子と関連して非常 に興味深い。2009年度にはまた、それまで弾性 散乱領域にしか適用できなかった方法を、結合チャン ネル相互作用を求める方法へと拡張し、 - N

結合系への応用を進めている。また三核子間力を 格子量子色力学で求めるための最初のステップとし て、三核子中の有効二体力に関する研究を進めてい る。[17,57,58,59,154,155,156,180,203,204,218]

量子ハドロン物理学

ハドロン(核子、中間子、及びその励起状態)は、 クォークとグルーオンの強い束縛状態で、量子色力 学(QCD)がその多様な構造や相互作用を支配して いる。QCDはその本質的な非線形性と強い量子効果 のために、そのハミルトニアンの形からは予想もで きないような様々な現象を示す。我々の研究室では、 ハドロンやハドロン間相互作用のクォーク・グルーオ ン構造、QCDの真空構造と高温高密度における相転 移などを、QCDの量子多体問題という観点から理論 的に研究している。その手法は、場の量子論による 解析的アプローチと、格子上で定義された QCDの 数値シミュレーションによる第一原理的アプローチ である。

我々の研究対象は、ハドロンの励起状態スペクト ルの構造、新しいハドロン状態としてのマルチクォー ク状態の解明、クォーク閉じ込め現象の数理、核力を はじめとするハドロン間相互作用、原子核中でのカ イラル対称性、宇宙初期の高温プラズマの熱力学的 性質やその動的構造、中性子星やクォーク星内部の 高密度クォーク物質におけるカラー超伝導現象、相 対論的重イオン衝突実験から得られるクォーク・グ ルーオン・プラズマ物性、冷却原子フェルミ気体や ボース気体の物性、グラフェンなどの強結合電子系、 など多岐にわたり、実験や観測と密接に関係した研 究を展開している。

格子ゲージ理論で探る強結合 QCD プラズマ

RHICで観測され、LHCにおいても実験が行われ る、クォーク・グルオン・プラズマの性質を第一原 理格子 QCD 計算で研究した。特に、改良 Wilson 型 クォーク作用を用いて、有限温度・有限化学ポテンシャ ルでの QCD 熱力学と重いクォーク間のポテンシャル を、クォーク行列式のキュミュラント展開に基礎と する新しい方法で系統的に解析した [25, 26, 27, 63]。 また、有限温度での虚時間鏡影対称性に基いた格子 ゲージ計算により、重いクォーク間のポテンシャル に関する磁気的遮蔽長と電気的遮蔽長を、ゲージ不 変かつ非摂動的に導出し、磁気的遮蔽長がポリアコ フループの相関関数の長距離の振る舞いを支配して いること、磁気的遮蔽長と電気的遮蔽長の比が、3 次元有効理論や AdS/CFT に基づく計算結果と定量 的に一致することを示した [28, 62]。

2+1 フレーバー格子 QCD 数値実験による核子構造の研究

核子の構造に関する格子 QCD 計算は近年着実に 精度が上がりつつあるが、本研究においては Domain Wall Fermion(DWF)の定式化を用いた3種類の動 的クォークの自由度(アップ、ダウン、ストレンジ) を全て厳密に取り扱った 2+1 フレーバー格子 QCD 数値計算による核子構造の研究を世界に先駆けて行 なった。とくに今回の数値解析ではベクトル、軸性ベ クトルの両チャンネルに関与する計4つの異なる形 状因子を計算し、それぞれの低エネルギー極限におけ る形状因子の運動量移行依存性から平均自乗半径を 測定することにより、核子の大きさについての情報が 引き出せることに注目した。計算においてはストレン ジクォーク質量を現実の値に固定した下で、アップ・ ダウンクォークの質量が 中間子の質量 330MeV,390 MeV.520 MeV.620 MeV に相当する 4 つの異なるの アップ・ダウンクォークの質量における数値計算を 行い、電荷平均自乗半径を含むいずれのチャンネル における平均自乗半径も、そのクォーク質量依存性 は非常に弱く、単純なカイラル極限への外挿ではそ れぞれの実験値を3分2程度しか再現できないこと

を指摘した。この数値計算の結果と実験値との食い 違いの背後には、カイラル摂動論で電荷平均自乗半 径などにおける、 中間子による量子効果を計算す る際に必然的に現れるカイラル極限での強い赤外発 散との関連が強く示唆される。[30, 168, 210]

格子 QCD 数値解析によるハイペロン 崩壊とフレー バー SU(3)の破れの研究

ハイペロン 崩壊とは、バリオン8重項(ハイペロ ン)の弱い相互作用による semi-leptonic 崩壊 $(B \rightarrow$ $B'+l+\bar{\nu}_l$)のことで、中性子ベータ崩壊はその一部を 成す。ハイペロン 崩壊の情報は、核子スピンにおけ る各フレーバー・クォークの寄与を査定するときにイ ンプットとして用いられる。しかしながら、その際、 フレーバー SU(3) 対称性を暗に仮定するために、核 子スピンに対するストレンジクォークのスピン寄与に 対する系統誤差は、実験的統計誤差と同程度と見積も られ、実際に核子内ストレンジクォークの核子スピン への寄与が高い精度で決定できていない要因の一つに なっている。本研究においては、実験的には難しい、 ハイペロン 崩壊におけるフレーバー SU(3)の破れ の存在を格子 QCD 数値解析により直接観測するこ とを目的とした。複数あるハイペロン 崩壊のうち、 特に $\Xi^0
ightarrow \Sigma^+$ 崩壊に着目した。この崩壊は、中性子 ベータ崩壊($n \rightarrow p$)とSU(3)対称性を仮定した場 合に同一(ダウンクォークをストレンジクォークで置 き換えたもの)と考えられるため、中性子ベータ崩 壊と比較することにより直接的にフレーバー SU(3) の破れを観測できる。現在、実験的にはこの崩壊が1 グループ (KTeV collaboration@Fermilab) でしか測 定に成功しておらず、その実験誤差も測定値に対し て約15%と大きいため、ハイペロン 崩壊のフレー バー SU(3) の破れの有無さえ確認できていないが、 今回の研究では、 $\Xi^0
ightarrow \Sigma^+$ 崩壊のそれぞれベクト ル、軸性ベクトルの両チャンネルに関与する計6つ の異なる形状因子をそれぞれ独立に計測し、中性子

崩壊との違いを詳細に調べることによって、ハイ ペロン 崩壊におけるフレーバー SU(3)の破れを高 い精度で観測することに成功した。特に特筆すべき は、それまで理論的予測がほぼ皆無だったセカンド クラス形状因子の存在を確認し、この無視できない 大きさのためにその存在を無視した実験解析におい てフレーバー SU(3)の破れの過小評価につながるこ とを指摘した。今回の研究をハイペロン 崩壊の中 で実験的に精度の高い、 $\Sigma^- \rightarrow n$ 崩壊に応用するこ とにより、カビボ-小林-益川行列要素 (CKM 行列要 素)の一つである、 V_{us} の決定にも大きな貢献する ことができると考えている。[29]

ヤン・ミルズ理論によるクォーク閉じ込めと QCD の真空構造の解明

QCD において最も重要なカイラル対称性の破れ/ 回復と閉じ込め/非閉じ込めの2つの問題を,同時に かつ同等なレベルでQCDの第一原理から議論し得る 枠組みを構築することが研究の目標であった。 従来 のハドロンのモデルにおいては,カイラル対称性の 破れか,閉じ込めのどちらか一方のみが正確に扱わ れ,両者を同時に有効に扱えるモデルは存在しない。 我々が従来から発展させてきた新しい場の変数を 用いる QCD の再定式化が原理的にこれを可能にし, 事実この目的を果たすひとつの低エネルギー有効理 論を導出できることが判明した (現在論文準備中)。 ただし,実際に,これらの非摂動的問題を解く上で最 も重要なインプットとなるのはゲージ結合定数のス ケール依存性である。 この 10 年来,九後-小嶋のカ ラー閉じ込め判定基準と両立すると信じられてきた グルーオンとゴースト伝播関数に対するスケーリン グ解の他に, デカップリング解がごく最近発見さ れ,それが格子ゲージ理論の大規模数値計算等で支 持されるに至り,赤外領域でのゲージ結合定数の振 る舞いを再検討する必要が生じた。これに関して,赤 外領域の違いはグリボフコピーを避けるために導入 された非摂動的なゲージ固定処方箋に依存しており、 グリボフホライズンを規定するホライズン関数の選 択の違いに起因して,2つの解が導けることを厳密 に示した。[31, 32] グリボフホライズンをシュウィン ガーダイソン方程式に取り入れる方法を提唱し,2 つの解がグリボフホライズンを考慮したシュウィン ガーダイソン方程式の厳密解であることを示した。 [33] 今後, これらの方法論を QCD 相図の解明など に適用していきたい。[34,64,65,66,67,68,69,107, 108, 169, 170, 171, 188, 212, 222, 223, 224, 225, 226]

格子 QCD による K 中間子-核子相互作用および クォーク間相互作用の研究

本研究において、(1) ストレンジネスを持つ南部・ ゴールドストンボソンである К 中間子と核子の力学、 および(2) '現実的な'質量を持った二つのクォークの 間にはたらく相互作用の情報を強い相互作用の第一 原理計算である格子 QCD を用いて導出した。これら はハドロン物理学において重要な課題である。なぜ なら、(1) に関して、K 中間子 - 核子のチャンネルに クォーク 5 個からなるエキゾチック粒子 ($\Theta^+(1540)$) の存在が実験的に示唆されおり、詳細な K 中間子 -核子相互作用の情報が求められているからである。 また、(2)に関しては、これまでの研究では'仮想的 に² クォークの質量を無限大にした場合でのポテン シャルが提案されていた。しかしながら、'現実的な' 質量を持つクォークに対するポテンシャルがどのよ うな形をしているのかは調べられてこなかった。本 研究では、現実的な質量を持つクォーク間にはたら くポテンシャルを導出し、ハドロンはどのようにク ォークが束縛してできているのかを探った。本研究 で得られた成果は以下のようにまとめられる。(1) K 中間子 - 核子系の内部に含まれているクォークに はたらくパウリ原理により К 中間子 - 核子ポテン シャルの近距離部分に大きな斥力芯が現れることが 分かった。(2) クォークの質量を無限大とした以前 の研究で示唆されているように、クォーク間ポテン

シャルはクーロン力+線形で書けることが理解でき た。さらに、クォークの質量依存性がクーロン力の 大きさに強く影響を及ぼすという結果が得られた。 [35, 36, 37, 84, 173, 109, 110, 111, 189, 213, 227]

高密度 QCD における非可換渦の不安定性

QCD は高密度において、カラー超伝導と 呼ばれるクォークの超伝導状態となると理論的に考 えられている。特に高密度極限においては、カラー・ フレーバー・ロッキング(CFL)相と呼ばれる状態 がエネルギー的に最も安定な基底状態であることが 分かっている。この相の対称性の破れ方からトポロ ジカルに渦の配位が許されるが、通常の金属の超伝 導と異なるのは、QCD のカラーとフレーバーの自 由度に由来して、可換渦だけでなく非可換渦が存在 し得る点である。我々は高密度 QCD における非可 換渦の低エネルギー有効理論を構築し、特にストレ ンジクォーク質量によって誘起されるポテンシャル によって、有効理論のモジュライ空間の1点を除く 全ての非可換渦が不安定になることを明らかにした。 この結果は、有効理論の量子効果を無視した範囲で は、高密度 QCD にモノポールが存在しないことを 示している [38]。

高密度 QCD におけるハドロン・クォーク連続性と 双対性

QCD の相構造において、低温・低密度のハドロン 相はクォークと反クォークの対凝縮であるカイラル 凝縮によって特徴づけられる一方、低温・高密度の カラー超伝導相はクォークとクォークの対凝縮であ るダイクォーク凝縮によって特徴づけられる。我々 は3フレーバー(アップ、ダウン、ストレンジクォー ク)の Nambu–Jona-Lasinio (NJL) 模型の枠内で、 これまで取り入れられていなかった軸性異常に由来 するカイラル凝縮とダイクォーク凝縮の競合を考慮 して、QCDの相構造を調べた。その結果、モデルの 適当なパラメータの範囲内で、ハドロン相とカラー 超伝導相の間に低温臨界点が現れるだけでなく、ダイ クォークの Bose-Einstein (BEC) 凝縮相が出現し、 クォーク化学ポテンシャルの関数としてダイクォー クの BEC-BCS クロスオーバーが実現し得ることを 示した [39]。さらに、系の微視的な詳細に依らない ユニバーサリティのある有限体積の QCD を考える ことによって、ハドロン相およびカラー超伝導相に おける QCD の分配関数が同じ関数形に書けるとい う新たな双対性があることを明らかにした[40,70, 85, 112, 190, 191, 228, 229, 230, 231, 232]

プローブを用いたクォーク・グルーオン・プラズマ の研究

チャームクォークやボトムクォークは、その質量 (数 GeV)が温度に比べて十分に重いとき、媒質であ るクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)におけ る不純物とみなせることができ、QGPをプローブで きる。本研究では、この不純物の拡散過程を現象論 的に記述するランジュバン方程式を相対論的に拡張 し、さらに相対論的重イオン衝突実験で生成された 媒質の時空発展を記述する流体力学模型と融合させ ることで、実験データとの比較を行った。上記の相 対論的ランジュバン方程式に含まれる基本的な物理 量は、QGP中で重いクォークに働く摩擦力であり、 実験との比較から見積もることで、摂動論的QCDの 予言する値よりも大きいことを示した。さらに近年 盛んに研究されているゲージ/重力対応からの予想値 と誤差の範囲で一致することも分かった。このこと から、QGPの強結合性を重いクォークの摩擦力の観 点から明らかにした。[49, 130, 131, 192, 193, 233]

また、さらなる実験的な拘束を得ることを目指し、 対生成時にはあったはずの重いクォーク・反クォーク 対の運動量相関が、拡散過程によっていかに消失す るか調べた。具体的には、重いクォークからのセミレ プトニック崩壊による電子や陽電子、ミューオンや反 ミューオン、ハドロンの相関の計算を行い、先に得ら れた摩擦力で実験的に運動量相関の減少が観測され得 ることを予言した。[42, 71, 130, 131, 192, 193, 233] QGP をプローブする他の物理量として、レプトン 対の放射がある。レプトン対は、QGP 中のベクトル 的なモードをプローブすることができる。この研究 の中心的興味は、真空でのベクトル中間子が高温環 境下でどのような振る舞いをするか、という点にあ る。QGP 中のベクトル的なモードは、高温では自由 なクォークの自由度からつくられる、あるいは、ま だベクトル中間子的な集団励起として見える、とい う異なるシナリオを実験的に選別できないか調べた。

Proper Heavy Quark Potential from a Spectral Decomposition of the Thermal Wilson Loop

A suppression of heavy quarks, especially J/ψ , that was predicted to be one of the prime signals of a high temperature phase transition in QCD has been observed recently in Heavy-Ion collisions at the RHIC facility. To understand the details of the underlying physics, a consistent picture of heavy quarkonia in a hot and dense medium is needed around the critical temperature. This research is therefore concerned with a first-principles derivation of a non-perturbative definition of the heavy quark potential from lattice QCD.

We base our approach on a spectral decomposition of the thermal Wilson loop, which allows us to connect the standard formulation at zero temperature and the perturbative hard thermal loop calculations by Laine et al. in the high temperature limit. Our method differs qualitatively from the usual use of Polyakov line correlators, for it provides in particular a determination of both real and imaginary part of the potential at all temperatures. The thermal Wilson loop with size $(\tau \times R)$ and its spectral representation read

$$\mathcal{W}(\tau, R) \propto \int e^{-\bar{\omega}\tau} \rho(\bar{\omega}, R) d\bar{\omega}.$$

We deploy finite temperature quenched lattice QCD on an anisotropic $\xi = 4$ lattice to calculate the Wilson loop with sufficiently high resolution in imaginary time for $20^3 \times 32 - 20^3 \times 96$ with coupling parameter $6/g^2 = 7.0$. Then, by using the maximum entropy method (MEM) or exponential fitting, where applicable, the spectral function for given $Q\bar{Q}$ distance R is extracted. The real and imaginary part of the potential can now be readily determined from the peak position and width of the spectral function since a Fourier transform connects both quantities

$$\int d\bar{\omega} e^{-i\bar{\omega}t} \rho(\bar{\omega}, R) d\bar{\omega} \sim e^{-itV(R)} \ (t \to \infty).$$

In our ongoing investigation during fiscal year 2009, we have successfully extracted the proper potential below the critical temperature, where it coincides with the Coulomb gauge fixed free energies in the color singlet channel.



Currently the main focus lies on a reliable determination of the proper potential above the deconfinement phase transition, since the possible existence of a spectral width invalidates simple exponential fitting and mandates the use of MEM.

[113, 114, 132, 134, 133, 194, 72, 43]

Two-color QCD の高バリオン数密度極限の研究

有限温度密度 QCD は初期宇宙や中性子星の内部 構造、重イオン衝突等の幅広い物理に応用を持つが、 有限バリオン数密度では格子ゲージ理論のモンテ・ カルロ計算が困難となるため、高密度極限における カラー超伝導の予言等にも関らず第一原理からの理 解は今も十分には進んでいない。しかしカラーの数 を3から2に変えると、新しい対称性が存在して格

子シミュレーションが有限密度においても可能とな る。本研究では、このカラーが2のQCD("two-color QCD")の高密度極限に関する理論的研究を行った。 その中で、高密度極限におけるカイラル対称性の自発 的な破れに伴う南部・ゴールドストーン場の低エネル ギー有効ラグランジアンを導くとともに有限体積の ε -regime が高密度極限においても存在することを指 摘し、有限体積系の分配関数のクォーク質量依存性を 解析的に求めた。そしてディラック演算子の固有値が 満たすスペクトル和則を導き、microscopic spectral correlation function を定義し、それを与えるカイラ ルランダム行列理論の存在を予想した。(これらの結 果は通常の QCD の高密度極限 (CFL 相) に関する 我々の結果 [40] の two-color QCD への拡張である。) さらに新しい非エルミートカイラルランダム行列理論 を導入し、そのラージサイズ極限が two-color QCD の高密度での有効ラグランジアンと一致することを証 明した。[44, 45, 73, 74, 115, 116, 214, 195, 196, 197]

ボソン・フェルミオン混合系の相構造の研究

有限密度 QCD においては、高密度領域でカラー 超伝導状態が実現し、低密度側では核子の形成が起 こると考えられている。さらに、核子は高密度側の 有効自由度であるダイクォークとクォークの束縛状 態と見なすことが出来る。本研究では、ダイクォー クをボソン、クォークをフェルミオン、核子を複合 フェルミオンに抽象化したボソン・フェルミオン混 合系の相構造の解析を行った。相構造を決める制御 パラメーターとして、温度とボソン・フェルミオン 間の引力相互作用の強さを用い、冷却原子気体にお けるハドロン物理の模擬実験を提唱した。我々は実 験に先駆けて、弱結合領域では誘起相互作用の摂動 計算を行い、ボソンの超流動相と不安定相が存在す ることを示した。一方、強結合領域では複合フェル ミオンの低エネルギー有効理論を導出し、複合フェ ルミオンの超流動状態が実現しうることを明らかに した。[46, 47, 135, 136, 234, 235]

格子ゲージ理論に基づくグラフェンの相構造の研究

グラフェン (graphene) は六角格子状に配列し た炭素原子の単原子層である。その電子軌道上をホッ プする電子系は、低エネルギー領域では (3+1) 次元 の U(1) ゲージ場と相互作用する (2+1) 次元の無質 量 Dirac 粒子として記述できる。グラフェン上の電子 のフェルミ速度は光速の約 300 分の 1 倍と遅いため、 電子間の Coulomb 相互作用の実効的な強さは、真空 中においては量子電磁気学 (QED)の約 300 倍とい うきわめて大きな値で記述される。この強結合性に より、真空中のグラフェン上の電子は、エネルギー・ スペクトルにギャップを生じ絶縁体として振舞う可 能性が示唆されている。これは量子色力学 (QCD) に 代表される強結合ゲージ理論における、カイラル対 称性の自発的破れに伴うフェルミオンの動的質量生 成と同様のメカニズムによって記述される。 本研究では、グラフェンの低エネルギー有効理論 を正方格子上で正則化し、QCDの解析においても有 効な手段である強結合展開の手法を適用した。これ により、系の有効ポテンシャルをエキシトン凝縮(カ イラル対称性の破れの秩序変数)の関数として強結 合展開の1次のオーダーまで評価し、エキシトン凝 縮の大きさはCoulomb相互作用が弱くなるにつれて 小さくなることを示した。さらに、集団励起の分散関 係の式を導出し、秩序変数の位相揺らぎに対応する π 励起はカイラル対称性の破れに伴う南部-Goldstone モードとして振舞い、その励起エネルギーはQCDで の π 中間子に対する Gell-Mann-Oakes-Renner 関係 式と同様に、フェルミオンの質量の 1/2 乗に比例す ることを示した。[48, 117, 198, 199, 200]

格子ゲージ理論に基づくチャーモニューム-核子相互 作用の研究

チャーモニューム (重い中間子)-核子系の特徴は、 互いの構成要素として同種フレーバーのクォークを 含まないことにより、多重グルーオン交換による相 互作用、所謂カラーファンデルワールス力が支配的と なることである。そのため、原子核内においてチャー モニュームはパウリ排他律に由来される短距離斥力 効果を全く感じず、さらに、核子とのカラー・ファン デルワールス力が常に引力であることからチャーモ -ウムが原子核に束縛される可能性が高い。しかし ながら、実際に束縛させるためにどのくらい大きな 核子数の原子核が必要かは、核子-チャーモニウム間 _体相互作用の詳細に強く依っている。本研究で ത_ は、相対論的重クォーク作用を用いた定式化と、ハ ドロン間の Bethe-Salpeter 振幅からポテンシャルを 導出する定式化を用いて格子 QCD 数値解析を行っ た。今年度は、クォークの真空偏極を無視したクエ ンチ近似で、且つクォーク質量がパイオン質量に換 算して 0.5-0.8 GeV の比較的重いクォーク質量を用 いた予備計算を行い、初めてチャーモニューム-核子 間ポテンシャルを QCD の第一原理から導くことに 成功した。得られたポテンンシャルの特徴としては、 「相対距離に依らず常に引力的であること」と「1 fm 近傍で指数関数的に遮蔽される短距離力」であるこ とが挙げられる。これは、チャーモニュームが核子 数の大きな原子核に対し、いずれ束縛状態が実現す ることを意味するだけでなく、カラーの閉じ込めに 関連する非摂動論的効果の重要性を示唆している。

[88, 211, 187, 128, 129]

高エネルギーハドロン物理学

我々の研究室では、高温・高密度状態における極限状態の核物質「クォーク・グルーオン・プラズマ (quark gluon plasma, QGP)」の実現の場としての 高エネルギー原子核衝突反応に注目し、測定結果を 基にした理論的研究、いわば観測的 QGP 論の研究 を展開している。特に、数値シミュレーションに基 づくクォーク・グルーオン・プラズマの流体力学的 記述、ハドロンガスの運動学的記述、クォーク・グ ルーオン・プラズマ中の高エネルギージェット、重い クォークやクォーコニウムの伝播、高エネルギーハ ドロン・原子核の普遍的な姿としてのカラーグラス 凝縮など、多角的な視点から、高温クォーク・ハド ロン物質の熱力学的性質、輸送的性質を解明するこ とを目的としている。

相対論的重イオン衝突反応の統合的記述

高エネルギー重イオン衝突反応は、エネルギース ケール、タイムスケールに応じて、様々な様相を示 す。したがって、反応全体を記述するためには、個々 のスケールに有効なモデルを適切に組み合わせる必 要がある。我々は、衝突初期のカラーグラス凝縮、 中間状態としての QGP の流体力学、終状態として のハドロンの運動学を組み合わせたモデルの構築を 行っている。この立場から、現状の RHIC における 実験結果の包括的な解釈を行うレビュー講演を行っ た [77, 81, 174, 175, 176, 177, 178, 215, 216, 217]。

重いクォークを用いた QGP の探索

相対論的重イオン衝突反応を通して QGP の性質 を調べるには、物質自身の振る舞いだけでなく、物 質にプローブを通して調べることもできる。QGP 流 体中を通過する重いクォークの確率過程を用いて、 QGP が重いクォークに与える摩擦力の定量的な評価 を行い、AdS/CFT 対応から予想されている値程度 となることが分かった [49, 71]。また、1 粒子分布だ けでなく、重いクォークとその反クォークの対生成 の相関が媒質中でどのように変更を受けるか、その 変更を効率的に見るためにはどのようなチャンネル が有効かを調べ、重いクォークの半レプトン崩壊で 出てきた電子とミューオンの相関関数を計算し、媒 質の性質と定量的に結びつけた [42, 71]。

相対論的粘性流体力学

高エネルギー重イオン衝突反応において生成され る高温 QCD 物質の時空発展に対する相対論的流体モ デルでは、非平衡過程の取り扱いが重要な課題となっ ている。まず多成分系における位相分布関数の粘性 による歪みを一意的に求める方法を考案した。これ を用いて重イオン衝突反応における粒子スペクトル に対する分布補正の効果を定量的に見積もり、従来 小さいと考えられていた体粘性の効果が重要である ことを発見した [52, 80, 89, 137, 138, 179, 201, 202]。 次に分布歪みの議論に基づき、粒子の生成消滅など非 弾性散乱がある多成分系における相対論的粘性流体 力学を構築した。素朴に線形応答として散逸の効果を 記述すると、因果律が破れることが指摘されている。 その問題を回避する一つの方法が、エントロピー流 の高次の補正を考慮し、散逸を表すカレントに対す る構成方程式に緩和項を得ることである。このとき新 たなモーメント方程式を考えることにより、任意の慣 性系において全ての散逸カレントに対しての構成方 程式を得た。また得られた式には、旧来表れなかった 項が数多く表れる事を確認した[89,137,138,179]。 さらにオンサーガーの相反定理に基づいて、複数保 存流が存在する系でも適応可能な相対論的粘性流体 力学を定式化した。

また、相対論的粘性流体力学についての講義を行った [216]。

QGP からの電磁放射

QGP 内部の情報を担う粒子として、光子やレプト ン対などの強い相互作用をしない粒子が注目されて いる。高エネルギー重イオン衝突反応における光子 生成を解析するためには、さまざまな寄与を考慮に 入れる必要がある。我々は、衝突初期のハード過程 により生成される光子、媒質の熱的輻射、ハードな パートンとQGP の相互作用による転化 (conversion) 過程、及び、ハードなパートンの破砕過程を系統的 に評価した。最も興味のある QGP からの熱的輻射 の寄与が主要になる運動領域は $1 < p_T < 3 \text{ GeV}/c$ と分かった [75]。更に、熱的輻射に注目し、光子の 楕円型フロー係数を評価し、ハドロンの場合とは異 なる横運動量依存性を示すことが分かった [51, 78]。

反応初期状態の揺らぎの影響

有限の衝突係数の反応では、重イオン同士が重な り合う楕円のような形の高温物質ができると考えら れており、この描像は楕円型フローの観測で確かめ られている。事象平均としてこのような描像は正し いものの、一方で、衝突する重イオン内の核子の位 置は事象毎に揺らいでおり、結果として楕円形も揺 らいでいると考えられている。この揺らぎの効果を、 衝突初期を記述するグラウバー模型、及び、カラー グラス凝縮模型に取り入れ、流体数値シミュレーショ ンの初期条件の計算を行った。特に銅イオンのよう な金イオンに比べてサイズの小さい反応系の場合、 楕円型フローパラメータを、より良く再現すること が分かった [50, 79]。この補正は、今後、QGP の輸 送係数を実験結果から引き出す上で重要になる。

QGP 阻止能の導出

大きな運動量を持ったパートンは媒質との相互作 用により、エネルギー損失を起こす。この定量的な 解析から、媒質自身の情報を引き出す手法はジェット トモグラフィーと呼ばれている。 π^0 と半レプトン崩 壊による電子の nuclear modification factor、ハドロ ンの2粒子相関の実験データを、最新のモデル計算 を用いて大域的にフィッティングを行い、統計的手 法を駆使して、エネルギー損失に関わる QGP の阻 止能パラメータの最尤値を導出した [53]。その結果、 物質が理想気体的に振舞うと想定される値から大き くずれていることが判明した。

重イオン衝突の初期状態

重イオン衝突反応で、QGP の熱平衡化がどのように起こるか、そのときのエネルギー密度分布がど のようであるかは、いまだ不明な点が多い。そこで event generator の一つ EPOS を用いて、衝突直後の エネルギー密度分布を計算し、流体数値シミュレー ションの初期条件に用いた。特に、衝突軸方向のエ ネルギー密度分布は従来、流体モデルで用いられて いるラピディティ依存性がほとんどないものとは異 なり、中心ラピディティでピークを持つ。この初期 条件を用いて楕円型フローのラピディティ依存性の 解釈を試みた [76]。

<受賞>

- [1] 平野哲文:平成21年度科学技術分野の文部科学大
 臣表彰「若手科学者賞」(文部科学省、2009年4月 14日).
- [2] 平野哲文:第24回西宮湯川記念賞(西宮市、2009年 11月5日).
- [3] 池田陽一:第4回日本物理学会若手奨励賞(第11回核 理論新人論文賞)(2010)受賞研究:3体精密計算 に基づくストレンジダイバリオン共鳴の研究
- [4] 山本直希:平成21年度理学系研究科研究奨励賞(博士) 東京大学大学院理学系研究科、2010年3月
- [5] 角田直文:平成 21 年度理学系研究科研究奨励賞(修士) 東京大学大学院理学系研究科、2010 年 3 月

<報文>

(原著論文)

- [6] R. Kanungo, C. Nociforo, A. Prochazka, et al., "One-Neutron Removal Measurement Reveals O-24 as a New Doubly Magic Nucleus", Phys. Rev. Lett., 102, 152501 (2009)
- P. Maierbeck, R. Gernhauser, R. Krucken, et al., "Structure of Ti-55 from relativistic one-neutron knockout", Phys. Lett., B675, 22-27 (2009)
- [8] T. Suzuki, M. Honma, K. Higashiyama, et al., "Neutrino-induced reactions on Fe-56 and Ni-56, and production of Mn-55 in population III stars", Phys. Rev., C79, 061603 (2009)
- [9] M. De Rydt, G. Neyens, K. Asahi, et al., "Precision measurement of the electric quadrupole moment of Al-31 and determination of the effective proton charge in the sd-shell", Phys. Lett., B678, 344-349 (2009)
- [10] S. Zhu, R.V.F. Janssens, B. Fornal, et al., "Highlying, non-yrast shell structure in Ti-52", Phys. Rev., C80, 024318 (2009)

- [11] M. Ionescu-Bujor, A. Iordachescu, S.M. Lenzi, et al., "High-spin structure of Cl-37, intruder excitations, and the sd-fp shell gap", Phys. Rev., C80, 034314 (2009)
- [12] G.A. Lalazissis, S. Karatzikos, M. Serra, et al., "Covariant density functional theory: The role of the pion", Phys. Rev., C80, 041301 (2009)
- [13] Y. Iwata, T. Otsuka, J.A. Maruhn, et al., "Synthesis of exotic nuclei in heavy ion collisions at higher energies", Euro. Phys. Jour., A42, 625-625 (2009)
- [14] M. Honma, T. Otsuka, T. Mizusaki, et al., "New effective interaction for f(5)pg(9)-shell nuclei", Phys. Rev., C80, 064323 (2009)
- [15] T. Nakamura, N. Kobayashi, Y. Kondo, et al., "Halo Structure of the Island of Inversion Nucleus Ne-31", Phys. Rev. Lett., 103, 262501 (2009)
- [16] Takaharu Otsuka, Toshio Suzuki, Michio Honma, Yutaka Utsuno, Naofumi Tsunoda, Koshiroh Tsukiyama, and Morten Hjorth-Jensen, "Novel Features of Nuclear Force and Shell Evolution in Exotic Nuclei", Phys. Rev. Lett., **104**, 012501 (2010)

(Selected for a Viewpoint in Physics)

- [17] S. Aoki, T. Hatsuda, and N. Ishii, "Theoretical Foundation of the Nuclear Force in QCD and its applications to Central and Tensor Forces in Quenched Lattice QCD Simulations", Prog. Theor. Phys. **123**,89-128(2010).
- [18] T. Abe and R. Seki: "Lattice Calculation of Thermal Properties of Low-Density Neutron Matter with Pionless NN Effective Field Theory", Phys. Rev. C79, 054002 (2009).
- [19] T. Abe and R. Seki: "From Low-Density Neutron Matter to the Unitary Limit", Phys. Rev. C79, 054003 (2009).
- [20] Nan Wang, Lu Guo, "Ground state properties of La isotopes in reflection asymmetric relativistic mean field theory," Sci. China Ser. G52(10), 1574 (2009).
- [21] K. Tsukiyama, M. Hjorth-Jensen and G. Hagen: "Gamow shell-model calculations of drip-line oxygen isotopes", Phys. Rev. C 80, 051301(R), (2009).
- [22] Shun Uchino, Michikazu Kobayashi, and Masahito Ueda: "Bogoliubov Theory and Lee-Huang-Yang Corrections in Spin-1 and Spin-2 Bose-Einstein Condensates in the Presence of a Quadratic Zeeman Effect", cond-mat/0912.0355 (Phys. Rev. A に投稿中).
- [23] K. Nomura, N. Shimizu, and T. Otsuka: "Formulating the Interacting boson Model by mean-field methods", Phys. Rev. C 81, 044307 (2010)
- [24] Takaharu Otsuka, Toshio Suzuki, Michio Honma, Yutaka Utsuno, Naofumi Tsunoda, Koshiroh Tsukiyama, and Morten Hjorth-Jensen

"Novel Features of Nuclear Force and Shell Evolution in Exotic Nuclei", Phys. Rev. Lett.,**104**, 012501 (2010) (Selected for a Viewpoint in *Physics*)

- [25] Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, H. Ohno, T. Umeda, "Free energies of heavy quarks in full-QCD lattice simulations with Wilson-type quark action", Nucl. Phys. A 830, 247C (2009).
- [26] Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, H. Ohno, T. Umeda, "Fixed scale approach to the equation of state on the lattice", Nucl. Phys. A 830, 801C (2009).
- [27] S. Ejiri, Y. Maezawa, N. Ukita, S. Aoki, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, T. Umeda (WHOT-QCD Coll.), "Equation of State and Heavy-Quark Free Energy at Finite Temperature and Density in Two Flavor Lattice QCD with Wilson Quark Action", arXiv:0909.2121 [hep-lat].
- [28] Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, N. Ukita, T. Umeda (WHOT QCD Coll.), "Electric and Magnetic Screening Masses at Finite Temperature from Generalized Polyakov-Line Correlations in Two-flavor Lattice QCD", to appear in Phys. Rev. D (2010) [arXiv:1003.1361 [hep-lat]].
- [29] S. Sasaki and T. Yamazaki
 Lattice study of flavor SU(3) breaking in hyperon beta decay,
 Phys. Rev. D79 (2009) 074508.
- [30] T. Yamazaki, Y. Aoki, T. Blum, H.-W. Lin, S. Ohta, S. Sasaki, R. Tweedie, J. Zanotti, Nucleon form factors with 2+1 flavor dynamical domain-wall fermions, Phys. Rev. **D79** (2009) 114505.
- [31] K.-I. Kondo, Kugo-Ojima color confinement criterion and Gribov-Zwanziger horizon condition, e-Print: arXiv:0904.4897 [hep-th], Phys.Lett. B678, 322-330 (2009).
- [32] K.-I. Kondo, Infrared behavior of the ghost propagator in the Landau gauge Yang-Mills theory, e-Print: arXiv:0907.3249 [hep-th], Prog. Theor. Phys. 122, No.6, pp.1455–1475 (2009).
- [33] K.-I. Kondo, Decoupling and scaling solutions in Yang-Mills theory with the Gribov horizon, e-Print: arXiv:0909.4866 [hep-th], Phys. Rev. D, submitted.
- [34] A. Shibata, K.-I. Kondo, T. Shinohara, The exact decomposition of gauge variables in lattice Yang-Mills theory, e-Print: arXiv:0911.5294 [hep-lat], Phys. Lett. B, submitted.
- [35] Y. Ikeda, H. Kamano and T. Sato, "On the resonance energy of the strange dibaryon," Nucl. Phys. A 835, 386 (2010).

- [36] D. Jido, T. Sekihara, Y. Ikeda, T. Hyodo, Y. Kanada-En'yo and E. Oset, "The nature of Lambda(1405) hyperon resonance in chiral dynamics," Nucl. Phys. A 835, 59 (2010).
- [37] T. Sato and Y. Ikeda, "anti-K N N resonance anti-K N N - pi Y N coupled channel Faddeev equation," Mod. Phys. Lett. A 24 (2009) 895.
- [38] M. Eto, M. Nitta, and N. Yamamoto: "Instabilities of Non-Abelian Vortices in Dense QCD", to appear in Phys. Rev. Lett., arXiv:0912.1352 [hep-ph].
- [39] H. Abuki, G. Baym, T. Hatsuda, and N. Yamamoto: "The NJL model of dense three-flavor matter with axial anomaly: the low temperature critical point and BEC-BCS diquark crossover", submitted to Phys. Rev. D, arXiv:1003.0408 [hepph].
- [40] N. Yamamoto and T. Kanazawa: "Dense QCD in a Finite Volume", Phys. Rev. Lett. 103, 032001 (2009).
- [41] Y. Akamatsu, T. Hatsuda and T. Hirano: "Heavy Quark Diffusion with Relativistic Langevin Dynamics in the Quark-Gluon Fluid", Phys.Rev.C79, 054907 (2009).
- [42] Y. Akamatsu, T. Hatsuda and T. Hirano: "Electron-muon correlation as a new probe of strongly interacting quark-gluon plasma" Phys.Rev.C80, 031901(R) (2009).
- [43] J. Berges, J. Pruschke, A. Rothkopf, "Instabilityinduced fermion production in quantum field theory", Phys. Rev. D 80, 023522 (2009)
- [44] T. Kanazawa, T. Wettig, N. Yamamoto: "Chiral Lagrangian and spectral sum rules for dense two-color QCD", JHEP 0908(2009)003 [arXiv:0906.3579]
- [45] T. Kanazawa, T. Wettig, N. Yamamoto: "Chiral random matrix theory for two-color QCD at high density", to appear in Phys. Rev. D [arXiv:0912.4999]
- [46] K. Maeda, G. Baym, and T. Hatsuda: "Simulating Dense QCD Matter with Ultracold Atomic Boson-Fermion Mixtures", Phys.Rev.Lett. 103, 085301 (2009).
- [47] T. Hatsuda and K. Maeda: "Quantum Phase Transitions in Dense QCD", arXiv:0912.1437, to be appeared in "Understanding Quantum Phase Transitions" edited by Lincoln D. Carr, CRC Press (2010).
- [48] Y. Araki and T. Hatsuda, "Chiral Gap and Collective Excitations in Monolayer Graphene from Strong Coupling Expansion of Lattice Gauge Theory", arXiv:1003.1769[cond-mat.str-el].
- [49] Y. Akamatsu, T. Hatsuda, and T. Hirano: "Heavy Quark Diffusion with Relativistic Langevin Dynamics in the Quark-Gluon Fluid", Phys. Rev.C 79, 054907 (2009).

- [50] T. Hirano and Y. Nara: "Eccentricity fluctuation effects on elliptic flow in relativistic heavy ion collisions", Phys. Rev. C 79, 064904 (2009).
- [51] F.M. Liu, T. Hirano, K. Werner and Y. Zhu: "Elliptic flow of thermal photons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", Phys. Rev. C 80, 034905 (2009).
- [52] A. Monnai and T. Hirano: "Efects of Bulk Viscosity at Freezeout", Phys. Rev. C 80, 054906 (2009).
- [53] N. Armesto, M. Cacciari, T. Hirano, J. L. Nagle, and C. A. Salgado: "Constraint fitting of experimental data with a jet quenching model embedded in a hydrodynamical bulk medium", J. Phys. G 37, 025104 (2010).

(会議抄録)

- [54] T. Otsuka, T. Suzuki and Y. Akaishi, "The Fujita-Miyazawa 3N Mechanism and Neutron-rich Exotic Nuclei", Proc. of the Int. Symposium New Facet of Three Nucleon Force - 50 Years of Fujita Miyazawa Three Nucleon Force (FM50), AIP Conf. Proc., Vol. 1011, 153, (2008).
- [55] T. Otsuka, "Hadronic Interaction and Structure of Exotic Nuclei", Proc. of the Franco-Japanese Symposium "New Paradigms in Nuclear Physics", Int. J. Mod. Phys. E18, 1981-1985 (2009).
- [56] T. Otsuka, N. Tsunoda, K. Tsukiyama, T. Suzuki, M. Honma, Y. Utsuno, M. Hjorth-Jensen, J. Holt and A. Schwenk, "Hadronic Interaction and Exotic Nuclei", Proc. of the Int. Conference Nuclear Structure and Dynamics '09, AIP Conf. Proc., Vol. 1165, 47-52, (2009).
- [57] H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, and T. Hatsuda, "Hyperon-Nucleon Forces Calculated From Lattice QCD", Int. J. Mod. Phys. A24,2110-2117(2009).
- [58] N. Ishii for PACS-CS and HAL-QCD Collaboration, "Lattice study of nuclear forces", PoS(LATTICE2009)019(2009).
- [59] K. Murano, N. Ishii, S. Aoki, and T. Hatsuda, "Energy dependence of nucleon-nucleon potentials in lattice QCD", PoS(LATTICE2009)126(2009).
- [60] K. Tsukiyama, T. Otsuka and R. Fujimoto: "Lowlying Continuum States in Oxygen Isotopes", AIP Conf. Proc., Vol. 1165, p59, (2009).
- [61] K. Nomura, N. Shimizu, and T. Otsuka, "New Microscopic Derivation of the Interacting Boson Model and its Applications to Exotic Nuclei", AIP Conference Proceedings, **1165** 215–218 (2009)
- [62] Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya, H. Ohno, T. Umeda (WHOT-QCD Coll.), "Heavy-quark free energy at finite temperature with 2+1 flavors of improved Wilson quarks in fixed scale approach", PoS LAT2009, 165 (2009).
- [63] K. Kanaya, S. Aoki, H. Ohno, T. Umeda, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, Y. Maezawa, "Towards the

equation of state in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks in the fixed scale approach", PoS **LAT2009**, 190 (2009).

- [64] Kei-Ichi Kondo, Gauge-invariant magnetic monopole dominance in quark confinement, Talk presented at 4th International Symposium on Symmetries in Subatomic Physics, June 2-5, 2009 at Department of Physics, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, to appear in the proceedings.
- [65] Kei-Ichi Kondo, An exact result for the behavior of Yang-Mills Green functions in the deep infrared region, presented at 12th Marcel Grossmann Meeting, UNESCO, Paris, France, July 13-18, to appear in the proceedings.
- [66] Kei-Ichi Kondo, Gribov-Zwanziger horizon condition, ghost and gluon propagators and Kugo-Ojima confinement criterion, Talk presented at International Workshop on QCD Green's Functions, Confinement and Phenomenology, September 7-11, 2009, ECT* Trento, Italy, e-Print: arXiv:0911.2880 [hep-th], to appear in the proceedings.
- [67] Kei-Ichi Kondo, Infrared behavior of ghost and gluon propagators compatible with color confinement in Yang-Mills theory with the Gribov horizon, Talk presented at Strong Coupling Gauge Theories in LHC Era, Dec. 8 - 11, 2009, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan.
- [68] S. Kato, K.-I. Kondo, A. Shibata, T. Shinohara, S. Ito, Gauge-independent derivation of 'Abelian' dominance and magnetic monopole dominance in the string tension, Talk given at Contribution to the "XXVII International Symposium on Lattice Field Theory", July 26-31, 2009, Peking University, Beijing, China, e-Print: arXiv:0911.0755v1 [hep-lat]
- [69] A. Shibata, K.-I. Kondo, S. Kato, S. Ito, T. Shinohara, N. Fukui, Topological configurations of Yang-Mills field responsible for magnetic-monopole loops as quark confiner, Talk given at Contribution to the "XXVII International Symposium on Lattice Field Theory", July 26-31, 2009, Peking University, Beijing, China, e-Print: arXiv:0911.4533 [heplat]
- [70] 山本直希、金澤拓也、T. Wettig: "Dirac spectrum and Lee-Yang zeros in dense QCD",『素粒子論研 究』118 巻 1 号 (2010 年 5 月号) 掲載予定
- [71] Y. Akamatsu, T. Hatsuda and T. Hirano: "Langevin + Hydrodynamics Approach to Heavy Quark Propagation and Correlation in QGP", proceedings of the 21st International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2009), Nucl.Phys.A830, 865C (2009).
- [72] T. Hatsuda, A. Rothkopf, S. Sasaki, "Proper heavy-quark potential from a spectral de-

composition of the thermal Wilson loop" PoS(LAT2009)162

- [73] T. Kanazawa, T. Wettig, N. Yamamoto: "Chiral Lagrangian and spectral sum rules for twocolor QCD at high density", PoS(LAT2009)195 [arXiv:0910.2300]
- [74] 金澤拓也、T. Wettig、山本直希: "Dirac spectrum in dense two-color QCD",『素粒子論研究』118巻 1号(2010年5月号)掲載予定
- [75] F.-M. Liu, T. Hirano, K. Werner, and Y. Zhu:
 "Jet quenching and direct photon production", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 36, 064072 (2009).
- [76] K. Werner, T. Hirano, Iu. Karpenko, T. Pierog, S. Porteboeuf, M. Bleicher, and S. Haussler: "On the role of initial conditions and final state interactions in ultrarelativistic heavy ion collisions", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **36**, 064030 (2009).
- [77] T. Hirano: "Hydrodynamic analysis of heavy ion collisions at RHIC", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 36, 064031 (2009).
- [78] F.-M. Liu, T. Hirano, K. Werner, and Y. Zhu: "Elliptic flow of thermal photons at midrapidity in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", Nucl. Phys. A **830**, 587C (2009).
- [79] T. Hirano and Y. Nara: "Eccentricity Fluctuation in Initial Conditions of Hydrodynamics", Nucl. Phys. A 830, 191C (2009).
- [80] A. Monnai and T. Hirano: "Effects of Bulk Viscosity on p_T-Spectra and Elliptic Flow Parameter", Nucl. Phys. A 830, 471C (2009).
- [81] T. Hirano: "Dynamical Modeling of Nucleus-Nucleus Collisions at High Energies", Nucl. Phys. A 834, 241c (2010).
- (国内雑誌)
- [82] 初田哲男, "21 世紀に活きる南部先生のアイデア",南 部陽一郎先生ノーベル賞受賞記念特集号:対称性の自 発的破れ-現在・過去・未来-,(原子核研究、2009 年 53 巻 Supp.3).
- [83] 初田哲男,"量子力学",第2版 現代数理科学事典, (丸善、2009年12月).
- [84] 池田陽一,原子核研究 第54巻2号(2010年3月発行)
 "3体精密計算に基づくストレンジダイバリオン共鳴の研究," p.29
- (学位論文)
- [85] 山本直希: "Hadron-quark continuity and duality in dense QCD", 博士論文
- [86] 角田直文: "核力の有効相互作用におけるテンソル力", 修士論文
- [87] 荒木康文: "格子ゲージ理論に基づくグラフェンの相 構造の研究",修士論文

- [88] 河内太一: "格子ゲージ理論に基づくチャーモニューム-核子相互作用の研究",修士論文
- [89] 門内晶彦: "Relativistic Viscous Hydrodynamics for Multi-Component Systems", 修士論文.

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [90] N. Shimizu : "Shell model calculations on Sn isotopes", Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS, Hilton Waikoloa Village, Hawaii, USA, Oct. 13-17, 2009.
- [91] N. Shimizu : "Monte-Carlo Shell Model for ab initio calculation", EFES-NSCL workshop on Perspectives on the modern shell model and related experimental topics National Superconducting Cyclotron Laboratory, Michigan State University, East Lansing, Michigan, USA, Feb., 4-6, 2010.
- [92] N. Shimizu : "Tests of the ab initio Monte Carlo Shell Model 1", EFES-Iowa mini workshop on the ab initio Monte Carlo Shell Model (MCSM), Iowa State University, Ames, Iowa, USA, Feb. 26-27, 2010.
- [93] T. Abe, P. Maris, T. Otsuka, N. Shimizu, Y. Utsuno and J. P. Vary: "No-core Monte Carlo shell model calculation for light nuclei with JISP16 NN interaction", Workshop for "ab-initio calculations and nuclear forces", HI, USA, October 12, 2009
- [94] T. Abe, P. Maris, T. Otsuka, N. Shimizu, Y. Utsuno and J. P. Vary: "ab-initio no-core full configuration calculation of light nuclei by Monte Carlo shell model with JISP16 NN interaction", Third joint meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS, HI, USA, October 13-17, 2009
- [95] T. Abe, P. Maris, T. Otsuka, N. Shimizu, Y. Utsuno and J. P. Vary: "Tests on the ab initio Monte Carlo shell model 2", EFES-Iowa Mini Workshop on the ab initio Monte Carlo Shell Model (MCSM), Iowa State University, IA, USA, Feb. 26, 2010
- [96] K. Tsukiyama, S. K. Bogner and A. Schwenk: "In-medium similarity renormalization group to finite nuclei", ICHOR-EFES International Symposium on New Facet of Spin-Isospin Responses (SIR2010), U. Tokyo, Japan, February 19, 2010.
- [97] K. Tsukiyama, S. K. Bogner and A. Schwenk: "Inmedium similarity renormalization group to finite nuclei", JUSTIPEN workshop, RIKEN, Japan, December 7-9, 2009.
- [98] K. Tsukiyama, S. K. Bogner and A. Schwenk: "In-medium similarity renormalization group to many-body problems", APS-DNP/JPS meeting, Waikoloa Hawaii, U. S. A., October 13-17, 2009.
- [99] K. Tsukiyama, S. K. Bogner and A. Schwenk: "In-medium Similarity Renormalization Group for Finite Nuclei", The 8th CNS Summer School, RIKEN, Japan, August 26-September 1, 2009.

- [100] K. Tsukiyama, S. K. Bogner and A. Schwenk: "In-medium similarity renormalization group to many-body problems", Confrontation and Convergence in Nuclear Theory, ECT* Trento, Italy, July 27-31, 2009.
- [101] K. Tsukiyama, S. K. Bogner and A. Schwenk: "In-medium similarity renormalization group to the nuclear shell model", Development of nuclear structure models from the viewpoint of nuclear force, YITP, Kyoto, Japan, May 20-22, 2009.
- [102] K. Tsukiyama, T. Otsuka and R. Fujimoto: "Continuum states of drip-line Oxygen isotopes", Perspectives on the modern shell model and related experimental topics, NSCL/MSU, U. S. A., February 4-6, 2010.
- [103] K. Tsukiyama, T. Otsuka and M. Hjorth-Jensen: "Low-lying Continuum States of Oxygen drip-line isotopes", Nuclear Structure and Dynamics 09, Dubrovnik, Croatia, May 4-8, 2009.
- [104] K. Tsukiyama, T. Otsuka, G. Hagen and M. Hjorth-Jensen: "Low-lying Continuum states of Oxygen Drip-line isotopes", FIDIPRO-EFES Workshop, Saariselkä, Finland April 20-24, 2009.
- [105] L. Liu, T. Otsuka, N. Shimizu, "From UCOM potential to Shell-Model and Monte Carlo Shell-Model calculation", Joint Meeting of the APS and JPS 2009, Waikoloa, USA
- [106] L. Liu, T. otsuka, S. Shimizu, "From UCOM potential to Shell-Model and Monte Carlo Shell-Model calculation", The 8th CNS-EFES International Summer School, Wako, Saitama, Japan
- [107] K.-I. Kondo: 12th Marcel Grossmann Meeting, UNESCO, Paris, France, July 13-18; An exact result for the behavior of Yang-Mills Green functions in the deep infrared region
- [108] K.-I. Kondo: New Frontiers in QCD 2010? Exotic Hadron Systems and Dense Matter –, Yukawa International Program for Quark-Hadron Sciences, January 18?March 19, 2010, Yukawa Instutite for Theoretical Physics, Kyoto University, Japan; Toward a first-principle derivation of confinment and chiral-symmetry crossover transition in QCD
- [109] Y. Ikeda for HAL QCD Collaboration, "NK potential in full QCD lattice simulation," US-Japan Joint Workshop on Meson Production Reactions at Jefferson Lab and J-PARC, October 11 - 13, 2009, Hilton Waikoloa Village, Hawaii's Big Island, U.S.A.
- [110] Y. Ikeda, H. Kamano and T. Sato, "On the resonance energy of the KbarNN – piYN system," 10th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (Hyp X), September 14 - 18, 2009, Tokai, Ibaraki, Japan.
- [111] Y. Ikeda for HAL QCD Collaboration, "Kaon-Nucleon potential from lattice QCD," 19th International IUPAP Conference on Few-Body Prob-

lems in Physics, August 31 - September 5, 2009, University of Bonn, Bonn, Germany.

- [112] N. Yamamoto: "Recent development in hadronquark continuity", Mini-workshop on Hadron Physics, Tokyo (Japan), September 21, 2009.
- [113] T. Hatsuda, A. Rothkopf, S. Sasaki, "Proper Heavy QQbar potential in a spectral decomposition of the thermal Wilson loop", The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory 2009, Beijing, China
- [114] T. Hatsuda, A. Rothkopf, S. Sasaki, "Proper Heavy QQbar potential in a spectral decomposition of the thermal Wilson loop", Joint Meeting of the APS and JPS 2009, Waikoloa, USA
- [115] T. Kanazawa: "Chiral Lagrangian and spectral sum rules in two-color QCD at high density" (poster), The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory, Beijing, China, 25-31 July 2009
- [116] T. Kanazawa: "Spectral analysis of dense twocolor QCD", Norwegian Winter Workshop on QCD in Extreme Conditions, Trondheim, Norway, 24-26 February 2010
- [117] Y. Araki and T. Hatsuda, "Analysis of the phase structure of graphene using lattice gauge theory", Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS, Hawaii, U.S.A., October 13-17, 2009.
- [118] K. Nomura: "New Microscopic Derivation of the Interacting Boson Model and its Applications of Exotic Nuclei" (口頭発表), Nuclear Structure and Dynamics (NSD09), ドブロブニク, クロアチア, 2009 年 5 月 4-9 日
- [119] K. Nomura: "Mean-field Derivation of the IBM and Shape-phase Transitions in Nuclei" (口頭発表), 5th Workshop on Shape-Phase Transitions and Critical Point Phenomena in Nuclei, イスタンブール、トルコ, 2009 年 9 月 16-18 日
- [120] K. Nomura: "Mean-field Derivation of the Interacting Boson Model for deformed nuclei" (口頭発表), Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan, ハワイ島, ハワイ, アメリカ, 2009 年 10 月 13-17 日
- [121] K. Nomura: "Formulating the IBM by the Mean Field" (口頭発表), JUSTIPEN-EFES Workshop in Wako, 理化学研究所, 埼玉県和光市, 2009 年 12 月 7-9 日
- [122] K. Nomura: "Mean-filed Derivation of the IBM for Deformed Nuclei" (口頭発表), The 4th LACM-EFES-JUSTIPEN Workshop, オークリッジ国立研 究所, テネシー州, アメリカ, 2010 年 3 月 15-17 日
- [123] Naofumi Tsunoda, Takaharu Otsuka, Koshiroh Tsukiyama: "Spin-tensor decomposition of renormalized nuclear force" (oral) International Workshop :

"Development of nuclear structure models from the viewpoint of nuclear force" Kyoto, Japan, 20-22 May, 2009

[124] Naofumi Tsunoda, Takaharu Otsuka, Koshiroh Tsukiyama, Morten Hjorth-Jensen: Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan

" Tensor force in effective shell model interaction" (oral)

Hilton Waikoloa Village on Hawaii's Big Island, HI, USA, Oct. 13-17, 2009

[125] Naofumi Tsunoda, Takaharu Otsuka, Koshiroh Tsukiyama, Morten Hjorth-Jensen, Toshio Suzuki, Yutaka Utsuno, Michio Honma: "Spin-tensor decomposition of the effective interaction for the shell model" (oral)

EFES-NSCL meeting "Perspectives on the modern shell model and related experimental topics", 4-6 Feb. 2010, Michigan State University

[126] Naofumi Tsunoda, Takaharu Otsuka, Koshiroh Tsukiyama, Morten Hjorth-Jensen: SIR2010 meeting,

"Tensor force in the effective interactions of nuclear force" (oral, student session)

17-20 Feb. 2010, Koshiba Hall, The University of Tokyo, Japan

[127] Naofumi Tsunoda, Takaharu Otsuka, Koshiroh Tsukiyama, Morten Hjorth-Jensen: The 4th LACM-EFES-JUSTIPEN Workshop "Spin-tensor decomposition of the effective interaction for the shell model" Joint Institute for Heavy Ion Research, Oak Ridge,

Tennessee, USA Oak Ridge National Laboratory March 15-17, 2010

- [128] T. kawanai, S. Sasaki, T. Hatsuda, "Charmonium-Nucleon Interaction from Quenched Lattice QCD with Relativistic Heavy Quark Action", Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS, October 13 -17, 2009, Hilton Waikoloa Viillage, Hawaii, USA
- [129] T. kawanai and S. Sasaki, Poster "Study of charmonium-nucleon interaction in lattice QCD", XI HADRON PHYSICS, Sao Paulo, Brazil, 21-26, March, 2010
- [130] Y. Akamatsu, T. Hatsuda and T. Hirano: "Langevin + Hydrodynamics Approach to Heavy Quark Propagation and Correlation in QGP", the 21st International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2009), Knoxville, U.S.A., March 29-April 4, 2009.
- [131] Y. Akamatsu, T. Hatsuda and T. Hirano: "Langevin + Hydrodynamics Approach to Heavy Quark Diffusion in the Quark-Gluon Fluid", JPS-APS Meeting, Kona, U.S.A., October 13-October 17, 2009.

- [132] T. Hatsuda, A. Rothkopf, S. Sasaki, "Heavy QQbar potential from a spectral decomposition of the thermal Wilson loop", New Frontiers in QCD 2010, Kyoto, USA
- [133] T. Hatsuda, A. Rothkopf, S. Sasaki, "Proper Heavy QQbar potential from Lattice QCD", GSI Lattice Days 2009, Darmstadt, Germany
- [134] T. Hatsuda, A. Rothkopf, S. Sasaki, "Heavy QQbar potential from a spectral decomposition of the thermal Wilson loop", Tokyo University QHEC Workshop 2009, Tokyo, Japan
- [135] K. Maeda: "Phases of boson-fermion mixtures", Workshop on "Lattice QCD at Finite Density", YITP, Japan, Jan. 12-15, 2010.
- [136] K. Maeda, G. Baym, and T. Hatsuda: "Simulating Dense QCD Matter with Ultracold Atomic Boson-Fermion Mixtures", Workshop on "Condensed Matter Physics Meets High Energy Physics", IPMU, Japan, Feb. 8-12, 2010.
- [137] A. Monnai: "Viscous Effects on Distribution Function and Relativistic Hydrodynamic Equations", ECT*/HICforFAIR/CATHIE/Nikhef Workshop "Flow and Dissipation in Ultrarelativistic Heavy Ion Collisions", ECT*, Trento, Italy, Sep. 14-18, 2009.
- [138] A. Monnai: "Bulk Viscous Effects on Relativistic Hydrodynamic Models of the Quark-Gluon Plasma", Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS, Waikoloa, Hawaii, USA, Oct. 13-17, 2009.

招待講演

- [139] T. Otsuka : "Structure of exotic nuclei another role of pions -", Arctic Fidipro-EFES Workshop "Future Prospects of Nuclear Structure Physics", 20-24 April, 2009, Saariselka, Finland
- [140] T. Otsuka : "Hadronic interaction and exotic nuclei", Int. Conf. Nuclear Structure and Dynamics, 3-8 May, 2009, Dubrovnik, Croatia
- [141] T. Otsuka : "Another role of pions in neutron-rich exotic nuclei" YITP workshop on Development of nuclear structure models from the viewpoint of nuclear force May 20-22, 2009, YITP, Kyoto
- [142] T. Otsuka : "Shell structure of exotic nuclei and Hadronic interactions", Gordon Conference on Nuclear Chemistry 21-27 June, 2009 Colby-Sawyer College, New London
- [143] T. Otsuka : "Monte Carlo Shell Model for atomic nuclei", Ect* workshop on Linking Nuclei, Molecules, and Condensed Matter: Computational Quantum Many-Body Approaches 6-10 July, 2009, Trento, Italy
- [144] T. Otsuka : "Nuclear Forces and Exotic Nuclei", Ect* workshop on Confrontation and Convergence in Nuclear Theory, 27-31 July, 2009, Trento, Italy

- [145] T. Otsuka: "Shell Model and Exotic Nuclei", Int. Summer School on Subatomic Physics -5th course: New facet of Nuclear Physics, 23-27 August, 2009, 北京大学、北京、中国
- [146] T. Otsuka : "Microscopic approaches -Brief overview of achievements in the past and basic points of present studies-", 5th Workshop on Shape-Phase Transitions and Critical Point Phenomena in Nuclei, 16-18 Sep., 2009, Istanbul, Turkey
- [147] T. Otsuka : "Nuclear 3-body Force and M1 Excitation", Ect* workshop Strong, Weak and Electromagnetic Interactions to Probe Spin-Isospin Excitations 28 September - 2 October, 2009, Trento, Italy
- [148] T. Otsuka : "New Aspects of Nuclear Structure", 3rd Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS, 13-17 Oct., 2009, Waikoloa, Hawaii
- [149] T. Otsuka : "Shell evolution and existence limit of exotic nuclei and the nuclear force" Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics VII, 16-20 Nov., 2009, Kobe, Japan
- [150] T. Otsuka : "The nuclear three-body force and exotic nuclei", EFES-NSCL Workshop on Perspectives on the modern shell model and related experimental topics, 4-6 February, 2010, East Lansing, USA
- [151] T. Otsuka : "Exotic nuclei and modern shell model", Workshop on exotic nuclei and modern shell models, Feb. 9, 2010, Tokyo Institute of Technology
- [152] T. Otsuka : "Spin-isospin 2- and 3-body forces and exotic nuclei", ICHOR-EFES International Symposium on New Facet of Spin-Isospin Responses (SIR2010) Feb. 18-21, 2010, University of Tokyo
- [153] T. Otsuka : "Physics of Exotic nuclei and Roles of Nuclear Forces", EFES-Iowa workshop on the ab initio Monte Carlo Shell Model, Feb. 26, 2010, Iowa State University
- [154] N. Ishii for PACS-CS and HAL-QCD Collaboration, "Lattice study of nuclear forces", The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory, LATTICE2009, Beijing, China, July 25–31, 2009.
- [155] N. Ishii for PACS-CS and HAL-QCD Collaboration, "Lambda-Nucleon and Nucleon-Nucleon interactions on the Lattice", International Workshop on Relativistic Description of Two- and Three-Body Systems in Nuclear Physics, ECT^{*}, Trento, Italy, Oct.19–23, 2009.
- [156] N. Ishii for HAL-QCD Collaboration, "Lattice approach to nuclear forces", International Conference "Strong Interaction In The 21st Century", Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India, Feb. 10–12, 2010.

- [157] Lu Guo, "Time-dependent-Hartree-Fock (TDHF) theory and its applications to nuclear Landau-Zener effect and giant resonance", International workshop on Non-equilibrium Transport Dynamics in Finite Quantum Systems 2009, Mito, Japan.
- [158] T. Hatsuda, "QCD Phase Structure at High Baryon Density", *Heavy Ion Meeting 2009-04*, (Hanyang Univ., Korea, April 11, 2009).
- [159] T. Hatsuda, "Hot quarks and hadrons in lattice QCD", Topical Workshop on Quarks and Hadrons under Extreme Conditions - AdS/QCD, Lattice QCD, and Physics at RHIC/LHC -, (Univ. Tokyo, Japan, May 18-19, 2009).
- [160] T. Hatsuda, "Physics of Quark-Gluon Plasma", ECT* Doctoral Training Programme 2009: Strongly Correlated Quantum Systems, (ECT*, Trento, Italy, June 1 - June 7, 2009).
- [161] T. Hatsuda, "Nuclear Forces from Lattice QCD", *Chiral Dynamics 2009*, (Univ. Bern, Bern, Switzerland, July 6 - 10, 2009).
- [162] T. Hatsuda, "Nuclear Forces from Lattice QCD", *Hot Summer Week 2009*, (Yonse Univ., Seoul, Korea, July 26 - 28, 2009).
- [163] T. Hatsuda, "Hyperon Interactions from Lattice QCD", Hawaii 2009: Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS, (Hawaii, USA, Oct. 13 - 17, 2009).
- [164] T. Hatsuda, "Nuclear Force from Lattice Quantum Chromodynamics", Nishina Memorial symposium: "Symmetry Breaking in Particle Physics" in honor of Professor Y. Nambu, (YITP, Kyoto, Japan, Oct. 27, 2009).
- [165] T. Hatsuda, "Nuclear Force from Lattice QCD", New Frontiers in QCD 2010 - Exotic Hadron Systems and Sense Matter, (YITP, Kyoto, Japan, Feb. 17, 2010).
- [166] T. Hatsuda, "QCD Phase Streucture at High Baryon Density", New Frontiers in QCD 2010 -Exotic Hadron Systems and Dense Matter, (YITP, Kyoto, Japan, March 10, 2010).
- [167] T. Hatsuda, "Nuclear Force in Lattice QCD and Dense Hadronic Matter", *HASUL 2010: Har*monies and Surprises on the Lattice, (Hiroshima, Japan, March 13, 2010).
- [168] Shoichi Sasaki
 Nucleon structure from 2+1 flavor lattice QCD.
 Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS
 October 13 17, 2009, Hilton Waikoloa Viillage, Hawaii, USA
- [169] K.-I. Kondo: 4th International Symposium on Symmetries in Subatomic Physics, June 2-5, 2009 at Department of Physics, National Taiwan University, Taipei, Taiwan; Gauge-invariant magnetic monopole dominance in quark confinement

- [170] K.-I. Kondo: International Workshop on QCD Green's Functions, Confinement and Phenomenology, September 7-11, 2009, ECT* Trento, Italy; Gribov-Zwanziger horizon condition, ghost and gluon propagators and Kugo-Ojima confinement criterion.
- [171] K.-I. Kondo: Strong Coupling Gauge Theories in LHC Era, Dec. 8 - 11, 2009, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan; Infrared behavior of ghost and gluon propagators compatible with color confinement in Yang-Mills theory with the Gribov horizon,
- [172] K.-I. Kondo: 2009 年 6 月 14 日から 7 月 4 日まで, 日本学術振興会・特定国派遣研究者(短期)として ドイツに滞在し, Berlin-Humboldt 大学, Erlangen-Nuernberg 大学, Regensburg 大学, Tuebingen 大学 を訪問,各大学で最新の研究成果に関する講演と議 論を行った。
- [173] Y. Ikeda for HAL QCD Collaboration, "K N potential and Theta+ in lattice QCD," Yukawa International Program for Quark-Hadron Sciences (YIPQS) New Frontiers in QCD 2010 — Exotic Hadron Systems and Dense Matter — January 18 - March 19, 2010, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan.
- [174] T. Hirano: "Hot quarks and hadrons in relativistic heavy ion collisions", Quarks and Hadrons under Extreme Conditions, the Univ. of Tokyo, Tokyo, May 18-19, 2009.
- [175] T. Hirano: "Dynamical modeling of nucleusnucleus collisions at high energies", The 10th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2009), Beijing, China, Aug. 17-21, 2009.
- [176] T. Hirano: "Theoretical perspectives of physics on relativistic heavy ion collisions", third joint meeting of the nuclear divisions of the American Physical Society and the Physical Society of Japan (HAW09), Waikoloa, Kona, USA, Oct. 13-17, 2009.
- [177] T. Hirano: "Perfect fluidity of the quark gluon plasma in relativistic heavy ion collisions", KEK Theory Center Cosmophysics Group Workshop on High Energy Astrophysics 2009 (HEAP09), KEK, Japan, Nov. 10-12, 2009.
- [178] T. Hirano: "Current status of ideal hydro+cascade model", Joint CATHIE/TECHQM Meeting, BNL, New York, USA, Dec. 14-18, 2009.
- [179] A. Monnai: "Bulk Viscous Contributions to Distribution Functions", Joint CATHIE/TECHQM Workshop, BNL, New York, USA, Dec. 14-18, 2009.

(国内会議)

一般講演

[180] 石井理修 for HAL-QCD Collaboration, "格子 QCD による核力と Luescher の散乱長", 日本物理 学会(岡山大学、2010年3月23日)

- [181] 阿部喬: "軽い原子核における芯のないモンテカルロ 殻模型による第一原理計算"、「次世代コンピュータ でせまる物質と宇宙の起源と構造」プログラム 素 原宇宙分野融合にむけて、計画・公募研究報告、東京 大学、2010年3月16日
- [182] 阿部喬、Pieter Maris,大塚孝治、清水則孝、宇都 野穣、James P. Vary: "No-core Monte Carlo shell model calculation of light nuclei with JISP16 NN interaction",日本物理学会 第65回年次大会、岡山 大学、2010年3月20-23日
- [183] 内野瞬、小林未知数、上田正仁:"スピノール BEC における Bogoliubov 理論及び Lee-Huang-Yang 補 正",日本物理学会 2010 年春季大会(岡山大学、2010 年 3 月 20 日).
- [184] 野村昂亮: "中性子過剰な Os・W 同位体における形の相転移",日本物理学会第65回年次大会、岡山大学津島キャンパス、岡山市、2010年3月20日-23日
- [185] Naofumi Tsunoda, Takaharu Otsuka, Koshiroh Tsukiyama, Morten Hjorth-Jensen: "Tensor force in effective interaction for the shell model" (oral) KEK symposium: Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, Aug. 11-13, 2009
- [186] Naofumi Tsunoda, Takaharu Otsuka, Koshiroh Tsukiyama, Morten Hjorth-Jensen:
 "Tensor force in effective interaction for the shell model" (oral)
 The Physical Society of Japan, 65th Annual Meeting Okayama University, Okayama, Japan, Mar. 30-23, 2010
- [187] 河内太一、佐々木勝一、初田哲男,
 格子ゲージ理論に基づくチャーモニューム-核子相互 作用の研究
 日本物理学会 第65回年会、岡山大学、2010年3月 20-23日
- [188] 近藤慶一: 2010年3月22日,日本物理学会年会に て講演,グリボフ・ホライズンを持つヤンミルズ理論 のゴースト・グルーオン伝播関数の赤外での振る舞い とカラー閉じ込め
- [189] 池田陽一 for HAL QCD Collaboration, "格子 QCD による K 中間子 - 核子相互作用の研究," March 20 -23, 2010, 岡山大学津島キャンパス, 岡山, 日本.
- [190] 山本直希: "Dirac spectrum and Lee-Yang zeros in dense QCD", 基研研究会「熱場の量子論とその応用」 (京都大学基礎物理学研究所、2009 年 9 月 3-5 日)
- [191] 山本直希: "高密度 QCD におけるカイラル対称性", KEK 理論センター研究会「原子核・ハドロン物理」 (KEK、2009 年 8 月 11-13 日)
- [192] Y. Akamatsu, T. Hatsuda and T. Hirano: "Langevin + Hydrodynamics Approach to Heavy Quark Diffusion in the QGP", Heavy Ion Cafe : Towards Understanding of QGP Transport Properties, Tokyo, Japan, May 9, 2009.
- [193] Y. Akamatsu, T. Hatsuda and T. Hirano: "Heavy Quark Propagation and Correlation in QGP",

Quarks and Hadrons under Extreme Conditions, Tokyo, Japan, May 18-19, 2009.

- [194] T. Hatsuda, A. Rothkopf, S. Sasaki, "Proper Heavy QQbar potential in a spectral decomposition of the thermal Wilson loop", Workshop on thermal field theory and its applications (NET-SUBA2009), Kyoto, Japan
- [195] 金澤拓也: "Dirac spectrum in dense two-color QCD"(ポスター),基研研究会「熱場の量子論と その応用」,京都大学基礎物理学研究所,2009年9月
- [196] 金澤拓也: "Spectral analysis of dense two-color QCD"(ポスター), Nagoya Global COE Workshop SCGT09" Strong Coupling Gauge Theories in LHC Era", 名古屋大学, 2009 年 12 月
- [197] 金澤拓也: "Chiral Lagrangian and chiral random matrix theory for dense two-color QCD", 日本物理 学会第 65 回年次大会, 岡山大学津島キャンパス, 2010 年 3 月
- [198] 荒木康史、初田哲男: "格子ゲージ理論を用いたグラ フェンの相構造の解析",基研研究会「熱場の量子論 とその応用」、京都大学基礎物理学研究所、2009年9 月3日-5日。
- [199] Y. Araki, T. Hatsuda, "Dynamical Theory of Graphene from Strong Coupling Expansion of U(1) Lattice Gauge Theory with Staggered Fermions", IPMU Focus Week "Condensed Matter Physics Meets High Energy Physics", IPMU, Japan, February 8-12, 2010.
- [200] 荒木康史、初田哲男: "格子ゲージ理論に基づくグラ フェンの相構造の研究",日本物理学会第65回年次 大会、岡山大学、2010年3月20日-23日。
- [201] 門内晶彦: "Effects of Bulk Viscosity on *p_T*-Spectra and Elliptic Flow Coefficients", 第 12 回 Heavy Ion Café, 東京大学, 2009 年 5 月.
- [202] 門内晶彦: "On Viscous Hydrodynamic Description of a Multi-Component Hot QCD Matter", 熱 場の量子論とその応用, 京都大学基礎物理学研究所, 2009 年 9 月.

招待講演

- [203] N. Ishii, H. Nemura, K. Murano, S. Aoki, T. Hatsuda for PACS-CS Collaboration, "Tensor force from Lattice QCD", YITP International Workshop on "Development of nuclear structure models from the viewpoint of nuclear force", 京都大学基礎物理 学研究所, 2009 年 5 月.
- [204] N. Ishii for HAL-QCD Collaboration, "Shortrange nuclear force in lattice QCD", KEK theory center workshop on Short-range correlations and tensor structure at J-PARC, KEK, Tsukuba, Japan, Spet. 25, 2009.
- [205] K. Tsukiyama, S. K. Bogner and A. Schwenk: "In-medium similarity renormalization group to the nuclear shell model", 日本物理学会第65回年 次大会, 岡山大学, 2010年3月 20-23日.

- [206] 初田哲男、"高密度物質の相構造"、「バリオン間相互 作用に基づく核物質の構造」(盛岡、2009 年 6 月 25 日-27 日)
- [207] 初田哲男、"クォークマター:極限状態での物質構造"、「第3回大学生のための素粒子・原子核スクール:KEK サマーチャレンジ 2009」(KEK、つくば、2009 年 8 月 22 日)
- [208] 初田哲男、"対称性の自発的破れ 2 1 世紀に活きる 南部博士のアイデア-"、「現代物理学の最前線:物理 学の現在:ミクロからマクロまで」(高知工科大学、高 知、2009 年 7 月 24 日)
- [209] 初田哲男、"極限状態における強結合 QCD 物質"、 「KEK 理論研究会 2010」(KEK、つくば、2010 年 3 月 10 日-13 日)
- [210] 佐々木勝一 格子QCDと関連するカイラル摂動論の説明 核子構造軌道角運動量 (OAM) 研究会、理化学研究所 仁科ホール、2010 年 2 月 12 日
- [211] 佐々木勝一 チャーモニウム原子核の可能性を探る 科研費新学術領域研究「素核宇宙融合」シンポジウム 東京大学理学部 小柴ホール、2010年3月16日
- [212] 近藤慶一: 2009年12月2日から4日の3日間,京都大学・理学研究科において「クォーク閉じ込め:双対超伝導描像に基づく最近の発展」と題する大学院 生及び研究者向けの集中講義を行った。
- [213] 池田陽一, "3体精密計算に基づくストレンジダイバ リオン共鳴の研究," March 20 - 23, 2010, 岡山大学 津島キャンパス, 岡山, 日本.
- [214] 金澤拓也: "Spectral analysis of dense two-color QCD"(招待講演), YIPQS international molecule workshop on Lattice QCD at Finite Density, 京都 大学基礎物理学研究所, 2010年1月
- [215] 平野哲文: "Hydro Model: Past and Next Decades", Heavy Ion Cafe, 東京大学, 2009 年 11 月.
- [216] 平野哲文: "相対論的流体力学と高エネルギー重イオ ン衝突", 東北大学集中講義, 2010 年1月.
- [217] 平野哲文: "相対論的流体力学と高エネルギー重イ オン衝突反応",日本物理学会第65回年次大会,岡山 大学,2010年3月.

(セミナー)

- [218] N. Ishii, "Lambda-Nucleon and Nucleon-Nucleon interactions on the Lattice", University of Rome, Rome, Italy, Oct. 23, 2009.
- [219] K. Tsukiyama: "Effective interactions for nuclear many-body systems ", CNS Wakate Colloquium, CNS/RIKEN, 2009 年 9 月 11 日.
- [220] Shun Uchino, Takaharu Otsuka, and Masahito Ueda: "Dynamical Symmetry in Spinor Bose-Einstein Condensates", ECT*, Trento, Italy, April 28, 2009.

- [221] 角田直文:
 "核力の有効相互作用におけるテンソル力"
 九州工業大学,KHK(北九州ハドロン研究会),2009
 年 11 月 10 日
- [222] 近藤慶一: 2009 年 4 月 21 日,東京大学(本郷)ハ ドロン理論研究室にてセミナー, Recent progress in dual superconductor picture for quark confinement
- [223] 近藤慶一: 2009 年 5 月 20 日,東京大学(駒場)原子 核理論研究室にてセミナー, Recent progress in dual superconductor picture for quark confinement
- [224] 近藤慶一: 2009 年7月23日, KEK にてセミナー, Recent progress in dual superconductor picture for quark confinement (Gauge-invariant magnetic monopole dominance)
- [225] 近藤慶一: 2009年10月23日,奈良女子大学において「院生企画セミナーII」として,前半:1時間半「ヤン-ミルズ理論におけるクォーク閉じ込めと質量ギャップ問題」,後半:1時間「Gribov-Zwanziger theory, Kugo-Ojima color confinement & ghost and gluon propagators」の講演を行った。
- [226] 近藤慶一: 2009 年 12 月 22 日, 立教大学にてセミ ナー, Ghost and gluon propagators in Yang-Mills theory with Gribov horizon and Kugo-Ojima color confinement criterion
- [227] Y. Ikeda, "Hadron scatterings with strangeness in few body system," RIKEN - TRIUMF Nuclear Theory Meeting, RIUMF Theory Group, Vancouver BC, Canada, December 15 - 16, 2009.
- [228] 山本直希: "Chiral symmetry breaking in dense QCD", (東京大学駒場、2009年4月15日)
- [229] 山本直希: "Hadron-quark continuity and duality in dense QCD", (筑波大学、2009 年 11 月 6 日)
- [230] 山本直希: "Hadron-quark continuity and duality in dense QCD", (佐賀大学、2009 年 11 月 11 日)
- [231] 山本直希: "Hadron-quark continuity and duality in dense QCD", (KEK、2009年12月22日)
- [232] 山本直希: "Hadron-quark continuity and duality in dense QCD", (東京工業大学、2010年1月21日)
- [233] 赤松幸尚、初田哲男、平野哲文:"重いクォークで探 る QGP の輸送現象"、名古屋大学 EHQ セミナー、 2009 年 7 月 14 日。
- [234] 前田賢志, "Phases of Boson-Fermion Mixtures", 岡山大学, 2009 年 10 月.
- [235] 前田賢志, "Phases of Boson-Fermion Mixtures", 首都大学東京, 2009 年 12 月.

1.2 素粒子論研究室(諸井・柳田・ 浜口・松尾)

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

2009年度は諸井が教授として着任し、遠藤が助教 として着任した。また今村助教が転出した。

1.2.1 現象論

暗黒物質

近年のATIC、PAMELA、FERMIなどの観測に よって、これまでの予想に比べて過剰な電子と陽電子 の宇宙線が観測されており、これが暗黒物質由来で あるという可能性が示唆されている。暗黒物質は通 常完全に安定であると仮定されるが、寿命が有限で ある可能性を排除することは出来ない。例えば、この ような準安定な暗黒物質の崩壊によって、PAMELA 実験などで観測された宇宙線スペクトルの異常現象 を説明することが可能であると考えられている。

浜口は C.R.Chen (IPMU)、野尻 (KEK)、高橋 (IPMU)、鳥居 (早稲田) らと共に、地上で観測され る宇宙線スペクトラムを現行 / 将来の観測で詳細に 調べる事によって暗黒物質の性質を見分ける事が出 来る可能性を示した [2]。

浜口、柳田は高橋 (IPMU) と共に、PAMELA で 観測された陽電子アノマリーの原因がグラビティー ノ暗黒物質の崩壊だとするシナリオでは、宇宙の再 加熱温度とグルイーノ質量の両方に上限がつく事を 示した [3]。

浜口、中村、中路は [25] において、観測された過 剰な電子陽電子のエネルギースペクトルの情報から、 暗黒物質が崩壊、あるいは対消滅した際の電子陽電 子のエネルギースペクトルを再構成するという手法 を開発した。

柳田、白井は高橋 (IPMU) との共同研究において anomaly mediation と呼ばれる枠組みにおいて、暗 黒物質が十分に長い寿命を持つが、ごくわずかに不 安定になる機構を発見した。この暗黒物質の崩壊に よって PAMELA 実験や Fermi 実験を説明できるこ とを示した [13]。

柳田、白井は高橋 (IPMU) とともに隠れた U(1) ゲージーノが暗黒物質になる模型を考察した。その 模型では暗黒物質がごくわずかに不安定なり、実際 に観測された宇宙線スペクトルを説明できることを 示した [14]。

柳田、白井は村山 (IPMU)、伊部 (SLAC) ととも に暗黒物質の起源が超対称性を破るセクターである 模型を考察し、その暗黒物質由来の宇宙線スペクト ルについて議論した [16]。 また、Gauge mediation と呼ばれる枠組みは超対 称性模型の中で、フレーバー問題 などの問題を抱え ていない模型として知られている。通常、この枠組み ではグラビティーノが暗黒物質の候補になる。2008 年に柳田、高橋 (IPMU)、白井、米倉によって gauge mediaiton においてもニュートラリーノが暗黒物質 になる模型を提案した。遠藤、白井、米倉はこの模 型の現象論的側面、特に暗黒物資の性質について詳 細に議論した [17]。

浜口は、北野(東北大)、高橋(IPMU)と共に、 ゲージ伝達模型においてグラビティーノ暗黒物質が 超対称性を破るスカラー場の崩壊によって生成され るシナリオを詳細に解析し、グラビティーノ質量が O(10-100) MeV、スカラー場の質量が O(100) GeV のときに種々の宇宙論的制限と無矛盾なシナリオが 得られる事を示した[4]。

中路は修士論文においてグラビティーノが最も軽 い超対称性粒子(LSP)であるモデルについて詳しく 解析し、その現象論についてまとめた[33]。

LHC

標準模型を超えた物理では、長寿命の重粒子が予 言されることがある。そのような粒子は LHC 実験 などの加速器実験で生成されると期待される。浜口、 白井は浅井(東大)との共同研究にて、検出器内で止 まった長寿命粒子の崩壊を測ることが可能であり、そ の寿命や質量などが測れることを示した [12]。

グラビティーノがO(1) eV の小さな質量を持つ超 対称性模型は宇宙論的問題点がない模型として注目 されている。そのような模型が実現していたとする と、加速器実験では大量の高エネルギー光子やレプ トンなどのシグナルが期待される。柳田、白井はこ のようにグラビティーノが軽い超対称性模型の光子 のシグナルについて考察した。そして、光子の運動 量分布が特異的であり、そのことがグラビティーノ が軽いということのテストになることを示した[15]。

超対称模型

佐藤と米倉は、超対称性の破れが標準模型のゲージ相互作用で伝わるゲージ伝達型模型において、軽いグラビティーノを実現しかつ超対称性を破る真空が摂動論的に安定な模型を詳しく解析し、その模型におけるゲージーノの質量に対する上限を与えた[24]。 佐藤はその結果とゲージ伝達型模型のレビューを修 士論文にまとめた[35]。

柳田、米倉は、井沢、高橋とともに新たな超対称 性の破れの模型を提唱した [21]。

佐藤、柳田、米倉は、ゲージ伝達模型においてメッ センジャー数の制限を緩めるメカニズムを提唱した [22]。

遠藤,浜口,岩本は,R-パリティの破れた模型に ついて宇宙論的整合性を議論し,超対称性を持つ模 型では一般にレプトンのフレーバー間に混合が生じ るため,典型的にはR-パリティの破れの大きさが厳 しく制限されることを示した[23]。岩本は,R-パリ ティが破れている模型の現象論についての研究を修 士論文にまとめた[31]。

遠藤は進藤(工学院)と共にグラビティーノが暗 黒物質であるシナリオにおいて右巻きニュートリノ が R-パリティを破るシナリオについて調べた[26]。

ゲージ / 重力対応によるハドロンの高エネルギー散 乱現象

西尾は、ゲージ/重力対応を応用することで強結 合ゲージ理論におけるハドロンの高エネルギー散乱 現象を解析する研究を行い、先行研究をレヴューす る修士論文を書いた [34]。

1.2.2 弦理論

M 理論、BLG 模型

2008年よりM理論における2ブレーンの記述法 が発見され活発に研究されている。その特徴はChern-Simons 理論と呼ばれる位相的な場の理論に現れる新 しいタイプのゲージ相互作用の導入と3代数と呼ばれ る南部括弧式に関連する新たな対称性の導入である。

台湾大学の Ho と松尾, 柴は3 代数の分類を行い, 無限次元の表現を新たにいくつか発見した。更にこの 対称性に基づいて理論を構築すると高次元のDブレー ンやM理論の5 ブレーンの作用を導くことができるこ とを示した。[5] 更に古保・松尾・柴はこのようにして 得られるDブレーンの作用の中に Ramond-Ramond 背景場との結合が自然に得られることを示した。ま た, U 双対性とよばれるM理論に特徴的な性質がこ の定式化の下では3 代数の近似的な automorphism として表現できることを示した。[6, 36]

柴は博士論文 [29] において、BLG 模型とその最近 の発展についてレビューすると共に、その発展に対 する自身の寄与を詳細に述べた。また、柴は日本物 理学会において [45]、BLG 模型の具体的な表式とし て、M 理論のトーラスコンパクト化を実現する具体 例が存在することを口頭発表した。

M 理論、AdS/CFT 対応

M 理論において安定に存在する M2 ブレーンは質 量をもつため、重力場の源になる。その分布は超重 力理論で表すことができ、プレーン近傍では AdS4 と呼ばれる時空になる。その一方、M2 ブレーンはそ の世界体積上でゲージ理論を実現する物体でもある。 近年、M2 ブレーン上で実現されるゲージ理論が低エ ネルギー極限で 3 次元の超共形不変な Chern-Simons 理論によって表される、という提案がなされた。し たがって、M2 ブレーンを媒介にしたゲージ/重力対 応は、3 次元超共形 Chern-Simons 理論と AdS4 時 空における M 理論が等価であることを主張し、特に CFT₃/AdS₄ 対応とも呼ばれる。

両者の理論の対応を調べることは、AdS/CFT 対応が弱/強結合対応であることにより一般に難しい。しかし、両者の理論に大きな対称性がある場合、それらは「可積分性」と呼ばれる性質をもつことが知られており、その場合、両理論で厳密なスペクトラムを求め、比較することが可能になる。田中は初田(理化学研究所)との共同研究 [19] で、AdS₄×CP³ 背景上のIIA型超弦理論と 3 次元 $\mathcal{N} = 6$ 超 Chern-Simons 理論(ABJM 模型)の双対性を可積分な性質を用いて検証を行った。AdS 側で、弦の BPS 解からの励起であるソリトン解の性質を世界面が無限に拡がった極限で調べた。ソリトン解どうしの散乱時の位相のずれを計算し、CFT 側で予想されている magnon 束縛状態の S 行列と一致することを示した。

横山は今村(東工大)と共同で昨年度に引き続き、 上で述べた CFT₃/AdS₄ 対応を N=4 Chern-Simons 理論を用いて調べた。昨年度、我々は Chern-Simons 理論に現れる(特殊なものを除いた)モノポール作用 素が内部空間の2サイクルに巻き付く M2 ブレーンに 対応するという予想を提出した。この対応は ABJM 模型と呼ばれる N=6 Chern-Simons 理論では現れな い、N=4の模型に特徴的な対応である。今年度我々 は、Witten 型の指数を二つの理論で計算し比較する ことでこの予想を強く裏付ける結果を得た。[18]。す なわち、ゲージ理論側ではモノポールの寄与を含め た指数を、重力側では巻き付いた M2 ブレーンの寄 与を含めた指数を計算し、それら二つの量が我々の 調べた範囲内で完全に一致することを確かめた。

山崎は、カリフォルニア工科大学のSchäfer-Nameki、 京都大学の吉田とともに、非相対論的AdS/CFT対応に現われる重力解の一意性定理を示した[10]。

双対性

2009年にGaiottoにより4次元N=2超対称ゲージ 理論のあらたな双対性の描像が(対応する2次元曲面 の大局的自己同型変換)得られ,更にAlday-Gaiotto-Tachikawaによりより詳細な4次元SU(2)ゲージ理 論と対応する曲面上のLiouville理論の関係が指摘さ れた。菅野・松尾・柴とPrinceton高等研究所の立 川はこの対応をSU(N)ゲージ対称性に拡張し,ゲー ジ理論側の質量を持つHypermultipletを2次元側の 戸田理論でどのように記述するべきかについて,詳 細な対応関係を明らかにした。[7]

菅野は、双対性に関する最近の発展を自身の研究 と合わせて修士論文にまとめた [32]。

BPS 状態の数え上げと結晶の溶解模型

山崎はカリフォルニア工科大学の大栗とともに、 弦理論のトーリック・カラビ・ヤウコンパクト化に おける BPS 状態の数え上げの問題を解決し、その答 えが結晶溶解の統計模型で与えられることを示した [8]。さらにその統計模型の熱力学極限がカラビ・ヤ ウ多様体の幾何を再現することを示した [9]。また、 これらの研究成果を博士論文にまとめた [30]。

ストリング現象論

川野と林は Tatar (Liverpool 大)、渡利 (IPMU) とともに [11] において、7-ブレーン上の有効理論で ある 7+1 次元場の理論の局所模型を用いることによ り、F 理論における湯川結合定数の計算方法を初め て定式化した。さらに F 理論の一般のコンパクト化 の下では、7+1 次元場の理論は、7-ブレーンが巻く 内部空間に分岐曲線を持った場の理論となることを 示した。また、そのような一般のコンパクト化の場 合、一つの特異点から生成されるアップタイプ湯川 結合定数がランク 1 となるとなることを示した。こ れは特異点が一つしかなければ現象論的に好ましい 結果である。

F 理論

F 理論は超弦理論の記述の仕方のひとつであり、例 外型(E型)のゲージ群を実現できるところにその利 点がある。2008年に低エネルギー有効理論に現れる 自由度が、F 理論の幾何でどう記述されるかが明らか になった。土屋は、Tatar (Liverpool)、渡利(IPMU) との共同研究で、右巻きニュートリノがF 理論の複 素構造モジュライに同定できることを示した[20]。こ の論文では、F 理論における次元4の陽子崩壊問題 の解法についても議論している。

<受賞>

[1] 山崎雅人、東京大学大学院理学系研究科研究奨励賞 (博士)東京大学理学系研究科、2010年3月.

<報文>

(原著論文)

- [2] C. R. Chen, K. Hamaguchi, M. M. Nojiri, F. Takahashi and S. Torii, "Dark Matter Model Selection and the ATIC/PPB-BETS anomaly," JCAP 0905 (2009) 015.
- [3] K. Hamaguchi, F. Takahashi and T. T. Yanagida, "Decaying gravitino dark matter and an upper bound on the gluino mass," Phys. Lett. B 677 (2009) 59.
- [4] K. Hamaguchi, R. Kitano and F. Takahashi, "Nonthermal Gravitino Dark Matter in Gauge Mediation," JHEP 0909 (2009) 127.
- [5] P. M. Ho, Y. Matsuo and S. Shiba, "Lorentzian Lie (3-)algebra and toroidal compactification of M/string theory," JHEP 0903, 045 (2009).
- [6] T. Kobo, Y. Matsuo and S. Shiba, "Aspects of Uduality in BLG models with Lorentzian metric 3algebras," JHEP 0906, 053 (2009).

- S. Kanno, Y. Matsuo, S. Shiba and Y. Tachikawa, "N=2 gauge theories and degenerate fields of Toda theory," Phys. Rev. D 81, 046004 (2010).
- [8] H. Ooguri and M. Yamazaki, "Crystal Melting and Toric Calabi-Yau Manifolds," Comm. Math. Phys. 292, 179 (2009).
- [9] H. Ooguri and M. Yamazaki, "Emergent Calabi-Yau Geometry," Phys. Rev. Lett. **102**, 161601 (2009).
- [10] S. Schäfer-Nameki, M. Yamazaki and K. Yoshida, "Coset Construction for Duals of Non-relativistic CFTs," JHEP05 05, 038 (2009).
- [11] H. Hayashi, T. Kawano, R. Tatar and T. Watari, "Codimension-3 Singularities and Yukawa Couplings in F-theory," Nucl. Phys. B 823, 47 (2009)
- [12] S. Asai, K. Hamaguchi and S. Shirai, "Stop and Decay of Long-lived Charged Massive Particles at the LHC detectors," Phys. Rev. Lett. 103, 141803 (2009).
- [13] S. Shirai, F. Takahashi and T. T. Yanagida, "Rviolating Decay of Wino Dark Matter and electron/positron Excesses in the PAMELA/Fermi Experiments," Phys. Lett. B 680, 485 (2009).
- [14] S. Shirai, F. Takahashi and T. T. Yanagida, "Cosmic-ray Electron and Positron Excesses from Hidden Gaugino Dark Matter," Prog. Theor. Phys. 122, 1277 (2010).
- [15] S. Shirai and T. T. Yanagida, "A Test for Light Gravitino Scenario at the LHC," Phys. Lett. B 680, 351 (2009).
- [16] M. Ibe, H. Murayama, S. Shirai and T. T. Yanagida, "Cosmic Ray Spectra in Nambu-Goldstone Dark Matter Models," JHEP 0911, 120 (2009).
- [17] M. Endo, S. Shirai and K. Yonekura, "Phenomenological Aspects of Gauge Mediation with Sequestered Supersymmetry Breaking in light of Dark Matter Detection," JHEP **1003**, 052 (2010).
- [18] Y. Imamura and S. Yokoyama, "A Monopole Index for N=4 Chern-Simons Theories," Nucl. Phys. B 827, 183 (2010).
- [19] Y. Hatsuda, H. Tanaka, "Scattering of Giant Magnons in CP³," JHEP 02 (2010) 085.
- [20] R. Tatar, Y. Tsuchiya and T. Watari, "Righthanded Neutrinos in F-theory Compactifications," Nucl. Phys. B 823 1-46 (2009).
- [21] K. I. Izawa, F. Takahashi, T. T. Yanagida and K. Yonekura, "Conformal Supersymmetry Breaking in Vector-like Gauge Theories," Phys. Rev. D 80, 085017 (2009).
- [22] R. Sato, T. T. Yanagida and K. Yonekura, "Relaxing a constraint on the number of messengers in a low-scale gauge mediation," Phys. Rev. D 81, 045003 (2010).

- [23] M. Endo, K. Hamaguchi and S. Iwamoto, "Lepton Flavor Violation and Cosmological Constraints on R-parity Violation," JCAP02(2010)032.
- [24] R. Sato and K. Yonekura, "Low Scale Direct Gauge Mediation with Perturbatively Stable Vacuum," JHEP 1003, 017 (2010)
- [25] K. Hamaguchi, K. Nakaji and E. Nakamura, "Inverse Problem of Cosmic-Ray Electron/Positron from Dark Matter," Phys. Lett. B 680, 172 (2009).
- [26] M. Endo and T. Shindou, "R-parity Violating Right-Handed Neutrino in Gravitino Dark Matter Scenario," JHEP 0909, 037 (2009).

(会議抄録)

[27] 林博貴 "Codimension-3 Singularities and Yukawa Couplings in F-theory,"基研研究会「場の理論と弦 理論」研究報告,素粒子論研究 117 巻 6 号 (2010 年 2 月号).

(国内雑誌)

[28] 遠藤基「超重力理論とインフレーション宇宙」日本物 理学会誌 2009 年 64 号 735

(学位論文)

- [29] 博士論文: S. Shiba, "M-branes, D-branes and Uduality from BLG Model."
- [30] 博士論文: M. Yamazaki, "Crystal Melting and Wall Crossing Phenomena."
- [31] 修士論文:岩本祥, "Supersymmetry without *R*-Parity: Its Phenomenology."
- [32] 修士論文: 菅野正一, "N=2 ゲージ理論における双 対性"
- [33] 修士論文:中路紘平, "グラビティーノが暗黒物質と なるシナリオにおける現象論"
- [34] 修士論文:西尾亮一, "ハドロン高エネルギー散乱現 象のホログラフィック QCD による解析"
- [35] 修士論文:佐藤亮介、"ゲージ伝達型の超対称性の破 れの現象論的性質について"
- (著書)

```
< 学術講演 >
```

(国際会議)

一般講演

- [36] Y. Matsuo, "Lorentzian Lie (3-)algebra and toroidal compactification of M/string theory," Quantum Theory and Symmetries 6, University of Kentucky, 20 July – 25 July, 2009.
- [37] M. Yamazaki, "Crystal Melting and Wall Crossing Phenomena", Focus Week on New Invariants and Wall Crossings, IPMU, 2009 年 5 月
- [38] M. Yamazaki, "Amoeba, coamoeba and Noncommutative Donaldson-Thomas Invariants", Conference on Tropical Geometry and Mirror Symmetry, UCSD, 2010年2月

- [39] S. Shirai, "Stop and Decay of Long-lived Charged Massive Particles at the LHC detectors," SUSY09, Northeastern University, July 2009
- [40] S. Yokoyama, Y. Imamura, "A Monopole Index for N=4 Chern-Simons Theories.", National String Meeting 09 (NSM09), Indian Institute of Technology, Mumbai(IITB), Feb/2010
- [41] S. Iwamoto, "Cosmological Constraints on R-Parity violating SUSY under Lepton Flavor Violation," KEK-PH2010, KEK, 20 February 2010.

招待講演

- [42] Y. Imamura, "N = 4 Chern-Simons theories and their gravity duals," Strings 2009, Rome, Italy, June, 2009.
- [43] M. Endo, "What is natural scenario of SUSY," KEK-PH2010, KEK, February 2010.
- [44] M. Yamazaki, "Wall Crossing and M-theory", Simons Workshop in Mathematics and Physics 2010, Stony Brook, 2009 年 8 月

(国内会議)

一般講演

- [45] 柴正太郎、"Lorentzian Lie (3-)algebra and toroidal compactification of M/string theory," 日本物理学 会、甲南大学、2009 年 9 月。
- [46] 柴正太郎、"N=2 gauge theories and degenerate fields of Toda theory," KEK 理論研究会 2010、 KEK、2010年3月。
- [47] 柴正太郎、"Correspondence between behavior of Seiberg-Witten curve and structure of W-algebra,"
 日本物理学会、岡山大学、2010年3月。
- [48] 山崎雅人, "Coset 構成による非相対論的共形場理論の 重力双対の構成,"日本物理学会,甲南大学,2009年9 月
- [49] 山崎雅人, "結晶溶解と BPS 状態の数え上げ,"日本 物理学会, 甲南大学, 2009 年 9 月
- [50] 山崎雅人, "一般化された Lie-3 代数の構成と八元数," 日本物理学会, 甲南大学, 2009 年 9 月
- [51] 林博貴 "Codimension-3 Singularities and Yukawa Couplings in F-theory," 基研研究会「場の理論と弦 理論」, 基礎物理学研究所, 2009 年 7 月
- [52] 林博貴 "Flavor Structure of F-theory Compactifications," 日本物理学会, 岡山大学, 2010 年 3 月
- [53] 白井智, "Signals of Composite Messenger Dark Matter," 日本物理学会, 岡山大学, 2010 年 3 月.
- [54] 横山修一, "N=4 Chern-Simons 理論におけるモノ ポール指数",日本物理学会,岡山大学, 2010 年 3 月
- [55] 土屋陽一、"Right-handed Neutrinos in F-theory Compactifications,"「弦理論と場の理論」、京都大 学基礎物理学研究所、2009 年 7 月
- [56] 土屋陽一、"F 理論における次元4陽子崩壊問題とその解法"、日本物理学会、岡山大学、2010年3月

- [57] 米倉和也、"Conformal SUSY breaking in Vectorlike Gauge Theories"日本物理学会、甲南大学岡本 キャンパス2009年9月11日
- [58] 米倉和也、"Relaxing a constraint on the number of messengers in a low-scale gauge mediation" 日本物 理学会、岡山大学津島、2009年3月21日
- [59] 菅野正一" N=2 gauge theories and degenerate fields of Toda theory "日本物理学会, 岡山大学,2010 年 3 月

招待講演

- [60] 浜口幸一、"Long-lived signature" 実験理論共同研究 会「LHC が切り拓く新しい物理」、東京大学、2009 年4月3日
- [61] 川野輝彦, "F-Theory and Grand Unification,"日本物理学会 2009 年秋季大会, 甲南大学岡本キャンパス, 2009 年9月12日
- [62] 川野輝彦, "F-GUTs,"新潟-山形大合宿, 山形県飯豊 少年自然の家, 2009 年 11 月 6-8 日
- [63] 林博貴 "F-theory and its Applications to Phenomenology," 2nd Mini Workshop on String Theory, 高エネルギー加速器研究機構, 2009 年 11 月

(セミナー)

- [64] 浜口幸一、「宇宙誕生はじめの1秒間の謎~対称性と その破れ~」、理学部公開講演会「理学の最高峰」、東 京大学、2009 年4月26日
- [65] 浜口幸一、「宇宙誕生はじめの1秒間の謎~対称性と その破れ~」、理学部オープンキャンパス、東京大学、 2009 年 8 月 6 日
- [66] 浜口幸一、「宇宙誕生はじめの1秒間の謎」、第2回 数理の翼冬季セミナー、東京大学、2010年1月4日
- [67] 川野輝彦, 'F-Theory and Grand Unification (F理 論と大統一模型),"基研集中講義,京都大学基礎物 理学研究所,2009年4月22-23日

2 原子核・素粒子実験

2.1 原子核実験グループ【酒井・早野・小沢】

原子核実験グループは、酒井(英)研(2009年度 末まで)、早野研、小沢研の三つの研究室で構成さ れ、国内外の加速器を利用して原子核物理の実験的 研究を行っている。三研究室が取り組んでいる研究 テーマは各々異なるが、大学院生の居室や実験室は 共通とし、セミナーなども三研究室で共催している。

酒井研究室では、原子核のスピン・アイソスピン自 由度に着目し、ハドロン多体系としての原子核の構 造や、核子間の相互作用の研究を中心におこなってき た。特別推進研究「発熱型荷電交換反応による時間領 域でのスピン・アイソスピン応答 (ICHOR: Isospinspin responses in CHarge-exchange exOthermic Reactions) (2005 年度~2009 年度)」の最後の年にあ たり、理化学研究所の不安定核ビームファクトリー (RIBF)の大強度不安定核ビームを用いて、未開拓領 域の原子核励起状態を探索した。

早野研究室では、原子核のまわりに電子以外の負 電荷の粒子が回っている奇妙な原子(エキゾチック 原子)の分光実験を、特別推進研究「エキゾチック 原子の分光による基礎物理量の精密測定(2008年度 ~2012年度)」によって進めている。CERNの反陽 子減速器にて反陽子へリウム原子と反水素原子を、 J-PARC及びイタリアのDAφNE加速器にてK中 間子原子・原子核を、理研のRIBFにおいてπ中間 子原子を研究し、陽子の質量起源、粒子・反粒子の 対称性、物理定数の決定など、物理学の基本的な課 題に取り組んでいる。

小沢研究室では、強い相互作用の非摂動論的側面 に関わる諸問題を実験的に解明するための研究を行っ ている。特に、クォーク・グルーオン・プラズマ(QG P)の生成とその性質を調べる実験や陽子や中間子 などのハドロンが動的な質量を獲得する機構を調べ る実験に力を入れている。2009年度は、米国ブルッ クヘブン国立研究所においてQGPを探索する実験 のデータ収集と解析を行いつつ、新たに東海村に建 設された J-PARC において原子核密度中の中間子質 量とカイラル対称性の回復に関わる、 ϕ 中間子の電子 対崩壊による質量変化の直接測定実験と ω 中間子の 質量変化と原子核束縛系の同時測定実験の2種類の 実験を遂行している。また、高エネルギー加速器研究 機構(KEK)、ブルックヘブン国立研究所、理化学研 究所などと共同でGas Electron Multiplier(GEM) と呼ばれる新検出器の開発も行っている。

2.1.1 荷電ベクトル型スピン単極巨大共鳴 の探索(酒井研究室)

原子核の集団運動は原子核物理学の主要なテーマ であり、様々な励起モードが研究されてきた。それ らは外界から原子核に与えられるスピン (ΔS)、荷電 スピン (ΔT)、軌道角運動量 (ΔL) で特徴づけられ、 なかでも、 $\Delta S = \Delta T = \Delta L = 0$ の荷電スカラー型 (陽子と中性子が同位相) 等方的密度振動は、実験理 論双方から理解が進められてきた。その一方で、荷 電ベクトル型 (逆位相) 密度振動についてはほぼ手付 かずの状態であり、今後の進展で新しいタイプの原 子核物質圧縮率の研究につながることが期待される。 そこで、我々は、原子核全体が荷電反転 ($\Delta T = 1$)、 スピン反転 ($\Delta S = 1$)を伴って等方的 ($\Delta L = 0$) に密 度振動 ($\Delta n = 1$) する励起状態である「荷電ベクト ル型スピン単極巨大共鳴」(IVSMR)の研究を行う。

このため、2008年度までに理化学研究所 RIBF に て開発した SHARAQ スペクトロメタを用いた実験 を2つ提案した。そのうちひとつを遂行し、IVSMR の兆候を捉えることに成功した。

(t,³He) 反応による観測

2009 年 11 月、SHARAQ を用いた最初の物理実 験として、「300 MeV/uにおける²⁰⁸Pb,⁹⁰Zr(*t*,³He) 反応を用いた荷電ベクトル型スピン単極巨大共鳴 (IVSMR)の測定」を行った。

原子核のスピン反転モードが最も強く励起されるの は、探索子として核子あたり運動エネルギー 300 MeV のビームを用いたときである。また、三重水素(t)を 入射ビームとして(t,³He)反応を用いると、荷電反 転モードを選択的に励起できることに加え、核子を 使った反応((n, p)反応)と比べて原子核表面のみが 強く励起される。このため、以前から、(t,³He)反応 が IVSMR 観測に有利であることが指摘されていた。 かつては 300 MeV/uの tビームを安定して供給でき る施設が存在しなかっためこの測定は不可能であっ たが、RIBF が稼働したことで可能となった。

超伝導リングサイクロトロンにより 320 MeV/uに 加速した α ビームを ⁹Be 標的に照射し、破砕反応に より 300 MeV/u の t ビームを生成した。これを超 伝導 RI ビーム分離装置に入射して純度を ~100 %に まで高め、高分解能ビームラインを通して二次標的 ²⁰⁸Pb,⁹⁰Zr に照射した。二次標的から散乱される ³He を SHARAQ で運動量分析し最終焦点面検出器で測 定した。これらにより ²⁰⁸Pb,⁹⁰Zr($t, {}^{3}$ He)反応の二階 微分断面積スペクトルを励起エネルギー 0–70 MeV, 散乱角 0–3 度の範囲で取得することに成功した。

測定で得られた²⁰⁸Pb(t,³He)反応のスペクトルを 図 2.1.1 上段に示す。目的とする単極共鳴の成分は主 としてゼロ度に強く現れることが核反応計算から分 かっている。そこで、予備的な解析として、0.0-0.5 度と 0.5-1.0 度スペクトルとの間で差分をとることで 単極成分の抽出を試みた。得られた差分スペクトルは 図 2.1.1 下段のようになり、励起エネルギー 12 MeV 付近に統計的に有意な単極共鳴成分を見出した。こ れは IVSMR の兆候と考えることができる。破線は IVSMR の理論予測で、核内有効相互作用 SGII が使 用されている。この理論予測は、実験データの概形 を説明する一方、励起エネルギーを数 MeV 過小評 価するという興味深い結果となっている。⁹⁰Zr につ いても励起エネルギー 20 MeV 付近に単極共鳴成分 を発見し、同様の傾向があることを確認した。

今後、単極共鳴成分をより精度よく抽出するため に、多重極展開の手法を取り入れた詳細な解析を進 めると同時に、理論計算との比較を通して物理的に 未解明な部分について議論を深める予定である[47, 50,68](三木)。



図 2.1.1: 得られた ²⁰⁸Pb(*t*, ³He)反応スペクトルと、 それらの差分スペクトル。励起エネルギー ~12 MeV 付近を中心とした単極共鳴成分が観測された。詳細 は本文参照。

発熱型荷電交換反応による探索

不安定核によって引き起こされる原子核反応では、 不安定核が崩壊するときに放出されるエネルギーが、 小さな運動量移行 (q)のみをもって、標的核に付与 される。即ち、適当な入射不安定核を選択すること により高い励起エネルギーに対しても $q \sim 0$ という 条件を達成し得、 $\omega > q$ の運動学領域の原子核応答 を研究することが可能になる。IVSMR はそのよう な応答の一つである。

本実験では、不安定核¹²Nを⁹⁰Zr標的に照射する ことによって引き起こされる発熱型の荷電交換反応 ⁹⁰Zr(¹²N,¹²C)⁹⁰Nbを用いて残留核⁹⁰NbのIVSMR を探索する。ここでは、RIBFの超伝導リングサイ クロトロンによって250 MeV/uまで加速された¹⁴N ビームから入射核破砕反応によって200 MeV/uの ¹²N ビームを生成する。これを⁹⁰Zr標的に照射し、 反応生成物¹²Cの運動量をSHARAQ スペクトロメ ターで測定することにより ⁹⁰Nb の励起エネルギー スペクトルを取得する。

SHARAQ スペクトロメタでは、分散整合ビーム 輸送という手法をとることにより、RIビームを用い た高エネルギー・高角度分解能の原子核分光を行う ことが可能である。この特色を最大限に活用する発 熱型荷電交換反応測定は、SHARAQの本領を発揮 する実験であると言える。発熱型反応に特有のバッ クグラウンドに対処しなければならないものの、こ れにより不安定核を道具として原子核を研究すると いう原子核物理学の新しい展開の端緒を開くことが 期待される。

本実験のプロポーザルは 2009 年 6 月の課題審査 委員会により採択され、2010 年中に実験を実施する 予定である [33, 43, 45, 48, 62](野地)。

2.1.2 反物質の研究(早野研究室)

早野研究室は、世界唯一の超低速反陽子源である CERN研究所の反陽子減速器施設においてASACUSA (Atomic Spectroscopy and Collisions Using Slow Antiprotons)という研究グループを率い、反物質研 究を行っている。その主要な目的は、反陽子へリウ ム原子や反水素原子の分光により、物質と反物質の CPT 対称性を高精度で検証することである。

反陽子ヘリウム原子のレーザー分光

反陽子ヘリウム原子は、我々が発見した、ヘリウム 原子核のまわりを電子と反陽子が一個ずつ回ってい る奇妙な中性原子である。通常のレーザー分光は電 子状態を遷移させるが、反陽子へリウム原子のレー ザー分光では、反陽子の軌道を変化させ、その遷移 周波数を量子電磁力学計算と比較することで、反陽 子・電子質量比が求まる。

我々の結果を陽子・電子質量比と比較することに より、CPT 対称性を高精度で検証できる。逆に CPT 定理を仮定すれば ($m_p = m_{\bar{p}}$)、我々の実験で陽子・ 電子質量比という、理科年表にも出ている重要な基 礎物理定数を決定できるのである。最近ではその精 度が 10^{-9} に達し、我々の測定結果が基礎物理定数の 最新値に採択された。すなわち、反陽子へリウム原 子のレーザー分光結果が、水素原子のレーザー分光 と並んで、リュードベリ定数や陽子・電子質量比な どの決定に用いられているのである。

現在、更なる高精度をめざした分光法の開拓とレー ザーの開発を行っている(図2.1.2)。近日中に陽子・ 電子質量比の精度を凌駕できる見込みである(早野・ 轟・小林・橋本)。

反水素原子の生成と分光

反水素原子は陽電子と反陽子の束縛状態である。これを大量に生成して精密に分光し、通常の水素原子



図 2.1.2:反陽子ヘリウム原子の二光子分光法により ドップラー幅よりも遥かに線幅の狭い共鳴の観測に 成功。これにより、基礎物理定数の高精度化に更な る貢献が期待できる。

と比較することは、CPT 対称性の究極のテストにな ると期待されている。2009 年度は超伝導電磁トラッ プ中で反陽子と陽電子を混合して生成した反水素原 子を、超伝導多重極磁石で構成した磁気トラップに よって捕獲する実験を進めた(早野)。

これと並行して超伝導高周波トラップを用いて反 水素原子のビームを生成し、反水素原子の基底状態超 微細構造を測定する実験の準備も進めている。2009 年度はその一環として反水素消滅検出器の開発を行っ た(早野・小林)。

超低速反陽子の原子核吸収断面積測定

反陽子は原子核に強く吸収され、高エネルギーで はその吸収断面積は原子核の幾何学的な面積に比例 ($\sigma_{ann} \propto A^{2/3}$)することが知られている。反陽子の ドブロイ波長が原子核のサイズを越えるような超低 エネルギー($E_{\bar{p}} < 100 \text{ keV}$)では、 $A^{2/3}$ からのズ レが見えることが予想されるが、これまでこのよう な超低エネルギー反陽子ビームが存在しなかったた め、実験的な検証はなされていない。

我々は、反陽子へリウム原子分光などのために開 発した反陽子線形減速器を利用して、100 keV での 反陽子-原子核吸収断面積測定に着手し、2009 年度に テスト実験を行った。その結果を踏まえ、現在は超 低速反陽子ビームモニター用の検出器の開発を進め ている(早野・轟)。

2.1.3 K 中間子原子の精密分光 (早野研究 室)

早野研究室では水素や重水素、ヘリウム等の軽い 原子核における K 中間子原子の精密分光実験をイタ リアの $DA\phiNE$ 及び J-PARC 加速器にて精力的に進 行中である。K 中間子原子の研究において我々は直 接の測定が困難である 0 エネルギーでの K 中間子- 核子あるいは原子核の間に働く強い相互作用につい ての知見を得る事が出来る。これらの研究は後述す る反 K 中間子原子核の問題とも密接な関連を持って いる。

 $\mathbf{DA}\phi\mathbf{NE}$ における K 中間子水素原子 X 線の精密 測定

K中間子水素原子は、クーロン力で束縛された K^- 中間子と陽子からなるエキゾチックアトムである。その原子エネルギー準位は、電磁相互作用のみで計算 された値に、強い相互作用の効果によるシフトと幅 を持つ。特に 1s 状態のシフトと幅から、低エネル ギー極限におけるK - pの散乱長を導出でき、K中 間子と核子間の強い相互作用を定量的に評価するこ とができる。我々はイタリアの DA ϕ NE 電子陽電子 衝突型加速器で行われる SIDDHARTA 実験で、 K^- 中間子が基底状態への遷移過程で発生する X 線を精 密に測定して、1s 状態のシフトと幅を数 eV の精度 で決めることを目指している。

SIDDHARTA 実験では、電子・陽電子衝突型加速器 DA ϕ NE で大量に生成し た ϕ 中間子の $\phi \rightarrow K^+K^-$ 崩壊で生じる低エネル ギー K^- 中間子を水素気体標 的に静止させる。X 線検出器としては 6keV で 150eV という高いエネルギー分解能 (FWHM) に加えて、 < 1 μ s の時間分解能を持つシリコンドリフト検出器 (SDD:有効面積 1 cm²) を 144 個使用し、高い精度を 達成する。

2009 年度は 3 月から 11 月にかけて装置の最適化 及び性能テストの目的で K 中間子 X 線の収量が大き いへリウム 4 気体標的の測定を行い、また本来の目 的である水素標的のデータの取得をも完了した。前 者の測定に於いては図 2.1.3 で示す X 線スペクトル から 3d - 2p 遷移のエネルギーを 10 eV 以下の誤差 で決めた [19]。この結果は、2005 年に行われた KEK E570 実験の結果と一致し、K 中間子へリウム 4 の 2p 原子状態のエネルギーは強い相互作用によって大 きくはシフトしないことが確立した。水素標的のデー タに関しては現在解析を鋭意進行中である(早野・ 竜野・施)。

J-PARC における *K* 中間子へリウム 3 原子 X 線の 精密測定 (E17)

早野研究室では 2005 年度に K 中間子へリウム 4 の精密分光実験 KEK-PS E570 を行い「K 中間子へ リウムパズル」として長年問題になっていた理論と 実験の不一致を解決した。これに加えてK 中間子へ リウム 3 の分光を実行すればK 中間子と原子核間の ポテンシャルに関する知見がより完全なものになる 事が期待される。

我々が J-PARC で推進している K 中間子へリウム 3 原子の X 線測定実験 (E17) は、J-PARC の 50GeV 陽子シンクロトロン完成後、ハドロン実験施設にお ける最初に実施される実験に選ばれている。



図 2.1.3: ヘリウム 4 標的測定で得られた、K 中間子 ヘリウム 4 原子の L_{α} X 線 ($3d \rightarrow 2p$ 遷移に伴って 放射される X 線) 付近のエネルギー領域における X 線スペクトル (2 SDD のデータ)。 6.4 keV におい て 150 eV (FWHM) の分解能を実現した。スペクト ル上には、in-situ でのエネルギー校正用の Ti と Mn の特性 X 線のピークが見える。

2009 年度においては 10 月の 1.1 GeV/c における K^- 及び \bar{p} の同定に引き続き、J-PARC 50 GeV 陽 子シンクロトロンの供給する"遅い取り出し"による - 次陽子ビームの強度及び時間構造の改善と歩調を 合わせながら E17 に於ける最適運動量であると期待 される 0.75 GeV/c で K1.8BR ビームラインの調整 を速やかに進行し、12月には静電セパレータを運転 してビームラインの K 中間子最適化設定を確立 (図) 2.1.4)、2010年1~2月には KEK-PS 程度の一次陽 子ビーム強度 (1~1.6 kW) で K 中間子数の運動量依 存性、各スリットのオフセット調整及びビームライ ンのアクセプタンス等々の詳細に関する系統的 study を行った。J-PARCにおけるビームラインの調整の ・方、KEK 北カウンターホールに於いては X 線検出 器 SDD の準備を進め、印可電圧/温度とエネルギ 時間分解能の関係を初めて系統的に調べて本実験に 最適な条件を見いだした一方、実機の液体ヘリウム3 実験標的系内部に於ける4台同時運転で150eV以下 の分解能 (FWHM) での長時間の安定した駆動を達 成する(図2.1.5)等々、2010年度に行われるK中間 子ヘリウム3原子X線測定に向けて系統的なR&D を進行した(早野・鈴木・佐藤・橋本)。



図 2.1.4: 2009 年 12 月 12 日に実行された CM スキャ ンの結果 (図は KEK ハドロンビームライングループ 家入正治氏による提供)。横軸は CM 電流値、縦軸は 一次陽子数で規格化された各粒子トリガーの数。静 電セパレータの電圧は $\pm 200 \text{ kV}$. K トリガーの数に おいては CM1=CM2=350A 付近に K^{\pm} による鋭い ピークが観測され、K1.8BR ビームラインを K 中間 子に最適化することにこの時初めて成功した。



図 2.1.5: SDD により ⁵⁵Fe 線源を用いて測定された 典型的な X 線スペクトル。5.9 keV のエネルギーに おいて FWHM=150 eV を実現した。
2.1.4 反 K 中間子原子核の研究 (早野研究 室)

反 K 中間子が原子核に強い相互作用で束縛され た、準安定かつ高密度な「反 K 中間子原子核」が存 在するのではないかという議論が近年活発に成され ている。もしもそのような状態が実在するならば、全 く新しい形態のハドロン系としてその存在自体が興 味深い上に、超高密度核物質の実験的研究への道を 拓く事が期待される。

J-PARC における K^-pp/K^-pn 状態の探索 (E15)

現在実験/理論の両面から精力的な研究が続けられている K^-pp 状態の同定を目指し、J-PARC K1.8BR ビームラインにおいて E15 実験を行う。実験では先述の E17 と同一の液体ヘリウム 3 標的を使用し、入射 運動量 1.0 GeV/cの (K^- , n)反応によって K^-pp を 生成し、同時に K^-pp の崩壊で生じる Λp 対を CDS (Cylindrical Drift-chamber System)を用いて再構成 する。

2009 年度には本来の実験目的である K⁻pp の探索 (E15)に加えてアイソスピン依存性の研究の目的で (K^-, p) 反応を用いた P28 - K^-pn 探索実験 - を正規 に提案し、7月に開催された J-PARC PAC(Program Advisory Committee) において E15 の拡張として受 理された。P28はE15のby productとして同時実行 可能であり、E15の(K⁻, n)反応の測定と合わせて最 も単純かつ同定が容易な中間子-原子核強束縛系であ る *KNN* 状態の性質につき、断定的な情報を得る事 が出来ると期待される。2010年現在において中間子原 子核間の強束縛状態は実験的には一つも同定されてい ないことから、E15/P28 においてそのような状態を 明瞭に観測出来ればこれは今後の中間子 $(K, \eta, \omega, \phi, \phi)$ etc.)-原子核強束縛系の研究の進展のマイルストーン となる。2009年度に行われた実験準備としては主に 前述の E17 と共用の装置の構築を先行して進行し、 入射 K⁻ 測定器系の設置を完了し D5 電磁石上下流 に設置された軌道検出器によるビーム運動量分析の 試験データを取得する一方、CDC (Cylindrical Drift Chamber) においては期待される位置分解能が達成 され、また³He 標的系の R&D をほぼ完了した(早 野・鈴木・佐藤)。

2.1.5 π中間子原子の精密分光 (早野研究 室)

 π 中間子原子の深い束縛状態、すなわち、 π^- 中間 子軌道と原子核の核子分布が重なった状態の分光は、 陽子の質量起源を定量的に解明する有力な手段であ る。陽子質量が、その構成要素であるu, d クォーク より遥かに重いのは、真空中にクォーク・反クォー ク対が凝縮し(カイラル凝縮)、u, d クォークが大き な有効質量を得たためであると考えられるが、 π 中 間子原子の分光によって、原子核中で中間子の状態



図 2.1.6: 焦点面におけるビームの位置スペクトル (青:分散整合適用前、赤:適用後)。分散整合の実 現が確認され、分解能が約2倍向上した。

(質量や崩壊定数)を精密に測定すると、核内でのカ イラル凝縮を定量的に知ることが出来る。

理研 RIBF 施設の BigRIPS 装置において分散整合 という手法を用いると、 $(d,^{3}\text{He})$ 反応による π 中間 子原子の分光精度を飛躍的に高めることが可能であ る。分散整合を実現させるため、ビームの光学軌道 計算を行い、実際のビームの軌道が計算結果と一致 するかのテスト実験を 2009 年 5 月に行った。

図 2.1.6 はテスト実験で得られた焦点面における ビームの位置スペクトルである。分散整合適用後で は分光精度が約 2 倍向上した。この結果は特別実験 の一環として、第 3 回日米物理学会合同核物理分科 会の学部学生ポスターセッションにおいて発表され た。2010 年の秋には π 中間子原子の精密分光実験を 行う予定である。この実験のための光学計算、検出 器の準備なども行った(早野・伊藤・西(特別実験)・ 後藤(特別実験))。

2.1.6 ミュオニウム生成標的の研究 (早野 研究室)

正 μ 粒子はスピン 1/2 を持ち、陽電子と電子ニュー トリノ、反 μ ニュートリノに崩壊するレプトンであ る。スピン偏極したミュオンビームを試料中に静止 させると、 μ はその場所での磁場を感じて歳差運動を 行い、その後崩壊する。この際生まれる陽電子を検 出すると、飛行角度分布は崩壊直前の μ の磁気モー メントの方向に従うため試料中の磁気状態を知るこ とができる (μ SR 法)。超低速偏極ミュオンビームは エネルギーが 0.5~30 keV 程度に抑えられたビーム であり、大強度化が進むことで表面磁性研究のブレ イクスルーに繋がると期待されている。生成過程は、 4 MeV 偏極ミュオンビームを減速し、ミュオニウム (電子と正ミュオンの束縛状態) を形成、静止させた 後、減速材外部に湧き出したものをレーザーでイオ

ン化し電子を剥ぎとり、さらに再加速するというも のである。理研 RAL 超低速ミュオンビームライン においては、現状ミュオンからミュオニウムを生成 する過程でミュオニウムが真空中に脱出する割合を 3%よりも大きくすることが難しいために、速い偏極 ミュオンビームの強度は 1.3 × 10⁶/s であるのに対 し得られる超低速ミュオンは 15~20 個/s にとどま る。近年、ミュオニウム生成標的となりうる物質の 形状を材料科学の手法を用いてナノスケールで構成 することが可能になり、我々はこれら新材料を用い てミュオニウム生成率向上を目的としたテスト実験 を、

カナダ TRIUMF 研究所で 2010 年に行う予定で ある。また生成率の測定にとどまらず、表面付近で のミュオニウムの挙動やミュオニウムの生成メカニ ズムに関しての研究を進める (早野・藤原)。

2.1.7の生成とその性質の研究(小沢研究 室)

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

日本を含む世界各国のグループの参加により検出器 の建設が進められ、2000年4月から現在までに、金-金衝突、陽子-陽子衝突、重陽子-金衝突、銅-銅衝突 を核子あたり 200GeV の重心系エネルギーでのデ-タを中心に収集した。測定のための検出器系は、透 過的なプローブであるレプトンやフォトンを捉える 事を主眼に置いたもので、広いアクセプタンス、高 い運動量分解能、高いパイオン除去率などの能力を 持つ。我々は、電子同定用検出器である Ring Image Čerenkov Counter (RICH)の運用、低質量ベクトル 中間子 (ρ, ω, ϕ) や J/ψ 粒子の解析などで中心的な役 割を果たしてきた。この実験によって、今までに見ら れていない様々な現象が観察され、我々はパートン レベルの流体模型で記述される新しい物質層が存在 することを発見した。その後も精力的な解析が我々 も含む共同研究者らによって続けられ、本年度にも 様々な重要な結果が得られた(渡辺・宇都宮・桝本・ 小松・小沢)。[10, 11, 12, 14, 15, 16]

我々のグループでは、現在、特に電子・陽電子崩 壊を用いた低質量ベクトル中間子 (ρ, ω, ϕ) の物理に 力を入れている。これは、我々のもうひとつの研究 テーマであるハドロンの動的な質量獲得機構とも密 |接に関連したもので、RHIC で実現されている高温・ 高密度状態中で、カイラル対称性の回復によるベク トル中間子の質量変化や収量変化を捉えようという ものである。特に、2009年度から2010年度にかけ て収集しているデータは、この物理解析を主目的と しており、さらに精度の良いデータを収集するため 電子・陽電子対測定に対する主要バックグランドで ある π^0 中間子の Dalitz 崩壊などを除去するための 検出器として小型大立体角のチェレンコフ光検出器 である Hadron Blind Detector(HBD) をインストー ルし運用した。現在、予備的な解析を進めている段 階である(小松・渡辺・小沢)。

2.1.8**計測定実験(小沢研究室)**

当研究室ではハドロンの質量起源の問題に取り組 んでいる。真空中では数 MeV しかないとされてい るクォークの質量がなぜハドロンとして集まったと き、たとえば陽子では1GeV、というように重くな るのかという問題で、つまり我々の世界が質量を獲 クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)して声が生め、特別である。この機構と して南部先生が提唱されたのが、強い相互作用によ り真空中反クォーク・クォーク対が凝縮し、これによ リカイラル対称性が自発的にやぶれることで真空が 変化し、ハドロンが質量を獲得するというメカニズ ムである。この質量獲得のメカニズムを実験的に調 べることが、現代のハドロン物理学の大きな課題の 一つである。いくつかの理論的モデルによると、カ イラル対称性は原子核内でも部分的に回復しており、 このことはベクトル中間子の核内での質量分布変化 として観測されるはずである。

> 我々が理研との協力で計画している J-PARC の E16 実験においては、高統計のデータで原子核中の す。E16 実験では、J-PARC のハドロン実験ホールに 新たに高運動量ビームライン (30GeV) を建設し、そのビームにより原子核標的中に ϕ 中間子を生成しそ の電子対崩壊を測定する。E325のときの10倍のビー ム強度にあたる 10¹⁰Hz のビームを 0.1% interaction 標的にあてることで、10⁷Hzの衝突レートの実験を 行う。さらに、縦方向に2倍強の立体角を持つ検出器 系を建設し、電子対のアクセプタンスとして5倍を 実現する。これにビームエネルギーの増加から得ら れる生成断面積の増加(2倍)も加え最終的に約100 倍の収量を得る予定である。

> E16 実験では、 φ 中間子の電子陽電子崩壊を利用 してその原子核内での不変質量を測定し、その真空 からの変化を調べる。電子と陽電子の運動量は、磁 場内に3層の位置検出器をおくことによってその飛 跡から決定する。位置検出器としては、Gas Electron Multiplier(GEM) を用いる計画である。これは 25kHz までの動作が報告されている。読み出しには ストリップを用いることで、~ 100μm の分解能、質 量分解能にして 5MeV/c²(KEK での実験の半分) を 達成する。

GEM 検出器を用いた軌跡検出器の開発

標準的な GEM 検出器のセットアップは、まず、一 番上にドリフト電場形成用のカソードがあり、その 下に電子増幅用の GEM が 3 枚続く。そして最下部 におかれた電極で GEM により増幅された電子を電 気信号として読み出す。読み出し用の電極は基板上 に実装され、本実験に使用する GEM 検出器の場合、 x、y 方向にストリップがあり、二次元読み出しが可 能になっている。使用しているガスは $Ar - CO_2(30\%)$ 混合) と $Ar - CH_4(10\%)$ 混合) である。

本年度は 0-30 度のトラックに対して ~ 100µm の 位置分解能を目指して GEM 検出器の開発を行って きた。E16 実験で用いる検出器系では、磁場によっ て電子が曲げられる効果と検出器の幾何学的な効果 をあわせて最大 30 度程度の入射角度が予想されて いる。つまり、入射角度 30 度まで 100µm 程度の高 い分解能が必要となる。昨年度のテストでは、スト リップの電荷情報をもちいて位置を計算し、正面入 射に対して位置分解能 $\sim 100 \mu m$ を実現した。しか し、15度入射に対して位置分解能が悪化してしまう こともわかった。そこで、ストリップに落ちた電荷 情報だけでなく、ストリップに電荷が到着した時間 を用いて位置の算出を行うことを考え、ビームテス トを 2009 年 12 月に東北大学核理研で行った。ガス、 GEM とカソードの間の距離、GEM とカソードの間 にかける電場、読み出しストリップの間隔に関して 様々な組み合わせをテストした。図 2.1.7 に 30 度入 射の場合に時間情報を用いた解析を行った時の残差 分布を示す。詳細な解析の結果、時間情報を用いる ことで分解能が著しく向上するとの結果が得られ、 30 度入射で~150µm 程度の分解能を得ることに成 功した(渡辺)。



図 2.1.7: 30°入射のときのテスト実験の結果:横軸は ビーム粒子の通過位置を GEM 検出器で決めた場合 と SSD で決めた場合の差である。(単位は mm) 縦軸 はイベント数。

GEM 検出器に用いる大型 GEM の開発

J-PARC E16 実験ではトラッカーとして 10cm 角、 20cm 角、30cm 角の GEM が用いられる予定である。 現状で 10cm 角に関しては安定に動作しているが、大 型の GEM の開発が急務である。その一環として、レ イテック社による Wet Etching 法で製作した 20cm 角 GEM についてのゲイン測定を行った。ガスとして ArCH₄ 90:10 を使用し、GEM1 枚への電圧が 340V で 17~20 倍の増幅率を得ることができた。

また、大型(30cm角)で100µm厚のGEMフォイ ルの開発を進めている。100µm厚では、より高い増 幅率が期待できるが、Wet Etching法による製作は 難しくレーザ加工を行う必要がある。YAGレーザー を用いてよりアラインメントの精度が高いGEMを 作成し、その性能をテストした。Wet Etching法で は穴形状が緩い円錐形となるものが、円筒形となっ た。GEM印加電圧340Vで37倍という高い増幅率 を得た。また、ゲインの時間変化を測定してみると7 %ほどであり、バイコニカルな形状の穴を持つGEM の時間変化が約10%に対して向上していることが確 認された(小松)。

2.1.9 原子核中のω中間子の生成・崩壊同 時測定実験(小沢研究室)

前項の実験に加え、さらに多面的なアプローチを 行うための実験も準備中である。原子核中での中間 子質量の起源に関する研究に関しては、二つのアプ ローチが存在する。一つ目は小沢が KEK で行ったよ うに原子核内で崩壊した中間子の質量分布を直接的 に測定するというもの。二つ目は原子核内に中間子 を束縛した系を生成し、その束縛状態のエネルギー 順位を詳細にしらべるというものである。現在まで の研究では、それぞれのアプローチを独立した実験 として遂行しているが、両者を同時に測定する実験 の準備も独立して進めている。

具体的には、J-PARC において ω 中間子の原子核 束縛状態と原子核中での ω 中間子質量に関する実験的 知見を与えるための実験を準備している。 ω 中間子の 原子核束縛状態は生成時の反応を用いた Missingmass 法で探索し、原子核中での ω 中間子質量はその $\pi^0 \gamma$ 崩壊を用いた不変質量法で測定する。二つの方法を 同時に行うことにより、 ω 中間子が存在する原子核 が定まった状態にあることを担保した核中の中間子 質量測定を行うことと、束縛状態の解析で得られる 原子核の持つ中間子へのポテンシャルと不変質量観 測を結びつけることが目的である。

実験は、J-PARC 加速器のハドロン実験ホール・ K1.8 ビームラインを用いて行う。具体的には、原子核 標的に π 中間子を入射させることで中性子と ω 中間 子を生成する反応を用いる。その素過程は $p(\pi^-, n)\omega$ である。入射 π 中間子の運動量を適切に選び、反応 中性子が 0 度方向で入射 π 中間子とほぼ同じ運動量 を持っていることを要求する。その結果 ω 中間子を 原子核内に静止して生成する。 ω 中間子の質量が原 子核内で 50MeV 程度軽くなると仮定して計算する と、入射する π 中間子の運動量が 1.8GeV/c であれ ば、 ω 中間子がほぼ運動量ゼロで生成される。 ω は π^0 中間子と γ に崩壊し、さらに π^0 中間子は 2γ に 崩壊する。最終生成物は中性子と 3γ となる。本実験 では最終的に生じた中性子と γ 線検出に十分な分解能を 持った大立体角の検出器を用いる。これには CsI を 用いた γ 線検出器を使用する。前方 0 度方向に出る 中性子は、シンチレーション検出器による飛行時間 測定を用いて検出する。

検出器開発とシミュレーションによる評価

本実験には、生成物の測定用検出器として、中性 子検出器とγ線検出器が必要であるが、そのための 基礎的な開発と期待される物理結果に関する評価を 行った。

中性子検出器は、シンチレーション検出器と中性 子吸収物質の鉄板で構成されている。各層には6本 のシンチレーション検出器と鉄板が配置され、合計 4層から成り立つ。性能として 80ps 以下という高い 時間分解能と 30% 程度の中性子検出効率が求めら れており、Saint Gobain Crystals のプラスチックシ ンチレーター BC408 と浜松ホトニクスの H2431-50 を使用する。ビームテストやシミュレーションを通 して、これらの要求性能を満たすかテストを行った。 時間分解能に関しては、東北大学において電子を用 いたテストを行い、当初の予定より4倍の面積を持 つ検出器に対して、60psの時間分解能が達成可能で あることを示した。さらに、実際に測定する中性子 のエネルギー領域における反応と測定効率を評価す るためハドロン輸送モデル FLUKA を用いたシミュ レーションを行った。シンチレーションカウンター の直前に1cm 程度の鉄板を置いた場合の計算などを 行い、中性子と鉄原子核との反応を利用し、23.3% の Efficiency を得られることが判明した。

 γ 線検出器は、768 個の CsI(Tl) クリスタルと PIN フォトダイオードで構成されるカロリメーターであ る。この検出器は KEK の実験 E246 で使用され、J-PARC での T-violation 実験 (E06) に向けアップグ レードされているものを使用する。この検出器は、過 去の実験での使用実績があるため、エネルギー分解 能のエネルギー依存性やシャワーの漏れの効果など が十分理解されている。過去の知識を基に我々の実 験で期待される質量分解能などの評価を行った。評価 には、既知のエネルギー分解能を input とした Fast MonteCarlo コードを開発し使用した。その結果、 ω 中間子の質量 (782MeV/ c^2) に対して 18MeV/ c^2 の 質量分解能が得られた。これは、予想される質量変 化 (70MeV/ c^2) に対して十分小さい。

さらに、本実験の目指す複合測定に関して、奈良 女子大学の比連崎氏や永廣さんとの協力で期待され るスペクトラムや収量の評価を行った。永廣さんに よる ω 中間子生成の計算を input とし、実験的効果 や核内巾の増大を効果に入れた計算を行った。その結 果、十分大きな立体角を持つ γ 線検出器を用いるこ とで、核内で完全に静止し崩壊する ω 中間子を 2000 個以上収集できることが分かった。さらにシミュレー ションを進め、最終的に期待されるスペクトラムと して図 2.1.8 を得た (宇都宮・桝本)。



図 2.1.8: 不変質量と Missing mass の相関図。a) 相 関の無い場合と b) 強い相関のある場合の二つを仮定 した計算。

J-PARC K1.8 におけるビームラインチェンバーの 運用

本実験で使用予定の J-PARC K1.8 ビームラインに おいては、ペンタクォーク探索実験である E19 実験 の準備が行われている。本実験の準備も兼ねて、ビー ムラインチェンバーの製作・運用に参加した。E19 実 験に必要な要素のひとつとして、 $p(\pi^-, K^-)$ 反応に おける K^- の運動量を測定する必要がある。この運 動量測定は、SKS magnet 及び 4 台のドリフトチェ ンバー (SDC1~4)を使用し、 K^- をトラッキングす ることによって行われる。その 4 台のドリフトチェ ンバーのうち、SKS magnet の上流側に置くビーム ラインチェンバー (SDC2) の立ち上げを行った。

SDC2 は Ar isoC₄H₁₀ を用いた cathode-wire gap 2.5mm、anode-potential wire gap 2.5mmのMWDC で、X,X',U,U',V,V'の6面で構成される。X'面はX 面のワイヤーを 2.5mm ずらしたもの、U面とV面 はX面の wire をそれぞれ 15度、-15度に傾けたも のである。SDC2の読み出しは ASD カードを用い、 MHTDC を用いてデータを取得する。

SDC2 を J-PARC に設置する前に、まず、KEK において SDC2 のエイジング及びテストを行った。 SDC2 のテストでは、ストロンチウム及び宇宙線を 用いて、SDC2 の動作確認、性能評価及び動作電圧 を調べる等を行った。テストは ASD の threshold を-100mV に設定して行い、cathode、potential wire 電 圧-1350V で検出効率が一定値となった。その後 J-PARC に運搬し SDC2 を取り付け、ノイズ対策を行っ た。ノイズ対策の結果、ASD の threshold を-50mV に設定し、実際のビームタイムでは efficiency は cathode、potential wire 電圧-1330V で検出効率が一定値 となった(桝本・小松・宇都宮)。

2.1.10 Gas Electron Multiplier(GEM) 検出器の基礎開発研究(小沢研究 室)

我々のグループでは、将来の J-PARC などでの実験 への応用を見据えて、Gas Electron Multiplier(GEM) と呼ばれる検出器の開発を行っている。GEM 検出器 は、厚さ50µm 絶縁物のフォイルの両面を金属皮膜 で覆い、直径70µm 程度の穴を140µm 間隔で多数 空けた構造したフォイルから構成されており、この フォイルの両面ににガス中で電圧をかけることによ り、穴中に高電場を発生し電離電子の増幅を行うも のである。高エネルギー加速器研究機構(KEK)ブ ルックヘブン国立研究所、理化学研究所などと共同 で開発を進めており、本年度は新製法のGEMフォ イルの性能評価と読み出し用 ASIC の開発を行った。

Hadron Blind Detector の Upgrade に向けた GEM 基礎特性研究

米国ブルックヘブン研究所 (BNL) の PHENIX 実 験では、電子のみを選択的に検出するための Hadron Blind Detector (HBD) がスペクトロメター中心部に 設置されている。HBD では電子が CF4 中で発する チェレンコフ光により CsI 光電面から叩き出された 光電子を増幅して検出するが、その増幅段として Gas Electron Multiplier (GEM) が使用されている。本研 究室では将来的な HBD の性能向上も見据えた GEM 検出器の基礎特性研究を行った。

現在 PHENIX 実験では HBD のディテクターガ スとして 100 %の CF₄ を用いているが、Ar の方が CF₄ よりも電離に必要なエネルギーが小さいので、 Ar-CF₄ にすることでより高い増幅率を得られる可 能性がある。また、CF₄ のカットオフエネルギーと CsI の量子効率から決まる波長領域の光の Ar 中での 透過率はほぼ 100 %である。⁵⁵Fe の 5.9 keV X 線源 を使用し、混合比と GEM 1 枚にかける電圧を変え て CERN 製 GEM 3 枚の増幅率を測定した。同じ電 圧でも Ar の混合比を多くすることで高い増幅率が 得られることを確認した。実用のためには Ar の波長 130nm 付近のシンチレーション光からのノイズなど を考慮する必要がある。

Tech-Etch 製 GEM は、増幅率がプラトー領域に 入るまでの時間が長く、またその変化も大きいこと と言われているが、確認のため実際に測定を行った。 混合ガス Ar+CO₂ 70:30 中で増幅率を電圧印加から の経過時間と共に記録した。測定開始 2.5 時間で増 幅率は 3.5 倍上昇し、変化が大きいことが確かめら れた。また、チェンバー内の水分量を変えて増幅率 の時間依存性を測定したが、増幅率が飽和する時間 まで測定を継続することが難しく水分量と増幅率の 変化の関係を確立することは出来なかった。

上記二つの測定は、BNL において行った(小松)。

GEM 検出器のための ASIC 開発

高エネルギー加速器研究機構(以下 KEK)におい て開催された ASIC 製作実習(2009/9/14~9/18)に 参加し GEM 検出器の読み出しのためのセルフトリ ガー型プリアンプの開発を行った。

デザイン値として入力レンジ-0.01pc~-0.05pcを 想定し、増幅率10V/pcとした。基本的な構成要素 はプリアンプ、シェイパー、コンパレータ、サンプ ル&ホールド回路である。図2.1.9 に回路図を示す。 シェイパーは速いシェイパーと遅いシェイパーの2 種類を用意した。速いシェイパーからの信号はコン パレータで処理し、トリガーが作られる。この信号 を外部で適当なタイミングまで遅延させてから遅い シェイパー側のサンプル&ホールドのスイッチ部に 入力すれば、最終的に元の信号の波高に比例した出 力が得られる。

具体的なデザインは KEK エレクトロニクスシス テムグループの所有するライブラリを基に行い、シ ミュレーションで動作を確認した。その後レイアウト を作成し、サブミットした。2010年3月には完成品 が届き、これからテストの予定である(桝本・小松)。



図 2.1.9: セルフトリガー型アンプ回路図。シミュ レーションでは遅いシェイパーの出力は速い方より 約 160ns 遅らせられた。

- <受賞>
- [1] 早野龍五、中日文化賞、中日新聞社、2009 年 5 月 3 日。

<報文>

(原著論文)

- [2] R.S. Hayano, "Antiprotonic Helium Atoms", Nucl. Phys. News 19, 18 (2009).
- [3] J. Marton *et al.*, "New X-Ray Detectors for Exotic Atom Research", IEEE Trans. Nucl. Sci. 56, 1400 (2009).
- [4] M. Sato *et al.*, " Development of a super-fluid ⁴He target system for an experimental search for nuclear \bar{K} states", Nucl. Instrum. Meth. A **606**, 233 (2009).
- [5] C. Cesar *et al.*, "Antihydrogen Physics at AL-PHA/CERN", Can. J. Phys. 87, 791 (2009).
- [6] R.S. Hayano, "Antiprotonic helium and kaonic helium - A tale of two exotic helium atoms", Can. J. Phys. 87, 835 (2009).

- [7] K. Yako, K. Miki, H. Sakai, S. Noji *et al*, "Gamow-Teller strength distributions in ⁴⁸Sc by the ⁴⁸Ca(p, n) and ⁴⁸Ti(n, p) reactions and twoneutrino double- β decay nuclear matrix elements", Phys. Rev. Lett. **103**, 012503 (2009).
- [8] K. Sekiguchi, H. Sakai, K. Yako *et al.*, "Threenucleon force effects in the ¹H(d, pp)n reaction at 135 MeV/nucleon", Phys. Rev. C 79, 054008 (2009).
- [9] C.J. Guess, S. Noji, H. Sakai *et al.*, "Spectroscopy of the ¹³B via the ¹³C(t, ³He) reaction at 115A MeV", Phys. Rev. C **80**, 024305 (2009).
- [10] S. Afanasiev *et al.* (PHENIX collaboration), "Systematic studies of elliptic flow measurements in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", Phys. Rev. C 80, 024909 (2009).
- [11] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration), "Measurement of Bottom Versus Charm as a Function of Transverse Momentum with Electron-Hadron Correlations in p + p Collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV", Phys. Rev. Lett. **103**, 082002 (2009).
- [12] A. Adare *et al.* (PHENIX collaboration), "Gluon-Spin Contribution to the Proton Spin from the Double-Helicity Asymmetry in Inclusive π^0 Production in Polarized p + p Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", Phys. Rev. Lett. **103**, 012003 (2009).
- [13] T. Pask *et al.*, "Antiproton magnetic moment determined from the HFS of p̄He", Phys. Lett. B 678, 55 (2009).
- [14] S. Afanasiev *et al.* (PHENIX collaboration), "Photoproduction of J/ψ and of high mass e^+e^- in ultra-peripheral Au plus Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", Phys. Lett. B **679**, 321 (2009).
- [15] S. Afanasiev *et al.* (PHENIX collaboration), "Charged Kaon Interferometric Probes of Space-Time Evolution in Au plus Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ ", Phys. Rev. Lett. **103**, 142301 (2009).
- [16] S. Afanasiev *et al.* (PHENIX collaboration), "Charged Kaon Interferometric Probes of Space-Time Evolution in Au plus Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ ", Phys. Rev. Lett. **103**, 142301 (2009).
- [17] G.B. Andresen *et al.*, "Magnetic multipole induced zero-rotation frequency bounce-resonant loss in a Penning-Malmberg trap used for antihydrogen trapping", Phys. Plasmas **16**, 100702 (2009).
- [18] M. Hori *et al.*, "Large-area imager of hydrogen leaks in fuel cells using laser-induced breakdown spectroscopy", Rev. Sci. Instr. **80**, 103104 (2009)
- [19] M. Bazzi *et al.*, "Kaonic helium-4 X-ray measurement in SIDDHARTA", Phys. Lett. B 681, 310 (2009).
- [20] R.S. Hayano, "Spectroscopy of antiprotonic helium atoms and its contribution to the fundamental

physical constants", Proc. Jap. Acad, Ser B 86, 1 (2010).

- [21] G.B. Andresen *et al.*, "Antihydrogen formation dynamics in a multipolar neutral anti-atom trap", Phys. Lett. B 685, 141 (2010).
- [22] H. Mardanpour, K. Miki, S. Noji, H. Sakai, K. Yako *et al.*, "Spin-isospin selectivity in threenucleon forces", Phys. Lett. B, **687**, 149 (2010).

(会議抄録)

- [23] R.S. Hayano, "Kaonic helium atoms", Nucl. Phys. A 827, 324c (2009).
- [24] H. Sakai, K. Yako *et al.*, "GT[±] strength distribution in ⁴⁸Sc and ¹¹⁶In measured by (p, n) and (n, p) reactions at 300 MeV and their implications for $2\nu 2\beta$ decay", Int. Jour. of Mod. Phys. E **18**, 2119 (2009).
- [25] T. Suzuki, "The investigation of $\Lambda(1405)$ state in the stopped K^- reaction on deuterium", Mini-Proceedings of ECT* Workshop, arXiv:1003.2328v2.
- (学位論文)
- [26] H.X. Shi, "Energy calibration method and performance evaluation of silicon drift detectors for precision spectroscopy of kaonic atom X-rays" (早野 研修士論文), 2009.
- [27] K. Utsunomiya, "Detector design for new combined measurements of meson in nucleus", (小 沢研修士論文), 2009.
- [28] Y. Watanabe, "Development of GEM detectors for a large acceptance lepton pair spectrometer", (小 沢研修士論文), 2009.
- <学術講演>

(国際会議)

学部学生ポスターセッション

- [29] Y. Goto and T. Nishi, "Eliminating the effect of SRC beam-energy spread on the BigRIPS focal plane", 第3回日米物理学会合同核物理分科会 (HAW09), Waikoloa, Hawaii, Oct 2009.
- [30] T. Sato, "Development of Hadron Blind Detector (HBD) for φ→e⁺e⁻ measurements at J-PARC",
 第3回日米物理学会合同核物理分科会 (HAW09), Waikoloa, Hawaii, Oct 2009.

ポスターセッション

- [31] T. Suzuki, "Strange tribaryons studied in the ${}^{4}\text{He}(K_{stopped}^{-}, \Lambda N)$ reaction", 19th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB19), Bonn, Germany, Sep 2009.
- [32] T. Suzuki, "The investigation of $\Lambda(1405)$ state in the stopped K^- reaction on deuterium", 10th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (Hyp X), Tokai, Japan, Sep 2009.

一般講演

- [33] S. Noji, "Exothermic charge-exchange reaction using the SHARAQ spectrometer —towards observation of isovector spin monopole resonance", The 8th exotic beam physics summer school, Lawrence Berkeley National Laboratory, U.S., Aug 5, 2009.
- [34] Y. Fujiwara, "J-PARC E17 experiment", 19th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB19), Bonn, Germany, Sep 2009.
- [35] T. Suzuki, "The investigation of $\Lambda(1405)$ state in the stopped K^- reaction on deuterium", 19th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB19), Bonn, Germany, Sep 2009.
- [36] Y. Fujiwara, "Confirmation of kaons in the J-PARC K1.8BR beamline", 10th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (Hyp X), Tokai, Japan, Sep 2009.
- [37] K. Yako, "Study of nuclear matrix elements of twoneutrino double-beta decay by (p, n) and (n, p)reactions", Double beta decay and neutrinos, Waikoloa, Hawaii, Oct 12, 2009.
- [38] Y. Fujiwara, "J-PARC E17 experiment", HAW09, Waikoloa, Hawaii, Oct 2009.
- [39] Y. Watanabe, "Development of GEM detectors for a large acceptance phi meson spectrometer", HAW09, Waikoloa, Hawaii, Oct 2009.
- [40] K. Utsunomiya, "New detector design for combined measurements of omega meson", HAW09, Waikoloa, Hawaii, Oct 2009.
- [41] H.X. Shi, "Precision spectroscopy of kaonic atom x rays at DAΦNE with silicon drift detectors in SIDDHARTA (III)", HAW09, Waikoloa, Hawaii, Oct 2009.
- [42] S. Itoh, "Precision Spectroscopy of Pionic Atom in (d,³He) Reaction at RIKEN-RIBF", HAW09, Waikoloa, Hawaii, Oct 2009.
- [43] S. Noji, "Proposed experiment for the observation of the isovector spin monopole resonance via the exothermic charge-exchange reaction using the SHARAQ spectrometer", HAW09, Waikoloa, Hawaii, Oct 2009.
- [44] T. Suzuki, "Strange tribaryons studied in the ${}^{4}\text{He}(K_{stopped}^{-}, \Lambda N)$ reaction", 13th International Conference on Hadron Spectroscopy (HADRON 2009), Tallahassee, USA, Dec 2009.
- [45] H. Sakai, "Overview of the ICHOR project", New facet of spin-isospin responses (SIR2010), UT, Japan, Feb 18, 2010.
- [46] K. Yako, "Study of nuclear matrix elements of twoneutrino double- β decay by (p, n) and (n, p) reactions", SIR2010, UT, Japan, Feb 18, 2010.
- [47] K. Miki, "Measurement of the ²⁰⁸Pb and ⁹⁰Zr $(t, {}^{3}\text{He})$ reactions at 300 MeV/u —the first physics measurement with SHARAQ—", SIR2010, UT, Japan, Feb 19, 2010.

- [48] S. Noji, "Proposed experiment for the observation of the isovector spin monopole resonance via the exothermic charge-exchange reaction using the SHARAQ spectrometer", SIR2010, UT, Japan, Feb 19, 2010.
- [49] H. Sakai, "GT/SDR Study by the Exothermic ${}^{12}\text{Be}(p,n){}^{12}\text{B}$ Reaction", The 4th LACM-EFES-JUSTIPEN workshop (LEJ4), Oakridge National Laboratory, U.S., Mar 17, 2010.
- [50] K. Miki, "Search for the isovector spin monopole resonance via the ²⁰⁸Pb, ⁹⁰Zr(t, ³He) Reactions at 200 MeV/u", LEJ4, Oakridge National Laboratory, U.S., Mar 17, 2010.

招待講演

- [51] H. Sakai, "Intermediate nuclear structure for $2\nu 2\beta$ decay of ⁴⁸Ca studied by (p, n) and (n, p) reactions at 300 MeV", Nuclear structure and dynamics, Dubrovnik, Croatia, May 5, 2009.
- [52] R.S. Hayano, "ASACUSA-future opportunities", New Opportunities in the Physics Landscape at CERN, CERN, May 12, 2009.
- [53] K. Yako, "Study of nuclear matrix elements of twoneutrino double- β decay by (p, n) and (n, p) reactions", Collective motions in nuclei under extreme conditions (COMEX3), Michigan, U.S., June 4, 2009.
- [54] R.S. Hayano, "Precision experiments at lowest energies for fundamental tests and constants", Heraeus Seimnar, Bad Honnef (Germany), Jun 15, 2009.
- [55] R.S. Hayano, "Hadron Properties in the Nuclear Medium", 5-th International Conference on Quarks and Nuclear Physics, Beijing, Sep 21, 2009.
- [56] H. Sakai, "Intermediate nuclear structure for $2\nu 2\beta$ decay of ⁴⁸Ca studied by (p, n) and (n, p) reactions at 300 MeV", Strong, weak and electromagnetic interactions to probe spin-isospin excitations, Trento, Italy, Sep 28, 2009.
- [57] T. Suzuki, "Pionic atom results from GSI and experiments at J-PARC K1.8BR", US-Japan Joint Workshop on Meson Production Reactions at Jefferson Lab and J-PARC, Waikoloa, Hawaii, Oct 2009.
- [58] K. Ozawa, "Experimental study of ω meson in nucleus", US-Japan Joint Workshop on Meson Production Reactions at Jefferson Lab and J-PARC, Waikoloa, Hawaii, Oct 2009.
- [59] M. Sato, "Precision Spectroscopy of Kaonic Helium-3 X rays at J-PARC", Hadronic Atoms and Kaonic Nuclei - Solved Puzzles, Open Problems and Future Challenges in Theory and Experiment, ECT*. Trento, Italy, Oct 2009.
- [60] T. Suzuki, "The investigation of $\Lambda(1405)$ state in the stopped K^- reaction on deuterium", Hadronic

Atoms and Kaonic Nuclei - Solved Puzzles, Open Problems and Future Challenges in Theory and Experiment, ECT^{*}. Trento, Italy, Oct 2009.

- [61] R.S. Hayano, "Testing the CPT symmetry using slow antiprotons", HAW09, Waikoloa, Hawaii, Oct 2009.
- [62] H. Sakai, "Exothermic heavy-ion chrage-exchange reactions with unstable beams and the high resolution magnetic spectrometer SHARAQ", XXXIII Symposium on Nuclear Physics, Cocoyoc, Mexico, Jan 7, 2010.
- [63] K. Yako, "Nuclear matrix elements of two-neutrino double-β decay studied by charge exchange reactions", Nuclear, particle and astrophysics, Yongpyong, Korea, Feb 23, 2010.

(国内会議)

一般講演

- [64] 小沢恭一郎, "東大本郷における GEM 開発", MPGD 研究会, 東京大学, 2009 年 5 月 22 日.
- [65] 小松雄哉, "ブルックヘブンにおける HBD 開発と GEM 基礎特性について",第6回 MPGD 研究会, 神戸大学, 2009年12月12日.
- [66] 渡辺陽介, "J-PARC E16 実験のための GEM Tracker 開発現状", 第 6 回 MPGD 研究会, 神戸大学, 2009 年 12 月 12 日.
- [67] H. Shi, "Precision Spectroscopy of Kaonic Hydrogen x ray with Silicon Detector in SIDDHARTA (IV)", 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山, 2010.
- [68] 三木謙二郎、"300MeV/uにおける²⁰⁸Pb,⁹⁰Zr(t,³He) 反応を用いた荷電ベクトル型スピン単極巨大共鳴の 探索",日本物理学会第65回年次大会、岡山、2010.
- [69] 橋本直、"K 中間子 3He 原子の X 線精密分光実験に 用いるシリコンドリフト検出器の性能評価"、日本物 理学会第 65 回年次大会、岡山、2010.
- [70] 轟孔一,"低エネルギー反陽子の消滅断面積の測定", 日本物理学会第 65 回年次大会,岡山, 2010.
- [71] 小林拓実, "ASACUSA 超伝導ポールトラップの反陽 子消滅検出器の設計に向けての性能評価",日本物理 学会第65回年次大会,岡山,2010.
- [72] 宇都宮和樹, "核内 中間子複合測定のための検出器 系設計と開発",日本物理学会第65回年次大会,岡山, 2010.
- [73] 桝本新一,"核内 中間子質量分布測定のための検出 器開発の現状",日本物理学会第65回年次大会,岡山, 2010.

招待講演

[74] K. Ozawa, "Direct measurments of ω mass modification in A(π , n ω)X reaction and $\omega \to \pi^0 \gamma$ decays",Physics and Upgrade of the J-PARC hadron Facility, Sep 18, 2009, J-PARC, Ibaraki, Japan.

- [75] 小沢恭一郎、"E16 実験のための測定器開発の現状"、 新学術領域「多彩なフレーバーで探る新しいハドロン存在形態の包括的研究」キックオフ研究会、名古屋 大学、2009 年 11 月 28 日.
- [76] 酒井英行 "質量をもったフェルミオン・ペアーによる ベルの不等式の検証—アインシュタインは間違った か?—", グローバル COE プログラム ナノサイエン スを拓く量子物理学拠点, 東京工業大学, 2010 年 12 月 8 日.
- [77] R.S. Hayano, "Experimental study of hadron properties in the nuclear medium", High-energy hadron physics with hadron beams, Jan 8, 2010, KEK, Japan.
- [78] K. Ozawa, "omega meson in nucleus, experimental study", New Frontiers in QCD synposium, Feb 22, 2010, YITP, Kyoto, Japan.
- [79] R.S. Hayano, "Hadrons in Nuclear Medium, experimental studies", New Frontiers in QCD, Feb 25, 2010, YITP, Kyoto, Japan.
- [80] 酒井英行、"スピン・アイソスピン応答の実験的研究 -今と近未来 - ",日本物理学会第 65 回年次大会、岡山、 2010.

(セミナー)

- [81] 早野龍五, "反陽子ヘリウム原子:反物質研究で CPT 定理に挑む",東大物理コロキウム, 2009 年 4 月 17 日.
- [82] 早野龍五, "反物質", KEK 科学記者勉強会, 2009 年 4月22日.
- [83] 小沢恭一郎, "Quark Gluon Plasma at BNL-RHIC", 東北大学, 2009 年 7 月 3 日.
- [84] 早野龍五, "対称性について考える", 自然科学フォー ラム(中学生対象), 小柴ホール, 2009 年 7 月 4 日.
- [85] 早野龍五, "陽子・基礎物理定数・CPT 対称性", KEK 「金茶会」, 2009 年 10 月 1 日.
- [86] 小沢恭一郎, "J-PARC におけるハドロン質量起源の 探索実験", 原子力研究所先端基礎研究センター, 2009 年10月9日.
- [87] 鈴木隆敏, "Experimental Programs at J-PARC K1.8BR", ソウル大学 WCU セミナー, 2009 年 10 月 30 日.
- [88] 早野龍五, "反水素原子の生成と分光", 日大理工, 2009 年 12 月 18 日.

2.2 駒宮研究室

まさに、素粒子物理は革命前夜である。世界高エネ ルギーの陽子・陽子相互衝突型加速器 LHC が稼働を 始め、TeV(10¹²電子ボルト)のエネルギースケール での新粒子・新現象を直接実験できる時代がきた。将 来はこれに続く電子・陽電子衝突のリニアコライダー ILC(図 2.2.10) を建設し、精密実験によって LHC で の粒子の発見を物理の原理に高めていくことになる。 われわれは、素粒子物理の本質的な問題を実験的な アプローチで解明することを目指している。これに はエネルギーフロンティア(最高エネルギー)にお ける粒子衝突型加速器(コライダー)実験がもっとも 有効な手段であることは実験的な事実である。前の 実験である CERN の電子陽電子コライダー LEP-II での OPAL 実験では、素粒子の世代数を3と決定 し、電弱相互作用と強い相互作用のゲージ原理をを 決定的にするなどの成果を挙げた。 これらの成果を 踏まえて、LEP の次の世代の電子・陽電子コライダー である国際電子陽電子リニアコライダー ILC 計画の 推進をその中心となって行なっている。 特にナノス ケールの精度を持つビームサイズモニターやビーム 位置モニターの開発研究を行ない、かつ ILC での実 験の検討を行なっている。 また、CERN の LHC に おける ATLAS 実験のデータ解析にも大学院学生が 参加している。エネルギーフロンティアにおける加 速器実験に加えて、中小規模の実験で本質的な素粒 子物理研究を行なう為に、粒子検出器の開発研究を おこなっている。粒子検出器開発においては超冷中 性子の重力での束縛量子状態の測定と新たな近接力 の探索、中国北京の高能研において新たに建設され た低いエネルギーの電子陽電子コライダー BEPC-II における BES-III 実験の TOF 測定器の開発を行な い、BES-IIのデータ解析を行なっている。

2.2.1 電子・陽電子リニアコライダー ILC 計画

電子と陽電子(e⁺ と e⁻)は、素粒子とみなすこと ができるので、それらの衝突は素過程である。また、 e⁺とe⁻は粒子と反粒子の関係にあるので、衝突に よって対消滅が起こり、その全ての衝突エネルギー は新たな粒子の生成に使われる。従って、エネルギー フロンティア(世界最高エネルギー)での e⁺e⁻ 衝突 反応の実験研究は、素粒子の消滅生成の素過程反応 そのものを直接、詳細に観測できるという本質的利 点を有する。しかし、LEP のような円形 e^+e^- コラ イダーではシンクロトロン放射によって電子や陽電 子のエネルギーが急速に失われる。従って、電子・陽 電子を向かい合わせて直線的に加速して正面衝突さ せるシンクロトロン放射の出ないリニアコライダー の方が経済的である。日本はいち早く e+e-リニアコ ライダーを高エネルギー物理の次期基幹計画として 取り上げ、技術開発を進めてきた。7年前から ICFA (International Committee for Future Accelerators) ではリニアコライダーを国際的に推進する体制を整 えた。2004年8月には国際的に主線形加速器の加速



図 2.2.10: ILC 計画

技術を超電導加速空洞を用いることを決定し、2007 年3月にはICFA に基礎設計書が提出されプロジェ クトは国際的に大きく進展した。2012年末には技術 設計書を作成することになっており、LHC での初期 の物理結果によってはすぐに建設できるような体制 を整え、わが国に国際リニアコライダーILC を誘致 するべく、全国の研究者と共に努力を重ねている。

一方、LEP のデータは電弱統一ゲージ理論の正し さを圧倒的な精度で検証したのみならず超対称性の 正しさを示唆している。この理論では 130 GeV 以下 の質量を持った軽いヒッグス粒子の存在を予言して おり、また超対称性粒子が TeV 以下の質量領域で存 在する可能性が高く、LHC での実験と相補い合う形 でのリニアコライダーでの実験が極めて急務である。 特に LHC でこれらの新粒子や新物理の兆候が見え れば ILC 計画には拍車がかかる。本研究室はリニ こア コライダーでの物理・測定器の研究を行なってきた。 ILC での実験の測定器では荷電粒子と中性粒子をバ ランス良く測定し、ハドロンジェットのエネルギーを 正確に測定するためには、半径が大きい測定器が極 めて有利である。このような測定器のコンセプトを 国際的に詰めてきた。本研究室は更に、ILCの加速器 自体の研究開発にも参加してきた。具体的には KEK の ILC 開発テスト加速器 ATF2 において、レーザー 干渉を用いた新竹ビームサイズモニターや、超高精 度ビームポジションモニターの開発を行なっている。 本研究室の駒宮は ICFA 及び ILCSC (International Linear Collider Steering Committee) において KEK の鈴木機構長とともにわが国の代表である。

ATF2

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

KEK の先進加速器試験装置 (ATF) を拡張し、最 終収束系システムを実証するための研究施設 (ATF2) を建設してきた。ILCで採用される局所色収差補正 を基礎とした収束原理の実証を初めて行なう実験で、 ILC の Scaled down model として 2008 年の終りか らビームコミッショニングを進めている。プロジェ クトでは目標を二段階に分けて設定している。初期 の目標は、10¹⁰ 個の電子を縦 37 nm の非常に狭い空 間に閉じこめ、極微のビームサイズを実現すること である。また、このビームの軌道を 2 nm の精度で 制御できることを実証するのが、次期の目標である。 小さなビームサイズと、精密なビーム軌道制御が可 能となれば、電子と陽電子を高い頻度で衝突させる ことを保証できる。現在は、このような非常に小さ い電子ビームの大きさや軌道を正確に求めるための モニタの開発や、軌道を一定に保つためのフィード バックシステムの研究を進めている。

ATF2 は日本が主導する計画だが、アメリカやア ジア、ヨーロッパの多数の国々が参加した国際共同 研究として進めている。

ATF2 仮想衝突点ビームサイズモニター (新竹モニ タ) の開発研究

ATF2の仮想衝突点において縦方向に 37 nm に収 束した極小のビームを測定するビームサイズモニタ として、新竹モニタと呼ばれる測定器を研究開発し ている。

新竹モニタは、電子ビームに直交する平面上にレー ザー干渉縞を作り、干渉縞プローブとしてビームを スキャンすることでビームサイズを測定するビーム サイズモニタである。干渉縞上で磁場強度の山の位 置に電子ビームがある時、モニタ後方に置いたγ線 検出器で測定されるコンプトン信号量は多くなり、 谷の位置では少なくなる。ビーム位置に応じたコン プトン信号量の変調から、ビームサイズを算出する ことが可能である。このようなビームサイズ測定方 式は新竹積氏によって提唱され、米 SLAC の FFTB (Final Focus Test Beam) 実験では波長 1064 nm の レーザーを用いてビームサイズ 65 nm の測定に成功 した。

新竹氏の研究からの変更は、より小さい37 nm の ビームサイズを測定するために二倍高調波を使い波 長 532 nm のレーザーを生成する点、ビームを固定 したままでのサイズ測定を可能にする光学遅延の導 入、水平方向のビームサイズ測定にも対応する様に レーザーワイヤーとして使うことも可能にした点、 FFTB のビームエネルギー 50 GeV に比べて、ATF2 のエネルギーは 1.3 GeV と低いので、シグナルに比 較して高エネルギーのバックグラウンドが高く、こ れに対応するための多層構造の γ 線検出器の導入な どである。

現状と展望

2009 年度の進捗状況としては、コンプトン信号が レーザーの干渉縞に応じて変調することを確認し、3 µm 程度のビームを測定することに成功したことが 第一に挙げられる。また、レーザーと電子ビームの 衝突の条件を調べ、ソフトウェア、ハードウェア面 を整備し、安定して衝突する実験系を構築した。



 \boxtimes 2.2.11: 3μ m Beamsize measurement

3 µm のビームサイズ測定の成功 (図 2.2.11) を受 けて、測定結果を元に新竹モニタの系統誤差の評価 を行っている。系統誤差は 2009 年 12 月の段階では 50 %程度存在していたと見積もられている。光学系 の組み直しと、ビームプロファイルの改善によって、 2010 年 3 月には大幅な系統誤差の減少が確認された。 これにより新竹モニタの性能として、ATF2 の目標 の一つである 37 nm のビームサイズに対して、3%の 系統誤差で測定を行うことが可能であると見積もら れている。

2009 年度までの成果で、新竹モニタがビームサイ ズモニタとして正常に動作することが確認された。 2010 年度は研究開発と並行して、新竹モニタのビー ムチューニング用デバイスとしての活用が望まれて いる。これは今後、ビームが新竹モニタでしか測定 できない微少サイズ領域に入ってくるからである。 したがってさらなる系統誤差の追いこみと、ビーム チューニンググループとの協力のため、ユーザーイ ンターフェースの改良を進めている。

2.2.2 UCN 実験

超冷中性子は速度 10 m/s 程度の非常に遅い中性 子で、物質表面のポテンシャルに阻まれて全反射す る性質を持つ。そのため、重力のもとで平坦な床の 上に超冷中性子を落とすと、古典的にはパウンドを



図 2.2.12: 実験セットアップ概念図

繰り返すことになる。これを量子力学的に考えると、 超冷中性子は重力ポテンシャルによって束縛される ことになり、高さ方向の波動関数に従って、およそ 10 μm 周期の存在確率分布の濃淡を持つことになる。 この分布を精密に観測することがこの実験の目標で ある。測定された分布が量子力学による予想と異なっ た場合、到達距離 10 μm 程度の未知短距離力を探索 することも可能である。

この実験では、重力によって束縛された超冷中性 子の位置を、サブミクロンの精度で測定する必要が ある。このような前例のない位置分解能を達成する ため、中性子分布を拡大する中性子光学系と、リア ルタイム測定可能なピクセル検出器を組み合わせた 装置を開発した。2009 年度までに 装置は完成させ 測定の準備を終え、フランス ILL においてテスト実 験を行った。今年度はさらに装置を改良し、量子分 布を測定することを目指している。

測定器と実験の概略

超冷中性子の重力による量子状態を観測するための測定器を開発している(図 2.2.12)。

まず、超冷中性子を平滑な床と吸収体の天井を持 つガイドに通す。超冷中性子は床の上で重力による 量子状態を作る。高いエネルギー準位の状態は観測 の妨げになるため、天井に衝突するような主量子数 の高い中性子を吸収体によって取り除く。

超冷中性子が物質表面で全反射するという性質を 利用して、ガイドを通ってきた中性子の分布を円筒 の曲面によって 20 倍程度に拡大する。

拡大された分布を測定するために、CCD をベース とし、リアルタイム測定可能なピクセル検出器を開 発した。電荷を持たない中性子を CCD によって検 出するために、コンバータとの核反応によって中性 子を荷電粒子に変換する必要がある。高い位置分解 能を維持するために、¹⁰B の中性子コンバータ膜を CCD 受光面に直接蒸着した。このピクセル検出器は 超冷中性子に対して 40 %の高い検出効率を持ち、位 置分解能は約 3 µm であることが確かめられている。

中性子ガイド、拡大機構、CCD 検出器を組合わせ ることで、中性子の高さ分布を1 µm 以下の精度で 測定可能な装置を開発した。この装置を用いて、重 力による量子状態を克明に観測することを目指す。

2.2.3 LHC での物理解析

我々が長年探索し続けてきたヒッグス粒子や超対 称性粒子を発見出来る時代が迫っている。LHC は CERN の世界最高エネルギーの陽子陽子衝突の加速 器である。2010年3月に重心系エネルギー7TeVで の実験が開始された。わが国は汎用測定器のATLAS 実験に参加している。本来、e⁺e⁻ コライダーでの実 験の方がLHC のようなハドロンコライダーでの実験 よりも事象や実験環境がクリーンであり、バックグ ラウンドも非常に低いが、先にも述べた通り円形加 速器ではシンクロトロン放射によるエネルギー欠損 が大きく e+e- 衝突ではリニアコライダー以外の解 はない。シンクロトロン放射によって円形加速器を 粒子が一周する毎に失うエネルギーは、 $(E/m)^4$ (Eと m はビーム粒子のエネルギーと質量)に比例する ので、質量の重い陽子を用いればエネルギーを失う 事無く高い衝突エネルギーが得られる。これがLHC の有効性であるが、実験はバックグラウンドが高く且 つ放射線レベルも高いので難しい。 ATLAS 実験はこ のような困難を克服して TeV スケールの重要な物理 を発見できるように設計され建設が進んでいる。本 学の素粒子物理国際研究センターを中心として物理 解析の準備を進めてきた。LHC での最も重要な物理 は、素粒子の質量の起源とされるヒッグス粒子の発 見と、重力も含めた相互作用の超統一にとって不可 欠な超対称性の発見である。 ヒッグス粒子は LEP で の直接探索から 114 GeV よりも重く、LEP などでの 電弱相互作用の精密測定から約 200 GeV よりも軽い 事が分かっており、質量領域は絞られている。LHC ではバックグラウンドが低いヒッグスの生成・崩壊 モードを見極めて探索が行なわれる。特にクォーク から振りほどかれた W ボゾン同士が衝突してヒッグ ス粒子を生成し、ヒッグス粒子が $\gamma\gamma$ か $\tau\tau$ の対に崩 壊するモードが有望である。超対称性粒子に関して は、強い相互作用で生成されるグルーオンやクォー クの超対称性パートナーが大量に生成されると期待 されているが、これらは何段階かのカスケード崩壊 を行ない最も軽い超対称性粒子を生成するが、これ らの事象の特徴を捉えて探索する。LHC の実験開始 から早い時期にこれらの発見を目指す。エネルギー フロンティアの実験では、従来の理論では全く予期 されない発見がある可能性もあり期待できる。

ATLAS 検出器による超対称性粒子の解析

LHC のような陽子衝突型の加速器では,大量の バックグラウンドの中から目的とする信号をいかに して見つけるかが解析の鍵となる。超対称性粒子が 存在する場合の特徴的な信号は、大きな横消失エネ ルギーとジェットと呼ばれるクォーク・グルーオンか ら生じる粒子群が多数発生することである。これら を組み合わせることで、標準理論から来るバックグ ラウンドを少なく抑えることができる。

現在行っている解析は、第3世代粒子を含む超対称性粒子の探索である。超対称性理論によると、フェルミオンの超対称性パートナーの質量は右巻きの方がWinoの質量を拾わない分、左巻きよりも軽くな

る。また、湯川結合により右巻きと左巻きの質量の 混合が起こり、質量の固有状態は右巻き粒子よりも 更に軽くなる。この効果は質量の大きい第3世代粒 子で顕著になるため、結果として他の超対称性粒子 に比べて軽くなる。その大きさは、超対称性理論の パラメータにも依存するが、その値によっては、第 3世代フェルミオンの超対称性パートナーへの崩壊 分岐比が上昇するため、崩壊パターンには標準理論 の第3世代フェルミオンが多く存在することになる。 第3世代粒子のbクォーク、 τレプトンにはそれぞ れ特徴的な信号があるため、同定することが可能と なっており、これを利用することで、パラメータに よっては、バックグラウンドをより小さくすること が可能になる。

2.2.4 BES 実験

Beijing Spectrometer(BES) 実験は中国・北京の高 能研究所 (IHEP) にある Beijing Electron-Positron Collider(BEPC) で行われている、高エネルギー電 子・陽電子衝突実験である。1989 年よりおよそ12 年 間続いた BES-I 実験の終了後、1996 年から upgrade され、BES-II 実験 (図 2.2.13) が行われた。BEPC の ビームエネルギーは 1.5 GeV から 2.8 GeV である。



☑ 2.2.13: BES II detector

BEPC は *c*-クオークと τ レプトンの物理に特化し た加速器である。特に J/ψ 粒子は BES-I 実験にて 7.8 × 10⁶、BES-II 実験にて 5.77×10⁷ 事象得られて おり世界最大である。現在、加速器は BEPC-II に upgrade しつつあり、2008 年中には稼働し実験が始 まる。ビームエネルギー 1.89 GeV でピークルミノシ ティを 10³³ cm⁻²s⁻¹ に増強する。加速器の upgrade に伴い、実験装置の性能を更に向上させた BES-III 実験が計画されている。BES-III 実験では1年間に 10^9 の J/ψ 粒子を得ることが計画され、これまでの 実験結果よりさらに精度の高い結果が得られると期 待される。

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

解析

 Λ baryon は弱い相互作用によって、 $\Lambda \rightarrow p\pi^{-}$ と 崩壊する。崩壊によって生成された粒子の放出される 方向は Λ のスピンの方向に依存し、その角度分布は

$$\frac{d\Gamma}{\Gamma} = \frac{1}{2}(1 + m_a \alpha_\Lambda \cos\theta_a)$$

と表される。崩壊粒子の運動方向を測定することで、 Λのスピンの方向を測定することができる。

 $J/\psi \rightarrow \Lambda \overline{\Lambda}$ event を用いて、 $\Lambda \overline{\Lambda}$ のスピン相関に 対する Bell 不等式を検証する実験が DM2 Collaboration によって行われた。このとき検証に使用され たベル不等式は、

 $|\langle m_{1,a}m_{2,b}\rangle - \langle m_{1,a}m_{2,c}\rangle| \le 1 + \langle m_{1,b}m_{2,c}\rangle$

と表される。2008 年に S. P. Baranov によって、使 用された不等式の座標系の取り方に不備があること が指摘された。この不等式ではスピンを射影するた めに3本の量子化軸(a, b, c)をとり、 $\Lambda \ge \overline{\Lambda}$ のスピ ンを共通の量子化軸bに射影することを仮定してい る。しかし、異なる座標系に属している粒子に対し て共通の軸をとるという意味が明瞭ではない。また、 測定で得られたイベント数が 1077 event と少なく、 検証に十分な統計が得られていない。

本研究では、ベル不等式を一般化した不等式である CHSH 不等式の評価を行う。CHSH 不等式は以下の式で表される。

$$|\langle m_{1,a}m_{2,b}\rangle + \langle m_{1,c}m_{2,b}\rangle + \langle m_{1,a}m_{2,d}\rangle - \langle m_{1,c}m_{2,d}\rangle| \le 2$$

この不等式では4本の量子化軸をとり、AAの静止系 にそれぞれ2本づつ独立した量子化軸をとるので前 述のような不明瞭さは無い。

物理解析に使用するデータは、BES-II 実験で得られた $J/\psi \rightarrow \Lambda \overline{\Lambda}$ event を用いる。BES-II 実験で得られた J/ψ の event 数は、 5.7×10^7 event であり、DM2 で得られた event 数を大きく上回るため、DM2 より統計精度の高い検証を行うことが可能である。

<受賞>

 G. Ichikawa, 2009 IEEE Nuclear Science Symposium Student Paper Award, IEEE, Oct. 2009

<報文>

(原著論文)

- [2] OPAL Collaboration, G.Abbiendi *et al.*: "Σ⁻antihyperon correlations in Z0 decay and investigation of baryon production mechanism", Eur.Phys.J. C64 (2009) 609-625
- [3] OPAL Collaboration, G.Abbiendi *et al.*: "Search for Invisibly Decaying Higgs Bosons in $e^+e^- \rightarrow$ Z0h0 Production at $\sqrt{s} = 183-209$ GeV", Phys.Lett. B682 (2010) 381-390
- [4] N. Terunuma, A. Murata, M. Fukuda, K. Hirano, Y. Kamiya, T. Kii, M. Kuriki, R. Kuroda, H. Ohgaki, K. Sakaue, M. Takano, T. Takatomi, J. Urakawa, M. Washio, Y. Yamazaki, and J. Yang: "Improvement of an S-band RF gun with a Cs2Te photocathode for the KEK-ATF", Nucl. Instr. Meth. A613 (2010) 1-8
- [5] BESIII Collaboration, M.Ablikim *et al.*: "Branching Fraction Measurements of χ_{c0} and χ_{c2} to $\pi 0\pi 0$ and $\eta\eta$ ", Phys.Rev. D81 (2010) 052005
- [6] S. Kawasaki *et al.*: "Development of a pixel detector for ultra-cold neutrons", Nucl. Inst. And Meth. A 615(2010) 42-47
- [7] The ATLAS Collaboration: "Readiness of the AT-LAS Liquid Argon Calorimeter for LHC Collisions", submitted to EPJC
- [8] The ATLAS Collaboration: "Charged-particle multiplicities in pp interactions at $\sqrt{(s)} = 900$ GeV measured with the ATLAS detector at the LHC", submitted to Phys. Lett. B

(会議抄録)

- [9] A. Seryi *et al.* (ATF/ATF2 collaboration): "ATF2 Commissioning", Proceedings of Particle Accelerator Conference 09, Vancouver, Canada (2009)
- [10] T. Kume, N. Terunuma, T. Tauchi, Y. Honda, S. Araki, T. Okugi, J. Urakawa, T. Yamanaka, M. Oroku, Y. Kamiya, S. Komamiya, T. Suehara, B. Bolzon, A. Jeremie, and N. Geffroy: "Nanometer Order of Stabilization for Precision Beam Size Monitor (Shintake Monitor)", Proceedings of Particle Accelerator Conference 09, Vancouver, Canada (2009)
- [11] B. Bolzon, N. Geffroy, A. Jeremie, M. Oroku, T. Yamanaka, Y. Kamiya, and T. Kume: "Linear Collider Final Doublet Considerations: ATF2 Vibration Measurements", Proceedings of Particle Accelerator Conference 09, Vancouver, Canada (2009)
- [12] S. Bai, J. Gao, X. Zhu, P. Bambade, Y. Kamiya, A. S. Aryshev, T. Okugi, D. McCormick, M. Woodley, M. Oroku, and T. Yamanaka: "Beam Waist Manipulations at the ATF2 Interaction Point", Proceedings of Particle Accelerator Conference 09, Vancouver, Canada (2009)
- [13] T.Yamanaka *et al.*: "Status of the first commissioning of the Shintake Monitor for ATF2", Proceedings of Particle Accelerator Conference 09, Vancouver, Canada (2009)

- [14] ATF/ATF2 collaboration, N. Terunuma *et al.*: "Status of ATF (ATF2: Test beamline for ILC Final Focus System)", Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Toukai, Japan (2009)
- [15] M.Oroku :"The current status of ATF2 IP-BSM(Shintake Monitor)" Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Toukai, Japan (2009)
- [16] Y.Yamaguchi :"Beam size measurement by Shintake monitor: Background separation using the Gamma ray detector" Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Toukai, Japan (2009)
- [17] G. Ichikawa *et al.*: "A CCD-based Pixel Detector with Micron Spatial Resolution for Ultra Cold Neutrons" IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record 2009, pp.1619-1622 (2009)

(学位論文)

- [18] 大川英希:「Commissioning of the ATLAS Calorimeters at the Large Hadron Collider and Prospects towards New Physics Search,」博士論文 (東京大学 大学院理学系研究科)、2010年2月
- [19] 市川豪:「重力場中における超冷中性子の量子状態の 測定器開発と製作」、修士論文(東京大学大学院理学 系研究科)、2010年3月

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [20] T. Yamanaka: "Status of the first commissioning of the Shintake Monitor for ATF2", 2009 Particle Accelerator Conference, Vancouver, Canada, May 2009
- [21] Y. Kamiya, T. Yamanaka, M. Oroku, Y. Yamaguchi, T. Suehara, S. Komamiya, Y. Honda, T. Kume, T. Okugi, T. Tauchi, and N. Terunuma: "Current Status of Shintake Monitor for ATF2", Joint ACFA Physics and Detector Workshop and GDE Meeting on International Linear Collider (TILC09), Tsukuba, Japan, Apr. 2009
- [22] T. Yamanaka: "Commissioning Status of Shintake Monitor (IP-BSM)", 8th ATF2 project meeting, KEK, Tsukuba, Japan, June 2009
- [23] H. Okawa (presented by the convenors): "Calorimeter Noise Measurement & Topocluster Performance", ATLAS Hadronic Calibration Workshop, Lisbon, Portugal, June 2009
- [24] H. Okawa (presented by the convenors): "Commissioning of Jet/Etmiss with Cosmic Data & Their Clean-up", ATLAS Hadronic Calibration Workshop, Lisbon, Portugal, June 2009

- [25] G. Ichikawa: "A CCD-based Pixel Detector with Micron Spatial Resolution for Ultra Cold Neutrons" 2009 IEEE Nuclear Science Symposium, Florida, USA, Oct. 2009
- [26] T. Yamanaka: "Status of IP-BSM", 9th ATF2 project meeting, KEK, Tsukuba, Japan, Dec. 2009
- [27] T. Yamanaka: "Shintake Monitor in ATF2 : Present Status" LCWS10 and ILC10, Beijing, China, Mar. 2010
- [28] Y.Yamaguchi: "Shintake Monitor in ATF2: Performance Evaluation" International Linear Collider Workshop 2010, Beijing, China, Mar. 2010

招待講演

- [29] S. Komamiya : "Panel Discussions", ILC Workshop, Albquerque, New Mexico, USA, Sep. 2009
- [30] Y. Kamiya: "Precision measurement of quantum states of neutrons in the terrestrial gravity", Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan, Hilton Waikoloa Village, Hawaii, USA, Oct. 2009

(国内会議)

一般講演

- [31] 川崎真介:「ILL/PF2 での重力実験」、中性子基礎物 理研究会 (2009 年 7 月)、KEK、茨城
- [32] M.Oroku: "The current status of ATF2 IP-BSM(Shintake Monitor)", 日本加速器学会 (2009 年 8 月), J-Parc, 茨城
- [33] Y.Yamaguchi: "Beam size measurement by Shintake monitor: Background separation using the Gamma ray detector", 日本加速器学会 (2009 年 8 月), J-Parc, 茨城
- [34] 市川豪:「重力場による超冷中性子の量子状態観測 -ILL/PF2 における実験結果 I」、日本物理学会 (2009 年9月)、甲南大学、兵庫
- [35] 川崎真介:「重力場による超冷中性子の量子状態観測
 -ILL/PF2 における実験結果 -」、日本物理学会
 (2009 年 9 月)、甲南大学、兵庫
- [36] 園田真也:「J/ψ → AA event を用いた Bell 不等式の 検証」、日本物理学会 (2009 年 9 月)、甲南大学、兵庫
- [37] 山中隆志:「新竹モニタによる ATF2 衝突点ビームサ イズ測定~現状と次期ビームタイムに向けての改善 ~」、日本物理学会(2009年9月)、甲南大学、兵庫
- [38] 市川豪:「重力場による超冷中性子の量子状態観測 実験の概要とセットアップ」、日本物理学会(2010年3月)、岡山大学、岡山
- [39] 大録誠広:「レーザー干渉縞を使った ATF2 衝突点 ビームサイズ測定:現状と今後の予定」、日本物理 学会(2010年3月)、岡山大学、岡山
- [40] 川崎真介:「重力場による超冷中性子の量子状態観測
 -ILL/PF2 ビームラインでの実験データ解析」、日本物理学会(2010年3月)、岡山大学、岡山

- [41] 園田真也:「J/ψ → ΛΛevent を用いた Bell 不等式の 検証、日本物理学会(2010年3月)、岡山大学、岡山
- [42] 山口洋平:「レーザー干渉縞を使った ATF2 衝突点 ビームサイズ測定: ビームテストによるサイズ測定 能の評価」、日本物理学会(2010 年 3 月)、岡山大 学、岡山

招待講演

- [43] 駒宮幸男:「素粒子物理の謎の扉を開く国際リニアコ ライダー」、先端加速器科学推進協議会(2009年4 月)、アルカディア市ヶ谷、東京
- [44] 駒宮幸男:「素粒子物理の謎の扉を開く国際リニアコ ライダー」、東北加速器基礎科学研究会(2009 年 4 月)、仙台
- [45] 駒宮幸男:「巨大加速器が解明する素粒子と宇宙の謎、 東京大学エキゼクティブ・マネージメント・プログラム(2010年1月)、東京大学、東京

2.3 蓑輪 研究室

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

2.3.1 原子炉ニュートリノモニター

比較的小型で移動が可能な反電子ニュートリノ検 出器を開発している。このニュートリノ検出器は原 子炉中での核分裂反応に伴って生じる反電子ニュー トリノを検出対象としており、原子炉近傍に設置し、 原子炉の熱出力あるいは核燃料の燃焼状況などをモ ニタリングすることを目的としている。

現在、世界中に 430 以上の発電用原子炉が点在しており、主に ²³⁵U の核分裂反応の連鎖によってエネルギーを得ている。この核分裂反応によって生じた娘核の多くは不安定核であり β 崩壊により崩壊するが、β 崩壊は反電子ニュートリノの放出を伴うため、結果として原子炉から大量の反電子ニュートリノが放出されることになる。この放出される反電子ニュートリノの量を測定することにより、原子炉の出力をモニターすることができると考えられる。また、²³⁵U の燃焼と²³⁹Pu の燃焼によるニュートリノのエネルギースペクトルが異なることを利用すれば、原子炉の燃料構成比を原子炉に干渉することなく測定できる。

この結果期待される応用の一つとして、IAEA(国 際原子力機関)による原子力活動の監視が挙げられ る。例えば、核兵器の原料となるプルトニウムが原子 炉中でどの程度生成されたかという情報は、核査察活 動における大きな関心事の一つである。現在、IAEA は原子炉内部に測定装置を設置し、原子炉に大きく 干渉する形でその量を測定しているが、ニュートリ ノ検出器を用いると、原子炉の外部から熱出力や燃 料構成比を見積り、そこからプルトニウム生成量を 見積もることができると考えられる。ニュートリノ は遮蔽が不可能であり、原子炉以外の代用ニュート リノ源を用意する事が困難であるため、破壊等のあ からさまな方法以外で監視活動を妨害できないとい う点も小型反電子ニュートリノ検出器が、原子力活 動の監視手法として有力視されている理由の一つで もある。

我々が開発している小型反電子ニュートリノ検出 器は、おおまかにはプラスチックシンチレータと、ガ ドリニウム含有塗料塗布済みフィルムにより構成さ れている。検出器に入射してきた反電子ニュートリ ノ($\bar{\nu}_e$)は、プラスチックシンチレータ中に含まれる 陽子(p)と逆 β 崩壊反応を起こし、陽電子(e^+)と中 性子(n)が生成される。陽電子はシンチレータにエ ネルギーを落としながら短距離を移動し、その後シ ンチレータ中の電子と対消滅して2本の γ 線を放出 する。一方中性子は、シンチレータ中を平均 60μ s程 度の時間をかけながら動き回り、徐々にそのエネル ギーを失っていく。この中性子は十分にエネルギーを 失った段階で、検出器を構成するガドリニウム(Gd) に吸収されて合計約 8MeV の γ 線を放出する。以上



図 2.3.14: 検出器のおおまかな構造

2つの(陽電子と中性子の)信号をシンチレータで捉 え、遅延同時計測法を用いてニュートリノ信号とし て検出する。

検出器は、図 2.3.14 に示すように、100 本の 10cm × 10cm × 100cm の大きさの棒状プラスチックシン チレータの間にガドリニウムを含有する膜を挟むと いう構造を計画している。その重さは約1トンと比 較的軽量であり、また有機液体シンチレータよりも 燃えにくいプラスチックシンチレータを用いるとい う特徴により、原子力発電所敷地内に持ち込むため の障害が少ないと考えられる。

通常、ニュートリノ検出器はニュートリノの反応 断面積の小ささから、かなり大型のものが作られる が、上述の様に原子力発電所敷地内に持ち込み、原 子炉炉心近傍(数十m)に設置することにより、小型 のニュートリノ検出器でも十分な量のニュートリノ が検出できると見積もっている。我々の計画してい る検出器では熱出力 3GWthの原子炉炉心から 20m の地点で、1日あたり約 510 イベントが検出できる と考えている。

平成21年度前半は検出器を構成するモジュール形 状及び使用する部材の検討を行った。具体的には2 本のプラスチックシンチレータをまとめることで光 電子増倍管の数を削減する形のモジュールの性能測 定を行った。また、ライトガイド、シリコーンゴム、 反射材などの光学部品の検討も行った。

年度後半については、予備実験用の試作器として プラスチックシンチレータ16本を用いた検出器(図 2.3.15)を作成し、実験室環境におけるバックグラウ ンド測定を行った。これにより、適当なイベントセ レクションをオフラインで適用することにより大型 の商業用原子炉の近傍で測定を行うと予備実験用の 試作機を用いて、原子炉のオンオフに伴うニュート リノの有無が測定できるという見積もりを立てた。



図 2.3.15: 小型反電子ニュートリノ検出器の試作器

2.3.2 Sumico, アクシオンヘリオスコー プ実験

強い相互作用の理論である量子色力学(QCD)に は実験事実に反して CP 対称性を破ってしまう問題、 強い CP 問題があることが知られている。アクシオン (axion)模型はこの問題を解決するものとして期待さ れているが、それには模型が予言する擬南部ゴール ドストンボソンであるアクシオンの発見が不可欠で ある。アクシオンは小さい質量を持った中性擬スカ ラーボソンであり、物質や電磁場とはほとんど相互 作用しないと考えられている。予想される質量範囲 はまだ広いが、もし 1 eV オーダーであれば太陽がよ いアクシオン源となることが知られている。

我々は太陽由来のアクシオンを捉えるために、高エ ネルギー加速器研究機構の山本明教授と共同で中心 磁場4T、長さ2.3mの超伝導コイルとPINフォト ダイオードX線検出器を備え、仰角±28°、方位角は ほぼ全域において天体を追尾することのできるアク シオンヘリオスコープ (Tokyo Axion Helioscope)を 開発した。Sumicoと名づけられたこの装置は、太陽 起源のアクシオンを磁場領域で光子へと変換(逆プリ マコフ変換)し、その光子をPINフォトダイオードで 捉えるものである。これまでの観測ではアクシオン 由来と考えられる有意な事象は捉えられていないが、 アクシオンの質量として $m_a < 0.27 \text{ eV}$ 、0.84 eV < $m_a < 1.00 \text{ eV}$ という範囲でアクシオンと光子の結 合定数に対して $g_{a\gamma\gamma} < 5.6$ -13.4 × 10⁻¹⁰ GeV⁻¹ という上限値を得ることに成功している(図 2.3.16)。

昨年はまず、前回の実験から不具合を起こしていた PIN フォトダイオードを交換し、質量1 eV 以上の太陽アクシオン探索を行うべく、超伝導磁石クエンチ時の安全対策を目的とした安全弁の配管改修を行った。その後装置の冷却を開始して測定準備を行っていたが、実験装置の一部である冷却水循環装置やGM 冷凍機の故障、また気柱振動の発生による熱流入の増加、ヘリウムガス管での温度差発生など、様々な問題に見舞われ測定準備は中断した。昨年度後半からこれらの解決におわれている。現在、上記の問題の殆どは解決済みであり、残りの問題であるヘリ

ウムガス管の温度差を解消すべく実験装置の一部の 再設計を行っている。今年中に実験を再開する予定 である。

なお、欧州原子核研究機構 (CERN) において同じ 仕組みで大規模な装置を用いた CAST(CERN Axion Solar Telescope) グループも 2002 年より探索実験 を始めており、我々の後にアクシオン模型が予想する 領域に到達している。その後も探索質量範囲を拡大 しているが、彼らの実験装置では 1.1 eV 以上の質量 を持つ太陽アクシオン探索は行われない。我々の実 験ではそれよりも大きい質量の太陽アクシオン探索 を計画しており、Sumico 実験の強みとなっている。



図 2.3.16: 太陽アクシオンに対する制限

2.3.3 太陽 Hidden photon 探索実験

Hidden Photon は素粒子物理学の諸問題を解決す るための標準模型の拡張において存在が予言されてい る粒子である。Hidden Photon は物質とは直接相互 作用しないが、真空領域の長さ (l)、Hidden Photon の質量 $(m_{\gamma'})$ 、Hidden Photon と光子の混合角 (χ) 、 エネルギー (ω) に依存したある確率で光子に転換さ れる性質を持つ。Hidden Photon は存在すればクー ロン力の逆二乗則、星の進化、初期宇宙モデル等に 対して修正が加えられることになるが、観測結果と 矛盾しないことを要請することにより χ-m_{γ'} plot に 対して制限がつけられてきた。また、光子が Hidden Photon に転換し、壁を通過した後光子に再転換され るイベントを探索する実験、CERNのCAST(CERN Axion Solar Telescope) グループによる太陽由来 のエネルギー keV 領域の Hidden Photon 探索実験 等により、 χ - $m_{\gamma'}$ plot に対して制限がつけられてき た (図 2.3.17 参照)。

Hidden Photon はまだ実験的に存在が確認されて おらず、我々は Hidden Photon を実験的に探索する こと、特に太陽で生成され地球に降り注ぐ Hidden Photon を地上で直接検出することを研究テーマの一 つとしている。 太陽アクシオン探索実験結果から Hidden Photon の性質につけられる limit の考察

我々はアクシオンヘリオスコープ(愛称:Sumico) を用いた太陽アクシオン探索実験を行ってきた。太 陽アクシオン探索と太陽 Hidden Photon 探索の原理 は、それぞれの粒子をまず光子に転換し、転換され た光子を光検出器で検出するというものである。こ こで、光子への転換の際にアクシオンの場合は磁場 が必要であるが、Hidden Photon は磁場が必要ない という違いがある。しかし、太陽アクシオン探索と 太陽 Hidden Photon 探索は基本的に実験手法が似て おり、今までのアクシオン探索実験データを Hidden Photon 向けに解析することにより Hidden Photon の性質に制限をつけることができると考えられる。

そこで、2007~2008 年に質量 1eV 近傍の太陽ア クシオン探索実験を行ったが、本実験データを用い ると Hidden Photon の性質にどのような制限がつけ られるか考察した。測定は有効質量 0.841~1.004eV の間でガス密度を少しずつ変化させて何度も行った が、全測定結果に共通の Hidden Photon シグナルイ ベントレートの上限値を決定し、地上で予想される Hidden Photon スペクトル、Sumico の形状、X 線 検出器の検出効率等各種データを合わせて考察する ことにより、質量 $m_{\gamma'}$ の関数として Hidden Photon と光子の混合角 χ に対してつけられる上限値を計算 した。

結果は図 2.3.17 の実線のとおりである。各線はさまざまな実験、理論的考察によりつけられた上限値を表す。図のとおり、質量 0.841~1.004eV においてもっとも厳しい制限をつけられたという結論が得られた。今回の解析は簡易的なものであり厳密な解析結果ではないが、今後、より高質量の太陽アクシオンの探索実験を行っていく際に既存の実験結果と合わせて Hidden Photon 向けのより厳密な解析を行っていく予定である。



図 2.3.17: Exclusion Plot の見積り結果 (実線)

数 eV のエネルギーの太陽 Hidden Photon の探索 実験の為の実験装置の開発と製作

太陽 Hidden Photon は keV 領域のエネルギーだ けでなく、eV 領域のエネルギーのものも大量に生 成され、地上に降り注いでいると考えられる。そこ で我々は、太陽由来のエネルギー数 eV の Hidden Photon の探索実験を新たに行うことを検討し、測 定のための準備を行ってきた。測定を行うには太陽 を追尾する必要があるが、その手法として Sumico に新たに開発する Hidden Photon 探索用装置を搭載 して測定することを考えている。Hidden Photon 探 索用装置は、Hidden Photon から光子への転換領域 となる真空容器 (直径 567mm、長さ 1200mm)、転 換光子を集光する放物面鏡 (焦点距離 1007mm、直 径 490mm)、集光された光を検出する光電子増倍管 (R3550P,Hamamatsu) 等の部品から成る。これらの 各構成要素の仕様は、実験結果の見積りを元に決定 した。そして実際に各部品の製作、組立てを行い実 験装置本体を製作した (図 2.3.18 参照)。今後、本実 験装置を Sumico に設置し、10⁶s 程度の太陽追尾測 定を行う予定である。本実験により Hidden Photon 質量 O(meV) において世界でもっとも感度の高い測 定結果を目指している。



図 2.3.18: Hidden Photon 探索実験装置の写真

2.3.4 暗黒物質探索検出器の開発

CaF₂(Eu) による暗黒物質探索検出器の開発

以前我々は、CaF₂(Eu) シンチレータを用いたニ ュートラリーノ探索実験を行った。このシンチレー タは、ニュートラリーノと相互作用する核子として ¹⁹Fを含んでおり、スピンに依存した (SD、spin dependent) 相互作用に大きな感度を持つ。我々が 2005 年に出した散乱断面積に対する制限は、当時世界最 高水準にあり、今後の性能向上の結果次第で、さら に高感度を狙える可能性を持っている。 現在研究しているのは、入射粒子の識別によるバッ クグラウンド除去である。ニュートラリーノ由来の シグナルの見えない現状では、バックグラウンドを 下げること以外に暗黒物質を発見することはできな い。我々は、2005年の実験のバックグラウンドは、 検出器内外からのγ線であると推測し、γ線による電 子反跳イベントと、ニュートラリーノなどによる原 子核反跳イベントを識別する方法を、模索している。

識別手法の一つとして、波形識別を試みた。波形 識別はシンチレーション光の減衰時定数を用いて識 別する方法であり、他のグループでも、さかんに行 われている手法である。CaF₂(Eu)の波形識別の研 究は1998年にすでに行われており、低エネルギー領 域(~30keVee)では、原子核反跳と電子反跳の差異 はほとんど無いとの結果が出ている。しかし、より 厳密に測定、統計的処理を行った結果、我々は原子 核反跳と電子反跳での減衰時定数の差異を発見した。 ただその差異は、暗黒物質探索に十分使えるほど大 きいものではなかった。

これらの識別手法を検証するためには、シンチレー タに γ 線と中性子線を別々に入射させて比較しなけ ればならない。しかし、通常の中性子線源は同時に γ 線も発生させているため、検証する識別方法以外の 方法でイベントセレクションを行う必要がある。我々 の研究室では、TOFを用いたイベントセレクション の方法を確立した。これにより、実験室レベルでの 実験で中性子によるシンチレーションの研究が可能 となった。

液体シンチレータによる暗黒物質探索検出時の開発

CaF₂(Eu) シンチレータと並行して、液体シンチ レータによる暗黒物質探索についても模索している。 液体シンチレータは、測定中の純化(放射性同位体 の除去)が可能であり、また大型化も容易に行えるた め、暗黒物質探索では非常に有利である。暗黒物質 を直接捉えるターゲットは、CaF₂(Eu)と同じくフッ 素原子核である。現在、フッ素原子核を含む発光量 の多い液体シンチレータを開発している。

通常、液体シンチレータは溶媒と溶質から出来て いる。シンチレータ内を走る荷電粒子により溶媒が 励起され、そのエネルギーが溶質に移行して、溶質 の脱励起で発光する。我々はフッ素を導入するため に、既存の液体シンチレータにフッ素化合物を導入 した。フッ素化合物は、有機溶媒に良く溶けるノベッ ク(住友スリーエム)を採用した。フッ素は、溶媒か ら溶質へのエネルギーの移行を阻害すると考えられ ており、混合比率が高くなると発光量が減る。その ため、暗黒物質探索のためには、最適なフッ素濃度 を調べる必要がある。

溶媒はトルエンとプソイドクメンの2種を試した。 この結果から、フッ素の質量混合比が5%程度でも 2p.e./keVeeの発光量が得られることがわかった。ま たこの液体シンチレータで、波形識別によって原子 核反跳と電子反跳が識別可能であることも確認した。

<報文>

(原著論文)

- Yoshihiro Iwata, Yoshizumi Inoue, Makoto Minowa: Trace Element Analysis of Potassium by Resonance Ionization Mass Spectrometry, Jpn. J. Appl. Phys. 48 (2009) 076505, RESCEU-56/08, arXiv:0808.4020v2 [physics.atom-ph]
- [2] R. Ohta, M. Minowa, Y. Inoue, Y. Akimoto, T. Mizumoto, A. Yamamoto: Prospects of Search for Solar Axions with Mass over 1 eV and Hidden Sector Photons, RESCEU-50/09, arXiv:0911.0738 [astro-ph.IM].
- [3] Makoto Minowa: Tokyo Axion Helioscope, arXiv:1004.1308v1 [astro-ph.IM].

(会議抄録)

- [4] Y. Inoue, Y. Akimoto, R. Ohta, T. Mizumoto, A. Yamamoto, M. Minowa: Tokyo axion helioscope experiment, Identification of dark matter 2008 (idm2008), Proceedings of Science, PoS(idm2008)067; RESCEU-27/10; arXiv:1002.0468 [astro-ph.IM].
- [5] M. Minowa, Y. Inoue, Y. Akimoto, R. Ohta, T. Mizumoto, A. Yamamoto: Tokyo axion helioscope, Proceedings of the 4th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs, Eds. Axel Lindner, Javier Redondo and Andreas Ringwald (Verlag Deutsches Elektronen-Synchrotron), pp. 39–42, RESCEU-53/08, arXiv:0809.0596v1 [astroph].
- [6] 小栗秀悟、清水雄輝、井上慶純、蓑輪眞:暗黒物質探索のためのフッ素入り液体シンチレータの研究、研究会「電離及びシンチレーション検出器の基礎物理と暗黒物質探索への応用」、主催・協賛希ガスキセノンの医工学への応用プロジェクト 早稲田大学理工学術院総合研究所理工学研究所.

(国内雑誌)

[7] 秋本祐希、蓑輪 眞: 太陽アクシオンの探索,日本物理 学会誌, Vol. 65, 2010 年1月号 25 – 29.

(学位論文)

- [8] 黒田康浩: 原子炉モニタリングを目的とした小型反 電子ニュートリノ検出器の開発、平成22年3月修士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [9] Ryosuke Ohta: Prospects of search for solar axions with mass over 1eV and hidden sector photons, 5th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs, University of Durham, England, 13–17 July 2009.

招待講演

[10] Makoto Minowa: Tokyo Axion Helioscope, Axions 2010, Gainesville, Florida January 14 – 17, 2010. (国内会議)

一般講演

- [11] 蓑輪 眞:暗黒物質の探索、多摩泌尿器科医会第 100回記念大会、京王プラザホテル、2009 年7月4日.
- [12] 井上慶純: アクシオンヘリオスコープ実験、RESCEU・ DENET 共催夏の研究会・サマースクール、「第9回 宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会・'Dark Energy in the Universe' サマースクール、沖縄県宜 野湾市 カルチャーリゾート・フェストーネ、2009 年 8月31日.
- [13] 太田良介: 質量 1eV 以上の太陽アクシオン探索、日本物理学会 2009 年秋季大会、甲南大学 2009 年 9 月 11 日.
- [14] 水本哲矢:太陽アクシオン探索実験結果を用いた Hidden Photon 探索の考察、日本物理学会 2009 年秋季 大会、甲南大学 2009 年 9 月 11 日.
- [15] 小栗秀悟: フッ素入り液体シンチレータによる素粒 子放射線検出器の開発、日本物理学会 2009 年秋季大 会、甲南大学 2009 年 9 月 11 日.
- [16] 黒田康浩:小型反電子ニュートリノ検出器のための予備実験用測定器について、日本物理学会 2009 年秋季 大会、甲南大学 2009 年 9 月 13 日.
- [17] 小栗秀悟:暗黒物質探索のためのフッ素入り液体シン チレータの研究、研究会「電離及びシンチレーション 検出器の基礎物理と暗黒物質探索への応用」、早稲田 大学 2009 年 9 月 18 日.
- [18] 小栗秀悟:小型反電子ニュートリノ検出器"PANDA"
 の開発、第16回素粒子物理国際センターシンポジウム、長野県白馬村2010年2月15日.
- [19] 水本哲矢: エネルギー数 eV の太陽 Hidden Photon 探索実験の現状報告、GCOE「未来を拓く物理科学 結集教育研究拠点」第3回 RA キャンプ、静岡県掛 川市ヤマハリゾートつま恋 2010 年2月 20 日.
- [20] 太田良介: 質量 1eV 以上の太陽アクシオン探索、日本物理学会第 65 回年次大会、岡山大学 2010 年 3 月 23 日.
- [21] 水本哲矢: エネルギー数 eV の太陽 Hidden Photonの探索実験、日本物理学会第 65 回年次大会、岡山大学 2010 年 3 月 23 日.
- [22] 小栗秀悟:小型反電子ニュートリノ検出器(PANDA) のための予備実験(1)、日本物理学会第65回年次大 会、岡山大学2010年3月20日.
- [23] 黒田康浩:小型反電子ニュートリノ検出器(PANDA)のための予備実験(2)、日本物理学会第65回年次大会、岡山大学2010年3月20日.

2.4 相原・横山研究室

当研究室では、高エネルギー加速器研究機構(KEK) のBファクトリー加速器を使った実験(Belle 実験) 茨城県東海村に新しく建設された J-PARC 加速器を 使った長基線ニュートリノ振動実験(T2K 実験)、 米国フェルミ国立加速器研究所でのニュートリノ-原 子核反応測定実験 (SciBooNE 実験)、新型光検出 器(HPD・MPPC)の開発、さらに、国立天文台す ばる望遠鏡に搭載する超広視野 CCD カメラ (Hyper Suprime-Cam) によるダークエネルギーの研究、 などを行っている。本年度は、当研究室で博士の学 位を取得した中浜優氏(現パリ第11大学LALオル セー研究所博士研究員)が、博士論文「Measurement of *CP*-violating asymmetries in the flavor-changing neutral current decays of the *B*-boson」により第11 回(2009年度)高エネルギー物理学奨励賞および第 4回(2010年)日本物理学会若手奨励賞を受賞した。 また、横山将志准教授が 2009 年 11 月 1 日付で着任 した。

2.4.1 B中間子のフレーバー変換中性カレント崩壊の精密測定

小林・益川理論がクォークに働く弱い相互作用の CP 非対称の起源であることが明らかになった今、B ファクトリーにおける研究の主題は、CP 非対称現 象をプローブとする新しい物理、すなわち小林・益川 理論を含む素粒子の標準理論の枠組みに収まらない、 より根源的な物理の探索に移りつつある。当研究室 は、この新しい物理の探索を、B中間子崩壊のうち、 Flavor Changing Neutral Currents (FCNCs) によっ て引き起こされる崩壊の精密測定によって行ってい る。ここで、FCNCs とは、 $b \to s\gamma$ 、 $b \to s\ell^+\ell^-(\ell)$ は e または μ)、 $b \rightarrow d\gamma$ などの素過程で表される、 クォークの種類 (flavor, フレーバー) が b から s ある いは d に変換する中性カレント反応(反応の始状態 の電荷と、終状態の粒子の電荷の総和が等しく、電 荷のネットな流れがない反応)、すなわち、フレー バー変換中性カレントの総称である。

当研究室ではbクォークがsクォークを含む終状態 へ崩壊する過程である $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ 過程($\ell = e, \mu$)の 解析を行った。約6億5千7百万の $B \cdot \overline{B}$ 中間子対を用 いて $B \rightarrow X_s\ell^+\ell^-$ 反応(X_s はsクォークを含むハド ロン)の包括的な測定を行い、 $B \rightarrow X_se^+e^-$ について 123.6±19.5±2.0事象(有意度 7.0 σ)、 $B \rightarrow X_s\mu^+\mu^-$ について118.3±17.3±1.5事象(7.9 σ)の信号事象を 選別し、またこの二つのモードを合わせて解析するこ とで 237.8±26.4±2.5事象(10.0 σ)の $B \rightarrow X_s\ell^+\ell^-$ 崩壊候補を得た(図 2.4.19)。

またこれらの崩壊の分岐比を $M_{\ell^+\ell^-} > 0.2 \text{ GeV}/c^2$ に対し求め、 $Br(B \to X_s e^+ e^-) = [4.59 \pm 1.15 (統計$ $誤差)^{+0.56}_{-0.51} (系統誤差)] \times 10^{-6}$ 、 $Br(B \to X_s \mu^+ \mu^-) =$ $[1.91\pm 1.02 (統計誤差)^{+0.15}_{-0.14} (系統誤差)] \times 10^{-6}$ 、 $Br(B \to X_s \ell^+ \ell^-) = [3.22\pm 0.79 (統計誤差)^{+0.28}_{-0.25} (系統誤差)] \times 10^{-6}$ を得た。この結果は世界最高精度の測定であり、 得られた分岐比は標準理論と矛盾しない。現在、この結果をもとに投稿論文を準備中である。



図 2.4.19: $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$ 信号候補事象の不変質量 分布

2.4.2 Super-KEKB 計画のための衝突点 近傍デザイン

Belle 実験のアップグレード計画として、Super-KEKB 実験計画が推進されている。Super-KEKB で は、これまでのルミノシティーをさらに 40 倍増加さ せて、大量統計による超高精密実験を目指している。 ここで、ルミノシティーを増加させるために、Super-KEKB では衝突点のビームサイズを現行の 1/20 倍 とし、またビーム電流値を現行の 2 倍増加させるこ とを計画している。

このアップグレード計画のような高ルミノシティー 実験下における、安定した測定器動作を保証するた めには、衝突点近傍のデザインが重要である。我々 の研究室では、衝突点近傍デザインのために、以下 の研究を行っている。

加速器からのバックグランドを理解し、抑制するた めに、GEANT4によるビームラインシミュレーショ ンを構築し、Super-KEKB実験における加速器から のバックグランド研究を行っている。シンクロトロ ン(SR)光放射によるバックグランドの影響を見積 もり、SR光の影響から測定器を保護できるように、 ビームパイプの形状を最適化した。現在、他のバッ クグランド源(ビーム・ガス散乱、radiative-BhaBha 散乱、ビームバンチ内散乱)について、シミュレー ションを構築中である。特に、ビームバンチ内散乱 は現行よりも 20 倍高くなることが予想されるので、 シミュレーションを行い、高バックグランドに耐え うる衝突点近傍のデザインが重要である。

Super-KEKB では、衝突点でのビームサイズを小 さく絞り込むために、最終Q磁石の位置を衝突点近 傍へ近づけ、さらに磁石の磁場の強さも、これまで以 上に強くする必要がある。従って、加速器コンポーネ ントが測定器領域と近接するため、衝突点近傍にあ るビームパイプ、崩壊点検出器と加速器コンポーネ ントとの組み立て・サポート方法を新たに開発する必 要がある。また、最終磁石の磁場が非常に強いため、 磁石が生成する電磁力による磁石コンポーネントの 反跳の影響を測定器とその構造体で抑え込み、磁石 のアライメントを保証し、ビームを衝突点まで正確 に輸送させることが重要になる。崩壊点検出器と加 速器コンポーネントの組み立て方法として、チェー ンクランプを用いた接続方法の開発を行っている。 これらのデザインの検討を行ない、今後試験を行う 予定である。また、衝突点領域のスペースが限られ ているため、ビームパイプ形状の開発も重要である。 ビームパイプの冷却方法を新たに開発し、省スペー スなビームパイプのデザインを開発中である。今年 度から来年度にかけて、ビームパイプ冷却部の試作 を行い、冷却試験を行う予定である。

2.4.3 T2K 長基線ニュートリノ振動実験

次世代の長基線ニュートリノ振動実験である T2K 実験では、茨城県東海村に新たに建設した J-PARC (大強度陽子加速器)実験施設で大強度のミューオン ニュートリノビームを生成し、岐阜県飛騨市の大型水 チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデでニュー トリノ事象を観測することで、ミューニュートリノ 消滅現象の精密測定及び電子ニュートリノの発現現 象の発見を狙う。本研究室では、2007 年度より本格 的にニュートリノビームライン機器、特に一次陽子 ビームラインの陽子ビームモニター、の製作及び設 置を行ってきた。また、横山准教授は 2004 年から ニュートリノビームライン最下流のミューオンモニ ターおよび前置ニュートリノ検出器群の開発を主導 してきた。

2009 年度初頭には、ニュートリノビームラインの 全ての機器の設置が終わり、4月よりビームラインの コミッショニングを開始した。秋からは前置ニュー トリノ検出器群も稼働を開始し、ビーム強度を徐々 に上げながらコミッショニングを続け、2009 年度内 に前置検出器およびスーパーカミオカンデの両方で ニュートリノ事象の検出に成功して、本格的なデー タ収集を開始した。

当研究室では、大強度のニュートリノビームを生 成・制御するための要である、陽子ビームモニター の開発・製作を中心的に行ってきた。特に、セグメン ト化した厚さ 5 μ m のチタン箔を配置し、ビームの 通過によって放出される二次電子量のセグメント間 の違いを測定することによってビームの拡がりを再 構成する Segmented Secondary Emission Monitor (SSEM: 図 2.4.20)、およびビームダクトの内側に4 枚の電極板を配置し、ビーム通過時に4つそれぞれ の電極に誘起される電荷量の違いからビーム中心位 置を見積もる4極静電型モニター(ESM)の2種類 を開発した。

生成されたニュートリノビームの状態をモニターす るために、標的より約110m離れたところにはミュー オンモニターが、約280mのところには前置ニュー トリノ検出器群がそれぞれ設置されている。ミュー オンモニター(図2.4.21)は、パイ中間子の崩壊から ニュートリノと対になって生成されるミューオンの分



図 2.4.20: T2K 実験 超電導ビームライン部に用いる SSEM



図 2.4.21: T2K 実験ミューオンモニターの架台内部 (シリコンダイオードの取付作業中)

布を測定することで、標的で生成された二次ビームの 方向、広がり、強度などをリアルタイムに監視できる 唯一の装置である。ビームが通過する瞬間には、10⁸ 個/cm² という大量の粒子にさらされるため、放射線 に強く、メンテナンスなしで長時間稼働することが 必要となる。動作原理の単純なシリコンダイオード と平行平板型イオンチェンバーをそれぞれ7×7の格 子状に並べることで、堅牢かつ冗長性のある測定が 可能な装置を設計し、放射線耐性の高い材料の選定、 プロトタイプによる基礎特性や長期安定性の評価な どを行った後、2008年度に実機を製作・設置した。

前置ニュートリノ検出器群は、大きく二つの検出 器に分けられる。一つは,鉄とプラスチックシンチ レータのサンドイッチ構造をした 1.2×1.2×1.2 m³ の検出器モジュールを縦横に7つずつ並べ、ビーム の中心から±5m程度の面積をカバーする INGRID 検出器(図 2.4.22)である。INGRID 検出器では各 モジュールでのニュートリノ反応事象数を数えるこ ニュートリノビームの空間分布、方向、強度 とで、こ をモニターする。もう一つはオフアクシス検出器と ニュートリノ振動を起こす前、生成直後の 呼ばれ、 ニュートリノビームの強度、エネルギー分布、種類や 反応の様子を詳しく測定することを目的とする。こ の検出器は元々W・Zボソンを発見した UA1 実験の ために制作され、CERN から T2K 実験のために寄 贈・移設された大型電磁石の内側に様々な目的を持っ



図 2.4.22: INGRID 検出器 (水平方向モジュール)



図 2.4.23: T2K 用 MPPC[®]

たサブ検出器を組み合わせて設置したもので、さな がら衝突型加速器実験の検出器のような複雑さであ る。これらの検出器には、我々が共同開発した浜松ホ トニクス社製の新型光検出器、Multi-Pixel Photon Counter (MPPC[®]、図 2.4.23)が合計 6 万個以上使 われている。INGIRD 検出器は、2009 年 3 月に最初 の1モジュールを、夏のシャットダウン中に残りの 13 モジュールをインストールし秋からは完全な状態 で稼働した。オフアクシス検出器は、2009 年 10 月 と12 月に検出器本体のインストールを行い、調整の 後 2010 年 1 月末には電磁石を閉めフルに運転可能な 状態となった。

5年に渡った実験施設の建設が終わり、2009年4月 23日にはいよいよJ-PARCメインリングよりニュー トリノビームラインへ初めてビームが取り出され、 ビームラインのコミッショングが開始された。コミッ ショニング当初から、上記ビームプロファイルモニ ターSSEM 及びビーム位置モニター ESM を用いて ビームプロファイル及びビーム中心位置を観測する ことに成功した(図 2.4.24 および図 2.4.25)。これら のビームモニター情報を用いてビーム軌道の調整が 行われ、4月27日にターゲット中心へのビーム軌道 調整が完了した。4月25日には電磁ホーンの励磁を 開始し、ミューオンモニターによってミューオンプ ロファイルおよびその電磁ホーンによる収束を確認 し(図 2.4.26)、これによりニュートリノビームが期 待通り生成されていることを確認した。

その後、ビームラインのコミッショニングは加速



図 2.4.24: 19 台の SSEM で測定されたビームプロ ファイル



図 2.4.25: 21 台の ESM で測定されたビーム中心位 置の理想軌道からのずれ

器本体のコミッショニングと歩調を合わせながら、 徐々にビーム強度を上げつつ断続的に行われた。こ の中で、SSEM で得られるビーム中心位置のショッ ト毎の測定値のばらつきは約10 µm 程度でビーム自 身のばらつきに比べて十分小さく、取り出しビーム の安定性や電磁石の安定性を精度よく測定すること ができることがわかった。また、SSEM によるビー ム幅の測定から、ビームエミッタンス、ビーム取り 出し位置での光学パラメータおよびターゲット位置 でのビームサイズの見積りなどを行うことが可能で あり、これらの情報は加速器グループへのフィード バックや、T2K 実験におけるニュートリノ生成数の スタディにも役立てられている。また ESM につい ても、これまでに 0.3–0.5 mm の位置分解能を達成 している。

ミューオンモニターはビーム調整時に方向を制御 するための指標として、また実験中に生成されたビー ムの強度や方向の安定性を常時モニターするための 装置として使われているほか、わざと陽子ビームを ずらして標的に当てた時のミューオンプロファイル のずれから標的や電磁ホーンのアラインメントの情 報を得るなど、陽子ビームモニターとの組み合わせ によりビームライン由来の系統誤差を抑えるために 重要な役割を果たしている。

2009年11月22日には、INGRID検出器でT2K実 験初のニュートリノ反応事象候補を検出した(図2.4.27)。 続いて12月19日にはオフアクシス前置検出器で



図 2.4.26: ミューオンモニターで観測したビームの プロファイル(電磁ホーンの電流値設定3種類)



図 2.4.27: INGRID 検出器で観測された T2K 実験初 のニュートリノ反応事象

(図 2.4.28)、そして 2010 年 2月 24 日にはスーパー カミオカンデでニュートリノ反応事象の検出に成功 した(図 2.4.29)。こうして実験全体のコミッショニ ングをほぼ終え、2010 年初頭からは物理ランとして ニュートリノ振動の詳細研究に向けたデータを収集 しつつある。本研究室では、実験初期のデータから ビームラインやニュートリノ検出器が設計通りの性 能をもっていることを確認するためのデータ解析を 主導するとともに、今後のニュートリノ振動の本格 的な研究に向けた準備を進めつつある。

2.4.4 ニュートリノ-原子核反応断面積の 測定

長基線ニュートリノ振動実験では、ニュートリノを 検出装置内の物質と反応させ生成された粒子を観測 することでニュートリノの研究を行うため、ニュート リノと原子核の間の反応断面積の理解が重要となる。 しかし、断面積自身が非常に小さいこと、入射ニュー トリノのフラックスやエネルギー分布の正確な見積 もりが難しいこと、様々な反応モードが混じって存在 するエネルギー領域であること、標的原子核中での終 状態八ドロンの二次散乱の効果が大きいこと、などの 理由により、現在のニュートリノ振動実験で最も重要



図 2.4.28: オフアクシス前置ニュートリノ検出器で 観測されたニュートリノ反応事象



図 2.4.29: スーパーカミオカンデ検出器で観測され た最初の T2K ビームニュートリノ事象

な領域であるニュートリノエネルギー 1GeV 付近の 断面積の測定精度は十分でない。この状況を改善する ために、米国フェルミ国立加速器研究所でのニュート リノ-原子核反応断面積実験 SciBooNE(FNAL-E954) を提案し、T2K 実験の前身である K2K 実験のために 制作した重量約 20 トンの SciBar 検出器を高エネル ギー加速器研究機構からフェルミ研究所のブースター ニュートリノビームラインへと移設して、2007-2008 年の約1年間データ収集を行った。

本年度はニュートリノによる中性カレント $(NC)\pi^0$ 生成反応の断面積測定を行った。この反応は、 π^0 か らの 2 本の γ のうち 1 つを見失うとスーパーカミ オカンデのような検出器では電子ニュートリノの反 応と区別がつかなくなるために、T2K 実験での電子 ニュートリノ出現探索における背景事象の最大の原 因の一つであると考えられている。シンチレータ検出 器中で γ がコンバートした事象を選ぶアルゴリズム を最適化した結果、657事象を信号候補として選んだ (図 2.4.30)。 このうち、 シミュレーションから予想さ れる背景事象は240であった。入射ニュートリノフラ ックスの絶対値の見積もりの不定性の影響を避けるた め、荷電カレント (CC) 反応断面積との比を取った結 \mathbb{R} , $\sigma(NC\pi^0)/\sigma(CC) = (7.7 \pm 0.5(\text{stat.})^{+0.5}_{-0.4}(\text{sys.})) \times$ 10^{-2} を得た。生成された π^0 の角度分布や運動量分 布を含め、T2K でも使用しているニュートリノ反応



図 2.4.30: SciBooNE 実験で観測された、ニュートリ ノ反応による中性カレント π⁰ 生成候補事象の 2γ 不 変質量分布

モデルおよび終状態のハドロン二次反応を含めたシ ミュレーションプログラムがデータをよく再現する ことを確認した。

この他、反ニュートリノ-原子核反応の測定や、Mini-BooNE 実験と共同での短基線ニュートリノ振動現象 の探索などの研究も現在進めており、近日中に結果 を公表する予定である。

2.4.5 次世代水チェレンコフ検出器のため のハイブリッド光検出器開発

当研究室は、新型光検出器である大口径 Hybrid Photo Detector (HPD) を開発している。大口径 HPD は、従来の光電子増倍管 (PMT)より、優れた時間 分解能を持ち、かつ安価に製作できる可能性を持つ。 このため、大口径 HPD は、日本、アメリカ、ヨー ロッパなどでさかんに検討されている次世代メガト ン級水チェレンコフ検出器用において、現在使用さ れている PMT に代わるデバイスとして期待されて いる。当研究室は、浜松ホトニクス、東大宇宙線研、 KEK 素核研システムエレクトロニクスグループと 共同で 13 インチ HPD の試作に成功し、PMT より 優れた基本性能を確認した。本年度からは HPD の 商業化を目指した開発に移行し、13インチより需 要が見込める大きさの8インチで、電源ケーブルと ネットワークケーブルを接続するだけで信号がデジ タルデータで取得できるデジタル HPD の開発を行っ ている。以下に HPD の動作原理の説明、8インチ HPD とデジタル HPD の開発状況について述べる。

HPD は光電面とアバランシェダイオード (AD) から成り、光電面から出た光電子を電場で加速し、 AD に打ち込み増幅する。光電面と AD の間に、10 ~20keV の高印加電圧をかけることにより、AD 内に 光電子あたり数千の二次電子が生成される。さらに、 個々の二次電子は、AD のアバランシェ増幅により 数十倍の電子に増幅される。この二段の増幅機構に より、最終的に約 $O(10^5)$ の増幅が得られ、一光電子 が検出可能となる。その結果、HPDには、i)第一段 の電子増倍過程における増幅率が大きく、かつ増幅 率のばらつきが小さいため、波高分解能が PMT に 比べてよくなる、ii)電子増幅過程に PMT のような ダイノードを含んでいないため、電子走行時間のば らつきが存在せず、優れた時間分解能が達成できる、 iii)部品数が PMT の1/10ですみ安価である、など の特長がある。われわれは、13 インチ HPD の試作 器を 20kVの印加電圧で動作させることにより、1 光電子で 24%のエネルギー分解能、全照射で 190ps の時間分解能を測定し、HPD の PMT に対する優位 性を確認した。表 2.4.1 に、HPD と PMT の性能評 価の結果をまとめる。

表 2.4.1: HPD と PMT の性能比較表: どちらも口径 は 13 インチ

Parameters	HPD	通常 PMT
電子増幅	$O(10^{5})$	$O(10^{7})$
時間分解能 @1p.e.	$190 \mathrm{ps}$	$1400 \mathrm{ps}$
波高分解能 @1p.e.	24%	70%
立ち上がり時間	$1 \mathrm{ns}$	6 ns
パルス幅	$2.2 \mathrm{ns}$	10ns
ダイナミックレンジ	3000 p.e.	2000 p.e.
(p.e.= 光電子)		

このように HPD は PMT に比べて優れた性能を 持っているが、商品化を目指すに当たり口径のサイ ズを13インチから8インチに変更した。これは、次 世代メガトン級水チェレンコフ検出器より早期に実 現することが期待される、水チェレンコフ検出器や 液体シンチレーター検出器を用いた実験では、光検 出器の口径が8インチ程度になることが予想されて いるからである。8インチロ径の HPD では、低価格 化を実現するために今までの金属フランジを用いた 構造から、オールガラス製の構造に変更した。オー ルガラス製の8インチ HPD 試作機を図 2.4.31 に示 す。今回の変更により、基礎部品点数を10点から 6 点へ減らすことに成功した。(ちなみに PMT の基 礎部品点数は、200点以上ある)この試作機を用 いて動作確認を行い、きれいな単一光子信号のノイ ズからの波高分離、200psの時間分解能を確認した。

HPD の使用性を向上するために、電源ケーブル (~5V)とネットワークケーブルを接続するだけで、デ ジタル信号データが簡単に取得できるデジタル HPD の開発を進めている。デジタル HPD では、5V の電 源から 12kV まで印加できる高電圧電源や読み出し 回路を、8インチ HPD の端部に接続しなくてはな らない。昨年度までに開発した小型高圧電源から更 に小型化を行った高圧電源回路の開発を行った。開 発された小型高圧電源と8インチ HPD の接続試験 を行い、HPD からの信号をオシロスコープにより確 認した。我々が開発を行っている HPD 用の読み出 し回路は、PMT に比べて約 1/100 という低い電子 増幅をカバーするために、最新のデジタル信号処理 技術をもちいた、低ノイズプリアンプ、低消費電力 高速サンプリング、デジタル信号処理、更にイーサ ネット出力という高機能のものである。これだけの 機能を持った読み出し回路を8インチ HPD 端部に 搭載するための小型化をすすめた。この開発に成功 し、図 2.4.32 に示すように、8インチロ径のデジタ ル HPD の雛形となる試作機の開発に成功した。



図 2.4.31: オールガラス製8インチ HPD 試作機



図 2.4.32: 8 インチデジタル HPD 試作機

2.4.6 観測宇宙論によるダークエネルギー
 の研究

WMAP による宇宙背景輻射の観測などによって、 物質階層であるバリオンは宇宙の全エネルギーのわ ずか4%を占めるに過ぎず、実に73%のエネルギー が現在の理論では説明のつかないダークエネルギー と呼ばれる真空のエネルギーで占めらることが明ら かになった。このダークエネルギーの正体は全く不 明であり、21世紀の物理学に突きつけられた超難問 である。本研究室では、このダークエネルギーの正 体の解明をめざして、超広視野深宇宙撮像探査実験 計画を推進している。

この計画で、当研究室は、国立天文台と共同で、す ばる望遠鏡の主焦点に、広視野 1.77 平方度 1.2 ギガ ピクセルの CCD カメラ (Hyper Suprime-Cam)を製 作している。この新装置を用いて、最低 1000 平方度 の広域探査を行い、探査天域に含まれる 1.5 億個程度 の銀河の形状解析から、弱い重カレンズ効果による 系統的形状歪みを検出し、遠方銀河と我々の間に介 在する(ダークマターを含めた)全質量の分布を求 め、宇宙の3D質量分布図を作成する。さらに、宇 宙大規模構造の形成と進化、銀河の個数分布と形状 進化などの観測的宇宙論の研究を進めることによっ て、ダークエネルギーの正体に迫る。

宇宙論的弱重力レンズ効果を測定する際には、測 定の系統誤差を押さえ込む必要がある。この系統誤 差の要因は CCD のピクセルの特性やノイズ、大気 揺らぎ、測定機器の位置決め誤差などにより発生す る、重力レンズ効果以外の2次的ノイズ(像の広が り、歪み)である。この2次的ノイズ(像の広が り、歪み)である。この2次的ノイズを直交基底で 展開することにより、従来よりも数学的により精密 に定量化することを試みた。そして、この星の測定 を行うアルゴリズムと、星の測定結果を用いて銀河 像の2次的ノイズを補正するアルゴリズムを計算機 上に実装した。そして、銀河像に弱重力レンズ効果 と2次的ノイズを付加したシミュレーションデータ を作成し、これに新しく開発した解析手法を適用し て得られたシグナルと真の値を比較することにより、 測定精度・計算速度などの測定手法の改善を行った。

また、1ショットあたり、2ギガバイトにのぼる大量のイメージングデータを解析するためのプログラム(pipeline と呼ばれる)を高エネルギー実験 Belle II で使われるソフトウェアを応用して開発している。さらに、本研究室が開発した CCD カメラ用の後段読み出し回路(図 2.4.33)を前段回路と接続し、性能試験を行った。

2.4.7 国際リニアコライダー用検出器の開 発

世界では超高エネルギー(500GeV以上)の電子・ 陽電子リニアコライダー(International Linear Collider)を用いた実験将来計画のための研究開発が行わ れている。当研究室では、シリコン技術を駆使した検 出器 Silicon Detector (SiD)(図 2.4.34)を SLAC、 Fermilab、 ANL などと共同で提案している。これ までの検討にもとづいて、Letter of Intent を提出 した。

<受賞>

 [1] 中浜優:第11回(2009年度)高エネルギー物理学奨 励賞、日本高エネルギー物理学研究者会議。



図 2.4.33: Hyper Suprime Cam CCD 読み出し用後 段回路



図 2.4.34: リニアコライダー用検出器 SiD

[2] 中浜優:第4回(2010年)日本物理学会若手奨励賞、日本物理学会。

<報文>

(原著論文)

- [3] S. Uehara *et al.* [Belle Collaboration], "Highstatistics study of neutral-pion pair production in two-photon collisions," Phys. Rev. D **79**, 052009 (2009) [arXiv:0903.3697 [hep-ex]].
- [4] J. Dalseno *et al.* [Belle Collaboration], "Timedependent Dalitz Plot Measurement of CP Parameters in $B^0 \to K_S \pi^+ \pi^-$ Decays," Phys. Rev. D **79**, 072004 (2009) [arXiv:0811.3665 [hep-ex]].
- [5] P. Pakhlov *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the $e^+e^- \rightarrow J/\psi c\bar{c}$ cross section at $\sqrt{s} \sim 10.6$ GeV," Phys. Rev. D **79**, 071101 (2009) [arXiv:0901.2775 [hep-ex]].

- [6] C. Liu *et al.* [Belle Collaboration], "Search for the X(1812) in $B^{\pm} \rightarrow K^{\pm} \omega \phi$," Phys. Rev. D **79**, 071102 (2009) [arXiv:0902.4757 [hep-ex]].
- [7] J. Wiechczynski *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of $B \rightarrow D_s^{(*)} K \pi$ branching fractions," Phys. Rev. D **80**, 052005 (2009) [arXiv:0903.4956 [hep-ex]].
- [8] B. R. Ko *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of the Doubly Cabibbo-Suppressed Decay $D_s^+ \rightarrow K^+ K^+ \pi^-$," Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 221802 [arXiv:0903.5126 [hep-ex]].
- [9] J. T. Wei *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the Differential Branching Fraction and Forward-Backword Asymmetry for $B \rightarrow K^{(*)}\ell^+\ell^-$," Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 171801 [arXiv:0904.0770 [hep-ex]].
- [10] S. H. Kyeong *et al.* [Belle Collaboration], "Measurements of Charmless Hadronic $b \to s$ Penguin Decays in the $\pi^+\pi^-K^+\pi^-$ Final State and Observation of $B^0 \to \rho^0 K^+\pi^-$," Phys. Rev. D **80**, 051103 (2009) [arXiv:0905.0763 [hep-ex]].
- [11] R. Mizuk *et al.* [Belle Collaboration], "Dalitz analysis of $B \rightarrow K\pi\psi'$ decays and the $Z(4430)^+$," Phys. Rev. D **80**, 031104 (2009) [arXiv:0905.2869 [hep-ex]].
- [12] A. Zupanc *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of y_{CP} in D^0 meson decays to the $K_S^0 K^+ K^$ final state," Phys. Rev. D **80**, 052006 (2009) [arXiv:0905.4185 [hep-ex]].
- [13] S. Uehara *et al.* [Belle Collaboration], "Highstatistics study of $\eta\pi^0$ production in two-photon collisions," Phys. Rev. D **80**, 032001 (2009) [arXiv:0906.1464 [hep-ex]].
- [14] K. Belous *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of cross sections of exclusive $e^+e^- \rightarrow VP$ processes at $\sqrt{s} = 10.58$ GeV," Phys. Lett. B **681**, 400 (2009) [arXiv:0906.4214 [hep-ex]].
- [15] P. Urquijo *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement Of $|V_{ub}|$ From Inclusive Charmless Semileptonic B Decays," Phys. Rev. Lett. **104**, 021801 (2010) [arXiv:0907.0379 [hep-ex]].
- [16] A. Limosani *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of Inclusive Radiative B-meson Decays with a Photon Energy Threshold of 1.7 GeV," Phys. Rev. Lett. **103**, 241801 (2009) [arXiv:0907.1384 [hepex]].
- [17] G. Pakhlova *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the $e^+e^- \rightarrow D^0D^{*-}\pi^+$ cross section using initial-state radiation," Phys. Rev. D **80**, 091101 (2009) [arXiv:0908.0231 [hep-ex]].
- [18] C. P. Shen *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of the $\phi(1680)$ and the Y(2175) in $e^+e^- \rightarrow \phi \pi^+\pi^-$," Phys. Rev. D **80**, 031101 (2009) [arXiv:0808.0006 [hep-ex]].

- [19] Y. Miyazaki *et al.* [Belle Collaboration], "Search for Lepton Flavor and Lepton Number Violating tau Decays into a Lepton and Two Charged Mesons," Phys. Lett. B **682**, 355 (2010) [arXiv:0908.3156 [hep-ex]].
- [20] E. Won *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of $D^+ \to K_S^0 K^+$ and $D_s^+ \to K_S^0 \pi^+$," Phys. Rev. D 80, 111101 (2009) [arXiv:0910.3052 [hep-ex]].
- [21] P. Chen *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of $B^+ \rightarrow p\bar{\Lambda}\pi^+\pi^-$ at Belle," Phys. Rev. D **80**, 111103 (2009) [arXiv:0910.5817 [hep-ex]].
- [22] C. P. Shen *et al.* [Belle Collaboration], "Evidence for a new resonance and search for the Y(4140) in $\gamma\gamma \rightarrow \phi J/\psi$," Phys. Rev. Lett. **104**, 112004 (2010) [arXiv:0912.2383 [hep-ex]].
- [23] N. J. Joshi *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the branching fractions for $B^0 \to D_s^{*+}\pi^$ and $B^0 \to D_s^{*-}K^+$ decays," Phys. Rev. D 81, 031101 (2010).
- [24] T. Aushev *et al.*, "Study of the $B \to X(3872)(\to D^{*0}\overline{D}^0)K$ decay," Phys. Rev. D **81**, 031103 (2010).
- [25] K. Hayasaka, K. Inami and Y. Miyazaki, "Search for Lepton Flavor Violating τ Decays into Three Leptons with 719 Million Produced $\tau^+\tau^-$ Pairs," Phys. Lett. B **687**, 139 (2010) [arXiv:1001.3221 [hep-ex]].
- [26] S. Uehara *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of a charmonium-like enhancement in the $\gamma\gamma \rightarrow \omega J/\psi$ process," Phys. Rev. Lett. **104**, 092001 (2010) [arXiv:0912.4451 [hep-ex]].
- [27] Y. Kurimoto *et al.* [SciBooNE Collaboration], "Measurement of inclusive neutral current π^0 production on carbon in a few-GeV neutrino beam," Phys. Rev. D **81**, 033004 (2010) [arXiv:0910.5768 [hep-ex]].

(会議抄録)

- [28] T. Abe, H. Aihara, M. Iwasaki, M. Tanaka, Y. Kawai, H. Kyushima, M. Suyama, and M. Shiozawa, "R&D status of HAPD," Proceedings of 2009 International Workshop on New Photon Detectors (PD09), PoS(PS09)014.
- [29] T. Abe *et al.*, "Development of Large-Aperture Hybrid Avalanche Photo-Detector," 2009 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record.
- [30] M. Iwasaki *et al.*, "IP Beam Size Measurement During Collisions at Super-KEKB," *ibid*.

(学位論文)

- [31] 中山浩幸:博士論文: "Precision Measurement of the Electroweak Flavor-Changing Neutral Current Decays of B Mesons" (2010年3月)
- [32] 峯尾聡吾:修士論文: "Research and Development of an Analysis Framework for Hyper Suprime-Cam" (2010年3月)

[33] 藤森裕輝:修士論文: "Research and Development of Backend Readout Electronics for Hyper Suprime-Cam" (2010 年 3 月)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [34] T. Abe, "R&D status of HAPD," International Workshop on New Photon-Detectors (PD09) Matsumoto, Japan, June 2009.
- [35] M. Iwasaki, "IP Beam Size Measurement During Collisions at Super-KEKB," 2009 IEEE Nuclear Science Symposium And Medical Imaging Conference (NSS MIC 2009), Orland, Florida, October 2009.
- [36] S. Mineo, "Distributed parallel processing analysis framework for Belle II and Hyper Suprime-Cam," 13th International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research, Jaipur, India, February 25, 2010.

招待講演

- [37] H. Aihara, "SiD Letter of Intent," Joint ACFA physics and detector workshop and the GDE meeting on the International Linear Collider (TILC09), Tsukuba, Japan, April 17-21, 2009.
- [38] H. Aihara, "Subaru Dark Energy Survey Hyper Suprime-Cam (HSC) project – ," IPMU international conference Dark Energy, June 26, 2009, Kashiwa
- [39] M. Yokoyama, "Neutrino interaction cross sections," XXIX PHYSICS IN COLLISION, Kobe, Japan, August 30-September 2, 2009.
- [40] H. Kakuno, "Status of the T2K experiment," 22nd International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos, Perugia, Italy, September 4-19, 2009.
- [41] H. Aihara, "Large Water Cherenkov Detectors Technical Issues –," Workshop for European Strategy for Future Neutrino Physics, October 1-3, 2009 CERN.
- [42] H. Aihara, "Photodetector R&D in Japan," Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN09), Estes Park, Colorado, October 8-10, 2009.
- [43] T. Abe, "Development of Large-Aperture Hybrid Avalanche Photo-Detector," 2009 IEEE Nuclear Science Symposium And Medical Imaging Conference (NSS MIC 2009), Orland, Florida, October 2009.
- [44] M. Yokoyama, "Geiger-mode APDs," I Seminario Nazionale Rivelatori Innovativi, Frascati, Italy, November 30-December 4, 2009
- [45] M. Yokoyama, "SciBooNE and other neutrino cross section measurements," XLVth Rencontres de Moriond Electroweak Interactions and Unified Theory, La Thuile, Italy, March 6-13, 2010.

(国内会議)

一般講演

- [46] 峯尾聡吾, "Hyper Suprime-Cam と Belle II 実験の
 共用データ解析フレームワークの開発,"日本物理学
 会 2009 年秋季大会、甲南大学、平成 21 年 9 月
- [47] 阿部利徳, "大口径 HAPD の開発,"同上
- [48] 角野秀一, "T2K 実験ビームコミッショニングにおけ る陽子ビームプロファイルの測定,"同上
- [49] 横山将志, "SciBooNE 実験 (3) 反ニュートリノ-原子 核反応の研究と荷電カレントコヒーレント ±反応 断面積の測定,"同上
- [50] 峯尾聡吾, "Hyper Suprime-Cam と Belle II 実験の 共用データ解析フレームワークの開発 II," 日本物理 学会 第 65 回年次大会、岡山大学、平成 21 年 3 月
- [51] 杉原進哉, "Belle-II 実験用崩壊点検出器のアクセプ タンス拡張の研究," 同上
- [52] 阿部利徳, "大口径 HAPD の開発,"同上
- [53] 相原博昭, "精密宇宙論から超精密宇宙論へ: TMT へ 期待する,"日本天文学会 2010 年春季年会、広島大 学、平成 22 年 3 月 27 日

招待講演

- [54] H. Kakuno, "T2K experiment," KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2010), KEK, February 18-20, 2010
- [55] 横山将志, "J-PARC における素粒子実験,"シンポジ ウム「J-PARCの現状と展望」、日本物理学会第65 回年次大会、岡山大学、平成21年3月
- [56] 岩崎昌子, "SuperKEKB のための IR デザイン,"シ ンポジウム「ナノビームを作り出す!驚異の加速器 SuperKEKB」、日本物理学会第65回年次大会、岡 山大学、平成21年3月

その他

- [57] 相原博昭、"素粒子とは?~発見の歴史:クォークからニュートリノまで~"川口市民大学 平成21年6月7日埼玉県産業技術総合センター
- [58] 相原博昭、"素粒子と宇宙~物質の起源と南部、小林・ 益川理論~"川口市民大学 平成21年6月14日 埼 玉県産業技術総合センター
- [59] 相原博昭、"素粒子原子核分野の大型プロジェクトに ついて" 平成 21 年 6 月 19 日 文部科学省勉強会
- [60] 相原博昭、"素粒子原子核分野の大型プロジェクトに ついて,"平成21年6月22日日本学術会議「学術の 大型研究計画検討分科会」
- [61] 相原博昭、"最先端の科学の力で挑む、宇宙の謎-宇 宙と素粒子-,"先端加速器科学技術推進シンポジウ ム、平成21年7月4日、広島
- [62] 横山将志、"ニュートリノを測る―素粒子計測の最前 線―,"放射線計測セミナー、茨城県東海村、平成21 年10月17日

- [63] 相原博昭、"21世紀学術行政の現状と在り方,"アル スの会タウンミーティング@東京大学 平成21年11 月27日
- [64] 相原博昭、"ハイブリッド技術による新しい光検出器," JST 先端計測分析技術・機器開発事業 5 周年記念 シンポジウム 平成 21 年 12 月 8 日
- [65] 峯尾聡吾、"HSC と BelleII 実験のための分散解析フ レームワークの開発,"第4回HSC研究会、弘前、平 成22年3月15日

(セミナー)

[66] 岩崎昌子、"BelleII 実験用衝突点近傍の開発,"奈良 女子大学、平成 21 年 9 月

2.5 浅井研究室

本研究室は、「真空の構造の解明」、「力の統一の実 現」等を目指して、エネルギーフロンティア加速器実 験と非加速器実験の両面から研究を行っている。素粒 子物理国際研究センターと共同でLHC・ATLAS実 験でのヒッグス粒子や超対称性粒子や余剰次元の探 索で主導的な役割を果たしている。これと並んで小 規模な非加速器実験を複数行い、標準理論を超えた 新しい素粒子現象の探索を別の角度から行っている。

2.5.1 LHC・ATLAS 実験での研究

LHC 加速器は 2010 年 3 月 30 日に重心系エネル ギー 7TeV での運用を開始し TeV 領域の研究の新た な時代がはじまった。本研究室は、ヒッグス粒子、超 対称性粒子、余剰次元 (ブラックホール)の研究と、 発見で重要となる ATLAS 検出器のパフォーマンス評 価、及びバックグラウンド研究を中心に行っている。



図 2.5.35: 7TeV での衝突実験で観測された高い運動 量 (約 400GeV) をもつ2ジェット事象 (実データ)

ヒッグス粒子発見へ向けての研究

物質の質量を解明する上で鍵となるのが、ヒッグ ス粒子の発見であり、この粒子の研究を通して、「真 空」の持つ豊かな構造が解明されると考えられてい る。これまでの LEP や Tevatron での研究の結果、 標準モデル・ヒッグス粒子は115-140GeV にあると考 えられている。この場合、ヒッグス粒子の崩壊パター ン: $H \rightarrow \gamma \gamma, \, \tau \tau, \, W^+ W^- (\rightarrow l \nu l \nu) \,$ の3つのモー ドが重要な発見モードである。我々のグループは、こ の3つのモードに絞って研究を行い、L=10fb⁻¹の 初期データでそれぞれ3程度の確度で発見可能であ り、3つのチャンネルを合わせると5の確定的な 発見が可能であることを示した (文献 8,9,10)。この 3つのチャンネルは、ヒッグス粒子のスピンやフェ ルミオンとの湯川結合の存在の有無などいろいろな 情報が含まれている。この3つモードのヒッグスの 研究は、ヒッグスの発見のみならず、ヒッグス粒子 の性質や標準理論の様々な素粒子の質量起源を解明 する上で鍵となるものである。

レプトンやガンマ線を正しく検出することが実験 的に重要である。その検出効率や間違える確率などが 実験起源のバックグラウンドを評価する上で重要で あり、実験データを用いて評価する方法を確立した。



図 2.5.36: ヒッグス粒子が W⁺W⁻ に崩壊した時の 横方向質量分布 (シミュレーション)

超対称性粒子発見へ向けてのバックグラウンド研究

超対称性は、力の統一を実現する上で鍵となる性 質であり、LHC での発見が大いに期待されている。 一番軽い超対称性粒子は宇宙の暗黒物質の良い候補 であり、物質と反応しないで検出器を通り抜けてし まう。そのため、超対称性粒子事象の特徴は図3に 示す様に、横方向消失運動量(mET と呼ぶ)である この図は、レプトンを一個含む探索モードで横方向 消失運動量(mET)分布であり、バックグラウンドと 比べて超対称性粒子の信号は大きな mET を持って いる。



図 2.5.37: レプトンを1つ含む超対称性探索モード で期待される横方向消失運動量分布 (シミュレー ション)

超対称性粒子発見の鍵となるのが、(1)検出器起源 や宇宙線起源の偽りの横方向消失運動量の理解とそ の除去、(2) 標準モデルから期待されるバックグラ ンドの正しい理解の2点にある。横方向消失運動量 は全てのカロリメーターエネルギーとミューオント ラックのベクトルサムで計算される複雑な量であり、 検出器の理解が重要であり実験データからこれを評 価する必要がある。

- クラスターの形状や時間情報を用いた検出器 のノイズの除去を行った。不良カウンターで失 われたエネルギーを他のカウンターの情報とク ラスターの形状を用いて再構成する方法を確立 し、大きな偽の消失運動量を除くことに成功し た。宇宙線やビームハローバックグラウンドを 制御する方法を開発した。現在実験データを用 いた評価を行っている。(文献 5,6)
- 実験データを用いて、バックグラウンドを評価 する方法の開発を行い、超対称性粒子発見の 3つの主要なモード(レプトンを含まないモー ド、一つ含むモード、二つ含むモード)の全て で、実験データから10-30%程度の精度でバッ クグラウンドを評価する方法を開発した。(文 献7,11,12)

LHC での超対称性発見能力を、LHC の重心系エネ ルギーと期待されるルミノシティーから評価して、グ ルイーノとスカラークォークの質量が、~700GeV(2011 年), ~1.5TeV(2013年)まで発見が可能である。 暗黒物質を説明する比較的軽い超対称性粒子は、2011 年頃には発見が可能であることを示した。

長寿命粒子の発見能力の研究

超対称性モデルのうち、Anomaly-Medaited やGauge-Mediated モデルは Gravity-Mediated モデルと並ん で有望視されている。これらのモデルの特徴は、長 寿命荷電粒子が含まれている点であり、長寿命粒子 荷電粒子を発見し、寿命を測定することは、超対称 性の破れのメカニズムを解明する鍵となる。

長寿命荷電粒子の寿命が O(1m) 以上と長い場合 は、遅い (β < 1) ミューオンの様な信号がミューオ ン検出器で捉えることが出来る。この長寿命荷電粒 子がイオン化でエネルギーを失い、カロリメーター で確率は少ないが停止する可能性がある。この過程 を用いてこの寿命を測定する新しい方法を開発した。 (文献 1)

一方寿命が、O(1mm)-O(10cm)の比較的短い粒子 は飛跡検出器内で崩壊するため、ハドロンコライダー では発見が難しいとされていた。我々は、ATLAS検 出器のTRT連続飛跡検出器を用いて、途中で崩壊し た(曲がったり、消えたりするトラック)トラック が発見が可能であること及び崩壊点の同定より寿命 測定可能性を示した。これはハドロンコライダーで は初めての研究である。 ブラックホール・余剰次元探索

重力が他の力に比べて40桁も弱いのか(階層性 問題)を考える上で余剰次元は魅力あるものであり LHC での TeV の大きさにコンパクト化された余剰 次元が発見される可能性が指摘された。我々は、TeV スケール余剰次元によって期待されるブラックホー ルが LHC で発見が可能であることを世界で初めて 示した。

その後、より現実的なモデルに即したブラックホー ルジェネレーターの開発やバックグラウンドの研究 を行った。図4は、ブラックホールの発見可能な質 量を示したものである。Plank scale が1TeV の時 100fb⁻¹で8.5TeV(余剰次元数=7)~9.5TeV(余剰 次元数=2)までブラックホールが発見可能であるこ とを示した。現在、ブラックホールの3本の毛であ る「質量」「電荷」「角運動量」の再構成を行う研究 を行っている。



図 2.5.38: ブラックホールの発見能力: プランクス ケール 1TeV として、余剰次元の数 (2,4,7) とブラッ クホールの質量下限に対して発見に必要となるルミ ノシティーを示している。(シミュレーション)

2.5.2 小規模実験で探る標準理論を超えた 新しい素粒子現象の探索

エネルギーフロンティア加速器実験LHC/ATLAS 実験は、標準理論を超えた新しい素粒子現象を直接 生成する手法である。これとは対照的に、加速器実 験では到達出来ない超高精度測定や超高感度な探索 によって、標準理論を超えた新しい素粒子現象を間 接的に探る研究も同時に行っている。例えば、超高 エネルギーで対称性が破れると、そのエネルギース ケールに反比例して軽く、結合が弱くなる粒子が期 待される。(擬・南部ゴールドストーン粒子)この様 な粒子は、結合が極めて弱い為観測が難しいが、標 準理論からのずれを高精度で検出したり、標準理論 では禁止されている希現象を超高感度で探索するこ とで間接的に観測することが可能となる。

レプトン系の CP の破れ探索

宇宙の物質・反物質の非対称性の起源を探ること は、この宇宙の成り立ちを探る上で重要である。小 林・益川行列でクォーク系の CP の破れが理解され たがクォーク系の CP の破れだけでは、この宇宙の 物質・反物質の非対称性が説明出来ないことが判明 した。新しい CP の破れが必要であり、先ほど述べ た超対称性粒子起源の CP の破れか、レプトン系の CP の破れが期待されている。

電気的に中性なレプトン系は、ニュートリノ、ポジトロニウム(電子・陽電子系)、又はミューオニウム(ミューオンと陽電子)などであり、現在ポジトロニウムを用いて探索実験を行っている。ポジトロニウム(Ps)がCPを破っていると、Psのスピンと崩壊で放出される線とに偏りが生じる。

検出器を回転させながら系統誤差をキャンセルする実験装置を製作し、厳しい制限を得ることが出来た。CPの破れ C_{CP} が $-2.3 \times 10^{-3} < C_{CP} < 4.9 \times 10^{-3}$ (90%CL)でこの感度は、クォーク系 K 中間子の CPの破れに相当するものである。(文献 2)

ポジトロニウム超微細構造の精密測定

ポジトロニウム (Ps) のうち、スピン1の状態はオ ルソ-ポジトロニウム (o-Ps)、スピン0の状態はパラ-ポジトロニウム (p-Ps) と呼ばれている。この二つの 状態は、スピンースピン相互作用によりエネルギー 準位に差 HFS (Hyper Fine Structure)が生じる。電 子・陽電子は磁気モーメントが大きいので、HFS は、 水素と較べ約2桁大きく、束縛系 QED を精密検証 する上で重要な測定量である。近年理論計算の精度 が向上し、実験値と理論値に15ppm(3.9 σ)のズレが あることが判明した。過去の実験で考慮されていな い系統誤差があるか、新しい素粒子現象が寄与して いる可能性がある。極めて弱い結合をする未知粒子 は、HFS に仮想的な寄与を及ぼすため、HFS の精密 測定は標準理論を超えた新しい素粒子現象を探る上 でも重要である。

磁場方向 (Z 軸) にスピンを量子化したとき、 $m_Z = \pm 1$ の成分は磁場と結合しないが、 $m_Z=0$ の状態は磁場と結合しエネルギーが高くなる (Zeeman 効果)。 このエネルギー変化分は磁場と HFS の値に依存する。図 5 はセットアップと測定した共鳴曲線であり、 この結果から、 $\Delta_{HFS} = 203.3804 \pm 0.0022(stat.) \pm 0.0081(sys.)$ が得られた。磁場の非一様性が最大の系統誤差であることが判明し、補償コイルを製作しを 1ppm に抑えることが出来るようにした。統計誤差を抑えるために改良を行い、2 年の測定で ppm の 精度に達することが出来る。

強力ミリ波源を用いたポジトロニウム超微細構造の 精密測定

強力な 203GHz のミリ波源を福井大学と共同開発 している。これにより、Zeeman 効果を用いた間接



図 2.5.39: 上: Zeeman 効果を用いた HFS 測定実験 セットアップ 下:測定で得られた共鳴曲線

測定と異なり、o-Ps/p-Psの直接遷移の初めての観 測を行い直接 HFS を測定することが可能となる。ミ リ波は電波と光の中間的な性質であるため、これま で理学応用はじめあまり開拓されてこなかった領域 である。図6にセットアップを示す。500W 高出力 ジャイロトロンからのミリ波を3枚の鏡をもちいて、 TE03 モードの光をガウシアンモードに変換し、高い Q を持つファブリ・ペロー型の共鳴装置にカップル させる。この中で、o-Ps を生成することで p-Ps へ の直接遷移が起こすことが出来る。 こつの鏡面の間 隔をピエゾ駆動装置で制御してQを調整する。こう して得られた共鳴曲線の幅は p-Psの寿命に対応して おり、HFS の精密測定とあわせて、p-Ps の寿命測定 も可能になる。テストの結果コンバーターの変換効 率約30-40%が得られた。現在この効率を高める研究 を行っている。

ポジトロニウム・スピンローテションの精密測定

磁場の方向とポジトロニウム (Ps) のスピン方向が ずれていると、スピンは歳差運動する。Ps の崩壊で 放出されるガンマ線の方向は、スピンの向きと相関 をもっている為、スピンが磁場中で回転している様 子を直接観測することが出来る。この周期が上記の HFS に比例するため、HFS を測定することも出来 る。またスピン偏極の強度変化から Ps を用いたスピ ン緩和の測定が可能になる。ミューオンに較べて約



図 2.5.40: 強力ミリ波源を用いた直接遷移観測実験 セットアップ

100倍軽いPsを用いたスピン緩和の測定は、より 高感度でのPsと物質との相互作用を探ることが出来 ると期待されている。

 $^{68}Ge - Ga$ 線源から放出された陽電子は強く偏極 しており、密度 0.1g/cc のシリカエアロジェル中で Ps を生成する。偏極陽電子で生成されたオルソ-ポ ジトロニウム (o-Ps) も陽電子放出方向に偏極してい る。この軸に垂直に磁場をかけるとスピンは磁場と 垂直な平面内で回転する。崩壊で放射されるガンマ 線は、スピンと ± 45 度の方向に高いエネルギーを出 しやすく反対方向には出にくい。0.135Tの磁場中で 測定した結果を下図に示す。逆位相の計数を引くこ とで歳差に起因する振動が観測された。3つの異な る磁場強度で測定した結果は互いに無矛盾で、HFS 値 203. 324 ± 0.039 (stat.) ± 0.015 (sys.) GHz が得 られた。(文献 3)



図 2.5.41: B=0.135T でのガンマ線の検出量: 位相が 逆の検出器の計数を引いて振動成分だけをとりだし ている。点が測定結果、曲線がフィット結果である

<報文>

(原著論文)

- S.Asai, K.Hamaguchi, and S.Shirai, "Measuring lifetimes of long-lived charged massive particles stopped in LHC detectors", Phys.Rev.Lett.103:141803 (2009).
- [2] T.Yamazaki, T.Namba, S.Asai, and T.Kobayashi, "Search for CP-violation in Positronium Decay", Phys.Rev.Lett.104:083401 (2010).
- [3] Y. Sasaki, A. Miyazaki, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, K. Tanaka, A. Yamamoto, "Measurement of Positronium hyperfine splitting with quantum oscillation", arXiv:1002.4567.
- [4] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., "Sigma(-)-antihyperon correlations in Z(0) decay and investigation of the baryon production mechanism". Euro. Phys. J. C, 64 609-625,(2009)
- [5] The ATLAS Collaboration, S.Asai et al., "Jet energy scale: In-situ calibration strategies.", ATL-PHYS-PUB-2009-015 (2009).
- [6] The ATLAS Collaboration, J.Abdallah et al., "Measurement of missing tranverse energy", ATL-PHYS-PUB-2009-016 (2009).
- [7] The ATLAS Collaboration, S.Asai et al., "Estimation of QCD Backgrounds to Searches for Supersymmetry", ATL-COM-PHYS-2009-188 (2009).
- [8] The ATLAS Collaboration, C.Adam, et al., "Statistical combination of several important standard model Higgs boson search channels". ATL-PHYS-PUB-2009-063 (2009).
- [9] The ATLAS Collaboration, A.Ahmad, et al., "Search for the standard model Higgs boson via vector boson fusion production process in the ditau channels". ATL-PHYS-PUB-2009-055 (2009).
- [10] The ATLAS Collaboration, C.Adam, et al., "Prospects for the discovery of the standard model Higgs boson using the H —*i* gamma gamma decay". ATL-PHYS-PUB-2009-053 (2009).
- [11] The ATLAS Collaboration, J.Abdallah, et al. , "Prospects for supersymmetry discovery based on inclusive searches", ATL-PHYS-PUB-2009-066 (2009).
- [12] The ATLAS Collaboration, G.Akimoto, et al., "Data-driven determinations of W, Z and top backgrounds to supersymmetry", ATL-PHYS-PUB-2009-064 (2009).

(会議抄録)

- [13] S.Asai et al., "Precise measurement of Hyper Fine Structure of positronium using sub-THz light.", arXiv:1003.4324
- T.Suehara et al., "Probing the energy structure of positronium with a 203-GHz Fabry-Perot cavity", J.Phys.Conf.Ser.199:012002 (2010)
- [15] A.Ishida et al., "Precise measurement of HFS of positronium", J.Phys.Conf.Ser.199:012004,(2010)

(学位論文)

- [16] 石田明, "ポジトロニウムの超微細構造の精密測定", 修士論文 (2010 年 3 月)
- [17] 武市祥史, "ATLAS 実験における 2 ジェットトポロ ジーの研究", 修士論文 (2010 年 3 月)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [18] S.Asai, "The latest status of LHC and EWSB physics", SCGT09, Nagoya, December 2009.
- [19] S.Asai, "Application of Gyrotorn: Precise measurement of Hyper Fine Structure of positronium using sub-THz light.", 第 3 回遠赤外線国際学会(福 井大学) March 2010.

一般講演

- [20] A.Ishida, "Precise measurement of HFS of Positronium (poster)", The Workshop on Low Energy Positron and Positronium Physics (POSMOL2009) Canada, July 2009.
- [21] T.Suehara "Probing the Energy Structure of Positronium with a 203 GHz Fabry-Perot Cavity (Poster)", The Workshop on Low Energy Positron and Positronium Physics (POSMOL2009) Canada, July 2009.
- [22] A.Ishida, "Precise measurement of HFS of Positronium (poster)", XXVI International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions USA, July 2009.
- [23] T.Suehara, "The First Direct Measurement of the Hyperfine Splitting of Positronium (Poster)", XXVI International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions USA, July 2009.
- [24] A.Ishida, "Precise Measurement of HFS of Positronium using Zeeman Effect", Advanced Science Research Symposium, Japan, November 2009
- [25] G.Akimoto, "Precise measurement of hyperfine structure of positronium using Zeeman effect experimental set up and RF system (poster)" Advanced Science Research Symposium, Japan, November 2009
- [26] Y.Sasaki, "Measurement of Positronium Hyperfine Splitting with Quantum Oscillation (Poster)", Advanced Science Research Symposium, Japan, November 2009
- [27] A.Miyazaki, "Experiment for the First Direct Measurement of the Hyperfine Splitting of Positronium (Poster)", Advanced Science Research Symposium, Japan, November 2009

(国内会議)

招待講演

- [28] 浅井祥仁, "0.2 fb⁻¹ の LHC でわかること", 日本物 理学会:秋季大会:甲南大学
- [29] 浅井祥仁, "高次元 BH+余剰次元研究"京都大学・基 研研究会 「高次元 Black Hole 研究最前線」2009 年 12 月
- 一般講演
- [30] 佐々木雄一 "ポジトロニウム超微細構造の量子振動 を用いた測定",陽電子科学とその理工学への影響、京 都大学 2009 年 11 月.
- [31] 秋元銀河 "Zeeman 効果を用いたポジトロニウム超 微細構造の精密測定",陽電子科学とその理工学への 影響、京都大学 2009 年 11 月.
- [32] 難波俊雄 "ポジトロニウムを用いた CP 対称性の 破れの探索",陽電子科学とその理工学への影響、京 都大学 2009 年 11 月.
- [33] 宮崎彬"サブミリ波を用いたポジトロニウム超微 細構造の精密測定光学系の現状と検出器系",陽電子 科学とその理工学への影響、京都大学2009年11月.
- 日本物理学会:秋季大会:甲南大学
- [34] 山崎高幸, "ポジトロニウムを用いた CP 対称性の破 れの探索"
- [35] 佐々木雄一, "ポジトロニウム超微細構造の量子振動 を用いた測定"
- [36] 秋元銀河, "ポジトロニウム 超微細構造の精密測定 I (全体と遷移 RF)"
- [37] 石田明, "ポジトロニウム 超微細構造の精密測定 II (間接測定の状況と展望)"
- [38] 末原大幹,"サブテラヘルツ波を用いたポジトロニウ ム超微細構造の精密測定 I(概要と共振器)"
- [39] 宮崎彬, "サブテラヘルツ波を用いたポジトロニウム 超微細構造の精密測定 II (設計した検出器とシグナ ルの見積り)"
- [40] 磯部忠昭, "アトラス実験におけるトップクォーク対 に崩壊する新粒子の探索"
- [41] 岡村淳一, "ATLAS 実験における UED 模型の研究"
- [42] 東裕也、 "ATLAS 実験における長寿命荷電粒子につ いての研究 (@ 10TeV)"
- [43] Mark M. Hashimoto, "Exclusive study of the mSUGRA co-annihilation region using a new soft tau identification method with the ATLAS detector"
- [44] 武市祥史, "Atlas 検出器を用いた 2 jet + missing の 研究"

日本物理学会:春季大会:岡山大学

- [45] 石田明, "Zeeman 効果を用いたポジトロニウム超微 細構造の精密測定"
- [46] 佐々木雄一, "窒素ガス中でのポジトロニウム熱化曲 線の測定"
- [47] 宮崎彬, "サブテラヘルツ波を用いたポジトロニウム 超微細構造の精密測定 I 測定の概要"

- [48] 山崎高幸, "サブテラヘルツ波を用いたポジトロニウ ム超微細構造の精密測定 II"
- [49] 風間慎吾, "ポジトロニウムを用いた弱結合スカラー 粒子の探索"
- [50] Khaw K. Siang, "Higgs Boson Search in the VBF Channel of NMSSM with the ATLAS detector"
- 第16回素粒子物理国際研究センターシンポジウ ム:2/14—17:白馬
- [51] 風間慎吾, "ポジトロニウムを用いた弱結合スカラー 粒子の探索"
- [52] 佐々木雄一,"量子振動を用いたポジトロニウム超微 細構造の測定"
- [53] 石田明, "ゼーマン効果を用いたポジトロニウム超微 細構造の精密測定"
- [54] Khaw Kim Siang, "Higgs Boson Search in the VBF Channel of NMSSM with the ATLAS detector"

(セミナー)

- [55] 浅井祥仁, "LHC が切り拓く TeV スケールの新しい 物理",名古屋大学 2009 年 10 月
- [56] 石田明"ポジトロニウムの超微細構造の精密測定 中間結果の報告", KEK 超伝導低温工学センターセミナー 2009 年 10 月

3 物性理論

3.1 青木研究室

青木研では一貫して、「超伝導」、「強磁性」、「分 数量子ホール効果」に代表される多体効果の理論を 主眼に研究を行っている。これらの現象では、電子 相関(電子間斥力相互作用のために生じる量子効果) により、ゲージ対称性が自発的に破れる。一方、面 白い物質構造から面白い物性物理を探る「物質設計」 や、非平衡における新奇な物性を探ることを、もう 一本の柱としている。

3.1.1 超伝導

鉄系新高温超伝導体

2008年に発見された鉄系新超伝導体は、銅酸化物 に対比されるべき新しいカテゴリーの超伝導体であ り、特に鉄という意外な元素の化合物における高温 超伝導という点が興味深い。黒木(電通大)、大成 (名大)、有田(東大工)、臼井(電通大)、田仲(名 大) 紺谷(名大)と青木は、この理論の最初となる ものの一つを提出した。第一原理電子状態計算から 出発し、downfolding と呼ばれる方法により、多体の tight-binding 模型を構築し、Eliashberg 方程式を解 析することにより、超伝導のペアリング対称性を調 べた [2, 3, 16, 17, 18]。結果は、(a) フェルミ面は二 組のポケットからなる非連結フェルミ面である、(b) downfold された模型は鉄の5個のd 軌道全てを含む 5-band model となる、(c) 複数組ポケットの間に、複 数の nesting があり、これに伴いペアリング対称性 は、基本的にポケット間の非連結性を利用したフル ギャップの s (通称 s±) であることが示唆される。

ー連の鉄系超伝導体では、超伝導は大きい物質依 存性、それに伴う結晶構造依存性をもつ。黒木、臼 井、大成、有田と青木は、第一原理計算からの5 軌 道模型を用い、フェルミ・ポケットの構造が結晶構 造によって変化し、特に鉄の面から測ったニクトゲ ン (As, P 等) の高さ h_{Pn} が複数のスピン揺らぎの競 合を支配し、ニクトゲン位置の上下に応じて $s\pm$ か ら、nodal s, d へのスイッチングが起きるという興 味深い現象を示した (Fig.3.1.1)[1, 40, 59]。この論文 [1] は、editor's suggestion に選ばれた。



多バンド超伝導体における集団励起モード

鉄系超伝導体の発見および複数原子種からなる冷 却原子系の実現可能性より、多バンド超伝導や多バ ンド超流動の研究の重要性が増している.太田、町 田(原研)、小山(東北大)と青木は、多バンド(3 バンド以上)に亘りゲージ対称性が破れた場合、集団 励起モードに単一バンドでは見られない特徴が存在 することを理論的に明らかにした.[61]

銅酸化物高温超伝導体 再訪

鉄系など、高温超伝導のファミリーが増えている が、拡がった視野の元で、いまだに最高の Tc をもつ銅 酸化物を再訪するのは意味があろう。銅酸化物では、 実験的に Tc が低い La₂CuO₄ と高い HgBa₂CuO₄ があり、前者のフェルミ面は弯曲が小さくネスティ ングが良く、後者では大きく弯曲しているので、理 論的には前者の方が高い Tc であることが期待され、 謎となっていた。榊原、臼井、黒木(電通大)、有田 (東大工)と青木は、通常考えられている $dx^2 - y^2$ 軌道に加え dz^2 軌道をあらわに考慮した 2 軌道模型 を構築することにより、超伝導を調べた。[60] これ により、 La_2CuO_4 でネスティングが良いのは dz^2 軌 道がエネルギー的に EF に近いために寄与が大きい ためであるが、 dz^2 軌道が混じると超伝導が抑制さ れ、この効果がフェルミ面形状効果を凌駕すること が分かり、 $HgBa_2CuO_4$ の方が高い Tc をもつという 実験と整合する結果を得た。

一方、銅酸化物の中でも最高の Tc をもつのは多 層系である。西口と青木は、多層系が一層系とどう 異なるかを調べるために、Tc のピークとなる 3 層 系 (HgBa₂Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+2}, n = 1, 2, 3) までに亘り、 第一原理電子状態計算により、バンド構造とフェル ミ面を求め、多層におけるバンドの分裂の仕方やフェ ルミ面の湾曲の仕方、軌道成分の混成の様子などを 明らかにした。西口はこの結果を修士論文にまとめ た。[80]



汎関数繰り込み群法

フェルミ面形状やバンド分散を取り入れられる強 力な方法として、高島(東北大理) 有田(東大工) 黒木(電通大)、青木は温度汎関数繰り込み群法に 着目した。我々は、従来無視されていた自己エネル ギーの松原周波数空間を取り入れながら計算量を爆 発させないアルゴリズムを提案した。この方法を、 2次元斥力 Hubbard 模型に適用し、さまざまな相関 関数や質量繰り込み因子を計算することに成功した [19, 41]。

新有機超伝導体ピセンの電子構造

カリウムをドープした固体ピセン $C_{22}H_{14}$ がTc =7-20K において超伝導転移することが最近久保園 (岡山大)らによって発見された。初めての芳香族超 伝導物質である。超伝導機構の解明への第一歩とし て、小杉と青木は三宅、石橋(産総研)、有田(東大 工)とともに、固体ピセンの電子状態を第一原理計 算により解析した (Fig.3.1.2)[4,65,66]。固体ピセン の伝導帯は、ピセン分子の LUMO と LUMO+1 か ら成る。ピセン分子あたり約3個のKをドープする と超伝導が発現するが、K が層状構造のピセン結晶 の何処に入るかは実験では明らかになっていないの で、構造最適化したところ、ピセン分子層の内部に K が入り込む構造が安定であるが、他にも準安定構 造が存在することが分かった。電子構造は、ドービ ングによる分子配向の変化にも支配される一方、K 原子を取り除いたときの電子バンドとは形状が異な るので波動関数は K 原子の軌道成分も含む。フェル ミ面の形状は、次元性の異なる複数枚から成ること が示唆的である。



 \boxtimes 3.1.2: An electronic wavefunction in the conduction band of K-doped aromatic (picene) solid.[4]

3.1.2 磁性

近年、中性フェルミ原子における Stoner 強磁性に 興味がもたれているが、Stoner 強磁性は平均場由来 であり、強相関由来の強磁性を中性フェルミ原子系で 実現することは興味深い課題である。このため、電子 相関からの強磁性について、今年度は、奥村(原研、 現在理研)、山田、町田(原研)と青木は、two-leg ladder 光学格子の磁性を、厳密に評価できる密度行 列繰り込み群法を用いて解析を行った[62]。その結 果、トラップのための粒子密度が空間変化するため に、スピン・インバランスが強い条件下では、各点 の粒子密度に応じて、完全強磁性領域、部分偏極領 域、非偏極領域に分離することを見出した。

3.1.3 量子ホール系

グラフェンの量子ホール効果とカイラル対称性

最近、原子一層のグラファイト (グラフェン) にお ける特異な整数量子ホール効果が実験的に観測され 興味を集めているが、蜂の巣格子は massless Dirac 粒子のバンド分散をもつために、興味深い。グラフェ ン量子ホール効のトポロジカルな性質の一つはエッ ジ状態に現われるが、有川、初貝(筑波大)、青木は、 グラフェンのエッジ状態を数値計算により求め、 ポロジカルな観点や STM 観察の観点から議論した [21]。特に、massless Dirac 粒子特有の N=0 ラン ダウ準位は特異であるが、不規則性を入れたときに これがどうなるかは、トポロジカルな観点からも興 味深い。河原林(東邦大)初貝、青木は、不規則性 が炭素間の結合に入る場合は、カイラル対称性が保 たれ、殆どスケーリングの固定点のような異常な振 る舞いをすることを見出した (Fig.3.1.3)[5, 20, 63]。 また、森本、初貝、青木は、磁場中グラフェンにお いて、青木により以前提案されたランダウ準位レー ザーが起き易いことを示した。[22]



 \boxtimes 3.1.3: The density of states for Landau levels in graphene in a strong magnetic field in the presence of a spatially correlated random bonds for various values of the correlation length $\eta/a.[5]$

THz 領域における「光学ホール効果」

量子ホール系では静的ホール伝導度が量子化される が、森本、初貝、青木は、光学ホール伝導度(ac Hall conductivity、興味ある周波数は数 T の磁場下では THz 域)がどうなるかに着目し、通常の量子ホール 系およびグラフェンに対して光学ホール伝導度を計 算し、ホール・プラトーが意外にも ac 領域でも残る ことを見出した (Fig.3.1.4)[6, 23, 24, 42, 52, 69]。近 年の THz 分光の実験的技術の進展により、Faraday 回転角等によって測定されることが期待される。

実際、池辺,森本,枡富,岡本,青木,島野は、量 子ホール系のTHz帯におけるファラデー回転角の測 定を行い、光学ホール伝導度を調べた[59]。試料に GaAs/AlGaAsを用いたファラデー回転角から得ら れたホール伝導度は、ランダウ準位占有率2の近傍 で磁場に対してプラトー的に振る舞い、これはTHz 周波数帯においてもプラトー構造が存在することを 示す。



 \boxtimes 3.1.4: Numerical result for the optical Hall conductivity $\sigma_{xy}(\varepsilon_F, \omega)$ for the disordered graphene QHE system.[6]

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、電子は磁気長程度の量 子零点振動を行いながら斥力で避け合い、「電子分 子」構造をとり、「魔法数」角運動量をもつことを Maksym(Leicester 大)、青木等は提案してきた。電 子相関効果は量子ドットの詳細に敏感であるため、 Maksym、青木は、西、羽田野 (JST)、樽茶(東大 工)、Austing(カナダNat. Res. Council)、Kouwenhoven (Delft 工大)という実験家との共同研究とし て、電子分子理論の予言する魔法数構造が、精密な 理論的モデルを用いるとスピン自由度まで含めて実 験結果と一致することを示した [7]。

3.1.4 非平衡·非線形現象

モット絶縁体のような強相関電子系における非平 衡・非線形現象は、開拓の余地の大きい興味深い問 題である。強電場中でのモット絶縁破壊に対して岡、 青木は、多体状態の間の非断熱的量子遷移に対する 描像を与えた[32]。本年度は、強相関電子系以外に、 グラフェンも含めて、非平衡現象を研究した。また、 非平衡下での超伝導の研究にも着手した[46]。

光誘起絶縁体・金属転移の理論

— Keldysh + Floquet 法

光誘起絶縁体・金属転移を理解することを目的とし て、辻、岡、青木は、強いレーザー光のもとでの非平 衡定常強相関系の電子状態を計算する新方法を、非平 衡動的平均場理論を Floquet 法と組み合わせること により提案した。これを Falicov-Kimball モデルに適 用したところ、電子状態がモット絶縁体と Wannier-Stark 格子の間を転移する様子が見られた。さらに、 散逸を取り込むことにより強相関電子系の光誘起非 平衡定常状態の分布関数を決定し、これを非線形光 学応答関数の計算に応用し、場合によっては負の光 学伝導度 (gain) が生じることを示した [9, 27, 28, 29, 45, 47, 53, 73, 74]。

また、辻、岡、Millis (ETH)、青木は、ac 外場の ために負の温度が実効的に実現する場合があること を示唆した。[72]

強レーザー光下の朝永-Luttinger 液体的モード

一次元モット絶縁体に対して強いレーザー光を照 射すると金属状態が生じることが、ポンプ・プローブ 実験によって知られている。岡、青木は、密度行列 繰り込み群を用いて非平衡定常状態における光学相 関関数を計算した。その結果、金属状態は電子相関 によって繰り込まれた線形分散を持つ集団励起を示 し、朝永-Luttinger液体に似ることが分かった[26]。

光誘起されたゼロ磁場中グラフェン・ホール効果

岡、青木は、強い円偏光を照射するとグラフェン 中の Dirac 粒子が光誘起 dc ホール効果を発現する可 能性を発見した [10, 25, 43, 44, 70]。光誘起ホール 効果は既存のホール効果とは異なり無磁場で生じる ものであり、円偏光の非線形効果に伴って電子の獲 得する非断熱ベリー位相 (Aharonov-Anandan 位相) によって発生する。実験によってこの現象を検証す る方法についても提案を行った。

モット絶縁破壊とベーテ解の非エルミート拡張

岡、青木は「多体 Landau-Zener 遷移」によって モット絶縁破壊を説明してきたが、Landau-Zenerの
公式を単純にハバードモデルに適用すると熱力学極限で敷居電場が発散してしまう。そこで、これを量子トンネル現象に対する Dykhne-Davis-Pechkas 理論をハバード模型に適用することによって解決した [11,54]。敷居電場の計算過程で非エルミート化されたハバード模型が自然に出現することが分かり、ハバード模型厳密 (Bethe) 解を拡張することによって数値計算と整合する結果を得た。

相関電子系の非線形伝導の統一的理解:電子雪崩

岡、岸田(名大工)と青木は、相関電子系の I-V 特 性に広く見られる負の微分抵抗が多体電子雪崩効果 によって説明できることを、現象論的なモデルを用 いて示した[71]。

実時間量子モンテカルロ法の非平衡への拡張

岡、Werner(ETH)、Millis (Columbia 大) は強相 関系の非平衡相転移現象を調べる方法である非平衡 動的平均場理論の構築に必要な実時間量子モンテカ ルロ法を調べ、特に Hirsch-Fye 法および連続時間モ ンテカルロ法が非平衡下でも扱えるように Keldysh グリーン関数を用いて拡張した。負符号問題をある 程度緩和することに成功し、バイアス下の非平衡量 子ドットの非線形伝導について解析した [8, 12]。

光格子中の冷却原子の超流動・Mott 絶縁体相転移 ダイナミックス

光格子にトラップされた冷却原子系では超流動・ Mott 絶縁体 (SF-MI) 転移が観測さるが、堀口(現在 NEC) 岡、青木は、2次元正方格子 Bose-Hubbard 模型に対し、時間依存 Schrödinger 方程式を数値的 に解くことによって、SF-MI 相転移ダイナミックス を調べた [30]。これにより、相互作用 U/t をクエンチ させた際、超流動振幅は指数関数的に成長しながら 位相が空間的なドメイン構造を作り、Josephson 電 流によりドメインが融合する過程で Kibble-Zurek 機 構により位相欠陥(渦)が発生する様子が示された。

3.1.5 周期的ナノ構造の電子状態

ゼオライトは、隙間の多い結晶構造をもつが、ア ルカリ金属等のクラスターを隙間に吸蔵でき、新奇 な物性が期待される。興味は、(i) この系は単位胞に 数百個の原子を含む系であるが、ナノサイズ・ケー ジに閉じ込められた状態("superatom")の並びの ような単純化が可能か、(ii) 強磁性等の多体効果が期 待できるほど強相関電子系か、である。野原は、有 田、中村(工学系)と、この系の第一原理計算をス ピン密度汎関数法を用いて行い、有効模型と磁性を 明らかにした。[13, 49, 50, 55, 75, 76, 77, 78] 野原は 山本、藤原(東大、CREST-JST)とともに、ペロフ スカイト型遷移金属酸化物 La*M*O₃ (*M*=Ti~Cu) の U+GW 近似法による計算結果を出版した。[14, 48]

3.1.6 Zero-point analogue によるフォ トニック・バンドの設計

フォトニック・バンドを実現する方法には様々あ るが、遠藤、岡、青木は、金属導波管の network が、 "tight-binding photonic band "を系統的に実現する 新しい方法であることを提案した (Fig.3.1.5)[15, 79]。 これにより、電子系のような tight-binding band を 設計することができ、特に最近興味がもたれている、 「重い光子」が、カゴメ格子のような平坦バンド格子 で実現されることを理論的に予言した。



 \boxtimes 3.1.5: Eigenmodes in the metallophotonic waveguide network for two values of the period. The boundaries of the waveguide are shown as dotted lines.[15]

3.1.7 その他

青木と大栗 (Caltech/IPMU) は、物性物理と素粒 子物理の交流から新しい学際的な世界が拓けるのでは ないか、という考えから、*Condensed Matter Physics Meets High Energy Physics* を、IPMU focus week として企画・組織し、竣工なった IPMU での最初の 国際会議として開催した [37, 38]。総合報告として、 青木は、超伝導 [33]、南部理論と物性物理学 [34, 35]、 高温超伝導 [56]、鉄系新超伝導体 [36, 51]、グラフェ ン [39, 67, 68]、量子ホール効果 [31]、また岡は強相 関電子系における非平衡現象 [57, 58] 等のテーマで 講演、解説、執筆を行った。

(原著論文)

[1] Kazuhiko Kuroki, Hidetomo Usui, Seiichiro Onari, Ryotaro Arita and Hideo Aoki: Pnictogen height as a possible switch between high- T_c nodeless and

<報文>

low- T_c nodal pairings in the iron based superconductors, *Phys. Rev. B* **79**, 224511 (2009).

- [2] Kazuhiko Kuroki, Seiichiro Onari, Ryotaro Arita, Hidetomo Usui, Yukio Tanaka, Hiroshi Kontani and Hideo Aoki: Unconventional pairing originating from disconnected Fermi surfaces in the ironbased superconductor, New J. Phys. 11, 025017 (2009).
- [3] Kazuhiko Kuroki and Hideo Aoki: Unconventional pairing originating from disconnected Fermi surfaces in the iron-based superconductor, *Physica C*, special edition on superconducting pnictides 469, 635 (2009).
- [4] Taichi Kosugi, Takashi Miyake, Shoji Ishibashi, Ryotaro Arita and Hideo Aoki: First-Principles Electronic Structure of Solid Picene, J. Phys. Soc. Jpn 78, 113704 (2009).
- [5] Tohru Kawarabayashi, Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Quantum Hall plateau transition in graphene with correlated random hopping, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 156804 (2009).
- [6] Takahiro Morimoto, Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Optical Hall conductivity in ordinary and graphene QHE systems, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 116803 (2009).
- [7] P.A. Maksym, Y. Nishi, D.G. Austing, T. Hatano, L.P. Kouwenhoven, H. Aoki and S. Tarucha: Accurate model of a vertical pillar quantum dot, *Phys. Rev. B* **79**, 115314 (2009).
- [8] P. Werner, T. Oka, and A. J. Millis: Diagrammatic Monte Carlo simulation of non-equilibrium systems, *Phys. Rev. B* **79**, 035320 (2009).
- [9] Naoto Tsuji, Takashi Oka and Hideo Aoki: Nonequilibrium steady state of photoexcited correlated electrons in the presence of dissipation, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 047403 (2009).
- [10] Takashi Oka and Hideo Aoki: Photovoltaic Hall effect in graphene, *Phys. Rev. B* **79**, 081406(R) (2009) [*ibid* **79**, 169901(E) (2009)].
- [11] T. Oka and H. Aoki: Non-Hermitian generalization of the Bethe-ansatz excited states and dielectric breakdown in the Hubbard model out of equilibrium, *Phys. Rev. B*, **81**, 033103 (2010).
- [12] P. Werner, T. Oka, M. Eckstein, A. J. Millis: Weak-coupling quantum Monte Carlo calculations on the Keldysh contour: theory and application to the current-voltage characteristics of the Anderson model, *Phys. Rev. B* **81**, 035108 (2010).
- [13] Yoshiro Nohara, Kazuma Nakamura and Ryotaro Arita: Spin density functional study of magnetism in potassium-loaded Zeolite A, *Phys. Rev. B* 80, 220410 (2009).
- [14] Yoshiro Nohara, Susumu Yamamoto and Takeo Fujiwara: Electronic structure of perovskite-type transition metal oxides LaMO₃ (M=Ti~Cu) by

GW approximation, *Phys. Rev. B* **79**, 195110 (2009).

[15] Shimpei Endo, Takashi Oka and Hideo Aoki: Realization of tight-binding photonic bands in metallophotonic waveguide networks with application to a flat band in kagome lattice, *Phys. Rev. B* 81, 113104 (2010).

(国際会議録(招待講演))

- [16] Hideo Aoki: Unconventional superconductivity originating from disconnected Fermi surfaces in the iron-based compound, *Physica B* 404, 700 (2009).
- [17] Hideo Aoki: Model construction and pairing symmetry for the iron-based oxypnictides, *Physica C* 469, 890 (2009).

(国際会議録(一般発表))

- [18] Ryotaro Arita, Seiichiro Onari, Hidetomo Usui, Kazuhiko Kuroki, Yukio Tanaka, Hiroshi Kontani, and Hideo Aoki: Minimal model for study on superconductivity in LaFeAsO_{1-x}F_x based on *abinitio* downfolding, J. Phys.: Conf. Series **150**, 052010 (2009).
- [19] Hirokazu Takashima, Ryotaro Arita, Kazuhiko Kuroki and Hideo Aoki: An improved algorithm for the functional renormalization group and its application to the 2D Hubbard model, J. Phys.: Conf. Ser. 150, 052261 (2009).
- [20] Tohru Kawarabayashi, Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Landau level broadening in graphene with long-range disorder — Robustness of the n = 0 level, Proc. EP2DS18 Kobe, 2009 [Physica E 42, 759 (2010)].
- [21] Mitsuhiro Arikawa, Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Edge states for the n = 0 Laudau level in graphene, J. Phys.: Conf. Series **150**, 022003 (2009).
- [22] Takahiro Morimoto, Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Cyclotron radiation and emission in graphene — a possibility of Landau-level laser, J. Phys.: Conf. Series 150, 022059 (2009).
- [23] Takahiro Morimoto, Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Optical Hall conductivity in QHE systems, J. Phys.: Conf. Series 150, 022060 (2009).
- [24] Takahiro Morimoto, Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Optical Hall conductivity in 2DEG and graphene QHE systems, *Proc. EP2DS18*, Kobe 2009 [*Physica E* 42, 751 (2010)].
- [25] Takashi Oka and Hideo Aoki: Photo-induced Hall effect in graphene — effect of boundary types, J. Phys.: Conf. Ser. 148, 012061 (2009).
- [26] Takashi Oka and Hideo Aoki: Photo-induced metallic liquid in a one-dimensional Mott insulator in AC fields, J. Phys.: Conf. Ser. 150, 042152 (2009).

- [27] Naoto Tsuji, Takashi Oka, and Hideo Aoki: Photoinduced insulator-metal transition and nonlinear optical response of correlated electrons — a DMFT analysis, J. Phys.: Conf. Ser. 148, 012058 (2009).
- [28] Naoto Tsuji, Takashi Oka, and Hideo Aoki: Photoinduced insulator-metal transition in correlated electrons — a Floquet analysis with the dynamical mean-field theory, J. Phys.: Conf. Ser. 150, 042216 (2009).
- [29] Naoto Tsuji, Takashi Oka, and Hideo Aoki: Nonequilibrium steady states in correlated electron systems — Photoinduced insulator-metal transition and optical response, J. Phys.: Conf. Ser. 200, 012212 (2010).
- [30] N. Horiguchi, Takashi Oka, and Hideo Aoki: Nonequilibrium dynamics in Mott-to-superfluid transition in Bose-Einstein condensation in optical lattices, J. Phys.: Conf. Ser. 150, 032007 (2009).

(編著書)

- [31] Hideo Aoki: Integer quantum Hall effect (a chapter in *Comprehensive Semiconductor Science and Technology*, Elsevier), in press.
- [32] Takashi Oka and Hideo Aoki: Nonequilibrium quantum breakdown in a strongly correlated electron system, in *Quantum Percolation and Break*down [Lecture Notes in Physics 762, 251] (Springer Verlag, 2009).
- [33] 青木秀夫:「超伝導入門」(裳華房、2009)。

(国内雑誌)

- [34] 青木秀夫:南部理論と物性物理学、日本物理学会誌、 64,80 (2009)。
- [35] 青木秀夫:南部理論と物性物理学 超伝導を中心 に、原子核研究(南部先生ノーベル賞受賞記念特集 号)53, Suppl. 3, 183 (2009)。
- [36] 黒木和彦、有田亮太郎、青木秀夫:鉄系超伝導体における理論的研究の現状 有効模型とペアリング機構、日本物理学会誌 64,826 (2009)。
- [37] 青木秀夫、大栗博司:物性物理学と素粒子物理学の対 話 IPMU フォーカス・ウィークの報告、日本物理 学会誌、出版予定。

< 学術発表 >

(国際会議)

招待講演・総合報告 (会議録掲載以外)

- [38] Hideo Aoki: How can condensed-matter problems interact with field theoretic ideas an overview (IPMU Focus Week Condensed Matter Physics Meets High Energy Physics, Kashiwa, Feb 2010).
- [39] Hideo Aoki: Photo-induced Hall effects in graphene: optical Hall effect and photovoltaic Hall effect (*Graphene Tokyo*, July 2009).

一般発表(会議録掲載以外)

- [40] Kazuhiko Kuroki, Hidetomo Usui, Seiichiro Onari, Ryotaro Arita, and Hideo Aoki: Pnictogen height as a switch between high Tc nodeless and low Tc nodal pairings in the iron-based superconductors (9th Int. Conf. on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S), Tokyo, Sep. 2009).
- [41] Hirokazu Takashima, Ryotaro Arita, Kazuhiko Kuroki and Hideo Aoki: Functional renormalization group beyond the static approximation and its application to the two-dimensional Hubbard model (*M2S*, Tokyo, Sep. 2009).
- [42] Takahiro Morimoto, Yasuhiro Hatsugai, Hideo Aoki: Optical Hall conductivity in the graphene quantum Hall system – what happens to a topological number in ac response (*IPMU Focus Week*, Kashiwa, Feb 2010).
- [43] Takashi Oka and Hideo Aoki: Photovoltaic Hall effect proposed for graphene — Hall effect in the absence of uniform B with a geometric origin (Int. Conf. on Magnetism, Karlsruhe, July 2009).
- [44] Takashi Oka and Hideo Aoki: Photovoltaic Hall effect and its topological origin (*TOPO09*, Dresden, July 2009).
- [45] Naoto Tsuji, Takashi Oka and Hideo Aoki: Photoinduced nonequilibrium steady state of correlated electron systems — Floquet + DMFT analysis (8th Int. Symp. on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Ferromagnets, Niseko, Sept 2009).
- [46] Takashi Oka and Hideo Aoki: Non-equilibrium Superconducting Transition in Correlated Electron Systems (*ISCOM09*, Niseko, Sept 2009).
- [47] Naoto Tsuji, Takashi Oka and Hideo Aoki: Photoinduced insulator-metal transition in correlated electron systems — a dynamical mean-field study, (Gordon Research Conf. Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems, Galveston, March 2010).
- [48] Yoshiro Nohara, Susumu Yamamoto and Takeo Fujiwara: GWA with LSDA+U and applications to transition metal oxides (*Int. Symp. on Electronic Structure Calculations*, Tokyo, Dec 2009).
- [49] Yoshiro Nohara, Kazuma Nakamura and Ryotaro Arita: Ab initio spin density functional calculation for potassium loaded Zeolite A (Satellite Meeting of 15th Int. Symp. on Intercalation Compounds, Beijing, China, May 2009).
- [50] Yoshiro Nohara, Kazuma Nakamura and Ryotaro Arita: Magnetism of potassium loaded zeolite A from first principles (*Int. Symp. on Electronic Structure Calculations*, Tokyo, Dec 2009).

(Colloquia, APS)

[51] Hideo Aoki: Theory of superconductivity in the iron-based oxypnictides (ETH Zürich, June 2009).

- [52] Takahiro Morimoto, Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Optical Hall conductivity for the graphene QHE in the honeycomb lattice model (*APS March meeting*, Portland, Mar 2010).
- [53] Naoto Tsuji, Takashi Oka and Hideo Aoki: Nonequilibrium dynamical mean-field analysis of strongly photoexcited states of a Mott insulator (APS March Meeting, Portland, Mar 2010).
- [54] Takashi Oka and Hideo Aoki: Mott insulators in strong electric fields studied by the generalized Bethe ansatz (*APS March Meeting*, Portland, Mar 2010).
- [55] Yoshiro Nohara, Kazuma Nakamura and Ryotaro Arita: Spin density functional study on magnetism of potassium-loaded Zeolite A (*APS March Meeting*, Portland, Mar 2010).

(国内会議)

招待講演

- [56] 青木秀夫:高温超伝導の現在と展望(KEK 理論研究 会シンポジウム、筑波、Mar 2010)。
- [57] 岡隆史: 強電場中の一次元強相関電子系の非平衡現象 と時間依存 DMRG (日本物理学会「密度行列繰り 込み群(DMRG)の新展開」シンポジウム、熊本、 Sept 2009)。
- [58] 岡隆史:強相関系光励起による物性制御とその展望 (日本物理学会「半導体のキャリアドーピングと光」 シンポジウム、岡山、 Mar 2010)。

一般発表

- [59] 黒木和彦、臼井秀知、大成誠一郎、有田 亮太郎、青 木秀夫:鉄系超伝導体におけるニクトゲンの高さと ペアリング対称性の相関(日本物理学会、熊本、Sept 2009)。
- [60] 榊原寛史,臼井秀知,黒木和彦,有田亮太郎A,青木 秀夫:La 系銅酸化物における d_{x2-y2} と d_{z2} 軌道混 成の超伝導に対する効果 (日本物理学会、岡山、 Mar 2010)。
- [61] 太田幸宏,町田昌彦,小山富男,青木秀夫:多バン ド超伝導・超流動におけるレゲット・モードとその dynamical class (日本物理学会、岡山、 Mar 2010)。
- [62] 奥村雅彦、山田進、町田昌彦、青木秀夫:密度行列繰
 り込み群による梯子状光学格子上の冷却フェルミ原
 子 スピン偏極構造(日本物理学会、岡山、Mar 2010)。
- [63] 河原林透,初貝安,弘青木秀夫:グラフェン n = 0 ラ ンダウ準位における異常性とカイラル対称性(日本物 理学会、岡山、 Mar 2010)。
- [64] 池辺洋平,森本高裕,枡富龍一,岡本徹,青木秀夫, 島野亮:量子ホール系における THz 周波数帯光学ホー ル効果の観測(日本物理学会、岡山、 Mar 2010)。
- [65] 小杉太一、三宅隆、石橋章司、有田亮太郎、青木秀 夫:ピセン結晶の電子状態の第一原理計算(日本物理 学会、熊本、Sept 2009)。

- [66] 小杉太一、三宅隆、石橋章司、有田亮太郎、青木秀 夫:ピセン結晶の電子状態の第一原理計算(配列ナノ 空間を利用した新物質科学研究会、東京、Jan 2010)。
- [67] Hideo Aoki: Photo-induced Hall effects in graphene — Optical Hall effect and photovoltaic Hall effect (筑波大学・KEK 連携研究会「グラフェ ン・グラファイトとその周囲の物理」、筑波, Nov 2009).
- [68] Hideo Aoki: Quantum Hall criticality in graphene (理研、Nov. 2009).
- [69] 森本高裕、初貝安弘、青木秀夫、蜂の巣格子模型に基づくグラフェン量子ホール系の光学ホール伝導度(日本物理学会、岡山、Mar 2010)
- [70] 岡隆史、青木秀夫:、光誘起ホール効果と非線形光学 応答 (日本物理学会、熊本、Sept 2009)。
- [71] 岡隆史、岸田英夫、青木秀夫:相関電子系における 非線形伝導の統一的理解:電子雪崩、電荷閉じこめ、 多体 Schwinger-Landau-Zener 機構 (日本物理学会、 岡山、Mar 2010)。
- [72] 辻直人、岡隆史、Philipp Werner、青木秀夫: ac 外 場によるフェルミオン多体相互作用の制御(日本物理 学会、岡山、Mar 2010)。
- [73] 辻直人、岡隆史、青木秀夫、ハバード模型における光 強励起非平衡状態の動的平均場解析(日本物理学会、 熊本、Sept 2009 年).
- [74] 辻直人、岡隆史、青木秀夫、動的平均場理論による光 電場下でのハバード模型の時間発展(京大基研研究会 「相関電子系における光誘起現象」、京都、Dec 2009).
- [75] 野原善郎、中村和磨、有田亮太郎: K クラスターを吸 蔵したゼオライト A の第一原理電子構造計算 2 (日 本物理学会、熊本、Sept 2009)。
- [76] 野原善郎、中村和磨、有田亮太郎、Kを吸蔵したゼオ ライト A の低エネルギー有効模型の構築と計算(日本物理学会、岡山、Mar 2010)。
- [77] 野原善郎、中村和磨、有田亮太郎、K クラスターを 吸蔵したゼオライト A の磁性研究 (物性科学領域横 断研究会、東京、Nov 2009)。
- [78] 野原善郎、中村和磨、有田亮太郎:第一原理計算による K 吸蔵ゼオライト A の磁性研究 (次世代スパコン物性科学分野研究会、東京、Mar 2010)。
- [79] 遠藤晋平、、岡隆史、青木秀夫:金属導波管ネットワークにおける強束縛フォトニック・バンドの発生とカゴメ格子における平坦フォトニック・バンド(日本物理学会、熊本、Sept 2009)。
- (学位論文)
- [80] Kazutaka Nishiguchi: Theory of superconductivity in multi-layered correlated electron systems (修士 論文, 2010年1月)。

3.2 宮下研究室

統計力学・物性基礎論を理論的に研究している。特に、(1)相転移・臨界現象や、秩序形成に伴う非平衡現象、(2)強く相互作用している量子系の秩序形態の特徴や時間的に変動する外場のもとでの量子ダイナミックス、などについて研究を進めている。

平成21年度は、協力現象の統計力学に関しては、 これまで我々のグループが提案してきた、構成要素 の体積変化によって生じる実効的長距離相互作用の もとでの新しいタイプの相転移・臨界現象に関して、 動的臨界現象における特異性や、長距離相互作用を 持つ系での境界条件の効果や、分子場理論の適用性 などについて研究を進めた。また、ミクロな電荷移 動による磁気的相関の機構についても研究を進めた。

量子統計力学に関しては、量子固体や量子スピン 系など新奇な量子状態、量子アニーリング、速い外場 掃引による対称性が破れた秩序状態の量子応答、周 期的外場のもとでのフロケ固有値の縮退と外場の時 間反転対称性の関係、遍歴性のある量子粒子系で特 異な量子状態の生成プロセスやその観測方法、さら には大きなスピンを持つ場合の高い対称性のもとで の遍歴磁性について調べた。また、S = 1/2より大 きなスピン系での可解模型の定式化についても研究 を進めた。さらには散逸効果のもとでの応答関数の 定式化や、熱伝導、輸送現象に関する一般理論構築、 などに関して研究を進めた。

3.2.1 長距離相互作用のもとでの協力現象 の研究

これまでの相転移の研究は、主に固定した格子点 上での自由度間の相互作用によるものが研究されて きているが、スピンクロスオーバー物質、あるいは 電荷移動による格子構造の変化を伴う物質では、格 子点上での自由度間の相互作用が格子自身の変形に よって実効的な長距離力となることを提唱し、その 効果を明らかにしてきた [1, 5, 6, 46]。このような系 は、磁場や光、圧力、温度などのパラメターによっ て複合的に系の状態を制御できるため機能材料と呼 ばれ、注目されている。このテーマについての実験 面の研究は、所が大越研との共同研究を行い、密接 な連携のもとで研究が進んでいる [25]。

これらの系では、相転移のタイプが分子場普遍性 と呼ばれるものとなることを発見し、その効果を明 らかにしてきた。21年度は、実際に表面をもつ有 限系(自由境界条件)のもとでこの長距離相互作用 がどのような効果をもたらすか、またスピノーダル 点や光照射によるスイッチングの際の閾値現象の動 的特異性がどのようなものになるか詳しく研究した。

まず、長距離相互作用のもとでのスピノーダル現 象の特異性をマスター方程式で定式化し短距離力の 場合と異なり真の相転移としての特異性を持つこと を明らかにした [17]。また、光照射によるスイッチ ングの際の閾値現象がスピノーダル現象と見なせる ことを明らかにし、実際のスピンクロスオーバー物 質をモデル化したシミュレーションによってそのス ケーリングなどを明らかにした [10]。これまでの研 究は、周期境界条件のもとで行われてきたが、長距 離相互作用のもとでは境界条件が本質的な役割をす ることを指摘し、自由境界条件の下での状態変化の 特徴について研究を進めている [5,47]。長距離相互 作用のもっとも典型的なモデルとして無限レンジ相 互作用系がよく用いられるが、そこでは距離という 概念がなく境界条件は意味を持たない。しかし、実 際の長距離相互作用では、表面は大きな意味を持つ ことが明らかとなった。このように長距離相互作用 の詳細によって現れる現象が多岐にわたることを明 らかにするため、長距離相互作用のタイプと平均場 理論との関係についても研究を進め、平均場近似が 成立しない状況があることを発見した [28]。



図 3.2.6: 自由境界条件の下でのユニット体積が大き な状態 (HS) から小さな状態 (LS) への緩和

3.2.2 量子統計力学の研究

量子系では、不確定性関係から古典系では見られ ない超流動や超伝導、量子スピン系での諸現象など 新奇な現象が見られる。それらの発見とその機構の 解明を進めている [12]。また、その動的現象にもト ンネル現象など特徴ある振る舞いが現れる。量子力 学のコヒーレントな運動は、古典的にはない様々な 特徴を備えており、その積極的制御は新しい情報操 作(量子情報)において重要な役割をする。われわ れはこれまで、動的な外場に対する量子力学的応答 をミクロな立場から研究し、離散準位系の状態変化 における Landau-Zener 理論の役割、またそこでの 散逸効果などを調べてきた [2]。量子ダイナミックス の機構、制御に関する統一的な理論的基礎付けを進 めるため、JST のクレストプロジェクトとして「量 子多体協力現象の解明と制御」を進めている。

超固体

超流動や超伝導の秩序状態は、古典的には対応の ない「非対角秩序」と呼ばれる位相の対称性が破れ る秩序状態である。それに対し、通常の空間的な位 置の対称性が破れる秩序状態は「対角秩序」と呼ば れる。ヘリウムの場合、前者は超流動状態であり、後 者は固体である。古くから、これら2つの秩序状態 が共存するかどうかが興味の対象になっており、超 固体 (super-solid)の問題として多くの研究がなされ て来た。我々は、この問題を格子上におかれたボー ス粒子からなる softcore Bose Hubbard model を用 いて研究し、3次元系(単純立方格子)では、固化お よび超流動状態が有限温度で出現すること、1,2 次元では存在しなかった低濃度での超固体が実現さ れることを発見した[3,26]。また、超固体状態の実 現において格子の存在の重要性を指摘した。

遍歴電子系での磁性・非磁性相転移

格子上の遍歴電子系における磁性に関しては、格 子数と電子数の関係でいわゆるモット絶縁体状態・長 岡強磁性の転移が知られている。この機構を利用し て、有限の電子クラスターにおいて格子の化学ポテ ンシャルを制御することで、その系の基底状態の全 スピンを変化させることが可能あることを示し、そ の2つの状態の間の断熱的移行過程の観測を光格子 にトラップされた粒子系や分子磁性などで実現する ことを提案してきた。この転移によって作られるス ピン状態は、全スピン最大で、磁化が0のいわゆる Dicke 状態に相当する状態であるが、その状態をど のように観測するかについて研究を進めた [42]。こ の状態は磁化が変化を起こす操作に大きな行列要素 を持っているが、通常の ESR などの吸収スペクトル では吸収、放出の相殺のため効果が現れない。そこ で、量子系としての光子場との相互作用などにおけ る動的性質を調べ、超放射に相当する応答が起こる ことを示した [28, 44, 45]。

また、光格子上では、スピン 1/2 の粒子のみなら ず、これまで議論されていなかった大きなスピン Sを持つ粒子系、フェルミ粒子系やボーズ粒子系も実 現し、それらの遍歴磁性の性質についても明らかに し、そこでは SU(2S+1)の対称性を反映した縮退を 持つ基底状態の出現を明らかにし、光格子系におけ る新しい磁性現象として提案している [11]。

量子スピン系:励起、ギャップ

量子状態の外場による状態操作を考える場合、パ ラメターの関数としてのエネルギー準位の構造が重 要な役割を果たす。特に、エネルギーの擬交差点で のエネルギーギャップの大きさはランダウ・ゼナー遷 移などで重要な役割を果たす。これまで、ハミルト ニアンのエネルギー準位におけるエネルギーの擬交 差を調べてきたが、周期的動的外場によって駆動さ れている系での動的振る舞いに関しても、時間発展 演算子(フロケ演算子)の固有値問題としてエネル ギーの擬交差の問題を調べている。特に、通常周期的 な外場によって誘起される Rabi 振動の周期が無限大 になるいわゆる coherent destrauction of tunneling (CDT)呼ばれる現象を固有値縮退の現象として特徴 づけ、外場の変化が時間に関して非対称の場合縮退 が解けることを示した。また、その固有値の擬交差 によって、動的駆動系におけるランダウ・ゼナー遷 移類似現象を明らかにした[16]。

横磁場イジング模型の秩序状態の量子ダイナミックス

横磁場イジング模型において、横磁場はいわゆる 量子ゆらぎの源泉となり、熱ゆらぎとタイプの違う ゆらぎとして重要な役割をする。この系の基底状態 において、量子相転移に伴う秩序変数が時間的に変 動する動的外場にどのような応答をするか調べてき た。特に、ある程度速い磁場掃引に関してヒステリ



図 3.2.7: 振動磁場の振幅を掃引した場合の磁化の運動。 速い掃引(、、)では磁化が振動し始める。実線は断熱 的な変化。

シスが現れることを発見し、量子スピノーダル現象 と呼んでその性質を調べた [4]。

また、このゆらぎを用いて通常の熱ゆらぎを利用 した熱的アニーリングではなく、量子アニーリング と呼ばれる方法が開発されてきているが、スピン間 にフラストレーションがある場合に、スピン秩序が どのように量子ゆらぎに反応するかについて調べて いる。

量子粒子移送

粒子をポテンシャルで捕捉し移送する際の量子効 果についても研究を進めている。この過程で加速中 に加速が粒子に与える効果はある種のトンネル効果 として捉えることができ、加速による粒子の散逸率 がトンネル率で表される。この効果に加えて、操作 自身を始める際に生じる初期擾乱による粒子の散逸 を研究している。この問題を加速中の実効ポテンシャ ルにおける共鳴問題として捉え、トンネル率をその 複素固有値として、また初期擾乱をスペクトル分解 の励起状態の占有率として定式化する方法を構築し ようとしている。この方法で、加速のスムーズさと 加速の最大値の関係から散逸率の最適化問題や励起 状態の粒子の除去機構などを調べている。

観測による状態操作

系にある種の断熱操作をし、状態の占有数は元に 戻るが位相が変わることを利用して状態を把握する 方法は非破壊測定として知られている。フランスの ENSのHaroche グループはキャビティ内の光子状態 と原子の相互作用を利用して光子状態を非破壊測定 する実験を行っている。そこで見つかった興味深い 性質として、測定全体としては、光子数分布は変化 しないが、原子の状態を測定することで光子状態は 影響を受け、何回かの測定の後では系は光子数が確 定した光子数状態と呼ばれる状態に収束することが わかった。この機構に関して、測定全体の集合の統 計的性質や、光子数状態への収束の証明を行い、観 測による状態操作という量子力学特有の現象を考察 した [27]。

大きなスピンを持つ可解系の研究

S = 1/2 より大きなスピン系での可解模型の定式 化についても研究を進め、高次スピンを持つ可積分 XXZ スピン鎖における相関関数の導出を行った。これにより、各サイトに任意のスピンを持つ可積分ス ピン鎖や、磁性不純物を含む系における相関関数・ 波動関数の表式が明らかになった [19, 20, 48]。

3.2.3 非平衡ダイナミックス、輸送現象

散逸がある系での応答関数

熱浴と相互作用している系のダイナミックスは熱 浴の自由度を捨象する射影演算子の方法で定式化さ れる。線形応答理論において、系の時間発展に散逸 効果を取り入れるためには、相関関数の時間発展を 純量子的なものではなく散逸がある系での量子マス ター方程式を用いなくてはならない。その定式化は これまで多く研究された来たが、マルコフ近似など 何らかの近似的取り扱いがされてきた。我々は熱浴 との相互作用の2次の範囲で射影演算子の方法に現 れるすべての効果を完全に相関関数の時間発展に取 り入れ、かつ具体的な数値計算が直接適応できる形 に定式化ができることを示し、いくつかの例につい て適用した [8, 43]。また、この定式化に関していく つかの方法があるがそれらを統一した観点から比較 検討した [18]。

また、フラストレートした系での、エネルギー障 壁がないにもかかわらずエントロピーに起因する緩 和現象についても研究した。[9] また、電荷ポリマー の凝縮ダイナミックスに関する分子動力学的研究も 行った。[15]

輸送現象

メゾスコピックスケールにおける、量子輸送現象 のカレント揺らぎなどを研究した [13, 21, 22]。以前 理論的に量子熱輸送や電子輸送現象を考察し、任意 の次数のカレント揺らぎを生成する生成汎関数に対 して一般的な対称性を導出した。それを用いること で、輸送係数間に普遍的な関係式を導くことができ る。我々は実験家と協力して、これらの関係式の検 証実験を行った [22]。また、メゾスコピックスケール の分子を電流で冷却するメカニズムも提唱した [23]。

カーボンナノチューブに代表されるように、低次元 系では熱伝導現象は、フーリエの法則が成立しない 異常輸送現象を示す。どのようなメカニズムでフーリ エの法則が成立するかという問題は、非平衡統計力 学における最も重要な課題の一つである。その一つ として次元の重要性がこれまで指摘されてきた。次 元の重要性を示すために、大規模な数値計算を行い、 熱伝導現象の次元クロスオーバー現象を考えた。そ の結果2次元系では、熱流は発散を示すが3次元系 では、フーリエの法則が成立する兆候が見えた[24]。 最近グラフェーンシートを用いた熱伝導現象の次元 クロスオーバー現象が実験でも確認され、我々の数 値計算と整合した実験結果が報告されている。

量子カオス

古典系と量子系とのダイナミクスの違いとして、 カオスの問題がある。カオスは古典系では、軌道の 初期値敏感性を定量的に評価するリアプノフ指数に より特徴づけが可能だが、量子系ではそのような初 期値敏感性がない。カオスの量子古典対応の研究は、 統計力学における非常に大きな問題である。古典系 のカオスの名残は量子系では、量子準位の統計性に 現れ、その対称性に応じて、その統計性はランダム 行列のそれに一致するということが、経験的に知ら れている。我々はその経験則を、時間反転対称性のあ るカオス系から磁場を入れることによって時間反転 対称性のないカオス系に移るクロスオーバー領域で 考え、その普遍性を解析的に議論した。状態密度の 相関関数のフーリエ変換で定義されるフォルムファ クターを考え、そのランダム行列による非線形シグ マモデルを導出する。そのダイアグラム展開は実は、 半古典周期軌道論の周期軌道と1対1対応があるこ とが見出される。これにより、フォルムファクター における $\tau < 1$ だけでなく $\tau \ge 1$ をも説明する理論 を構築した[14]。

<受賞>

森貴司 平成21年度理学系研究科研究奨励賞(修士)

<報文>

(原著論文)

- M. Nishino, K. Boukheddaden, and S. Miyashita, Molecular dynamics study on thermal expansion and compression of spin-crossover solids by a microscopic model of elastic interactions, Phys. Rev. B 79, 012409 (1-4) (2009).
- [2] S. Miyashita, S. Tanaka, H. de Raedt, and B. Barbara, Quantum response to time-dependent external field, J. Phys.Conf. Ser. 143, 012005 (1-10) (2009).
- [3] Keisuke Yamamoto, Synge Todo, and Seiji Miyashita, Successive phase transitions at finite temperatures toward the supersolid state in a three-dimensional extended Bose-Hubbard model, Phys. Rev. B **79**, 094503 (1-6) (2009).
- [4] S. Miyashita, H. De Raedt and B. Barbara, Quantum spinodal phenomena, Phys. Rev. B 79, 104422 (1-11) (2009).
- [5] S. Miyashita, M. Nishino, Y. Konishi, H. Tokoro, K. Boukheddaden, F. Varret and P. A. Rikvold, New type of ordering process with volume change of molecules in the spin-crossover transition, and its new aspects of dynamical processes, J. Phys. Conf. Ser. 148, 012027 (1-6) (2009).
- [6] M. Nishino, K. Boukheddaden, S. Miyashita, and F. Varret, Dynamical property of nucleation in spin crossover depending on the system boundary, J. Phys. Conf. Ser. **148**, 012034 (1-3) (2009).
- [7] S. Muratsugu, K. Sodeyama, F. Kitamura, M. Sugimoto, S. Tsuneyuki, S. Miyashita, T. Kato and H. Nishihara, Two-Electron Reduction of a Rh-Mo-Rh Dithiolato Complex to Form a Triplet Ground State Assosiated eith a Change in CO Coordination Mode, J. Am. Chem. Soc., 131, 1388-1389 (2009).
- [8] C. Uchiyama, M. Aihara, M. Saeki, and S. Miyashita, Master equation approach to line shape in dissipative systems Phys. Rev. E 80 021128 (1-16) (2009). C. Uchiyama, M. Aihara, M. Saeki, and S. Miyashita, Pulisher's note Phys. Rev. E 80 039901.
- [9] Shu Tanaka and Seiji Miyashita, Mechanism of Slow Relaxation due to Screening Effect in a Frustrated System, J. Phys. Soc. Jpn. 78 084002 (1-7) (2009).

- [10] S. Miyashita, P. A. Rikvold, T. Mori, Y. Konishi, M. Nishino and H. Tokoro, Threshold phonomena under photoexcitation of spin-crossover materials with cooperativity due to elastic interaction Phys. Rev. B 80 064414 (1-6) (2009).
- [11] S. Miyashita, M. Ogata, abd H. De Raedt, Nagaoka ferromagnetism in large-spin fermionic and bosonic systems Phys. Rev. B 80 174422 (1-6) (2009).
- [12] Keigo Hijii and Kiyohide Nomura, Phase transition of S=1/2 two-leg Heisenberg spin ladder systems with a four-spin interaction, Phys. Rev. B 80, 014426 (1-6) (2009).
- [13] Yasuhiro Utsumi and Keiji Saito, Fluctuation Theorem in a Quantum-Dot Aharonov-Bohm Interferometer, Phys. Rev. B 79, 235311 (1-9) (2009).
- [14] Keiji Saito, Taro Nagao, Sebastian Muller, Petr Braun, Semiclassical Theory for Universality in Quantum Chaos with Symmetry Crossover, Journal of Phys. A: Math. Theor. 42, 495101 (1-22) (2009).
- [15] H. Takano, I. Baba, Dai Kubota and , S. Miyashita, Counterion Condensation and Self-Condensation of Single Polyelectrolytes, J. Phys. soc. Jpn. **79** 013801 (1-4) (2010).
- [16] Keigo Hijii and Seiji Miyashita, Symmetry for the nonadiabatic transition in Floquet states, Phys. Rev. A 81, 013403 (1-7) (2010).
- [17] Takashi Mori, Seiji Miyashita, and Per Arne Rikvold, Asymptotic forms and scaling properties of the relaxation time near threshold points in spinodal-type dynamical phase transitions, Phys. Rev. E 81, 011135 (1-10) (2010).
- [18] Mizuhiko Saeki, Chikako Uchiyama, Takashi Mori, and Seiji Miyashita, Comparison among various expressions of complex admittance for quantum systems in contact with a heat reservoir, Phys. Rev. E 81, 031131 (1-33) (2010).
- [19] Tetsuo Deguchi and Chihiro Matsui, Form factors of integrable higher-spin XXZ chains and the affine quantum-group symmetry, Nucl. Phys. B 814, 405-438 (2009).
- [20] Tetsuo Deguchi and Chihiro Matsui, Correlation functions of the integrable higher-spin XXX and XXZ spin chains through the fusion method, Nucl. Phys. B 831, 359-407 (2010).
- [21] Y. Utsumi, DS. Golubev, M.Marthaler, K.Saito, T. Fujisawa, Gerd Schon, Bidirectional Single-Electron Counting and the Fluctuation Theorem Phys. Rev. B 81, 125331 (1-5) (2010).
- [22] S. Nakamura, Y. Yamauchi, M. Hashisaka, K. Chida, K. Kobayashi, T. Ono, R. Leturcq, K. Ensslin, Keiji Saito, Y. Utsumi, A.C.Gossard, Phys. Rev. Lett. **104**, 080602 (1-4) (2010).
- [23] Michael Galperin, Keiji Saito, Alexander V. Balatsky, and Abraham Nitzan, Cooling mechanisms in molecular conduction junctions, Phys. Rev. B 80, 115427 (1-12) (2009).
- [24] Keiji Saito and Abhishek Dhar, Heat conduction in a three dimensional anharmonic crystal, Phys. Rev. Lett. 104, 040601 (1-4) (2010).
- [25] (Hiroko Tokoro: experimental studies) S. Ohkoshi, Y. Tsunobuchi, T. Matsuda, K. Hashimoto, A. Namai, F. Hakoe, and H. Tokoro, Synthesis of a metal oxide with a room temperature photo-reversible phase transition, Nature Chem. in press. T. Mahfoud, G. Molnar, S. Bonhommeau, S. Cobo, L. Salmon, P. Demont, H. Tokoro, S. Ohkoshi, K. Boukheddaden,

and A. Bousseksou, Electric Field-Induced Charge-Transfer Phase Transition: A Promising Approach Toward Electrically Switchable Devices, J. Am. Chem. Soc. 131, 15049 (2009). K. Takeda, H. Tokoro, A. Yamaguchi, and S. Ohkoshi, Absolute quantitation of magnetization of individual micron-sized magnets using a high-temperature superconductor micro-SQUID magnetometer, Supercond. Sci. Technol. 23, 045006 (2010). N. Tate, H. Tokoro, K. Takeda, W. Nomura, T. Yatsui, T. Kawazoe, M. Naruse, S. Ohkoshi, and M. Ohtsu, Transcription of optical near-fields by photoinduced structural change in single crystals for parallel nanophotonic processing, Appl. Phys. B 98, 685 (2010). W. Kosaka, H. Tokoro, T. Matsuda, K. Hashimoto, and S. Ohkoshi, Extremely gradual spin-crossover phenomenon in cyano-bridged Fe?Mo bimetallic assembly, J. Phys. Chem. C 113, 15751 (2009). R. Fukaya, M. Nakajima, H. Tokoro, S. Ohkoshi, and T. Suemoto, Photoinduced charge-transfer process in rubidium manganese hexacyanoferrate, J. Phys. 131, 154505/1-9 (2009). T. Suemoto, K. Ohki, R. Fukaya, M. Nakajima, H. Tokoro, and S. Ohkoshi, Dynamics of the charge transferred states relevant to magnetic phase transition in rubidium manganese hexacyanoferrate, J. Lumin. 129, 1775 (2009).

- [26] Keisuke Yamamoto: Study on the Coexistence of Diagonal and Off-Diagonal Long Range Order in Lattice Bose Systems, Doctor Thesis, The University of Tokyo (2010).
- [27] Sinsuke Fujisawa: Successive Measurements and Control of Quantum Systems, Master Thesis, The University of Tokyo (2010).
- [28] Takashi Mori: Dynamical Properties of the Order Parameter in Long Range Interacting Systems, Master Thesis, The University of Tokyo (2010).

(会議抄録)

- [29] Kenichi Kurihara, Shu Tanaka, and Seiji Miyashita, Quantum Annealing for Clustering, Proceedings of the 25th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI25).
- [30] Issei Sato, Kenichi Kurihara, Shu Tanaka, Hiroshi Nakagawa, and Seiji Miyashita, Quantum Annealing for Variational Bayes Inference, Proceedings of the 25th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI25).

(国内雑誌)

- [31] 齊藤圭司,非平衡輸送現象:輸送現象における計数統 計を学ぶための基礎 (講義ノート),物性研究 92(4), 345-376 (2009).
- [32] H. Tokoro, and S. Ohkoshi, Photo-induced phase transition in RbMnFe Prussian blue analog-based magnet, Progress in Nano Electro-Optics VII; Springer Series in Optical Science 155, 1 (2009).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

[33] Kenichi Kurihara, Shu Tanaka, and Seiji Miyashita, Quantum Annealing for Clustering, The 25th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI25) Motreal, Canada, 2009/06/18-21.

- [34] Issei Sato, Kenichi Kurihara, Shu Tanaka, Hiroshi Nakagawa, and Seiji Miyashita, Quantum Annealing for Variational Bayes Inference, 同上 (UAI25).
- [35] Shu Tanaka, Issei Sato, Kenichi Kurihara, Hiroshi Nakagawa and Seiji Miyashita, Quantum Annealing for Informational Engineering Problems – Clustering and Quantum Bayes Inference –, Dynamics and Manipulation of Quantum Systems (DMQS2009), Tokyo, 2009/10/13-16.
- [36] K. Hijii, Symmetry for the Nonadiabatic Transition in Floquet States, 同上 (DMQS2009).
- [37] T. Mori , ESR Peak Intensity of Coherent Spin Systems, 同上 (DMQS2009).
- [38] K. Yamamoto , The Dynamical Property of the Supersolid State, 同上 (DMQS2009). 2009/10/13-16
- [39] S. Fujisawa, Ensemble Analysis for Progressive Field Collapses in Quantum Non-Demolition Measurement, 同上 (DMQS2009).
- [40] T. Fujiwara , Spin alignment due to quantum charge fluctuation, 同上 (DMQS2009).
- [41] H. Tokoro, and S. Ohkoshi Photo-induced phase collapse in a rubidium manganese hexacyanoferrate European Conference on Molecular Magnetism ECMM 2009, ブロツラフ技術大学 (ポーラン ド), 2009/10/4-7.

招待講演

- [42] S. Miyashita , Dynamical Realization of Nagaoka Ferromagnetism in an optical lattice, 5th International Workshop on Nanomagnetism and Superconductivity, Coma-Ruga, Spain, 2009/07/05-09.
- [43] S. Miyashita, Master equation approach to line shape in dissipative systems -Extension of Nagata-Tazuke theorem to the triangle molecule-, Molecular Photoscience Research Center International Workshop "Electron Magnetic Resonance of Strongly Correlated Spin Systems", Kobe, 2009/11/08-09.
- [44] S. Miyashita, Time-resolve ESR under Adiabatic Changes with Sweeping Fields, Joint IMR International Symposium High Magnetic Field Spin Science in 100T VI Application of High Magnetic Field for Condensed Matter and Material Sciences, Sendai, 2009/12/07-09.
- [45] S. Miyashita , Novel Quantum Properties of Systems with Large Total Spins, Waseda Meeting "Quantum Technologies: Information and Communication", Tokyo, 2009/12/09-11.
- [46] S. Miyashita, "Cooperative dynamics and threshold phenomena with long-range interactions", International Workshop of Phase transition and Dynamical properties of Spin Transition Materials (PDSTM2010), Tsukuba University, 2010/2/6.
- [47] M. Nishino (NIMS), C. Enachescu, S. Miyashita (Tokyo Univ.), K. Boukheddaden, F. Varret "Nontrivial effects of the boundary condition for ordering in spin-crossover phenomena", 同上 (PDSTM2010).

[48] Chihiro Matsui, Tetsuo Deguchi, and Seiji Miyashita, A relation between integrable models of quantum and classical statistical mechanics, Conformal Field Theory, Integrable Models and Liouville gravity, Chernogolovka, 2009/06/27-07/02.

(国内会議)

一般講演

- [49] 田中宗, 栗原賢一, 宮下精二, 量子アニーリング法を 用いたクラスタ分析, DEX-SMI研究会:情報統計力 学の広がり:量子・画像・そして展開,北海道大学, 2009/07/06-08.
- [50] Chihiro Matsui and Seiji Mitashita, Control of Hamiltonians of quantum integrable systems by classical integrable systems, Infinite Analysis 09, Kyoto, 2009/07/27-31.
- [51] Chihiro Matsui, Correlation functions for higher spin integrable systems, Condensed Matter Physics Meets High Energy Physics, IPMU, 2010/02/08-12.
- [52] 齊藤圭司, 3 次元 FPU 格子の熱伝導, 日本物理学会 2009 秋季大会, 熊本大学, 2009/09/24-27.
- [53] 齊藤圭司,弱いスピン軌道相互作用のある量子ドット系でのカオス伝導:半古典解析,同上(2009秋季 大会).
- [54] 齊藤圭司, 対称性のクロスオーバー領域におけるカオ スの量子古典対応:非線形シグマモデルと周期軌道 論,同上(2009秋季大会).
- [55] 西野正理, 宮下精二, K. Boukheddaden, F. Varret, 光誘起相転移現象を示すスピンクロスオーバー系の ヒステリシス現象の特徴,同上(2009秋季大会).
- [56] 山本啓介,宮下精二,超固体状態の揺動に対する性質, 同上(2009 秋季大会).
- [57] 肘井敬吾, 宮下精二, 非対称周期外場中の非断熱遷移, 同上(2009 秋季大会).
- [58] 田中宗,佐藤一誠,栗原賢一,中川裕志,宮下精二,量子 アニーリング法を用いた変分ベイズ推定,同上(2009 秋季大会).
- [59] 田中宗, 栗原賢一, 宮下精二, 量子アニーリング法を 用いたクラスタ分析, 同上(2009秋季大会).
- [60] 松井千尋,宮下精二,転送行列における補助空間の状態数による量子系ハミルトニアンの制御,同上(2009秋季大会).
- [61] 所裕子,斉藤晋太郎,大越慎一,RbMnFeシアノ錯体 ナノ微粒子における電荷移動相転移,同上(2009秋 季大会).
- [62] 佐藤一誠,栗原賢一,田中宗,宮下精二,中川裕志, Latent Dirichlet Allocation の量子アニーリング変 分ペイズ学習,第12回情報論的学習理論ワークショッ プ(IBIS2009),九州大学,2009/10/19-21.
- [63] 田中宗,宮下精二,カゴメ反強磁性体における異常強磁性相と動的性質,第3回物性科学領域横断研究会, 東京大学,2009/11/29-12/01.
- [64] 田中宗, 佐藤一誠, 栗原賢一, 中川裕志, 宮下精二, 熱 ゆらぎ・量子ゆらぎ同時制御型量子アニーリング法の 開発, 物性研究所 短期研究会 計算物理学, 東京大学 物性研究所, 2009/12/10-11.

- [65] 田中宗, 宮下精二, 平成 21 年度領域成果報告会(特定 領域:フラストレーションが創る新しい物性), 京都大 学, 2010/01/07-09.
- [66] 宮下精二 (東大), 電子スピン共鳴を用いた量子コヒー レント状態の観測、第48回電子スピンサイエンス学 会年会(SEST2009), 神戸大学, 2009/11/10-12.
- [67] 宮下精二 (東大)、動的外場による量子状態制御、 JST/CREST "量子情報処理システムの実現を目指し た新技術の創出"領域ワークショップ、熱海、2009/12.
- [68] M. Nishino (NIMS), C. Enachescu, S. Miyashita, K. Boukheddaden, and F. Varret, "Dynamical properties of nucleation and clustering in spincrossover solids",同上(量子情報ワークショップ).
- [69] T. Mori and S, Miyashita, ESR Intensity of the Coherent Spin Systems, 同上 (量子情報ワークショッ プ).
- [70] K. Hijii and S. Miyashita, Nonadiabatic transition under an asymmetrically periodic field, 同上 (量子 情報ワークショップ).
- [71] T. Fujiwara and S. Miyashita, Spin Alignment due to Quantum Charge Fluctuation, 同上 (量子情報 ワークショップ).
- [72] S. Fujisawa and S. Miyashita, Ensemble analysis for progressive field collapses in quantum nondemolition measurement, 同上 (量子情報ワークショ ップ).
- [73] K. Yamamoto and S. Miyashita, The dynamical properties of the supersolid state, 同上 (量子情報 ワークショップ).
- [74] 齊藤圭司, Figure of Merit 増大の微視的メカニズム の考察, 古典および量子ダイナミックス・非平衡統計 力学に関するワークショップ, 東京, 2010/02/12-14.
- [75] 肘井敬吾,「Floquet 状態間の非断熱遷移」,同上(東 京大学ワークショップ).
- [76] 森 貴司,「長距離相互作用系と平均場モデル」,同 上(東京大学ワークショップ).
- [77] 森 貴司,宮下精二,「長距離相互作用系における 平均場モデルの普遍性」、次世代ナノ統合シミュレー ションソフトウェアの研究開発 第4回公開シンポジ ウム、岡崎,2010/03/04
- [78] 藤原知也,宮下精二,「電荷の量子ゆらぎによるスピン相関の発達」,同上(岡崎シンポジウム).
- [79] 宮下精二,森 貴司,「全スピン(S)が変化する過 程とその観測」,日本物理学会第65回年次大会,岡山 大, 2010/03/20-23.
- [80] 西野正理 (NIMS), 宮下精二, K. Boukheddaden, F. Varret, 「スピンクロスオーバー系における長距離相 互作用の効果」, 同上(第65回年次大会).
- [81] 藤原知也,宮下精二,「電荷の量子ゆらぎによるスピン相関の発達」,同上(第65回年次大会).
- [82] 藤澤慎介,宮下精二,「共振器中の光子数の測定にお ける波束の収縮過程の統計的解析」,同上(第65回 年次大会).
- [83] 田中 宗,宮下精二,「積層カゴメ反強磁性体におけ る異常強磁性相と秩序化過程」,同上(第65回年次 大会).
- [84] 森 貴司, 宮下精二,「長距離相互作用系と平均場 モデルの関係について」,同上(第65回年次大会).

- [85] 松井千尋, A. G. Bytsko,「テンソル積空間の既約部 分空間に対するq(sl2)第数の作用について」, 同上(第65回年次大会).
- [86] 所裕子,大越慎一 CuMo オクタシアノ錯体における 光誘起電荷移動相転移日本物理学会 2009 第 65 回年 次大会、岡山大学、2010/3/20-23.

招待講演

- [87] 齊藤圭司,量子輸送現象における計数統計と揺らぎの 定理,東大GCOE「未来を拓く物理科学結集教育研究 拠点」先端融合物理「非平衡・生命」研究グループ・ ワークショップ,2010/03/30.
- [88] 所裕子、光応答物質における相転移ダイナミクス、 SPring-8 次期計画 2019 シンポジウム ~光科学の明 日~,東京ステーションコンファレンス, 2009/06/19.
- [89] 所裕子, Photomagnetic phenomena in rubidium manganese hexacyanoferrate, The 3rd Japanese-Russian Workshop on Open Shell Compounds and Molecular Spin Devices, 淡路国際会議場 (日本), 2009/11/15-18.
- [90] 所裕子, Novel transition phenomena in cyanobridged metal assemblies, Phase transition and Dynamical properties of Spin Transition Materials 2010, 筑波大学 (日本), 2010/02/6-8.
- (セミナー)
- [91] 齊藤圭司,3次元非線形格子の熱伝導とその周辺の話 題,京大基礎物理学研究所2009年12月.
- [92] 齊藤圭司, Counting Statistics and Fluctuation Theorem, ブリュッセル自由大学, 2009 年 11 月.
- [93] 齊藤圭司, Counting Statistics and Fluctuation Theorem, テルアビブ大学, 2010 年 2 月.

3.3 小形研究室

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

3.3.1 高温超伝導の理論

強相関電子系としての高温超伝導

高温超伝導研究のためには、典型的な強相関モデ ルである *t-J* モデルを調べればよい。このモデルは 銅酸化物の実験から自然に得られるものである。し かし、一方でハバードモデルというものも高温超伝 導の近似的モデルとしてよく議論されている。これ ら2つのモデルの関係を明らかにし、強相関電子系 の中での高温超伝導の位置づけをはっきりさせるこ とも面白い問題である。我々はハバードモデルにお いても、強相関領域であれば、ドープされたモット 絶縁体のモデルと成り得るということを具体的な計 算によって示した。実際、同じサイト上でのクーロ ン斥力の大きさ U を変化させると、U の小さい弱相 関の領域とUの大きい強相関の領域とで非常に大き く系の振舞いが異なっていることがわかった。さら に、弱相関領域ではほとんど超伝導は見られず、強 相関領域でかつ弱相関に移ろうかというようなパラ メータのときに $d_{x^2-y^2}$ -波超伝導が最も強く現れると いうことが明らかになった。このことは *t-J* モデル の計算と完全に一致する。[25,48]

高温超伝導体における実空間不均一性と2 ギャップ

最近の高温超伝導体の研究において、運動量空間 での2種類のギャップの存在が実験的に見出され、大 きな謎として活発に議論されている。これは超伝導 秩序変数以外に、何か「隠れた秩序変数」があるので はないかという意味において非常に興味が持たれて いる。一方、走査型トンネル分光 (STS)の研究にお いては、実空間での大きな不均一性が見出されてい る。これらの高温超伝導体での2つの異常物性を微 視的な観点から理解するために、実空間での乱れを 持つ t-J モデルを調べた。とくに短距離の反強磁性 秩序変数を導入すると、実験で見られているような 運動量空間での2ギャップの特徴が得られることがわ かった [33, 51]。また、t-J モデルの変分波動関数を 徹底的に最適化することによって、長距離クーパー 対の効果によっても、擬ギャップに関する2ギャップ 的振舞いが生じるということもわかった[1]。これら の考え方を組み合わせることによって、実空間不均 ー性と2ギャップの存在という2つの高温超伝導体 での謎が解明されるのではないかと期待される。

多層系銅酸化物超伝導体の理論

銅酸化物高温超伝導体は、2次元平面をなす CuO₂ 面におけるキャリアが超伝導になると考えられてい る。さらに、unit cell 内の CuO₂ 面の数が1枚のも の、2枚のもの、3枚のものなどというように異なる 物質も合成されている。この CuO₂ 面の枚数によっ て、超伝導転移温度や、相図中での反強磁性相と超 伝導相の位置関係などが異なることが知られている。 この問題に対して、多層系の*t-J*モデルを考え、RVB 平均場理論をもとに相図や超伝導転移温度、反強磁 性との関連などを調べた。得られた結果は実験結果 と定性的に一致することが示された。[28]

3.3.2 新超伝導体:鉄砒素系超伝導に対す る理論

2008年の発見以来、世界的に注目を集めている鉄 砒素系超伝導体に関して、いくつかの角度から超伝 導発現のメカニズムおよび特徴のある磁性に関して の理論的研究を行っている。

鉄砒素系超伝導における非遮蔽効果の理論

鉄砒素系 (鉄ニクタイド) 超伝導の微視的機構と して、従来のスピンゆらぎによるメカニズムに加え、 新たにクーロン相互作用のスクリーニング効果を考 慮した理論を構築した。今までの実験結果によると、 電子をドープすることによって、系の状態密度が減少 するにも関わらず超伝導転移温度はあまり変化しな い。この結果は、単純な BCS 理論では理解できない。 しかしクーロン相互作用の"非遮蔽効果 (unscreening) effect)"というものを考慮すれば、この効果のために 超伝導転移温度が上昇するということがわかった。 方、磁気的な長距離秩序に関しては、電子ドープに よってネスティングが破れるために、スピン密度波 の転移温度が下降するということもわかった。これ らの結果は、鉄ニクタイド超伝導体で観測されてい る、光電子分光と核磁気緩和率の不思議な振舞いに 対して、明確な説明を与えたといえる。[45,46]

鉄砒素系超伝導における超伝導ギャップ関数

鉄系超伝導体に対する実験では、超伝導ギャップ関数の構造に関して、ノードの有無などの多様性が見出されている。これらのことを理解するために、超伝導ギャップ関数の簡潔な表現の構築を試みた(図)。通常よく用いられるバンド表示ではなく、軌道表示というものを用いることによって、実験の多様性をカバーしつつ微視的な理論計算とのつながりが明快



図 3.3.8: RPA で得られた $d_{zx/yz}$ 軌道 (上) と $d_{x^2-y^2}$ 軌道 (下) のギャップ関数。軌道表示ではこのように 単純になる。

となるような表式を得ることができた [4,43,60]。また、この結果を応用して超伝導状態の核磁気緩和率の計算を行い、コヒーレンスピークの消失や転移温度直下のベキ乗則などの実験結果について自然な解釈を与えることに成功した。[22,34]

鉄砒素系超伝導での遍歴電子による磁気特性

鉄砒素系超伝導体における磁性については、超伝 導発現メカニズムとの関連で非常に興味が持たれて いる。そこで、スピン揺らぎのドーピング依存性、お よび磁性の起源が遍歴電子によるものであるか局在 モーメントの発現を伴うのかについて調べた。具体的 には、非弾性中性子散乱の実験と直接比較できる物理 量であるスピン励起スペクトル $S(\mathbf{q},\omega)$ を、遍歴電子 を出発点としたモデルを用いて計算した。その結果、 バンド構造として現実的なものを用いれば、実験結 果を再現できるということを見い出した[3,29,30]。 また鉄系超伝導体が典型的な多軌道系であることを 考慮し、スピン揺らぎに対して軌道自由度が果たす 役割についても研究を行った。その結果、スペクトル のピーク位置のドーピング依存性などに対して、多 軌道性が重要な役割を果たしていることを見い出し た[29,30]。さらに、磁気秩序相にみられるスピン空 間での異方性の原因として、スピン軌道相互作用を 取り上げて調べた。まず、スピン軌道相互作用のバ ンド構造への影響について調べ、縮退の破れ方など に関し鉄系超伝導体に特有な強い軌道混成を反映し た興味深い結果が得られた[52]。

3.3.3 有機導体に関する理論

有機導体(分子性導体)は相関の強い電子系のモ デル物質であると考えられるが、そこで起こる特異 な現象や超伝導に関する研究を行なっている。

くりこみ群による磁場中擬一次元超伝導の理論

これまでに開発してきた N 鎖くりこみ群の方法を 磁場中に拡張し、擬一次元超伝導の性質を調べた。後 方散乱 g₁ が前方散乱 g₂ より大きな領域では、これま で見出されていなかったような p 波スピン三重項超 伝導が磁場によって誘起されることがわかった。この 新しい p 波超伝導は、スピンや電荷のゆらぎによっ て実現する従来型の超伝導とは全く異なる発現機構 によるものであることが明らかとなった。[39, 41, 68]

異方的三角格子スピン系における時間反転対称性の 破れたスピン液体状態

等方的な三角格子スピン系の基底状態は、隣接し たスピンが 120 度ずつ傾いた長距離秩序状態である と考えられている。この状態は正三角格子のときに 特異的に実現するものであり、空間的異方性や長距 離相互作用などによって、この磁気秩序は溶けてス ピン液体状態が生じ得る。実際、空間的異方性が僅 かにでもあると、フラストレーションを緩和するた めに相互作用の異方性が実効的に強まり、一次元化 や正方格子化が生じる可能性がある。我々は、異方 的三角格子スピン系を RVB 平均場近似で解析し、比 較的広いパラメータ領域において、スピン液体状態 や有限温度での物理量の一次元化、または正方格子 化を見出した [17, 70]。さらに RVB 平均場近似では 扱えないような量子ゆらぎを取り込むことが可能な 変分モンテカルロ法による解析も行い、一次元化お よび正方格子化の傾向が強まることを示した。異方 性を取り入れた複素ギャップ関数をもつ BCS 波動関 数を試行波動関数として用いたところ、正三角格子 近傍ではそのギャップ関数が複素成分を持つことが 分かった [24,38]。これはスピン液体状態の時間反転 対称性が破れていることを示しており、非自明な物 理の可能性を示唆している。

非平衡状態での電荷秩序状態

θ-型有機導体という物質群は、伝導面が2次元異方 的三角格子を組んだ系であり、多くの系において電 荷秩序が見出されている。その1つである θ-(BEDT-TTF)2X という物質群では、格子が三角格子的であ るために最近接相互作用 V にフラストレーションが あり、ストライプ型の電荷秩序と3倍周期の電荷秩序 がエネルギー的に拮抗していることが分かっている。 この状況下で系に電流を流した場合、電荷秩序の融 解と思われる現象が実験的に見出されており、サイ リスタ現象とともに非常に興味が持たれている。こ の現象を理解するために、非平衡グリーン関数理論 を基礎に、定常非平衡 Hartree 近似法というものを 定式化し、θ-型有機導体に適用した。その結果、金 属状態である3倍周期の電荷秩序は電場によってほ んの少し安定化され、絶縁体状態であるストライプ 型の電荷秩序は影響を受けないということが示され た。一方、3倍周期の電荷秩序の振幅自体は電場に

よって少し減少する。このことが実験を説明できる 可能性があるということを指摘した。[2]

保存近似を考慮した Hatree-Fock 近似での電荷秩 序相転移

 θ -(BEDT-TTF)₂X の有機導体を念頭に、低次元 分子性導体でみられる電荷秩序現象の機構について、 新たな観点からの研究を行った。電荷秩序化現象は、 これまで主に平均場計算を用いて研究されてきたが、 Hartree 近似を用いた場合と Fock 項まで考慮した場 合とを比較すると、得られる電荷秩序のパターンや 電荷秩序転移の相図が異なることが知られている。 このことは分子性導体において Fock 項の考慮が必 要であることを示している。しかし、これまで有限 温度での研究で用いられている乱雑位相近似(RPA) は、Baym-Kadanoff流の保存近似に基づけばHartree 近似を行っていることに対応する。そこで、我々は Hartree-Fock 近似が Baym-Kadanoff の保存則を満 たすことに着目し、感受率を全ての波数で計算する という手法を用いることによって、Fock 項を考慮す ることにした。その結果、電荷秩序転移が抑制され ること、および、低温の電荷秩序相の波数は、Fock 項によるフェルミ面の変形のために乱雑位相近似の 結果からずれることなどがわかった。[40, 53, 64]

3.3.4 超伝導体の理論

空間反転対称性が破れた系の磁性と超伝導

CePt₃Si という空間反転対称性の破れた系で超伝 導が発見され、注目を集めている。このような系で は偶パリティと奇パリティの対が混じることが知ら れている。この系を調べるためにまず、CePt₃Siの 電子構造とスピン軌道相互作用を記述する周期アン ダーソンモデルおよびハバードモデルを構成し、乱 雑位相近似による解析を行なった。CePt₃Si では超 伝導と反強磁性が共存するが、この物質が示す多く の異常物性の原因は、この反強磁性との共存にある ことを示した。またスピン軌道相互作用の幾何学的 性質から超伝導ギャップにラインノードが生じるこ とを示した。[50]

FFLO 超伝導から生じる反強磁性秩序

FFLO 超伝導とは並進対称性が自発的に破れた超 伝導状態である。この状態は理論的に昔から予言さ れていたが、現実の物質でその可能性が見出されて きたのは、ごく最近の $CeCoIn_5$ の低温高磁場超伝導 相が発見されてからである。この系では、FFLO 相 と考えられた状態の中に反強磁性秩序が見つかって いる。本研究では、FFLO 超伝導状態に特有のアン ドレーエフ束縛状態が磁性の引き金になっているこ とを示した。つまり、この新しい超伝導相は FFLO 超伝導であり、その中で反強磁性秩序が生じたもの であることがわかった。[11, 19, 37]

ランダム電子系における FFLO 超伝導・超流動

ランダムネスがある環境下における FFLO 超伝導・ 超流動の実空間構造を Bogoliubov-de Gennes 方程 式に基づいて調べ、その結果がランダムネスの種類 によって定性的に異なることを示した。ボルン極限 では、通常のストライプ型構造の歪みとして理解さ れる。一方、ユニタリー極限では、秩序変数の強いピ ニングにより多数の空間構造が縮退したエネルギー の多谷構造が生じる。ボルテックスグラス相との類 似性から、この結果は FFLO グラス相の存在を示唆 しているといえる。[10]

冷却原子気体における Angular-FFLO 超流動と BCS-BEC クロスオーバー

レーザー冷却中性原子気体で実現される低温量子 凝縮相に関して、インバランスなフェルミ原子系に おける FFLO 超流動と、BCS-BEC クロスオーバー について調べた。通常の調和型トラップでは対称性の 破れを伴う FFLO 超流動は実現されないが、トロイ ダル型トラップならば回転対称性の破れを伴う新し い形の FFLO 超流動(Angular-FFLO 超流動)が実 現することを示した。また不均一系での超流動揺ら ぎを計算し、BCS-BEC クロスオーバーとそれに伴 う擬ギャップの存在を示した。FFLO 超伝導は一般に 揺らぎに対して不安定であることを示し、その原因 が擬ギャップにあることを指摘した。[12, 23, 63, 83]

スピン三重項超伝導体の d ベクトル

スピン三重項超伝導体は d ベクトルというベクト ル型の秩序変数を持つ。これまでは、主に Ginzburg-Landau 方程式を代表とする現象論的理論に基づい て議論されてきたが、d ベクトルの構造を決定する 微視的理論を構築した。その結果は (1) 空間反転対 称性がある場合、(2) 空間反転対称性がない場合 (3) 大局的な空間反転対称性があるが局所的には破れて いる場合の 3 つの場合に分けられる。それぞれの場 合について d ベクトルを決定するメカニズムを調べ た。[54, 66, 79]

3.3.5 ディラック電子系

最近見出されたある種の有機物質や、グラファイトの2次元系、さらに古くから調べられている物質であるBi(ビスマス)において、電子の分散関係が相対論的量子力学におけるディラック電子と全く同じになる場合が見出されている。このような電子系は、通常の金属状態と異なる振舞いを示すと予想され、新たな電子状態として非常に興味が持たれている。

ビスマスにおけるバンド間磁場効果とホール効果

ディラック電子系ではバンド間磁場効果が顕著に なると考えられるので、スピン-軌道相互作用が強い ディラック電子系を取り上げ、ホール効果に現れる バンド間磁場効果を調べた。解析の結果、磁場によ るバンド間の寄与が、これまで知られていなかった 新たな特徴をホール伝導度に与えることがわかった。 この現象はバンド端で特に顕著に現れ、急峻なピー ク構造を示す。このような振舞いは、従来の直感的 な予測からはまったく想像し得ない結果であり、新 奇ホール電流が反磁性電流と起源が同じであること を強く示唆している。さらに、スピン-軌道相互作用 を伴うディラック電子系の典型物質であるビスマス に、この理論を適用することによって、長らく混乱 していたビスマスにおけるホール効果の測定結果を 整理する指針を提案した。[14, 15]

ビスマス中ディラック電子の磁気光学応答

ビスマス中で実現しているディラック電子に対し て、その磁気光学応答を調べた。その結果、バンド 内遷移では現れなかったような新しいスピン遷移が、 バンド間遷移にまで拡張することによって現れるこ とが分かった。このことは、ビスマスにおける非常 に強いスピン軌道相互作用の帰結であることが分か る。このスピン遷移は、光学伝導度および円偏光に 対する応答では観測可能な値をもって現れるが、単 純な有限周波数でのホール伝導度においては、ほと んど観測されないという特徴ある振舞いをすること が理論的に示された。[59, 78, 80]

3.3.6 フラストレーションのある系での電 子状態、スピン状態

フラストレーションを持つ Potts 模型の解析

 KOs_2O_4 という β 型パイロクロア酸化物において は、結晶中に存在する大きなカゴの内部で、К イオ ンが「ガラガラ」と動いているような特異な「ラッ トリング」という現象が見られている。我々は、こ のラットリングの相転移を説明する目的で導入され たフラストレーションのある Potts 模型について、 古典モンテカルロ・シミュレーションによる解析を 行った。その結果、このモデルでは単純な強磁性状 態とは異なる新奇な基底状態への1次相転移が生じ ることを見出した。得られた基底状態は、乱れた層 と秩序層が交互に配列する「部分秩序」を持つ層状 構造をとっていて、残留エントロピーが K 原子1個 当り約 k_B log 1.3 残るという状態であることがわかっ た。この基底状態は結晶の対称性を破っているので、 KOs₂O₄の説明には不十分であるといえるが、自発 的に部分秩序を持つという、これまでにあまり例の ない、統計力学的に非常に興味深いモデルであるこ とがわかった。[8, 20, 31]

フラストレーションを持つ擬 1 次元 Heisenberg 模 型の解析

フラストレーションを持つ格子上での量子模型の 基底状態や、その動的な性質については、数値計算上 の困難のために、いまだに多くの問題が残されてい る。我々は、近年急速に進歩している量子モンテカル ロシミュレーションのループアルゴリズムや、2次元 方向に拡張された密度行列繰り込み群法を利用して、 最も単純な量子模型である擬1次元の梯子やチュー ブ状に配置した格子上でのS = 1/2Heisenberg 模型 を調べた。これらのモデルの、基底状態での量子相 転移の有無や、エネルギー固有値のギャップ構造に ついての知見を得た。[44, 56, 61, 62, 73, 76]

幾何学的フラストレーションを持つハバードモデル の基底状態

フラストレーションを持つハバードモデルの基底 状態では、強い量子効果によって新奇な量子状態が 実現し得る。このような系では短距離相関が重要で あるが、それを厳密に取り扱うことができる量子ク ラスターの方法を用いて、正方格子上の*t-t'*ハバード モデルが三次元方向に重なったモデルを調べた。そ の結果、幾何学的フラストレーションの効果と次元 性の効果とが競合することが示された。[9,27,57]

3.3.7 重い電子系に関する理論

local Fermi liquid から heavy Fermi liquid へ のクロスオーバー

強相関電子系の典型例である重い電子系物質は、 大きな電子の有効質量によって特徴付けられている が、これは周期的に配置された局在性の強い f 電子 が伝導電子と混成すること、さらに f 電子間に働く クーロン斥力が強いことが起源となっている。この 系は電気抵抗が低温で T² に比例するなど、典型的 なフェルミ流体の振舞いを示すため、"heavy Fermi liquid"と称される。一方、元素置換(例:Ce La) によって f 電子数密度を減らしていくと、f 電子が希 薄な領域では1不純物問題でよく知られている "local Fermi liquid"の性質を示すことがわかっている。し かし、f 電子数密度の変化に伴って系がどのように local Fermi liquid から heavy Fermi liquid へと移行 していくかの詳細は明らかになっていない。我々は この問題を念頭に、 f 電子数密度を変化させた時の近 藤格子模型の基底状態を変分モンテカルロ法によっ て解析した。その結果、ある f 電子数密度を境に「伝 導電子によるスクリーニング」から「f 電子同士に よるスクリーニング」へのクロスオーバーが起こる ことを見出した。これは隣接する近藤クラウドが互 いに重なり合って f 電子間のコヒーレンスが成長し 始めた結果起こるものであり、local Fermi liquid か ら heavy Fermi liquid へのクロスオーバーに対応す ると期待される。[7,21,32,55,65,69,72]

3.3.8 2次元³Heに関する理論

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

固体相でのスピン液体

グラファイト上の He の密度をコントロールする と、ちょうど2次元面上に稠密に He が並ぶ状況を 作ることができる(4/7相と呼ばれている)。このと き系は理想的なモット絶縁体となり、スピン自由度 に関しては2次元三角格子を組むスピン系となると 考えられる。しかし、実験では三角格子ハイゼンベ ルグモデルで予想されるようなスピンの長距離秩序 は見られず、代わりにスピン液体的な振舞いが観測 されている。この問題の理論的解明のために、我々 は³He の下地のポテンシャルを考慮したモデルを考 え、高温展開の方法や厳密対角化の方法により、有 限温度の状態を調べた。その結果、実験で見られる スピン液体的な振舞い、特に比熱や帯磁率の異常な 振舞いを再現し得ることを示した。[5]

2次元³Heにおける新量子液体の発見:多体スピン 交換相互作用の効果

上記 4/7 相(モット絶縁体)からわずかに粒子数 を減らした領域では、比熱における二重ピーク構造 など、通常のフェルミ液体としては理解しがたい特 異な振舞いが報告されている。この異常液体の理論 的解明のために、2次元³Heのモデル化を行い基底 状態の解析を行った。有効模型として、³He 特有の ハード・コアを考慮して He 粒子の二重占有を禁止 し、さらに従来のハイゼンベルグ型の交換相互作用 以外に、リング状の多スピン交換相互作用(リング 交換) K を取り入れた三角格子 t-J-K モデルを考案 した。このモデルの基底状態を数値的厳密対角化に よって調べ、相図を決定した。その結果、ドープしたモット絶縁体領域において、強磁性的な二体交換 と反強磁性的な四体交換相互作用が競合することに よって、新しい量子相が出現し得ることを見出した。 さらに、エネルギー分布の解析から、この新しい量 子液体相ではスピン・質量(電荷)分離的振舞いが 見られることを明らかにした。これは測定されてい る2次元³Heの新奇な状態を説明することができる と考えられる。[49,81]

3.3.9 磁壁駆動の微視的理論

近年、強磁性体中に形成させた磁壁を電流で駆動・ 制御する試みがなされており、不揮発性メモリへの 応用に向けて盛んに研究されている。しかし、その 駆動機構の微視的な理解は未だ不十分であるといえ る。これは、既存の理論において電流を担う伝導電 子のダイナミクスが過小評価されてきたからである。 そこで、磁壁のみならず伝導電子のダイナミクスも 完全に考慮することにより、磁壁の駆動機構の微視 的な解析を行った。その結果、磁壁の容易面からの 立ち上がりを制御する困難軸異方性定数の大きさに 依存して、磁壁の駆動機構が既存の理論で支配的と 考えられていたスピン移行から、運動量移行に移り 変わることを見出した。またこの運動量移行による 磁壁運動は、摩擦が関わる現象で現れるスティック・ スリップ運動として理解できることが分かった。[26]

<報文>

(原著論文)

- T. Watanabe, H. Yokoyama, K. Shigeta, and M. Ogata: New J. Phys. 11, 075011-1-12 (2009). "Momentum dependence of pseudo-gap and superconducting gap in variation theory"
- [2] E. Yukawa and M. Ogata: J. Phys. Soc. Japan 79, 023705 (2010). "Mean-Field Analysis of Electric Field Effect on Charge Orders in Organic Conductors"
- [3] T. Kariyado and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. 78, 043708 (2009). "Normal-State Spin Dynamics of Five-Band Model for Iron Pnictides"
- [4] T. Kariyado and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. 79, 033703 (2010). "Simple Real-Space Picture of Nodeless and Nodal s-wave Gap Functions in Iron Pnictide Superconductors"
- [5] T. Koretsune, M. Udagawa, and M. Ogata: Phys. Rev. B 80, 075408 (2009). "Thermodynamic properties of the Heisenberg model on a triangular lattice with two exchange couplings: Application to two-dimensional solid ³He adsorbed on graphite"
- [6] S. Miyashita, M. Ogata, and H. De readt: Phys. Rev. B 80, 174422 (2009). "Nagaoka ferromagnetism in large-spin fermionic and bosonic systems"
- [7] H. Watanabe and M. Ogata: Phys. Rev. B 81, 113111 (2010). "Crossover from dilute-Kondo system to heavy-fermion system"
- [8] R. Igarashi and M. Ogata: submitted to Phys. Rev. B. "Partial order in a frustrated Potts model"
- [9] T. Yoshikawa and M. Ogata: Phys. Rev. B 79, 144429-1-7 (2009). "Role of frustration and dimensionality in the Hubbard model on the stacked square lattice: Variational cluster approach"
- [10] Y. Yanase: New J. Phys. 11, 055056 (2009). "The disordered Fulde–Ferrel–Larkin–Ovchinnikov state in d-wave superconductors"
- Y. Yanase and M. Sigrist: J. Phys. Soc. Jpn. 78, 114715 (2009). "Antiferromagnetic Order and pi-Triplet Pairing in the Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov State"

- Y. Yanase: Phys. Rev. B 80, 220510(R) (2009).
 "Angular Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov State in cold fermion gases in a toroidal Trap"
- [13] R. Okazaki, M. Shimozawa, H. Shishido, M. Konczykowski, Y. Haga, T. D. Matsuda, Y. Onuki, Y. Yanase, T. Shibauchi, and Y. Matsuda: submitted to Phys. Rev. B. "Anomalous Low-Field Diamagnetic Response in the Superconducting State of Ultraclean URu₂Si₂"
- [14] Y. Fuseya, M. Ogata and H. Fukuyama: Phys. Rev. Lett. **102**, 066601 (2009). "Interband Contributions from Magnetic Field on Hall Effects for Dirac Electrons in Bismuth"

(会議抄録)

- [15] Y. Fuseya, M. Ogata and H. Fukuyama: Proceedings of the 9th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-TOKYO '08), edited by S. Ishioka and K. Fujikawa (World Scientific), pp. 174-177. "Hall Effect and Diamagnetism of Bismuth"
- [16] H. Watanabe and M. Ogata: Proceeding of the 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25), (Amsterdam, August 6-13, 2008). J. Phys.: Conf. Ser. 150, 042227 (2009).
 "Fermi surface reconstruction in the Kondo lattice model and the periodic Anderson model"
- [17] Y. Hayashi and M. Ogata: Proceeding of LT25. J. Phys.: Conf. Ser. **150**, 042053 (2009). "Finite Temperature RVB Mean-field Analysis of the Anisotropic Triangular Lattice Spin System"
- H. Tsuchiura and M. Ogata: Proceeding of LT25.
 J. Phys.: Conf. Ser. **150**, 052272 (2009). "Antiphase superconducting domain structures in the t-t'-t"-J model"
- [19] Y. Yanase: Proceeding of LT25. J. Phys.: Conf. Ser. 150, 052287 (2009). "Antiferromagnetic order in the FFLO state"
- [20] R. Igarashi and M. Ogata: Proceeding of The International Conference on Magnetism 2009 (ICM 2009), (Karlsruhe, Germany, July 26-31, 2009). J. Phys.: Conf. Ser. 200, 022019 (2010). "Partial order of frustrated Potts model"
- [21] H. Watanabe and M. Ogata: Proceeding of ICM 2009. J. Phys.: Conf. Ser. 200, 012221 (2010).
 "Ground State Properties of Randomly-Doped Kondo Lattice Model"
- [22] T. Kariyado and M. Ogata: Proceeding of 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M²S 2009), (Tokyo, September 7-12, 2009). Physica C, in press. "Nuclear magnetic relaxation rate in iron-pnictide superconductors"
- [23] Y. Yanase and M. Sigrist: Proceedings of M²S 2009. Physica C, in press. "Angular Fulde-Ferrel-Larkin-Ovchinnikov Superfluid due to Self-One-Dimensionalization in Imbalanced Cold Fermion Gases"

[24] Y. Hayashi and M. Ogata: Proceeding of the 8th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Ferromagnets (ISCOM2009), (Niseko, September 12-17, 2009). Physica B, in press. "Variational Monte Carlo Study of the Spin Liquid State with Onedimensionalization"

(国内雑誌)

[25] 横山寿敏、小形正男:固体物理 44,515-524 (2009). 「高温超伝導の物理―ドープされたモット絶縁体の具 体的な描像―」

(学位論文)

- [26] 松林大介: "Theoretical study on cross-correlated dynamics between magnetic domain walls and conduction electrons"(磁壁と伝導電子の相互に相関し たダイナミクスに関する理論的研究)(東京大学大学 院理学系研究科・博士論文)
- [27] 吉川俊彦: "Variational Cluster Approach to Quasi-Two-Dimensional Hubbard Model" (変分クラス ター法を用いた擬二次元ハバード模型の研究)(東京 大学大学院理学系研究科・博士論文)
- [28] 五十嵐章大: "Mean-Field Analysis for Multilayered Cuprates Superconductors"(多層系銅酸化物超伝導 体に対する平均場解析)(東京大学大学院理学系研究 科・修士論文)

<学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [29] T. Kariyado and M. Ogata: International Workshop on the Search for New Superconductors, (Shonan Village, May 12-15, 2009). "Study of the Spin Dynamics in Iron-Pnictides with Itinerant Model"
- [30] T. Kariyado and M. Ogata: ISSP International Workshop "New Developments in Theory of Superconductivity", (ISSP, July 8-10, 2009). "Property of the Spin Fluctuation in Iron Pnictide Superconductors"
- [31] R. Igarashi and M. Ogata: The International Conference on Magnetism 2009 (ICM 2009), (Karlsruhe, Germany, July 26-31, 2009). "Partial order of frustrated Potts model"
- [32] H. Watanabe and M. Ogata ICM 2009 (Karlsruhe, July 26-31, 2009). "Ground State Properties of Randomly-Doped Kondo Lattice Model"
- [33] M. Ogata and H. Tsuchiura: The 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M²S 2009), (Tokyo, September 7-12, 2009). "Two-gap Feature and Inhomogeneity studied in the Two-dimensional t-J Model"
- [34] T. Kariyado and M. Ogata: M²S 2009 (Tokyo, September 7-12, 2009). "Nuclear Magnetic Relaxation Rate in Multi-Orbital Superconductors"

- [35] H. Yokoyama, M. Ogata and K. Kobayashi: M²S 2009 (Tokyo, September 7-12, 2009). "Effect of Antiferromagnetic Order on Superconductivity in Two-dimensional Hubbard Model"
- [36] Y. Yanase: M²S 2009 (Tokyo, 9.7-12, 2009). "Localization and Superconductivity in Doped Semiconductors"
- [37] Y. Yanase and M. Sigrist: M²S 2009 (Tokyo, 9.7-12, 2009). "Fulde-Ferrel-Larkin-Ovchinnikov State in Strongly Correlated Fermion Systems"
- [38] Y. Hayashi and M. Ogata: The 8th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Ferromagnets (ISCOM2009), (Niseko, September 12-17, 2009). "Variational Monte Carlo Study of the Spin Liquid State with One-dimensionalization"
- [39] Y. Fuseya, M. Ogata, and K. Miyake: ISCOM2009 (Niseko, 9.12-17, 2009). "Spin-triplet p-wave pairing in quasi-one-dimensional superconductors"
- [40] E. Yukawa, K. Yoshimi, H. Maebashi, T. Kato and M. Ogata: ISCOM2009 (Niseko, 9.12-17, 2009).
 "Charge-ordring Instability Driven by Exchange Process of the Long-range Coulomb Interaction"
- [41] Y. Fuseya, M. Ogata, K. Miyake and C. Bourbonnais: International Workshop, Theories on Strongly Correlated Molecular Conductors, (Narita, 9.17-19, 2009) "Renormalization group study on quasi-1D superconductivity under magnetic field"
- [42] Y. Yanase: PSM 2010 (Yokohama, Japan, March, 2010). "Microscopic theory of D-vectror in spintriplet superconductors"
- [43] T. Kariyado and M. Ogata: American Physical Society 2010 March Meeting, (Portland, March 15-19, 2010). "Simple Real-Space Picture for the Gap Functions in Iron Pnictide Superconductors"
- [44] R. Igarashi, M. Okumura, S. Yamada and M. Machida: APS 2010 March Meeting, (Portland, March 15-19, 2010). "Ground state phase diagram of the asymmetric spin tube up to 6 legs"

招待講演

- [45] M. Ogata: ICC-IMR Workshop "Physics on Transition Metal Based Superconductors" (Institute for Materials Research, Tohoku Univiersity, June 24-26, 2009). " 'Unscreening' effect on superconductivity in Fe-Pnictides"
- [46] M. Ogata: ISSP International Workshop and Symposium "New Developments in Theory of Superconductivity" (ISSP, Univ. of Tokyo, Kashiwa, July 8-10, 2009). "'Unscreening' effect of Coulomb interaction on superconductivity in Iron Pnictides"
- [47] M. Ogata: The 8th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Ferromagnets (ISCOM2009), (Niseko, September 12-17, 2009). "Superconductivity due to Charge Fluctuation in Organic Conductors"

- [48] M. Ogata: International Symposium "Novel states in correlated condensed matter — from model systems to real materials —" (Berlin, March 2-4, 2010). "Mott transition and d-wave superconductivity in the 2D-Hubbard model in the strongly correlated regime"
- [49] Y. Fuseya and M. Ogata: International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2010), (Yokohama, March 9-12, 2010). "Phase Diagram of the Triangular t-J Model in the Doped-Mott Region: Effects of Ring Exchange Interactions"
- [50] Y. Yanase: Novel Spin Pairing (Kyoto, 2009.9).
 "Microscopic theory of noncentrosymmetric superconductors: Mechanism and role of magnetism"

(国内会議)

一般講演

- [51] 土浦宏紀、小形正男:日本物理学会、熊本大学 2009、 9.25-9.28 (秋季大会) "乱れた t-J モデルにおける電 荷密度変調と準粒子干渉効果"
- [52] 苅宿俊風、小形正男:日本物理学会、熊本大学 "鉄砒 素超伝導体におけるスピン軌道相互作用の効果"
- [53] 湯川英美、吉見一慶、前橋英明、加藤岳生、小形正 男:日本物理学会、熊本大学 "長距離クーロン相互作 用を介した交換プロセスによる電荷秩序不安定性の 研究"
- [54] 柳瀬陽一:日本物理学会、熊本大学"層状欠陥がある スピン三重項超伝導体のdベクトルとその安定性"
- [55] 渡部洋、柚木清司、小形正男:日本物理学会、熊本大 学"f電子数密度制御による近藤格子模型の基底状態 の変化"
- [56] 五十嵐亮、山田進、町田昌彦、小形正男:日本物理学 会、熊本大学 "Heisenberg 模型の1次元化の解析"
- [57] 吉川俊彦、小形正男:日本物理学会、熊本大学 "Bilayer Hubbard model の磁気的性質 II: variational cluster approach を用いた interlayer coupling の効果の研 究"
- [58] 小形正男:日本物理学会、岡山大学 2010、3.20-3.23 (年次大会) シンポジウム「量子ビームを使ったスペ クトロスコピーの進展:超伝導研究を切り口として」 "理論とまとめ"
- [59] 伏屋雄紀、小形正男、福山秀敏:日本物理学会、岡山 大学"ビスマス中ディラック電子の磁気光学応答"
- [60] 苅宿俊風、小形正男:日本物理学会、岡山大学 "鉄系 超伝導体における超伝導ギャップ関数の実空間描像"
- [61] 五十嵐亮、奥村雅彦、山田進、町田昌彦:日本物理学 会、岡山大学 "スピンチューブ系のギャップの系統的 調査"
- [62] 山田進、奥村雅彦、五十嵐亮、町田昌彦:日本物理学 会、岡山大学"準2次元ハバードモデルに対する動的 DMRG 法の高速アルゴリズム"

- [63] 柳瀬陽一:科研費特定領域「スーパークリーン」 A03,A04班合同研究会、箱根、2009年4月"Angular-FFLO state in cold fermion gases near BCS-BEC crossover"
- [64] 湯川英美: 基研研究会「分子性導体における質量ゼロ のディラック粒子とその新展開」(京都大学基礎物理 学研究所、2009 年7月2-3日) "Hartree-Fock 保存 近似に基づく電荷秩序不安定性の研究"
- [65] 渡部洋、小形正男:新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」第2回研究会(広島大学東広島キャンパス2009,8.18-20)"希薄近藤系から重い電子系へのクロスオーバーの理論的研究"
- [66] 柳瀬陽一:新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序 化」第2回研究会"スピン三重項超伝導体のDベクト ルを決定する微視的メカニズム"
- [67] 小形正男:新学術領域研究「分子自由度が拓く新物質 科学」第2回領域会議(東京大学、小柴ホール、2009 年10月6-7日)"電荷秩序状態の磁場依存性"
- [68] 伏屋雄紀:新学術領域研究「分子自由度が拓く新物質 科学」第2回領域会議"磁場中擬一次元超伝導体にお ける次元性の効果"
- [69] 渡部洋、柚木清司、小形正男:第3回物性科学領域 横断研究会(東京大学武田ホール 2009, 11.29-12.1) "近藤格子模型を用いた希薄近藤系から重い電子系へ のクロスオーバーの理論的研究"
- [70] 林勇太、小形正男:第3回物性科学領域横断研究会" 三角格子の異方性とフラストレーションの解消"
- [71] 柳瀬陽一:第3回物性科学領域横断研究会 "スピン 三重項超伝導におけるランダムスピン軌道相互作用: Sr₂RuO₄ と CePt₃Si"
- [72] Hiroshi Watanabe, Seiji Yunoki, and Masao Ogata: RIKEN Workshop on "Emergent Phenomena of Correlate Materials" (Wako, Saitama, Japan, 2009, 12.2-4). "Theoretical study of crossover from local Fermi liquid to heavy fermi liquid"
- [73] 五十嵐亮、奥村雅彦、山田進、町田昌彦:東京大学物性 研究所 短期研究会「計算物理学」(物性研、December 10-11, 2009). "並列 DMRG 法のスピンラダー系へ応 用"
- [74] 小形正男:新学術領域研究「分子自由度が拓く新物質 科学」第3回領域会議(仙台、岩沼屋、2010年1月 5-7日)"三角格子の異方性とフラストレーションの 解消"
- [75] 町田昌彦、奥村雅彦、五十嵐亮、山田進、今村俊幸: スーパーコンピューターワークショップ 2010 (岡崎, January 13-14, 2010). "行列対角化と密度行列繰り こみ群の超並列化:強相関非平衡量子多体系の理解へ 向けて"
- [76] 五十嵐亮、奥村雅彦、山田進、町田昌彦:次世代ナノ 統合シミュレーションソフトウェアの研究開発第4 回公開シンポジウム(岡崎, March 3-4, 2010). "大規 模並列 DMRG 法によるスピンチューブ系のギャップ の評価"
- [77] 五十嵐亮、奥村雅彦、山田進、町田昌彦:次世代スパコ ン物性科学分野研究会 (東京, March 10-11, 2010). "

大規模並列 DMRG 法によるスピンチューブ系のギャッ プの評価"

招待講演

- [78] 伏屋雄紀、小形正男、福山秀敏:基研研究会「分子 性導体における質量ゼロのディラック粒子とその新 展開」(京都大学基礎物理学研究所、2009年7月2-3 日)"ビスマス中ディラック電子が生む量子輸送現象"
- [79] 柳瀬陽一:大阪大学 GCOE 若手秋の学校(近江八幡 休暇村、2009 年 9 月)"超伝導・超流動における新し い対称性の破れ"
- [80] 伏屋雄紀、小形正男、福山秀敏:物性研短期研究会 「ディラック電子系の物性-グラフェン及び関連物質 の最近の研究」(東京大学物性研究所、2009年10月 22-24日)"ビスマス中ディラック電子のホール効果"
- [81] 小形正男: CMRC 研究会「相関電子と構造物性」(高 エネルギー加速器研究機構、2010年2月22-23日)
 "異方的三角格子上での新奇スピン液体状態の探索"
- (セミナー)
- [82] 柳瀬陽一:物質材料機構 CMS セミナー (2009,5)
 "Symmetry breaking in superconductors and superfluid: Spin tripletsuperconductivity in Sr₂RuO₄"
- [83] 柳瀬陽一: 慶応大学教室談話会 (2009,7) "強相関フェ ルミオン系における新しい対称性の破れ:フェルミ原 子気体の FFLO 超流動"

3.4 常行研究室

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

3.4.1 シミュレーション手法の開発

フラグメント分子軌道法に基づくタンパク質の全系 電子状態計算手法の開発

タンパク質や DNA のような生体分子の電子状態 計算は、その巨大さと複雑さのため、従来非常に大 きなコストを要するものであった。我々は、近年京 都大学の北浦和夫らによって開発されたフラグメン ト分子軌道 (FMO) 法に基づき、生体分子全系の分 子軌道とエネルギースペクトルを低コストで求める FMO-LCMO 法を開発してきた。

FMO法は、系をその構成要素であるフラグメント (部分系)に分割し、フラグメント単量体(モノマー) および二量体(ダイマー)のエネルギーから、全系 の精密な全エネルギーと電子密度分布を算出する。 この手法では電子状態計算を行うのは部分系のみで あるため、生体分子全系の分子軌道やエネルギース ペクトルは一切計算されない。これに対してFMO-LCMO法では、FMO法における各部分系(フラグ メント単量体、二量体)の分子軌道と分子軌道エネ ルギーから、極めて単純な操作により、フラグメン トモノマーの分子軌道を基底とした系全体の一電子 ハミルトニアンを構成することで、全系電子状態計 算を実現する[4]。

今年度はフラグメント単量体、二量体に加えて三量 体の効果を加えた FMO-LCMO 法を定式化し、より 高精度の全系計算を実現した [?]。新しい方法(FMO3-LCMO 法と呼ぶ)は、従来の方法(FMO2-LCMO 法)に比べてシステムサイズの増大に対する誤差の 増大の程度が極めて小さく、大きなタンパク質の電 子状態計算で、より信頼性の高い方法論となった。今 後は電子伝達系や光受容タンパク質などへの応用が 期待される。

熱伝導計算のための汎用非調和格子モデル

熱電材料の性能を決める重要なパラメータの一つ が熱伝導度である。物質の熱伝導度を理論的に予測 するためには、ボルツマン方程式を緩和時間近似の もとで用いることが多いが、物質の非調和効果が決



図 3.4.9: FMO2-LCMO 法 (上)、FMO3-LCMO 法 (中) で計算されたタンパク質 (chignolin)の HOMO 軌道と通 常の全系計算による結果 (下)。FMO3-LCMO 法の軌道は 通常計算の軌道と 99.99% 一致する。

める緩和時間は実験的に見積もる必要があるほか、 界面や不純物の効果を理論的に取り扱うことは困難 である。一方、緩和時間近似を用いない手法として は(非平衡)分子動力学法があるが、熱伝導度の評 価には多数の原子の長時間シミュレーションが必要 となるため、汎用性の高い電子論に基づく第一原理 分子動力学法ではなく、簡単なモデルポテンシャル を用いた古典分子動力学法が用いられてきた。

そこで我々は、熱伝導度の物質依存性やナノスケー ルの構造依存性を正しく取り入れられるように、第 一原理分子動力学法を用いた非調和格子モデルの一 般的導出法の開発を開始した。本年度はその定式化 を行い、簡単な系で短時間の第一原理分子動力学シ ミュレーションから定量的なモデルを導出すること ができることを確認した(図 3.4.10)[9]。この手法 は表面・界面があるような系にも適用可能で、極め て汎用性が高い。今後、決定された相互作用モデル を用いた分子動力学法により、実際の熱伝導計算を 行う予定である。



図 3.4.10: シリコン結晶中のある原子に働く力の時間変化。4時非調和項まで含むモデルを使うと、第一原理分子動力学法の計算結果をほぼ再現することができる。

拡散量子モンテカルロ法計算への GPU の利用

固体や分子の全エネルギー計算手法の中で、現時 点で最も精度が高いと思われる手法は、拡散量子モ ンテカルロ法である。この手法は多電子系の時間依 存シュレーディンガー方程式を虚時間発展させるこ とにより、基底状態の電子密度とエネルギーを得る もので、計算規模は大きいが、モンテカルロ法であ るために並列計算が容易であるという数値計算上の 利点がある。そこで今年度は、もっとも安価な並列計 算機として近年注目されている GPU (パソコンにも 搭載されている Graphics Processing Unit) 向けに 原子・分子用のプログラム開発を行い、単精度ではあ るが CPU の最高 15 倍程度の高速化に成功し、GPU タイプの並列演算装置の有用性を実証した [10]。現 在の GPU は倍精度演算器が少なく、大きな性能向 上は単精度でしか期待できないが、今後予定されて いる倍精度演算性能の高い GPU を利用することに より、安価に拡散量子モンテカルロ法計算が実現で きる可能性がある。

トランスコリレイティッド法に基づく第一原理電子 状態計算手法の開発

固体の第一原理電子状態計算手法として一般的に 用いられている密度汎関数法理論(DFT)は、比較 的少ない計算量で電子物性や構造物性に関する精度 の高い結果を得ることができる優れた手法であるが、 半導体のバンドギャップを過小評価したり、凝集エ ネルギーや化学反応の活性障壁の定量性に欠けたり、 あるいは強相関系で破たんしたりといった問題が知 られている。また系統的に精度を向上させる方法が 明確でないことが、最大の難点である。そこで電子 相関効果を考慮して固体の電子状態を求めるために、 我々はトランスコリレイティッド(TC)法と呼ばれ る、波動関数理論に基づく第一原理電子状態計算手 法の開発を行ってきた。

TC 法における多体波動関数は、相関波動関数 $F\Phi$ で表される。 Φ はスレーター行列式であり、F はジャストロウ関数 $F = \exp[-\sum_{i < j} u_{ij}]$ である。 ここで

 u_{ij} はジャストロウ因子と呼ばれる2体関数である。 多体ハミルトニアンHの相似変換により得られる有 効ハミルトニアン $H_{TC} = F^{-1}HF$ を用いることで、 高々3体までの電子積分を使ってエネルギーを評価 することができる。 この H_{TC} のエネルギー分散を 最小化することで1粒子方程式が得られ、これを自 己無撞着場 (SCF)の手続きを用いて解くことで1電 子軌道および軌道エネルギーが求められる。

TC 法は 1970 年前後に英国ので S.F. Boys らが 原子・分子の電子状態計算手法として提案したもの の、他の量子化学的手法と比べて計算量が多く利点 が少ないとして、その後 30 年間ほとんど顧みられ てこなかった。しかしながら TC 法は、電子相関効 果が電子状態を定性的に変えてしまう固体にも原理 的には適用可能である上、多体波動関数を用いなが ら一電子描像が無理なく得られることから固体のバ ンド理論とも相性が良いと考えられる。さらに波動 関数理論であることから、摂動論や配置間相互作用 法 (Configuration Interaction) などを使った精度向 上の道筋が明らかである。このような優れた利点に 着目して、我々は固体のための TC 法の開発を目指 し、これまでに共有結合性固体やイオン性固体のバ ンド計算や全エネルギー計算に世界で初めて成功し ている (R. Sakuma et al., J. Phys. Soc. Jpn. 75, 103705 (2006))。一方で、現在の計算機をもってす ら TC 法の計算量は大きく、実用化への道を阻んで いた。

今年度、我々は TC 法の方程式に現れる 3 体項の特 徴的な構造に着目して、積分評価のアルゴリズムを全 面的に見直し、計算の高速化を行った。その結果、従 来は逆格子点数 N_k 、バンド数 N_b に対してオーダー $N_k^3 N_b^4$ であった計算量を、オーダー $N_k^2 N_b^2$ にまで劇 的に削減することに成功した。これは例えば、今ま で数日かかっていた半導体の計算が数分で終わるほ どの効果があり、TC 法の実用化が射程に収められ たと言って良い。さらなる高精度化や励起状態計算、 ダイナミクス計算への応用など、TC 法の新たな応 用にも期待がかかる。

3.4.2 第一原理電子状態計算の応用

窒化物半導体およびその界面の構造と電子状態

窒化ガリウム (GaN) 等の窒化物半導体は発光デバ イスのみならず、スピントロニクス材料の候補とし ても重要であり、実際 Gd や Cr をドープした GaN では室温強磁性が報告されている。我々は第一原理 計算による理論解析により、Gd をドープした GaN 中におけるスピン分極した Ga 単原子空孔間の強磁 性的相互作用が実験的に測定された巨大磁気モーメ ントの起源となっている事を昨年度までに明らかに した。しかしながら、最も詳細に研究されているシ リコンと対照的に、窒化物半導体に対しては複空孔 の性質に関してこれまで調べられていない。そこで 我々は、GaN 複空孔のスピン状態及び荷電状態を密 度汎関数法による第一原理計算により明らかにする 事を試みた。原子構造を最適化した結果、 $V_{Ga} - V_N$ 複空孔は2つの準安定な原子構造を取り得る事が分かった。その構造安定化のメカニズムとしては原子 変位による電荷移動と交換分裂によるエネルギー利 得があり、両者の微妙なバランス関係により二つの 安定構造が存在する事が分かった。

また、バルク中のスピン分極とは対照的に、窒化 物半導体ヘテロ界面におけるスピン分極の可能性に 関しては、まだ検討されていない。そこで、格子整合 性の高い窒化物半導体 / ホウ素化合物界面に着目し、 密度汎関数法による第一原理計算により界面スピン 状態を検討した。AlN/MgB₂(0001)界面に対して得 られたエネルギーバンド構造を図 3.4.11 に示す。界 面では強磁性状態が再安定となり、界面の窒素原子 あたり $0.69 \ \mu_B$ の磁気モーメントが得られた。さら に我々は、強磁性状態の起源は窒素原子の 2p 状態の スピン分極によるものである事を明らかにした。ま た、GaN/ZrB₂(0001) 界面に対する検討も行い、よ り大きな振幅を持つ金属誘起ギャップ状態 (MIGS) に よる遮蔽のため、この界面ではスピン分極が起こら ない事が分かった。ただし、GaN/ZrB₂(0001)界面 においても固有欠陥を導入する事により、スピン分 極が起こる可能性が考えられる。実際、界面再近接 の Ga 空孔 (V_{Ga}) では $\mu = 0.6 \mu_B$ の値が第一原理計 算により得られた。現在、これらの界面の物性に関 して実験グループとディスカッションを行い、共同 研究の萌芽としている所である。

なお、合田助教による窒化物半導体中の空孔準位 のスピン分極に関する研究成果 "Structural bistability and spin polarization of multivacancies in GaN identified by first-principles calculations" が半導体 欠陥国際会議において J.W. Corbett 賞を受賞した [1]。この研究により、窒化物半導体において窒素空 孔準位がスピン分極する事が第一原理電子状態計算 を用いて明らかにされ、複空孔の構造安定性を決定 するメカニズムの理解へ大きな寄与をした事が高く 評価された。



図 3.4.11: AlN/MgB₂(0001) 界面のエネルギーバンド 構造

SiON/SiC(0001) 表面系のショットキー接合

SiCは約3eVという大きなバンドギャップを持つ事 や高い熱伝導率などの特性からパワーデバイスへの 応用が期待される次世代半導体材料である。その表面 に電界効果トランジスタ(FET)などの電子デバイス への 応用に必要である清浄な絶縁膜を形成する事は 困難であったが、2007 年に SiC(0001) 表面に SiON という組成の絶縁性超薄膜が形成されたという報告 がなされた。SiON は厚さわずか 5A 程度という薄さ にもかかわらず、SiO₂と同程度のバンドギャップを 持つ事がSTM I-V 測定によって実験的に確かめられ ている。また表面の絶縁性は、第一原理計算によっ て求められた局所状態密度 (LDOS) を、SiON/SiC 表面深さ方向に関して解析した結果から得られたバ ンドギャップ変化によっても確かめられ、軟 X 線発 光吸収スペクトル測定による結果とも一致した。 方で FET などでは絶縁膜と金属電極を接触させた 構造をもっているため、金属/SiON 界面も基礎研究 は重要であると考えられる。

金属-半導体界面で重要な問題として Schottky 接合 問題が挙げられる。半導体-金属界面に生じる Schottky 障壁の高さは、理想的 には金属の仕事関数と半 導体の電子親和力の差で決まるとされ (この状態を Schottky limit と呼ぶ)、SiO₂ など大きなギャップを もつイオン結合性半導体では成立する事が知られて いる。しかし一般には界面状態によって金属状態の Fermi level がピンされることにより、 Si や Ge で は Schottky limit は全く成り立たない。SiON 構造 は SiO₂ と同程度のバンドギャップを持っているため、 Metal induced gap states による界面状態密度も小 さいと考えられるので Schottky limit が満たされる と予想される。

簡単のため SiON/SiC(0001) 表面系に Al submonolayer を吸着させた系と B submonolayer を吸着させ た系の計算を行い、両者の Schottky Barrier を、Valence Band Maximum (VBM) と系の Fermi levelの 差をもって評価した。Schottky limit が成り立つの であれば、両者の Schottky Barrier の差と、各 submonolayer の work function の差が同じになるはずで ある。VBM は図 3.4.12 に示した通り両系で差が見ら れた。厚さ 10Å でこの差の平均を取ると、その値は 0.394eV であった。一方 Al 及び B 原子 submonolayer の work function の差を計算したところ、0.390eV と いう値が得られた。この結果から SiC/SiON(0001) 表 面系で Schottky limit が成り立つことが示唆された。

<受賞>

 合田 義弘: The J.W. Corbett Prize for the Best Paper Presented by a Young Scientist at the 25th International Conference on Defects in Semiconductors.

<報文>

(原著論文)

[2] T. Shirasawa, K. Hayashi, H. Yoshida, S. Mizuno, S. Tanaka, T. Muro, Y. Tamenori, Y. Harada, T. Tokushima, Y. Horikawa, E. Kobayashi, T. Kinoshita, S. Shin, Y. Ando, K. Akagi, S. Tsuneyuki, and H. Tochihara, Atomic-layer-resolved band-gap structure of an oxynitride-silicon layer epitaxially grown on 6H-SiC(0001), Physical Review B 79, 241301 (2009) (R).



図 3.4.12: Valence band edge プロファイル。エネルギー 原点は各系の Fermi level としている。縦軸原点は、SiON 構造の最表面にある O 原子の位置を示す。(上: Al 原子吸 着系,下: B 原子吸着系)

- [3] Satoshi Muratsugu, Keitaro Sodeyama, Fusao Kitamura, Manabu Sugimoto, Shinji Tsuneyuki, Seiji Miyashita, Tatsuhisa Kato, and Hiroshi Nishihara, Two-electron Reduction of a Rh-Mo-Rh Dithiolato Complex to Form a Triplet Ground State Associated with a Change in CO Coordination Mode, J. Am. Chem. Soc. 131 (2009) 1388.
- [4] S. Tsuneyuki, T. Kobori, K. Akagi, K. Sodeyama, K. Terakura and H. Fukuyama, Molecular orbital calculation of biomolecules with fragment molecular orbitals, Chem. Phys. Lett. 476 (2009) 104.
- [5] M. Furuhashi, A. Omura, Y. Yamashita, K. Mukai, J. Yoshinobu, K. Akagi and S. Tsuneyuki, Electron Transport Properties and Dielectric Breakdown of Alkyl Monolayers Chemisorbed on a Highly Doped n-Type Si(111) Surface, Jpn. J. Appl. Phys. 48 (2009) 055003.

(国内雑誌)

- [6] 今田正俊,常行真司,寺倉清之,「第一原理電子状態計 算の現状と課題:概観」,日本物理学会誌 64 (2009) 241.
- [7] 今田正俊,常行真司「電子相関の精緻な取り扱い」, 日本物理学会誌 64 (2009) 283.

(学位論文)

- [8] (博士論文)小堀知輝: "Development of a new electronic structure calculation method for huge biomolecules with fragment molecular orbitals" (フラグメント分子軌道を用いた巨大生体分子の新しい 電子状態計算手法の開発),東京大学 (2010).
- [9] (修士論文)只野央将: "第一原理に基づく結晶の非 調和格子振動のモデル化",東京大学 (2010).
- [10] (修士論文)小野哲平: "拡散モンテカルロ法の GPU 実装法と単精度演算における精度改善法",東京大学 (2010).

<学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [11] Y. Gohda and A. Oshiyama, "Structural bistability and spin polarization of multivacancies in GaN identified by first-principles calculations", 25th International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS-25), (Sankt-Peterburg, RUSSIA, Jul. 20, 2009).
- [12] Y. Gohda, S. Watanabe, and A. Groß, "Effects of interface passivation on Fermi-level pinning at Al/Si(100) interfaces analyzed by first-principleas transport calculations", 26th European Conference on Surface Science (ECOSS-26), (Parma, ITALY, Aug. 31, 2009).
- [13] Yoshiki Iwazaki, Toshimasa Suzuki and Shinji Tsuneyuki: Density-functional calculations for the stability of hydride ion at oxygen-vacancy site in BaTiO₃, Horiba-ISSP International Symposium on"Hydrogen and Water in Condensed Matter Physics", Chiba, Japan, Oct. 12-16, 2009
- [14] Y. Gohda, S. Watanabe, and A. Groß, "Effects of H-passivation on Fermi-level pinning at Al-Si(100) interfaces identified by *ab initio* transport calculations", Horiba and the 11th ISSP International Symposium (ISSP-11) on Hydrogen and Water in Condensed Matter Physics (Chiba, JAPAN, Oct. 13, 2009).
- [15] S. Tsuneyuki, 'Transcorrelated method: another possible way towards electronic structure calculation of solids', The 3rd Yonsei-Tokyo Joint Symposium on Condensed Mater Physics, Seoul, Korea, Feb. 12, 2010.
- [16] T. Kobori, K. Sodeyama, S. Tsuneyuk, K. Akagi, K. Terakura and H. Fukuyama: 'Development of electronic structure calculation for biomolecules based on fragment molecular orbital method with three-body term', The 3rd Yonsei-Tokyo Joint Symposium on Condensed Mater Physics, Seoul, Korea, Feb. 12, 2010.
- [17] Y. Ando, Y. Gohda, and S. Tsuneyuki: Firstprinciples study of Fermi-level pinning on SiON/SiC(0001) surface, The 3rd Yonsei-Tokyo Joint Symposium on Condensed Mater Physics, Seoul, Korea, Feb. 12, 2010.
- [18] Y. Gohda and S. Tsuneyuki, "First-principles calculations on metal-induced gap states at metalsemiconductor interfaces", 2010 APS March Meeting, (Portland, USA, Mar. 18, 2010).
- [19] Y. Ando, Y. Gohda, and S. Tsuneyuki: Firstprinciples study of Fermi-level pinning at Al/SiON/SiC(0001) interfaces, American Physical Society March Meeting, Portland, Oregon, USA, March 15-19, 2010.

- [20] Keitaro Sodeyama, Masayuki Ochi, Rei Sakuma, Shinji Tsuneyuki: Acceleration of the transcorrelated method for solids, March meeting of the American physical society, Oregon (Portland), USA, March 15-19, 2010.
- [21] T. Kobori, K. Sodeyama and S. Tsuneyuki:Development of electronic structure calculation for biomolecules based on fragment molecular orbital method with three-body term, American Physical Society March Meeting, Portland (Oregon), USA, March 19, 2010.

招待講演

- [22] S. Tsuneyuki, S. Furuya, Y. Yoshimoto, 'Theoretical Study of a Strain-Induced Nanostructure at N/Cu(001) Surface', Second Internationa Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (Semicon-Nano 2009) (Anan, Tokushima), August 9-14, 2009.
- [23] Keitaro Sodeyama, Rei Sakuma, Shinji Tsuneyuki: Transcorrelated method applied to solids: wavefunction approach including electron correlation effects, The 12th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, Institute of Physics, CAS, Beijing, China, October 26-28, 2009.

(国内会議)

一般講演

- [24] 常行真司:「フラグメント分子軌道法に基づく巨大生 体分子の全系電子状態計算」,特定領域研究ナノリン ク領域会議(松島),2009年5月26日.
- [25] 袖山慶太郎, 邨次智, 西原寛, 常行真司:「異なる電気 化学的特性を示す異種金属三核錯体 Rh2Mo および Co2Mo に関する理論的研究」, 第12回理論化学討論 会, 東京大学 (本郷), 2009 年 5 月 28 日-30 日.
- [26] 小堀知輝、袖山慶太郎、常行真司、赤木和人、寺倉清 之、福山秀敏:「FMO-LCMO法に基づくタンパク質 の電子状態解析」,第12回理論化学討論会、東京大 学(本郷),2009年5月28日-30日.
- [27] 安藤康伸,合田義弘,常行真司:「Al 原子吸着による SiON/SiC(0001) 絶縁超薄膜の電子状態の変化」,G-COE「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」Research Assistant 自主研究会,河口湖(山梨),2009年7月1-3日.
- [28] 合田 義弘、常行 真司:「窒化物半導体 / ホウ素化合物界面の第一原理計算」日本物理学会 2009 年秋季大会 熊本大学(熊本市)2009 年 9 月 25 日
- [29] 佐久間怜, 袖山慶太郎:「摂動論での全エネルギー評価: 参照系依存性」, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本 大学黒髪キャンパス (熊本), 2009 年 9 月 25 日-28 日.
- [30] 小堀知輝、袖山慶太郎、常行真司、赤木和人、寺倉 清之、福山秀敏:「FMO-LCMO 法に基づく巨大分子 系の電子状態解析」、日本物理学会年次大会、熊本、 2009年9月26日.

- [31] 安藤康伸, 合田義弘, 常行真司:「Al 原子を吸着させ た SiON/SiC(0001) 表面系の電子状態計算」, 日本 物理学会秋季大会, 熊本大学(熊本), 2009 年 9 月 25-28 日.
- [32] 常行真司:「FMO-LCMO 法の開発 タンパク質電子 状態の理解に向けて」,生物物質科学フォーラム第3 回会合(北陸先端大),2009 年 11 月 4 日.
- [33] 常行真司:「ナノリンク分子のための波動関数理論」、
 特定領域研究ナノリンク領域会議(柏)、2010年3月2日.
- [34] 袖山慶太郎, 邨次智, 西原寛, 常行真司:「異なる電気 化学的特性を示す異種金属三核錯体 Rh2Mo および Co2Mo の分子構造変化に関する理論的研究」, 文部 科学省「最先端・高性能汎用スーパーコンピュータの 開発利用」プロジェクト次世代ナノ統合シミュレー ションソフトウェアの研究開発 第4回公開シンポジ ウム, 自然科学研究機構 岡崎コンファレンスセンター (岡崎),2010 年3月3日-4日.
- [35] 越智正之,袖山慶太郎,佐久間怜,常行真司:「トラン スコリレイティッド法の固体の電子状態計算における 高速化」,文部科学省「最先端・高性能汎用スーパー コンピュータの開発利用」プロジェクト 次世代ナ ノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開発 第 4回公開シンポジウム,分子科学研究所,2010年3 月4日.
- [36] 安藤康伸,合田義弘,常行真司:「SiON/SiC(0001) 表面における金属原子のFermi-level pinning に関する 電子状態計算」、次世代ナノ統合シミュレーションソ フトウェアの研究開発「第4回公開シンポジウム」、 分子科学研究所(愛知)、2010年3月3-4日
- [37] 越智正之,袖山慶太郎,佐久間怜,常行真司:「トランスコリレイティッド法の固体の電子状態計算における高速化と並列性」,文部科学省「最先端・高性能汎用スーパーコンピュータの開発利用」プロジェクト次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開発次世代情報機能・材料分野公開研究会「新物質とエネルギー」,東京国際フォーラム,2010年3月10日.
- [38] 袖山慶太郎, 邨次智, 西原寛, 常行真司:「異種金属三 核錯体 Co2Mo における電気化学的特性の溶媒および 電解質依存性に関する理論的研究」, 文部科学省「最 先端・高性能汎用スーパーコンピュータの開発利用」 プロジェクト 次世代ナノ統合シミュレーションソフ トウェアの研究開発 次世代情報機能・材料分野 公 開研究会, 東京国際フォーラム(東京),2010 年 3 月 10 日-11 日.
- [39] 安藤康伸、合田義弘、常行真司:「Al 原子と SiON/SiC(0001) 表面の Schottky 接合に関する電子 状態計算」、日本物理学会年次大会、岡山大学津島キャ ンパス(岡山)、2010年3月20-23日.
- [40] 越智正之,袖山慶太郎,佐久間怜,常行真司:「第一原 理トランスコリレイティッド法の励起状態への適用」, 日本物理学会年次大会,岡山大学津島キャンパス(岡山),2010年3月20日.
- [41] 只野 央将,合田 義弘,常行 真司:「第一原理に基づ く結晶の非調和格子振動のモデル化」日本物理学会 年次大会,岡山大学(岡山市)2010年3月22日

[42] 岩崎誉志紀, 鈴木利昌, 水野洋一, 常行真司: ペロブ スカイト酸化物中にドープされた 3d 遷移金属の第一 原理計算, 日本物理学会 年次大会, 岡山市(岡山), 2010年3月22日.

招待講演

- [43] 常行真司:「第一原理電子状態計算の挑戦:固体の精密計算からタンパク質のモデル化まで」,第一回量子シミュレーションとその未来を探る研究会(大阪大学付属図書館理工学図書館),2009年6月18日.
- [44] 常行真司:「第一原理電子状態計算のフロンティア」、
 日本物理学会秋季大会領域11,領域4,領域8,領域9,領域12合同シンポジウムシンポジウム「第一原 理電子状態計算のフロンティアと次世代計算機への 期待」(熊本大学),2009年9月26日.
- [45] 常行真司:「次世代ナノ情報機能・材料」,計算科学振 興財団第6回(平成21年度第3回)産学官ユーザー ネットワーク研究会(大阪大学),2009年9月30日.
- [46] 常行真司:「波動関数理論にもとづく凝縮系の電子状態計算」、スーパーコンピューターワークショップ 2010 (自然科学研究機構岡崎コンファレンスセンター)、 2010年1月14日.
- [47] 常行真司:「計算物質科学の拠点形成を目指して-『新物質・エネルギーの創成』戦略機関(FS)の取り 組み」、次世代スーパーコンピュータ戦略プログラム・ 分野5「物質と宇宙の起源と構造」・科研費新学術領域 研究「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的 物質構造の解明」合同シンポジウム「次世代スーパー コンピュータでせまる物質と宇宙の起源と構造」(東 京ステーションコンファレンス)、2010年3月15日.
- [48] 常行真司:「第一原理電子状態計算の基礎」,第46回 応用物理学会スクール「コンピューテーショナル・マ テリアルズ・デザイン(CMD)入門」(東海大学湘南 キャンパス),2010年3月17日.
- (学外セミナー(招待講演))
- [49] 常行真司:「表面吸着系の第一原理計算:単分子吸着 からナノパターン形成まで」,神戸大学システム情報 学研究科 計算科学先端セミナー,2009 年 6 月 8 日.
- [50] 常行真司:「アミノ酸集合体として見たタンパク質の電子状態」,千葉大学大学院理学研究科物性セミナー、2009年7月13日.
- [51] 常行真司:「FMO-LCMO法:フラグメント分子軌 道を用いた巨大生体分子の全系電子状態計算」,産業 技術総合研究所計算科学研究部門セミナー、2009年 7月16日.

4 物性実験

4.1 藤森研究室

藤森研究室では,角度分解光電子分光(angle-resolved photoemission spectroscpy: ARPES),軟X線磁気 円二色性(soft x-ray magnetic circular dichroism: XMCD)等の手法を用いて強相関電子系の研究を行っ ている.遷移金属化合物,磁性半導体などの複雑物 質が示す高温超伝導,スピン依存伝導,金属-絶縁 体転移,界面新奇物性等の発現機構解明をめざして いる.実験室光源を用いた測定の他に,紫外光から X線に至る高輝度放射光(高エネルギー加速器研究 機構フォトン・ファクトリー,SPring-8,広島大放 射光,スタンフォード放射光,台湾放射光)を用い 実験を行っている.

4.1.1 高温超伝導体

銅酸化物における高温超伝導は,その発見以来20 年余りにわたって多くの研究が積み重ねられてきた が,今だに機構解明に至っていない世紀の難問であ る.我々は,有力な実験手段であるARPESを用い て高温超伝導体の電子状態を調べている.さらに,近 年発見された鉄化合物の高温超伝導にも研究対象を 広げている.

銅酸化物超伝導体における面外乱れの効果

銅酸化物における電気伝導と超伝導は 2 次元的な CuO₂ 面で起こるため, CuO₂ 面内の乱れにより残 留抵抗が急激に増大し,臨界温度 T_c が低下する. 方,面外の乱れの残留抵抗と T_c への影響は小さい. しかし,残留抵抗の増大に対する T_c の減少の比は面 内よりも面外の乱れの方がはるかに大きく,面外の 乱れを制御することは高い T_c を得るために重要であ る.我々は,面外の元素を置換した Bi 系銅酸化物超 伝導体の ARPES を行い,面外の乱れにより超伝導 ギャップが減少し,擬ギャップの増大することを見出 した [7].

銅酸化物超伝導体における2ギャップ的振る舞い

銅酸化物における超伝導ギャップと擬ギャップが同 一起源か異なる起源かについて長年論争が続いてき



図 4.1.1: ARPES で明らかになった銅酸化物超伝導体の 超伝導ギャップ(Δ_{sc}, Δ_0)と擬ギャップ(Δ^*)のドーピ ング依存性 [12]. (a) 1 層型, (b) 2 層型.

たが,最近 CuO_2 面が 2 層重なった Bi 系超伝導体 において,超伝導ギャップと擬ギャップが異なる運動 量依存・ドーピング依存性を示すこと(いわゆる2 ギャップ的振る舞い)が ARPES を用いた研究で見 出された.我々は CuO_2 面層数が1枚の La 系超伝 導体についても2 ギャップ的振る舞いを見出し,超伝 導ギャップの大きさは層数に大きく依存するが,擬 ギャップの大きさは層数にほとんど依存しないこと を明らかにした(図 4.1.1).これは両ギャップの起 源が異なることを強く支持する [12].

銅酸化物超伝導体における化学圧力効果

これまで銅酸化物超伝導体の T_c に対する圧力効 果の研究が多くなされてきたが,その大部分はホー ルドープ系についてであり,電子ドープ系の研究は 限られている.我々は,電子ドープ型高温超伝導体 (R,Ce)₂CuO₄ 中の希土類元素 R のイオン半径を変 えることによって化学圧力をかけた試料の電子構造 を ARPES により調べた.化学圧力によるフェルミ 面の形状変化が,T_cの降下,反強磁性状態の安定化 をもたらしていると結論した [13].

鉄系超伝導体の3次元的なフェルミ面

鉄系超伝導体は、その層状結晶構造や相図が銅酸 化物超伝導体と似ていることから、2次元的な電子 構造を持つものと考えられてきた.我々は、反強磁 性体母物質 BaFe₂As₂ と超伝導体 Ba(Fe,Co)₂As₂ を 様々な光エネルギーを用いた ARPES で調べ、強い 3次元性をもつホール型フェルミ面を見出した.こ の結果は、2次元的フェルミ面のネスティングに基 づいて議論されてきた反強磁性磁気秩序や超伝導の 発現機構の見直しを迫るものである[23].



図 4.1.2: LaAlO₃/LaVO₃/LaAlO₃ 3 層構造における電 子状態の LaAlO₃ キャップ層厚さ依存性 [11]. (a) V 1*s* 内 殻, (b) V³⁺とV⁴⁺の強度比.

4.1.2 酸化物ヘテロ界面

金属-絶縁体転移,巨大磁気抵抗,スピン・電荷・ 軌道秩序など多彩な物性を示す遷移金属酸化物およ びこれらの物質がつくる界面の,バルクにない新しい物性が発現する機構の解明を目指して,光電子分 光,軟X線吸収分光を用いて電子状態を調べている.

遷移金属酸化物界面へのホールドーピング

絶縁体同士からなる LaAlO₃/SrTiO₃ 界面において 電子キャリアーによる金属性伝導が発見されてから, 界面の"電子的再構築"がもたらす新規物性に興味が 集まっている.我々は,LaAlO₃/LaVO₃/LaAlO₃ 3 層構造に対して薄膜電気伝導測定および内殻光電子 分光測定を行い,界面へのホールがドープされるこ とを示し,そのメカニズムも明らかにした.図4.1.2 は,LaAlO₃ キャップ層の増加とともに V³⁺の一部 が V⁴⁺ に変換され,ホールがドープされていること を示している[11].

基板圧力による Madelung ポテンシャルのシフト

様々なフィリング制御型強相関酸化物において, キャリアードーピングに伴う内殻準位の一様なシフ トから化学ポテンシャルのシフトが求められてきた. 我々は,バンド幅制御が内殻準位に及ぼす効果を調 べるために,様々な格子定数を持つ基板上にエピタ キシャル成長した(La,Sr)MnO3の内殻光電子スペク トルを測定した.その結果,内殻準位は様々な方向 と量のシフトを示し,基板圧力による Madelung ポ テンシャルの変化として解析した[16].

4.1.3 スピントロニクス材料

従来のエレクトロニクスにスピンの自由度を導入 した"スピントロニクス"が金属系材料を用いて実現 され,半導体を用いたスピントロニクスも実現が期 待されている.これらの物質の,通常の磁気測定で は得られないミクロで局所的な磁性を,我々は元素 選択的な手法である XMCD を用いて調べている.

常磁性を示す Co ドープ ZnO における磁気的相互 作用

Coをドープした ZnO は室温において強磁性を示 すことが報告されているが,キャリアー濃度が低い 試料は常磁性を示すことも報告されている.今回我々 は,常磁性を示す Coドープ ZnO の帯磁率と XMCD の測定を温度と磁場を変えて行なった.その結果,常 磁性試料では Co原子間に弱い反強磁性的相互作用 が働くことを見出した [26].

Fe をドープした ZnO ナノ粒子

希薄磁性半導体をナノ粒子化することによって,バ ルクと異なる磁気的性質が期待される.Feをドープ した ZnO については強磁性が報告され,粒子のコア に存在する Fe²⁺のスピンをシェルに存在する Fe³⁺ が媒介するというモデルが提唱されている.我々は, 軟 X 線吸収と XMCD を用いて Fe の価数と結晶場 を,強磁性・常磁性・非磁性成分に分離して同定し た.その結果,フェリ磁性的に結合する Fe³⁺ が主に 強磁性を担っていると結論した.[27].

<受賞>

- [1] 出田真一郎: 8-th Asia-Pacific Workshop on Novel Quantum Materials (Yonsei University, Seoul, 5-6 July 2009) 最優秀ポスター賞.
- [2] 出田真一郎: 2010 APCTP-A3 Winter School and Workshop on Frontiers in Electronic Quantum Matter (Phoenix Park, Korea, 2-6 February 2009) 優秀ポスター賞.
- [3] 山上浩志,斎藤祐児,岡根哲夫,藤森伸一,竹田幸治, 大河内拓雄,保井晃,藤森淳,福田義博:平成21年 度独立行政法人日本原子力研究開発機構研究開発功 績賞「JAEA ビームライン BL23SU の軟 X 線固体分 光の高度化」.

<新聞・雑誌・ホームページ等紹介記事>

[4]「電気の流れ3次元直接観測,超電導の解明に糸口/ 原子力機構」電子新聞,5月27日2面;「金属内電子 連側的に変化,原研機構など,超電導解明に道」日経 産業新聞,5月29日夕刊11面;「"重い電子"がつく るフェルミ面,世界初直接観測に成功,原子力機構な どのグループ」科学新聞,2009年6月7日1面.

<報文>

(原著論文)

- [5] T. Yanagida, Y. Saitoh, Y. Takeda, H. Tanaka, T. Kawai, A. Fujimori: X-Ray Absorption Magnetic Circular Dichroism of (La,Ce)MnO₃ Thin Films, Phys. Rev. B **79** (2009) 132405–1-4.
- [6] M. Hashimoto, T. Yoshida, K. Tanaka, A. Fujimori, M. Okusawa, S. Wakimoto, K. Yamada, T. Kakeshita, H. Eisaki, and S. Uchida: Coherent Quasi-Particles-to-Incoherent Hole-Carriers Crossover in Underdoped Cuprates, Phys. Rev. B 79 (2009) 140502(R)-1-4; Selected for an Editor's Choice; arXiv:0806.0101.
- [7] M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, D.H. Lu, Z.-X. Shen, M. Kubota, K. Ono, M. Ishikado, K. Fujita and S. Uchida:, Effects of Out-of-Plane Disorder on the Nodal Quasiparticle and Superconducting Gap in Bi2201, Phys. Rev. B **79** (2009) 144517–1-6; arXiv:0807.1779.
- [8] H. Wadati, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, A. Fujimori, M. Oshima, M. Lippmaa, M. Kawasaki, and H. Koinuma: *In-situ* Photoemission Study of Nd_{1-x}Sr_xMnO₃ Epitaxial Thin Films, Phys. Rev. B **79** (2009) 153106–1-4.
- [9] M. Kobayashi, Y. Ishida, J.I. Hwang, G.S. Song, M. Takizawa, A. Fujimori, Y. Takeda T. Ohkochi, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Gupta, H. T. Cao and K. V. Rao: Hybridization between the Conduction Band and 3d Orbitals in the Oxide-Based Diluted Magnetic Semiconductor In_{2-x}V_xO₃, Phys. Rev. B **79** (2009) 205203–1-5; arXiv:0801.4244.
- [10] T. Okane, T. Ohkoch, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, A. Yasui, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, Y. Matsumoto, M. Sugi, N. Kimura, T. Komatsubara, and H. Aoki: 4f-Derived Fermi Surfaces of CeRu₂(Si_{1-x}Ge_x)₂ near the Quantum Critical Point: Resonant Soft X-Ray ARPES Study, Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 216401–1-4.
- [11] M. Takizawa, Y. Hotta, T. Susaki, Y. Ishida, H. Wadati, Y. Takata, K. Horiba, M. Matsunami, S. Shin, M. Yabashi, K. Tamasaku, Y. Nishino, T. Ishikawa, A. Fujimori and H.Y. Hwang: Remote Hole-Doping of Mott Insulators on the Nanometer Scale, Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 236401–1-4; arXiv:0806.2191.
- [12] T. Yoshida, M. Hashimoto, S. Ideta, A. Fujimori, K. Tanaka, N. Mannella, Z. Hussain, Z.-X. Shen, M. Kubota, K. Ono, S. Komiya, Y. Ando, H. Eisaki, and S. Uchida: Universal versus Material-Dependent Two-Gap Behaviors in the High-T_c Cuprates: Angle-Resolved Photoemission Study of La_{2-x}Sr_xCuO₄, Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 037004–1-4; arXiv:0812.0155.
- [13] M. Ikeda, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, H. Das, T.Saha-Dasgupta, K. Unozawa, Y. Kaga, T. Sasagawa and H. Takagi: Effects of

Chemical Pressure on the Fermi Surface and Band Dispersion in the Electron-Doped High- T_c Superconductors, Phys. Rev. B **80** (2009) 014510–1-6; arXiv:0803.4059.

- [14] T. Ohkochi, T. Toshimitsu, H. Yamagami, S-i. Fujimori, A. Yasui, Y.Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, Y. Miyauchi, Y. Okuda, R. Settai, and Y. Onuki: Observation of Itinerant Ce 4f Electronic States in CeTrSi₃ Studied by Angle-Resolved Ce $3d \rightarrow 4f$ Resonance Photoemission Spectroscopy, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 084802–1-6.
- [15] H. Wadati, A. Chikamatsu, M. Takizawa, H. Kumigashira, T. Yoshida, T. Mizokawa, A. Fujimori, M. Oshima, and N. Hamada: Systematic Tight-Binding Analysis of ARPES Spectra of Transition-Metal Oxides, J. Phys. Soc. Jpn. 78 (2009) 094709–1-4; arXiv:0810.4905.
- [16] H. Wadati, A. Maniwa, A. Chikamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, T. Mizokawa, A. Fujimori, and G. A. Sawatzky: Madelung Potentials and Covalency Effect in Strained La_{1-x}Sr_xMnO₃ Thin Films Studied by Core-Level Photoemission Spectroscopy, Phys. Rev. B 80 (2009) 125107–1-4; arXiv:0905.1290.
- [17] T. Yoshida, X.J. Zhou, Z. Hussain, Z.-X. Shen, A. Fujimori, H. Eisaki, and S. Uchida: Underlying Fermi Surface of Sr_{14-x}Ca_xCu₂₄O₄₁ in Two-Dimensional Momentum Space Observed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, Phys. Rev. B 80 (2009) 052504–1-4; arXiv:0903.2918.
- [18] T. Okane, T. Ohkochi, T. Inami, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, N. Kawamura, M. Suzuki, S. Tsutsui, H. Yamagami, A. Fujimori, A. Tanaka, D. Aoki, Y. Honma, Y. Shiokawa, E. Yamamoto, Y. Haga, and Y. Onuki: Element and Orbital Specific Observation of Two-Step Magnetic Transition in NpNiGa₅: X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study, Phys. Rev. B **80** (2009) 104419–1-7.
- [19] K. Horiba, A. Maniwa, A. Chikamatsu, K. Yoshimatsu, H. Kumigashira, H. Wadati, A. Fujimori, S. Ueda, H. Yoshikawa, E. Ikenaga, J.J. Kim, K. Kobayashi, and M. Oshima: Pressure-Induced Change in the Electronic Structure of Epitaxially Strained La_{1-x}Sr_xMnO₃ Thin Films, Phys. Rev. B 80 (2009) 132406–1-4.
- [20] M. Ikeda, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, Y. Kaga, T. Sasagawa, and H. Takagi: Differences in the High-Energy Kink between Hole- and Electron-Doped High- T_c Superconductors, Phys. Rev. **80** (2009) 184506–1-4; arXiv:0902.4280.
- [21] R.J.O. Mossanek, M. Abbate, P.T. Fonseca, A. Fujimori, H. Eisaki, S. Uchida, and Y. Tokura: Optical Spectra and X-Ray Absorption Spectra of the Core Level and Valence Band of the Mott-Hubbard *RVO*₃ (*R* = Sr, Ca, La, and Y) Compounds, Phys. Rev. B **80** (2009) 195107–1-6.

- [22] Y. Takeda, T. Okane, T. Ohkochi, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, and A. Ochiai: Bulk 5f Electronic States of the Uranium Monochalcogenide US As Seen via Soft X-Ray Photoemission, Phys. Rev. B 80 (2009) 161101(R)–1-4; arXiv:0909.2917
- [23] W. Malaeb, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Kihou, P.M. Shirage, H. Kito, A. Iyo, H. Eisaki, Y. Nakajima, T. Tamegai, and R. Arita: Three-Dimensional Electronic Structure of Superconducting Iron Pnictides Observed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 123706–1-4; arXiv:0906.1846.
- [24] M. Takizawa, M. Minohara, H. Kumigashira, D. Toyota, M. Oshima, H. Wadati, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Lippmaa, M. Kawasaki, H. Koinuma, G. Sordi and M. Rozenberg: Coherent and Incoherent d Band Dispersions in SrVO₃, Phys. Rev. B 80 (2009) 235104–1-4; arXiv:0806.2231.
- [25] T. Yoshida, S. Komiya, X. J. Zhou, K. Tanaka, A. Fujimori, Z. Hussain, Z.-X. Shen, Y. Ando, H. Eisaki, and S. Uchida: Zn-Impurity Effects on Quasi-Particle Scattering in La_{2-x}Sr_xCuO₄ Studied by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, Phys. Rev. B 80 (2009) 245113–1-6; arXiv:1003.2267.
- [26] M. Kobayashi, Y. Ishida, J. I. Hwang, Y. Osafune, A. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, K. Kobayashi, H. Saeki, T. Kawai, and H. Tabata: Antiferromagnetic Interaction between Paramagnetic Co Ions in the Diluted Magnetic Semiconductor Zn_{1-x}Co_xO, Phys. Rev. B **81** (2010) 075204– 1-7; arXiv:1001.0712.
- [27] T. Kataoka, M. Kobayashi, Y. Sakamoto, G.S. Song, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D. J. Huang, C. T. Chen, T. Ohkochi, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Tanaka, S. K. Mandal, T. K. Nath, D. Karmakar, and I. Dasgupta: Electronic Structure and Magnetism of the Diluted Magnetic Semiconductor Fe-Doped ZnO Nano-Particles, J. Appl. Phys. **107** (2010) 033718– 1-7; arXiv:0904.1838.
- [28] R.J.O. Mossanek, M. Abbate, T. Yoshida, A. Fujimori, Y. Yoshida, N. Shirakawa, H. Eisaki, S. Kohno, P.T. Fonseca, and F.C. Vicentin: Electronic Structure of the Band Filling Controlled CaVO₃ and LaVO₃ Compounds, J. Phys.: Condens. Matter **22** (2010) 095601–1-8.
- [29] K. Tanaka, T. Yoshida, K.M. Shen, D.H. Lu, W.S. Lee, H. Yagi, A. Fujimori, Z.-X. Shen, Risdiana, T. Fujii, and I. Terasaki: Evolution of the Electronic Structure from the Insulator to the Supercondctor in $Bi_2Sr_{2-x}La_x(Ca,Y)Cu_2O_{8+\delta}$, Phys. Rev. B **81** (2010) 125115–1-5; arXiv:1002.2972.

(会議抄録)

- [30] T. Kataoka, M. Kobayashi, G.S. Song, Y. Sakamoto, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D. J. Huang, C. T. Chen, S. K. Mandal, D. Karmakar and I. Dasgupta: X-Ray Magnetic Circular Dichroism Investigations of the Origin of Room Temperature Ferromagnetism in Fe-Doped ZnO Nano-Particles, in *Proceedings of 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2008)*, Jpn. J. Appl. Phys. **48** (2009) 04C200.
- [31] M. Kobayashi, T. Ohkochi, G. S. Song, T. Kataoka, Y. Sakamoto, A. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, H. Yamahara, H. Saeki, T. Kawai and H. Tabata: Experimental Observation of Bulk Band Dispersions in the Oxide Semiconductor ZnO, *Proceedings of 29-th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2008)*; J. Appl. Phys. **105** (2009) 122403–1-4.
- [32] K. Sato, Y. Harada, M. Taguchi, S. Shin and A. Fujimori: Characterization of Fe 3d States in CuFeS₂ by X-Ray Emission Spectroscopy, *Proceedings of* 16-th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-16), Phys. Status Solidi A **206** (2009) 1096-1100.
- [33] T. Okane, T. Ohkochi, Y. Takeda, S-i. Fujimori, A. Yasui, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, Y. Matsumoto, M. Sugi, N. Kimura, and T. Komatsubara: Band Structures of CeRu2(Si_{1-x}Ge_x)₂ Studied by Resonant Soft X-ray ARPES, *Proceedings of International Conference on Quantum Criticality and Novel Phases*, Phys. Stat. Solidi B **247** (2010) 697-699.

(綜説,解説,その他)

- [34] 竹田幸治,小林正起,岡根哲夫,大河内拓雄,岡本 淳,斎藤祐児,小林啓介,山上浩志,藤森淳,田中 新,岡林潤,尾嶋正治,大矢忍,ファムナムハイ,田 中雅明:軟X線磁気円二色性による希薄磁性半導体 Ga_{1-x}Mn_xAsのMnイオンの磁気的相互作用の研究, 日本放射光学会誌,22 (2009) 202-209.
- [35] A. "Observa-Fujimori: Comment on Selective of a Novel Orbital Mott tion Transition $Ca_{1.8}Sr_{0.2}RuO_4$ ", Jourin nal Club for Condensed Matter Physics. http://www.condmatjournalclub.org/?p=729.
- [36] 石田憲二,佐藤卓,芝内他孝禎,藤森淳:鉄系超伝 導体研究の現状と課題-物性,日本物理学会誌,64 (2009) 817-825.
- [37] A. Fujimori: Electric Field Control of Spin-Orbit Interaction and Superconductivity at Oxide Interfaces, Journal Club for Condensed Matter Physics, http://www.condmatjournalclub.org/?p=843

(編著書)

[38] 藤森淳:放射光を用いたスピントロニクス材料の電子 状態評価,高梨弘毅監修:スピントロニクスの基礎と 材料・応用技術の最前線(シーエムシー出版,2009年)第25章, p. 297.

(学位論文)

- [39] Walid Malaeb: Iron-Pnictide and Cuprate Hightemperature Superconductors Investigated by Photoemission Spectroscopy (博士論文,新領域創 成科学研究科)
- [40] 片岡隆史: X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of Dilute Magnetism in Zinc Oxide and Metal Phthalocyanine (博士論文,新領域創成科学 研究科)
- [41] 相崎真一: *In-Situ* Photoemission Study of Epitaxially-Grown SrVO₃ Thin Films (修士論文)
- [42] 石上啓介: Photoemission Study of the Infinite-Layer Iron Oxide Sr_{1-x}Ba_xFeO₂ (修士論文,新領域創成 科学研究科)

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [43] A. Fujimori: Superconductivity on the Fermi Arc from ARPES Data, 2009 Gordon Research Conference on Superconductivity (Hong Kong University of Science and Technology, 7-11 June 2009)
- [44] A. Fujimori: Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy of Fe Pnictide Superconductors, ICC-IMR Workshop "Physics on Transition Metal Based Superconductors" (東北大金研, 2009年6月 24-26日)
- [45] A. Fujimori: Pseudogap, Fermi Arc, and Kink in Cuprate Superconductors, *ibid*.
- [46] A. Fujimori: Unusual High-Temperature Behaviors of High-T_c Cuprates, 8-th Asia-Pacific Workshop on Novel Quantum Materials (Yonsei University, Seoul, 5-6 July 2009).
- [47] A. Fujimori: Superconducting Gap, Pseudogap, and Critical Temperature in High-Tc Superconductors, Division of Physics & Applied Physics (PAP) Conference (Nanyang Technological University, Singapore, 20-22 July, 2009).
- [48] A. Fujimori: Material Dependence of Pseudogap and Superconducting Gap in Cuprates, 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S-IX) (Tokyo, 8-12 September 2009).
- [49] T. Yoshida: Universal versus Material-Dependent Two-Gap Behavior of the High-T_c Cuprate Superconductors, UVSOR Workshop on Low-Energy Photoemission of Solids using Synchrotron Radiation (LEPES 09) (UVSOR, 3-4 October 2009).
- [50] A. Fujimori: ARPES Studies of Fe Pnictides and Related Compounds, Workshop for A3 Foresight Program "Joint Research on Novel Properties of Emergent Materials" (Huangshan, China, 25-28 October 2009)

- [51] S. Ideta, K. Takashima, T. Yoshida, M. Hashimoto, A. Fujimori, H. Anzai, T. Fujita, Y. Nakashima, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, M. Kubota, K. Ono, D.H. Lu, Z.-X. Shen, K. M. Kojima, and S. Uchida: Universal Relationship between Fermi Arc Length, Energy Gaps, and Critical Temperature of the High-T_c Cuprate Superconductors, *ibid*.
- [52] A. Fujimori: Spectroscopic Characterization of Diluted Ferromagnetic Oxides and Semiconductors, Magnetism, Superconductivity and Phase Transitions in Novel and Complex Materials (MSM09) (Kolkata, 11-14 November 2009).
- [53] A. Fujimori: Fermi Arc and Superconducting Gap in Cuprates Revealed by ARPES, 2010 APCTP-A3 Winter School and Workshop on Frontiers in Electronic Quantum Matter (Phoenix Park, Korea, 2-6 February 2009).
- [54] A. Fujimori: Fermiology of Oxide Thin Films under Epitaxial Strain, 10th Japan-Korea-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (Himeji, 11-13 March 2009)

一般講演

- [55] T. Higuchi, Y. Hotta, T. Susaki, A. Fujimori, and H.Y. Hwang: Modulation Doping of a Mott Quantum Well by a Proximate Polar Discontinuity, 2009 MRS Spring Meeting (San Francisco, 13-17 April, 2009).
- [56] T. Yoshida, W. Malaeb, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Kihou, P.M. Shirage, H. Kito, A. Iyo, C. H. Lee, H. Eisaki, R. Arita, Y. Nakajima, and T. Tamegai: Observation of the Three-Dimensional Electronic Structure in Iron-Pnictides Ba(Fe,Co)₂As₂, *International Workshop on the Search for New Superconductors* (Hayama, 12-16 May, 2009).
- [57] T. Kataoka, Y. Sakamoto, M. Kobayashi, Y. Yamazaki, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D. J. Huang, C. T. Chen, Y. Takeda, T. Ohkochi, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, M. Kapilashrami, L. Belova, and K. V. Rao: XMCD Analysis of ZnO-Based Ferromagnetic Semiconductors, 5-th International School and Confrerence on Spintronics and Quantum Information Technology (SPIN-TECH 5) (Krakow, 7-11 July, 2009).
- [58] V. R. Singh, Y. Sakamoto, T. Kataoka, Y. Yamazaki, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, A. Tanaka, Y. Yamada, K. Ueno, T. Fukumura, and M. Kawasaki: XMCD Study of Ferromagnetic Semiconductor Ti_{1-x}Co_xO_{2-δ} Thin Films, *ibid*.
- [59] T. Yoshida, W. Malaeb, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Kihou, P.M. Shirage, H. Kito, A. Iyo, H. Eisaki, Y. Nakajima, T. Tamegai, and R. Arita: Three-Dimensional Electronic Structure of Iron Pnictides BaFe_{2-x}Co_xAs₂ Observed by

Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, 8-th Asia-Pacific Workshop on Novel Quantum Materials (Yonsei University, Seoul, 5-7 July, 2009).

- [60] S. Aizaki, K. Yoshimatsu, S. Ideta, T. Yoshida, K. Horiba, H. Kumigashira, M. Oshima, and A. Fujimori: Self-Energy Analysis of Kink in the V 3d Band Dispersion of SrVO₃, *ibid*.
- [61] S. Ideta1, K. Takashima, T. Yoshida, M. Hashimoto, A. Fujimori, H. Anzai, T. Fujita, Y. Nakashima, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, M. Kubota, K. Ono, D.H. Lu, Z.-X. Shen, K. M. Kojima, and S. Uchida: Universal Relationship between Fermi Arc Length, Energy Gaps, and Critical Temperature of High-T_c Cuprate Superconductors, *ibid.*
- [62] Y. Yamazaki, T. Kataoka, Y. Sakamoto, V.R. Singh, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, K. Ishikawa, K. Zhang, S. Kuroda: Soft X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of the Diluted Magnetic Semiconductor Zn_{1-x}Cr_xTe, *ibid*.
- [63] T. Yoshida, W. Malaeb, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Kihou, P. M. Shirage, H. Kito, A. Iyo, H. Eisaki, R. Arita, Y. Nakajima, and T. Tamegai: Observation of the Three-Dimensional Electronic Structure of Iron-Pnictides Ba(Fe,Co)₂As₂, *International Workshop on Strong Correlations and Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy (CORPES09)* (Zürich, 19-24 July, 2009).
- [64] S. Ideta, K. Takashima, T. Yoshida, M. Hashimoto, K. M. Kojima, A. Fujimori, S. Uchida, H. Anzai, T. Fujita, Y. Nakashima, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, M. Kubota, K. Ono, D. H. Lu, and Z.-X. Shen: Signature of Interlayer Interaction in the Tri-layer High-T_c Cuprate Superconductor Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+δ}, *ibid*.
- [65] T. Yoshida, W. Malaeb, S. Ideta, A. Fujimori, R. Moore, D.H. Lu, Z.-X. Shen, M. Kubota, K. Ono, S. Komiya, Y. Ando, H. Eisaki, Y. Fujimaki, and S. Uchida: Pseudo-Gap and Superconducting Gap near the Anti-Node in La_{2-x}Sr_xCuO₄, A3 Foresight Program "Joint Research on Novel Properties of Complex Oxides" Hokkaido Summer School (Rusutsu, 3-5 August, 2009)
- [66] W. Malaeb, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Kihou, P. M. Shirage, H. Kito, A. Iyo, H. Eisaki, Y. Nakajima, T. Tamegai, and R. Arita: Three-Dimensional Electronic Structure of Superconducting Iron Pnictides Observed by Angle-resolved Photoemission Spectroscopy, *ibid*.
- [67] S. Aizaki, K. Yoshimatsu, S. Ideta, T. Yoshida, K. Horiba, H. Kumigashira, M. Oshima, and A. Fujimori: Self-Energy Analysis of Kink in the V 3d Band Dispersion of SrVO₃, *ibid*.
- [68] S. Ideta, K. Takashima, T. Yoshida, M. Hashimoto, K. M. Kojima, A. Fujimori, S. Uchida, H. Anzai, T. Fujita, Y. Nakashima, A. Ino, M. Arita,

H. Namatame, M. Taniguchi, M. Kubota, K. Ono, D.H. Lu, and Z. -X. Shen: Signature of Interlayer Cooper pairing in the Tri-layer High- T_c Cuprate Superconductor Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+ δ} Observed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, *ibid*

- [69] Y. Yamazaki, T. Kataoka, Y. Sakamoto, V.R. Singh, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, K. Ishikawa, K. Zhang, and S. Kuroda: Soft X- Ray Magnetic Circular Dichroism Study of Diluted Magnetic Semiconductor Zn_xCr_{1-x}Te Thin Films, *ibid*.
- [70] T. Yoshida, W. Malaeb, S. Ideta, A. Fujimori, R. Moore, D.H. Lu, Z.-X. Shen, M. Kubota, K. Ono, S. Komiya, Y. Ando, H. Eisaki, Y. Fujimaki, and S. Uchida: Pseudogap and Superconducting Gap in the Anti-Nodal Region of La_{2-x}Sr_xCuO₄, International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S-9) (Tokyo, 7-12 September, 2009).
- [71] W. Malaeb, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Kihou, P.M. Shirage, H. Kito, A. Iyo, C. H. Lee, H. Eisaki, Y. Nakajima, T. Tamegai, and R. Arita: Three-Dimensional Electronic Structure of Superconducting Iron Pnictides Observed by Angle-resolved Photoemission Spectroscopy, *ibid.*
- [72] S. Ideta, K. Takashima, T. Yoshida, M. Hashimoto, K. M. Kojima, A. Fujimori, S. Uchida, H. Anzai, T. Fujita, Y. Nakashima, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, M. Kubota, K. Ono, D. H. Lu, and Z. -X. Shen: Signature of Interlayer Interaction in the Tri-layer High- T_c Cuprate Superconductor Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+ δ} Observed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, *ibid*.
- [73] T. Okane, T. Ohkochi, Y. Takeda, S-i. Fujimori, A. Yasui, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Fujimori, Y. Matsumoto, M. Sugi, N. Kimura, and T. Komatsubara: Band Structures of CeRu₂(Si_{1-x}Ge_x)₂ Studied by Resonant Soft X-Ray ARPES, *International Conference on Quantum Criticality and Novel Phases* (Dresden, 2-5 August, 2009).
- [74] K. Yoshimatsu, T. Okabe, H. Kimigashira, S. Okamoto, S. Aizaki, A. Fujimori, and M. Oshima: Bandwidth Controlled Metal-Insulator Transition in SrVO₃ Thin Films, 16th International Workshop on Oxide Electronics (WOE16) (Tarragona, Spain, 4-7 October 2009).
- [75] I. Nishi, W. Malaeb, W. Uemura, T. Yoshida, A. Fujimori, Y. Kotani, M. Kubota, K. Ono, M. Yi, D. H. Lu, R. Moore, Z.-X. Shen, M. Ishikado, A. Iyo, K. Kihou, H. Kito, H. Eisaki, and S. Shamoto: Angle-Resolved Photoemission Study of PrFeAsO_{1-y}, Workshop for A3 Foresight Program "Joint Research on Novel Properties of Emergent Materials" (Huangshan, China, October 25-28, 2009).

- [76] K. Yoshimatsu, T. Okabe, H. Kimigashira, S. Okamoto, S. Aizaki, A. Fujimori, and M. Oshima1: Dimensional Crossover Induced Metal-Insulator Transition in SrVO₃ Thin Films Studied by *in situ* Photoemission Spectroscopy, *International Workshop on Oxide Surfaces (IWOX-VII)* (Echigo-Yuzawa, 11-15 January 2010).
- [77] T. Yoshida, I. Nishi, A Fujimori, M. Yi, R. Moor, D.H. Lu, Z.-X. Shen, K. Kihou, P. M. Shirage, H. Kito, C.-H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, and H. Harima: Angle-resolved photoemmission study of KFe₂As₂, 2010 APCTP-A3 Winter School and Workshop on Frontiers in Electronic Quantum Matter (Phoenix Park, Korea, February 2-6, 2009).
- [78] S. Ideta, T. Yoshida, W. Malaeb, A. Fujimori, M. Kubota, K.Ono, H. Kito, H. Eisaki, A. Iyo, Y. Tomioka, T. Ito, H. Harima, M. Nakajima, K.M. Kojima, and S. Uchida: Fermi Surfaces of BaNi₂P₂ Observed by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy. *ibid.*
- [79] I. Nishi, W. Malaeb, T. Yoshida, A. Fujimori, Y. Kotani, M. Kubota, K. Ono, M. Yi, D.H. Lu, R. Moore, Z.-X. Shen, M. Ishikado, A. Iyo, K. Kihou, H. Kito, H. Eisaki, S. Shamoto, and R. Arita: Angle-Resolved Photoemission Study of PrFeAsO_{1-y}, *ibid*.
- [80] W. Uemura, W. Malaeb, T. Kataoka, K. Ishigami, S. Aizaki, T. Yoshida, A. Fujimori, and T. Sasagawa: Temperature Dependence of the Chemical Potential in Nd_{2-x}Ce_xCuO₄, *ibid*.
- [81] V.R. Singh, T. Kataoka, Y. Yamazaki, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.-J. Huang, C.T. Chen, Y. Yamada, T. Fukumura, and M. Kawasaki: Indication of Intrinsic Ferromagnetism in Anatase Ti_{1-x}Co_xO_{2-δ} Thin Films: X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study, 10th Japan-Korea-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (Himeji, March 11-13, 2009)
- [82] V.K. Verma, V.R. Singh, K. Ishigami, T. Kataoka, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.-J. Huang, C.T. Chen, S. Jana, S. Ray, N.S. Karan, S. Jana, and N. Pradhan :X-Ray Absorption Spectroscopy and X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of Mn-Doped ZnS Nanoparticles, *ibid*.
- [83] K. Ishigami, T. Kataoka, Y. Yamazaki, T. Yoshida, A. Fujimori, F.H. Chang, H.J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, S-I. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, T. Yamamoto, H. Kageyama, and K. Yoshimura: X-Ray Absorption and Photoemission Study of the Infinite-Layer Iron Oxide Sr_{1-x}Ba_xFeO₂, *ibid*.
- [84] T. Yoshida, W. Malaeb, I. Nishi, A. Fujimori, M. Yi, R. Moor, D.H. Lu, Z.-X. Shen, M. Kubota, K. Ono, K. Kihou, P.M. Shirage, H. Kito, A. Iyo, C.H. Lee, H. Eisaki, Y. Nakajima, T. Tamegai. R. Arita, and H. Harima: Three-Dimensional Electronic Structure of the Iron Pnictides Superconductors

Observed by ARPES, 2nd Nanyang Technological University-University of Tokyo Joint Workshop (University of Tokyo, February 22, 2010).

[85] T. Kataoka, V. R. Singh, Y. Yamazaki, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, G.Z. Xing, J.W. Seo, C. Panagopoulos, and T. Wu: Electronic Structure of Ferromagnetic Cu-Doped ZnO Nanowires using X-Ray Magnetic Circular Dichroism and X-Ray Photoemission Spectroscopy, *ibid.*

(国内会議)

招待講演

- [86] 藤森淳:光電子分光からみた鉄系化合物の電子状態と磁性,日本物理学会秋の分科会シンポジウム「鉄系化合物の遍歴性と局在性-鉄の磁性はどこまで理解されたか-」(熊本大学,2009年9月25-28日).
- [87] A. Fujimori: Photoemission Spectroscopy of Fe Compounds: Electron Correlation and Magnetic Fluctuation, GCOE Workshop on Condensed Matter and Photo Sciences (東京大学, 2009年10月7 日)
- [88] 吉田鉄平: ARPES Study of Iron Pnictides Superconductors, Mini Workshop on Iron-Pnictides (京 都大学基礎物理学研究所, 2009年10月16日).
- [89] 藤森淳:軟X線磁気円二色性によるスピントロニク ス材料の研究,物構研シンポジウム'09放射光・中性 子・ミュオンを用いた表面・界面科学の最前線(つく ばエポカル,2009年11月17-18日).
- [90] 藤森淳:鉄ヒ素系超伝導体の光電子分光,鉄系高温超 伝導研究の最前線-メカニズムおよび物性のレビュー と展望(上野,2009年11月28日).
- [91] 藤森淳: ARPES で見た強相関物質の化学的・物理的 圧力による電子構造変化,新学術領域研究「重い電 子系の形成と秩序化」ワークショップ 先端光電子分 光による重い電子系研究(岡山大学,2009年12月 25-26日).
- [92] 藤森淳: ARPES による遷移金属ニクタイドのフェル ミオロジー,日本物理学会第65回年次大会シンポジ ウム「光電子分光によるフェルミオロジー研究の最先 端」(岡山大学,2010年3月20-23日).
- [93] 藤森淳:放射光分光を用いたスピン源材料の磁性と電子状態の評価,金属学会2010年度春期大会(筑波大学,2010年3月28-30日)

一般講演

- [94] 吉田鉄平:鉄系超伝導体の角度分解光電子分光:磁気 秩序状態、3次元的電子構造,新規材料による高温超 伝導基盤技術第2回領域会議(秋葉原,2009年7月 10-11日)
- [95] 藤森淳,小出常晴,竹田幸治:XMCD を用いた希薄 磁性半導体のキャラクタリゼーション,2009 年度科 研費特定領域「スピン流の創出と制御」研究会(北海 道大学,2009 年8月9-11日)

- [96] 竹田 幸治,岡根哲夫,藤森淳,斎藤祐児,山上浩志, 大矢忍,ファムナムハイ,田中雅明:軟X線磁気円 二色性による Ga_{1-x}Mn_xAsのアニール効果の研究, 同上.
- [97] 片岡 隆史,山崎陽, Vijay Raj Singh,藤森淳, F.H. Chang, H.J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen,石川 弘一郎,張珂,黒田眞司,山田良則,上野和紀,福村 知昭,川崎雅司,K.V. Rao:軟X線磁気円二色性に よる室温希薄強磁性半導体の電子状態研究,同上.
- [98] 片岡隆史,坂本勇太,小林正起,V.R. Singh,山崎 陽,藤森淳,F.-H. Chang,H.-J. Lin,D.J. Huang, C.T. Chen,朝倉大輔,小出常晴,M. Kapilashrami, L. Belova,K.V. Rao:軟X線磁気円二色性による希 薄磁性半導体ZnO:(Mn,N)の電子状態研究,日本物 理学会秋の分科会(熊本大学,2009年9月25-28日).
- [99] W. Malaeb, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Kihou, P. M. Shirage, H. Kito, A. Iyo, H. Eisaki, Y. Nakajima, T. Tamegai, and R. Arita: Three-dimensional Electronic Structure of Superconducting Iron Pnictides Observed by Angle-resolved Photoemission Spectroscopy, 同上.
- [100] 西一郎, W. Malaeb,吉田鉄平,藤森淳,小谷佳範, 久保田正人,小野寛太, M. Yi, D.H. Lu, R. Moore, Z.-X. Shen,石角元志,伊豫彰,木方邦宏,鬼頭聖, 永崎洋,社本真一: PrFeAsO_{1-y}の角度分解光電子 分光,同上.
- [101] 出田真一郎,高島憲一,橋本信,吉田鉄平,藤森淳, 小野寛太,久保田正人,安斎太陽,藤田泰輔,中島 陽佑,井野明洋,有田将司,生天目博文,谷口雅樹, D.H. Lu, Z.-X. Shen,小嶋健児,内田慎一:三層系 高温超伝導体 Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+δ} におけるフェル ミアークと超伝導ギャップ,同上.
- [102] 相崎真一,吉松公平,出田真一郎,吉田鉄平,藤森 淳,組頭広志,堀場弘司,尾嶋正治:SrVO3のバン ド分散におけるキンクの自己エネルギー解析,同上.
- [103] 出田真一郎,吉田鉄平,W. Malaeb,藤森淳,小野 寛太,久保田正人,鬼頭聖,永崎洋,伊豫彰,富岡泰 秀,伊藤利光:角度分解光電子分光による BaNi₂P₂ のフェルミ面の観測,同上.
- [104] 吉田鉄平, W. Malaeb, 出田真一郎, 藤森淳, R. Moore, D. H. Lu, Z.-X. Shen, 久保田正人, 小野 寛太, 小宮世紀, 安藤陽一, 永崎洋, 藤巻洋介, 内田 慎一:アンダードープ領域 La_{2-x}Sr_xCuO₄ のアンチ ノード付近における超伝導ギャップ, 同上.
- [105] 吉松公平,岡部崇司,組頭広志,岡本敏史,相崎真 ー,藤森淳,尾嶋正治:低次元化によりバンド幅制御 した SrVO₃ 薄膜の電子状態,同上.
- [106] 岡根哲夫,竹田幸治,藤森伸一,斎藤祐児,山上浩志,藤森淳,山本悦嗣,芳賀芳範,大貫惇睦:強磁性 ウラン化合物の軟X線吸収磁気円二色性測定,同上.
- [107] 藤森伸一,保井晃,竹田幸治,岡根哲夫,斎藤祐児, 山上浩志,藤森淳,芳賀芳範,山本悦嗣,大貫惇睦: UPd₂Al₃ および UNi₂Al₃ の常磁性状態におけるフェ ルミ面,同上.
- [108] 岡本淳, D.J. Huang, K.S. Chao, S.W. Huang, C.H. Hsu, 藤森淳, 增野敦信, 寺嶋孝仁, 高野幹夫,

C.T. Chen: Fe ペロブスカイトの電荷不均化転移に おける秩序構造研究,同上.

- [109] 出田真一郎,吉田鉄平,Walid Malaeb,藤森淳,久保田正人,小野寛太,鬼頭聖,永崎洋,伊豫彰,富岡泰秀,伊藤利光,播磨尚朝,中島正道,小嶋健児,内田慎一:角度分解光電子分光によるBaNi₂P₂のフェルミ面の観測,物構研シンポジウム'09 放射光・中性子・ミュオンを用いた表面・界面科学の最前線(つくばエポカル,10月17-18日).
- [110] 西一郎, W. Malaeb,吉田鉄平,藤森淳,小谷佳範, 久保田正人,小野寛太,M. Yi, D.H. Lu, R. Moore, Z.-X. Shen,石角元志,伊豫彰,木方邦宏,鬼頭聖, 永崎洋,社本真一: PrFeAsO_{1-y}の角度分解光電子 分光,同上.
- [111] 片岡隆史,坂本勇太,V.R. Singh,山崎陽,小林 正起,藤森淳,朝倉大輔,小出常晴,F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen,田中新,M. Kapilashrami, L. Belova, K.V. Rao:軟X線磁気 円二色性による希薄磁性半導体ZnO:(Mn,N)の電子 状態研究,同上.
- [112] 相崎真一,吉松公平,出田真一郎,吉田鉄平,堀場弘 司,組頭広志,尾嶋正治,藤森淳:エピタキシャル応 力下の SrVO3 薄膜の高分解能 ARPES 測定,同上.
- [113] 片岡隆史,山崎陽, V.R. Singh,藤森淳, F.H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, W. Dandan, X. Guozhong, T. Wu: ZnO:Cuナノワイヤーのバルク敏感軟 X 線磁気円二色性,第3回物性科学領域横断研究会(東京大学,2009年11月29日-12月1日).
- [114] 山崎陽, 片岡隆史, 坂本勇太, V.R. Singh, 藤森淳, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, 石川弘一郎, 張珂, 黒田眞司: 軟 X 線磁気円二色性 を用いた強磁性半導体 Zn_{1-x}Cr_xTe 薄膜の電子状態 の研究, 同上.
- [115] 鎌倉望,岡根哲夫,竹田幸治,藤森伸一,斎藤祐児, 山上浩志,藤森淳,藤田麻哉,藤枝俊,深道和明: La(Fe_{0.88}Si_{0.12})₁₃の電子状態,第23回日本放射光学 会年会・放射光科学合同シンポジウム(姫路,2010 年1月69日)
- [116] 吉松公平,岡部崇司,組頭広志,岡本敏史,相崎真 ー,藤森淳,尾嶋正治:低次元化伴い金属絶縁体転 移を起こす SrVO₃ 薄膜の *in situ* 放射光光電子分光, 同上.
- [117] 藤森伸一,川崎郁斗,保井晃,竹田幸治,岡根哲夫, 斎藤祐児,藤森淳,山上浩志,芳賀芳範,山本悦嗣, 大貫惇睦:軟X線光電子分光実験によるウラン化合物の電子状態研究,同上.
- [118] 竹田幸治,岡根哲夫,大河内拓雄,斎藤祐児,山上 浩志,藤森淳,落合明:軟X線光電子分光によるUS のバルクU5f電子状態の研究,同上.
- [119] 岡根哲夫,大河内拓雄,藤森伸一,竹田幸治,保井 晃,斎藤祐児,山上浩志,藤森淳,松本裕司,木村憲 彰,小松原武美,青木晴善:CeRu₂(Si_{1-x}Ge_x)₂の共 鳴角度分解光電子分光,同上.
- [120] 藤森淳,小出常晴,竹田幸治:XMCD を用いた希 薄磁性半導体のキャラクタリゼーション,スピン流

2009 年度科研費特定領域「スピン流の創出と制御」 成果報告会(東京大学, 2010 年1月13-14日)

- [121] 片岡隆史,山崎陽, Vijay Raj Singh,藤森淳, F.H. Chang, H.J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen,竹田幸 治,藤森伸一,岡根哲夫,斎藤祐児,山上浩志, S.K. Manda, T.K. Nath, D. Karmakar, I. Dasgupta:軟 X 線磁気円二色性による強磁性 ZnO:(Fe,Co)ナノ粒 子の研究,同上.
- [122] V.R. Singh, T. Kataoka, Y. Yamazaki, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.-J. Huang, C.T. Chen, Y. Yamada, T. Fukumura, and M. Kawasaki : Indication of Intrinsic Ferromagnetism in Anatase $Ti_{1-x}Co_xO_{2-\delta}$ Thin Films: X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study,同上.
- [123] 竹田幸治,岡根哲夫,藤森淳,斎藤祐児,山上浩志, 大矢忍,ファムナムハイ,田中雅明:軟X線磁気円二
 色性による Ga_{1-x}Mn_xAs のアニール効果の研究2, 同上.
- [124] 出田真一郎, Walid Malaeb,吉田鉄平,藤森淳,小 谷佳範,久保田正人,小野寛太,中島正道,鬼頭聖, 永崎洋,伊豫彰,富岡泰秀,伊藤利光,播磨尚朝,小嶋 健児,内田慎一:角度分解光電子分光による BaNi₂P₂ のフェルミ面観測,第27回 PF シンポジウム(つく ば国際会議場エポカル,2010年3月9-10日)
- [125] 西一郎, W. Malaeb,吉田鉄平,藤森淳,小谷佳範, 久保田正人,小野寛太, M. Yi, D.H. Lu, R. Moore,
 Z.-X. Shen,石角元志,伊豫彰,木方邦宏,鬼頭聖, 永崎洋,社本真一,有田亮太郎: PrFeAsO_{1-y}の角 度分解光電子分光,同上.
- [126] 片岡隆史, 坂本勇太, V.R. Singh, 山崎陽, 小林正起, 藤森淳, 朝倉大輔, 小出常晴, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, 田中新, M. Kapilashrami, L. Belova, and K.V. Rao: 軟 X 線磁気円二色性によ る希薄磁性半導体 ZnO:Mn,N の電子状態研究, 同上.
- [127] 吉松公平,岡部崇志,組頭広志,岡本敏史,相崎真 ー,藤森淳,尾嶋正治:低次元化によりバンド幅制御 した SrVO₃ 薄膜の光電子分光,同上.
- [128] 吉田鉄平,西一郎,藤森淳,M.Yi,R. Moore,D.H. Lu,Z.-X. Shen,木方邦宏,P.M. Shirage,鬼頭聖, 李哲虎,伊豫彰,永崎洋:KFe₂As₂の角度分解光電 子分光,日本物理学会第65回年次大会(岡山大学, 2010年3月20-23日).
- [129] 西一郎, Walid Malaeb,吉田鉄平,藤森淳,小谷 佳範,久保田正人,小野寛太,M.Yi,D.H.Lu,R. Moore,Z.-X.Shen,石角元志,伊豫彰,木方邦宏, 鬼頭聖,永崎洋,社本真一,有田亮太郎:PrFeAsO_{1-y} の角度分解光電子分光 II,同上.
- [130] V. R. Singh, T. Kataoka, Y. Yamazaki, A. Fujimori, F.-H. Chang, D.-J. Huang, H.-J. Lin, C.T. Chen, Y. Yamada, T. Fukumura and M. Kawasaki: Indication of Intrinsic Ferromagnetism in Anatase $Ti_{1-x}Co_xO_{2-\delta}$ Thin Film: An X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study,同上.
- [131] 相崎真一,吉松公平,蓑原誠人,出田真一郎,吉田 鉄平,藤森淳,組頭広志,堀場弘司,尾嶋正治:エピ タキシャル応力下の SrVO₃ 薄膜の高分解能 ARPES 測定,同上.

- [132] 出田真一郎,高島憲一,橋本信,吉田鉄平,藤森淳, 安斎太陽,藤田泰輔,中島陽佑,井野明洋,有田将司, 生天目博文,谷口雅樹,小野寛太,久保田正人,D.H. Lu, Z.-X. Shen,小嶋健児,内田慎一:三層系高温 超伝導体 Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+δ} における ARPES ス ペクトル強度の温度依存性,同上.
- [133] 植村渉, Walid Malaeb, 片岡隆史, 石上啓介, 相崎 真一,吉田鉄平,藤森淳,笹川崇男: Nd_{2-x}Ce_xCuO₄ の化学ポテンシャルの温度依存性, 同上.
- [134] 片岡隆史,山崎陽, V.R. Singh,藤森淳,藤森伸 ー,竹田幸治,岡根哲夫,斎藤祐児,山上浩志,F.H. Chang,H.J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen,田中新, T.K. Nath, S.K. Mandal, D. Karmakar, I. Dasgupta:強磁性 ZnO:(Fe,Co) ナノ粒子の共鳴光電子 分光および軟 X 線磁気円二色性,同上.
- [135] 岡根哲夫,藤森伸一,竹田幸治,大河内拓雄,斎藤 祐児,山上浩志,松本裕司,木村憲彰,小松原武美, 青木晴善:共鳴角度分解光電子分光による CeRu₂Si₂ 希釈系化合物のフェルミ面の研究,同上.

セミナー他

- [136] 藤森淳:高温超伝導体の擬ギャップと超伝導ギャップ (千葉大学理学部,2009年9月18日).
- [137] 藤森淳:高温超伝導体の擬ギャップと超伝導ギャップ (広島大学理学研究科, 2009年10月21日).
- [138] 吉田鉄平:銅酸化物、鉄系高温超伝導体の電子構造: 角度分解光電子分光,放射光セミナー(物質構造科学 研究所,2009年10月23日).
- [139] 藤森淳:酸化物スピントロニクス材料の軟X線吸収 と軟X線磁気円二色性(九州シンクロトロン光科学 研究所,2010年3月3日).

4.2 内田研究室

研究室およびその活動の概要。

4.2.1 2009年度の研究その1

研究1-1

高温超伝導 Cu酸化物を代表とする低次元強相関 電子系においては、電子の「分裂」や「自己組織化」 による新しい秩序形成が起こり、それが高温超伝導 のような目覚しい現象を引き起こすと考えられるよ うになってきた。我々は、高温超伝導体を主体に、1, 2 次元構造 Cu 酸化物と 2008 年に発見された FeAs 系化合物を対象とし、電子のもつ電荷とスピンそし てフォノン自由度が織りなす現象と秩序形成の探求 を行っている。ドーピング、構造制御、そして電子輸 送現象、遠赤外分光という物性測定を両輪として研 究を遂行し、電荷・スピン・フォノン自由度のダイナ ミックスやそれらがつくり出す集団励起モードと高 温超伝導発現との関係を調べている。特に µSR、中 性子散乱、光電子分光、そして STM での国際共同 研究を推進しており、世界的な研究ネットワークか ら数多くの epoch-making かつ新たな研究の流れを 形成する成果を生産し続けている。これまでの、代 表的な研究テーマと成果は、

1) 正孔ドーピング可能な梯子型 Cu酸化物における超 伝導相を含む電子相図の全貌を明らかにした (Phys. Rev. Lett. (1997)(1998)(1999)(2003)(2006). Science (2002))。

2) 高温超伝導秩序と競合するストライプ秩序を発見 (Nature (1995)(2008), Science (1999)(2007), Phys. Rev. Lett. (2000)(2001)(2002)(2008) 。

 3) 高温超伝導体のナノスケール不均一性と超伝導準 粒子の量子力学干渉により生ずるナノスケール現象の 観測 (Nature (2000)(2001)(2002)(2003)(2008)), Science (2002)(2005)(2007), Phys. Rev. Lett. (2000)(2005) 4) T_c より高温の「正常状態」においても超伝導状態 と同様に磁束が存在することの発見 (Nature (2000), Science (2003)(2009), Phys. Rev. Lett. (2002)(2005)).
 5) 高温超伝導体におけるフォノンの寄与の再発見 (Nature(2001)(2003)(2006))。
 5) 高温超伝導体におけるフォノンの寄与の再発見 (Nature(2001)(2003)(2006))。
 5) 高温超伝導体におけるフォノンの寄与の再発見

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



図 4.2.3: 超伝導体 T_c の上昇の歴史(1973 年以降)

4.2.2 高温超伝導体の擬ギャップ相

超伝導ゆらぎ

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

我々は、Princeton 大学の Prof. Ong と共同の Nernst 効果の実験で磁束の存在を確認した。更に、 ミクロな超伝導領域が応答していると考えられる反磁 性をトルクを利用した高感度の磁化測定で観測した。 Nernst 効果は試料の温度勾配によって生ずるホール キャリアーの拡散に伴う Nernst 効果に比べ桁違いに 大きなものである。正常状態での磁束は T_cよりか なり高い温度(Tonset)まで観測できる。しかし、擬 ギャップ温度 T* に比べると、Tonset は低い。この結 果から結論できるのは、高温超伝導状態は非常にゆ らぎの強い状態であるということである。その原因 は、CuO2 面の2次元性やT2 が高いことによる熱力 学的ゆらぎだけではなく、量子力学的ゆらぎが大き いことにもある。量子力学ゆらぎは、高温超伝導体 中のクーパー対密度が低温超伝導体に比べ1桁以上 小さいことに起因している。一方、T_{onset}とT*が異 なることは、擬ギャップの起源が超伝導ゆらぎとは 別のところにあることを意味している。擬ギャップ は超伝導秩序と競合する秩序に関連していると考え るのが自然である。



図 4.2.4: 高温超伝導体の電子相図

秩序競合・共存

最近、「強相関電子系」と分類される Mn.Ni や Cu の酸化物内で電子が「ストライプ秩序」と呼ばれる 全く新しい秩序を形成していることが明らかになっ ここでいう強相関とはクーロン相互作用が極限 的に強く、電子がモット (Mott) 転移で局在するよ うな状況を意味している。高温超伝導は、そのよう な2次元 Cu酸化物に電荷キャリアーを注入(ドー ピング)することによって起こっている。注入され た電荷キャリアーは、それ自体で空間的に一様な電 子気体/液体を形成しているのであるが、それらが偏 析して1次元的に配列してしまうという現象が発見 されたのである。これがストライプ秩序と呼ばれる ものである。一種の電荷秩序と考えてよいであろう。 このストライプに挟まれた領域は元の(ドープされ ていない) モット絶縁体状態であり、電子のもつス ピンが表に現れて、反強磁性秩序が形成されている。 このようなストライプ秩序が形成されると超伝導秩 序の方は抑制されてしまう。

これまでのところ、ストライプ秩序は La 系高温 超伝導体、La_{2-x}Ba_xCuO₄、La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO₄、 でのみ観測されている。しかし、Bi 系高温超伝導体に 対する STM 観察(コーネル大学 J. C. Seamus Davis グループとの共同研究)で、類似の秩序が超伝導秩 序と競合・共存している様子が見えてきた。

STM/STS では、T_cの上の正常状態だけではな く、T_c以下の超伝導状態でも、CuO₂面の一部(ナ ノメートルスケールの領域)に擬ギャップが観測さ れた。超伝導秩序が局所的に壊れた磁束の芯近くで も擬ギャップが出現する。これらの擬ギャップ領域で は、チェッカーボード状のトンネルコンダクタンス の空間変調パターンが観測される。同様な「パター ン」は超伝導を外れた稀薄ドーピング域(スピング ラス相と呼ばれる)でも観測されるので、STM 観測 結果からは、超伝導とは別の秩序を表わしてるよう にみえる。

特殊な手法(トンネル非対称性)で詳細な構造を みると、ランダムに配向した一軸性のドメイン構造 が見えてくる。各ドメインはナノメートルスケール の「ストライプ」のミニチュアのようなもので、これ が電荷秩序(電子結晶)の破片だとすると「電子ガラ ス状態」が実現していることになる。これが「チェッ カーボード」のパターンをつくり出す擬ギャップ相の 空間構造といえる。このような「電子ガラス」組織が CuO₂を覆っていると同時に、その上を超伝導の準 粒子が自由に飛びまわっていることもSTM/STSで 明らかになった。驚くべきことに超伝導秩序もCuO₂ を覆っているのである。

STM や ARPES は試料表面の電子状態を調べる プローブであり、実験は殆んどの場合 Bi 系超伝導体 (Bi2212)に対して行われているので、結晶表面だけ に現われる特殊な状態を見たもので、擬ギャップ状態 の真の姿を捉えているのかという疑問があった。し かし、現在では、この疑問はほぼ解消している。擬 ギャップは、ドープされた CuO2 面で実現する複数 の状態のうちの1つであり、「擬ギャップ相」と呼ぶ べきものとなる。その正体として、空間的にゆらい だストライプ秩序(電子液晶とも呼ばれている)電 子対が整列して結晶化したもの(電子結晶)、など 様々な候補があげられているが決め手となる証拠が 未だにない。

「擬ギャップ相」は超伝導秩序が形成される前、あるいは超伝導秩序が弱められた場所に出現していることがわかった。この意味では、La系物質のストライプ秩序と同様、超伝導秩序と敵対する電子秩序であり、またその電荷秩序のパターンからストライプ秩序と「擬ギャップ相」とは密接な関係にあると想像できる。一方、ストライプ秩序に比べると「擬ギャップ」は超伝導秩序との相性がはるかに良い。超伝導ギャップと同じd波ギャップである。また、磁束芯の近くやドーピング量の少ない(アンダードーピング)領域の超伝導状態で、 CuO_2 面に「擬ギャップ相」が顔を出すが、超伝導にとっては必ずしも破壊的な存在ではなく、両者は共存して高い T_c を保持しているようにみえる。どのような共存状態にあるかを明らかにすることが次の課題である。



図 4.2.5: 超伝導相と擬ギャップ相の共存状態と擬 ギャップ相の空間構造

4.2.3 鉄化合物高温超伝導体の出現

2008年2月、予想外の物質から8番目の高温超伝 導体が現れた。鉄(Fe)と砒素(As)とを主元素と する化合物である(鉄ニクタイド系化合物と呼ばれ ている)。東工大・細野グループのLaFeAsO1-yFy という組成でのTc=26Kから始まり、僅か1ヶ月の 間にT_cは56Kにまで跳ね上がったのである。 銅 酸化物の履歴を辿るように、T_cの上昇はLaを他の 希土類元素(NdあるいはSm)に置換することによ り実現した。その後、いくつかの結晶構造の異なる 鉄・砒素化合物で超伝導が確認されたが、現在のT_c の最高値は上記の56Kである。多種の結晶構造が存 在し、多様な元素置換が可能であるという意味で、 銅酸化物群の共通要素がCuO₂面であったのと 同様、この物質群は鉄と砒素がつくる原子層である。

鉄を他の遷移金属元素、コバルトやニッケル、更 には銅、に置き換えた物質は高温超伝導を示さない。 また、砒素をリン(P)に換えても同様である。従っ て、FeAs 層が CuO_2 面と同様、高温超伝導の舞台で あり、鉄と砒素の組み合わせが特別な状況を作り出 していると考えられた。しかし、その後、砒素を周 期表の隣の VI 族セレン (Se) に置き換えた FeSe₁₋ (あるいは $Fe_{1+x}Se)$ という化合物でも超伝導が観 測され、高圧下ではあるが T_c が27Kまで上昇した。 この高温超伝導体の主舞台は鉄の二次元正方格子ら しいのである。但し、鉄の層は、分極性の高い砒素や セレンの原子層に挟まれていなければならない。銅 酸化物とは異なり、鉄層の電子構造の特徴は、 5本 の
d
軌道のすべてが電気伝導、そして超伝導に関与 していると予想されている。層状の結晶構造と周期 表で同じ周期に位置する鉄と銅という元素が主役で あるという以外、銅酸化物との共通点は見あたらな い。未だ発見後1年にも満たないため、鉄と砒素(セ レン)の組み合わせの何が特殊なのかも見えてきて いない。また、この系の超伝導機構を云々できる段 階ではない。しかし、よく知られているように、鉄 単体を含めて多くの鉄化合物は磁性体である。その 意味で、鉄の化合物の中に高温超伝導体があるとい うのは、銅酸化物のとき以来の驚きといえる。鉄化 合物の高温超伝導発見は、より高いT_cの超伝導 / 室 温超伝導を目指す道が銅酸化物の一本だけではなく、 他の道もあることを示したものと認識されている。



図 4.2.6: Fe 系化合物の結晶構造



図 4.2.7: Cu 酸化物、Fe 化合物電子状態それぞれの 特徴

4.2.4 T_cは上がるか?

高温超伝導の舞台は CuO₂ 面であり、CuO₂ 面は、 La 系であろうと Y 系であろうと殆ど同じなので、T_c は各ドーピング量に対して唯一つに決まっているは ずである。しかし、現実の銅酸化物の T_c は、物質 により大きく異なり、各物質の T_c の最大値は 30K から 135K の間に分布している。明らかに、CuO₂ 面 の外の環境が T_c に大きな影響を与えているのであ る。幸いにも、メカニズムに比べ、T_c がどのような 因子で決定されているのか、かなりわかってきてい る。従って、T_c を決める因子が CuO₂ 面の電子状 態にどのような影響を与えているのかを探ることは、 メカニズムの解明にも関係しており、T_c を向上させ るための方策にもつながると考えられる。

\mathbf{T}_{c} の決定因子

高温超伝導においては、これまで知られている T_c の決定因子は極めて多数にのぼる。(a)ドーピング 量(b)超流動密度(ρ_S)(c)CuO₂面の枚数 (d)面内の乱れ(Zn置換)(e)相競合(ストラ イプ秩序)がある。しかし、実は(d)の面内乱れを 除くと、これらの因子は面外の状況変化によりもた らされている。面外の状況を決めるのは、(f)CuO₂ 面外の乱れ(g)頂点酸素の位置(h)LaやSr 等の金属のイオン半径など、結晶化学に関連した因 子であることがわかっている。

フォノン BCS 超伝導体の場合との大きな違いは、 超伝導ギャップよりも超流動密度が T_cを支配するパ ラメーターになっていることである。実際、アンダー ドープ領域では、T_c はギャップの大きさとは無関係 に、 ρ_S に比例して増大する(Uemura プロット)。 ρ_S はクーパー対の密度なのでドーピング量とは密接な 関係にある。ドーピングは CuO₂ 面外の原子への化 学操作により行われるが、特に CuO₂ 面に隣接する 頂点酸素を含む原子層(頂点酸素ブロック)へのドー ピング等による乱れの導入が ρ_S そして CuO₂ 面の 電子状態に大きな影響を与えることがわかってきた。 この乱れは不純物として CuO₂ 面の電子(正孔)の 運動を乱す。しかし、不純物散乱としての効果は T_c
に影響を与える程強くはない。STMの観測から、超 伝導と他の相(擬ギャップ相)との競合状況がこの 乱れによって変化していることがわかってきた。La 系において、Laの一部を同じ希土類元素のNdに置 き換えると、ストライプ相が誘起されることが知ら れている。La系以外でも、頂点酸素ブロックの乱れ が競合相の勢を強めているのである。

頂点酸素の CuO_2 面からの距離も重要な因子であ る。この距離が長くなる程 T_c が高くなるという傾 向が見出されている。現在、最高の T_c をもつ Hg系 物質は、頂点酸素距離の最も長い物質である。

T_c を向上させるには?

上に述べたことに、T_cを向上させるためのヒント が2つ含まれている。1つは、結晶乱れを少なくする ことである。典型例としてBi系物質、Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+ δ} (Bi2212)を挙げると、CuO₂面の電子状態とT_cと に目に見える影響を与えるのは、頂点酸素ブロック (SrO ブロック)の乱れである。乱れの主因はSr²⁺の イオン半径が小さいために、Sr サイトにBi³⁺イオン が侵入し易いことにある。実際、物性実験の試料とし て用いられているBi2212のT_c(通常90K)を、Sr サ イトからBiを追い出すことにより、98.5Kまで上昇さ せることができた。また、同様な操作をすれば、超伝 導線材として用いられる3層(Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+ δ})のT_cを125Kまで向上させることができると予測さ れる。



図 4.2.8: Bi 系高温超伝導体の結晶乱れを減らすこと により上昇する超伝導臨界温度 T_c

<報文>

(原著論文)

 Effects of out-of-plane disorder on the nodal quasiparticle and superconducting gap in singlelayer Bi₂Sr_{1.6}L_{0.4}CuO_{6+δ}(L=La, Nd, Gd)", M. Hashimoto, T. Yoshida, A. Fujimori, D. H. Lu, Z. -X. Shen, M. Kubota, K. Ono, M. Ishikado, K. Fujita, and S. Uchida, Phys. Rev. B <u>79</u>, 144517(R) (2009).

- [2] Three-dimensional nature of normal and superconducting states in BaNi₂P₂ single crystals with the ThCr₂Si₂-type structure", Y. Tomioka, S. Ishida, M. Nakajima, T. Ito, H. Kito, A. Iyo, H. Eisaki, and S. Uchida, Phys. Rev. B 79, 132506(R) (2009).
- [3] Universal versus Material-Dependent Two-Gap Behaviors of the High-Tc Cuprate Superconductors: Angle-Resolved Photoemission study of La_{2-x}Sr_xCuO₄", T. Yoshida, M. Hashimoto, S. Ideta, A. Fujimori, K. Tanaka, N. Mannella, Z. Hussain, Z.-X. Shen, M. Kubota, K. Ono, S. Komiya, Y. Ando, H. Eisaki, and S. Uchida, Phys. Rev. Lett. <u>103</u>, 037004 (2009).
- [4] Spectroscopie Fingerprint of Phase-Incoherent Superconductivity in the Underdoped $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ ", Jhinhwan Lee, K. Fujita, A.R. Schmidt, Chung Koo Kim, H. Eisaki, S. Uchida, and J.C. Davis, Science <u>325</u>, 1099-1103 (2009).
- [5] Underlying Fermi surface of Sr_{14-x}Ca_xCu₂₄O₄₁ in two-dimensional momentum space observed by angle-resolved photoemission spectroscopy", T. Yoshida, X.J. Zhou, Z. Hussain, Z.-X. Shen, A. Fujimori, H. Eisaki, and S. Uchida, Phys. Rev. B <u>80</u>, 052504 (2009).
- [6] Out-of-plane effect on the superconductivity of Sr_{2-x}Ba_xCuO_{3+δ} with Tc up to 98K", W. B. Gao, Q. Q. Liu, L. X. Yang, Y. Yu, F. Y. Li, C. Q. Jin, and S. Uchida, Phys. Rev. B <u>80</u>, 094523 (2009).
- [7] NMR and NQR study of pressure-induced superconductivity and origin of criticaltemperature enhancement in the spin-ladder cuprate Sr₂Ca₁₂Cu₂₄O₄₁", N. Fujiwara, Y. Fujimaki, S. Uchida, K. Matsubayashi, T. Matsumoto, and Y. Uwatoko, Phys. Rev. B <u>80</u>, 100503(R) (2009).
- [8] Optical conductivity and x-ray absorption spectra of the Mott-Hubbard compound RVO₃(R=Sr, Ca, La, and Y)", R.J.O. Mossanek, M. Abbate, P.T. Fonseca, A. Fujimori, H. Eisaki, S. Uchida, and Y. Tokura, Phys. Rev. B <u>80</u>, 195107 (2009).
- [9] Zn-impurity effect on quasiparticle scattering in La_{2-x}Sr_xCuO₄ studied by angle-resolved photoe-mission spectroscopy", T. Yoshida, S. Komiya, X. J. Zhou, K. Tanaka, A. Fujimori, Z. Hussain, Z. X. Shen, Y. Ando, H. Eisaki, and S. Uchida, Phys. Rev. B <u>80</u>, 245113 (2009).
- [10] Possible hydrogen doping and enhancement of Tc (=35K) in a LaFeAsO-based superconductor", K. Miyazawa, S. Ishida, K. Kihou, P. M. Shirage, M. Nakajima, C. H. Lee, H. Kito, Y. Tomioka, T. Ito, H. Eisaki, H. Yamashita, H. Mukuda, K. Tokiwa, S. Uchida, and A. Iyo, Appl. Phys. Lett. <u>96</u>, 072514 (2010).

(学位論文)

- [11] 藤崎晴信:高温超伝導ストライプ相の c 軸光学応答 (修士論文)
- [12] 金谷尚亮:高温超伝導体のストライプ秩序(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [13] S. Uchida: Road to Higher Tc:A Case of Cuprates (International Workshop on the Search for New Superconductors-Frontier and Future-, Shonan Kanagawa, Japan, May 15, 2009).
- [14] S. Uchida: Transport in Cu-Oxides (Gordon Research Conference on Superconductivity, Hong Kong, June 09, 2009).
- [15] S. Uchida: Coherence and incoherence in high-Tc cuprates (International Workshop on Physics of Transition Metal Based Superconductors, Sendai, Japan, June 25, 2009).
- [16] S. Uchida: High temperature superconductivity: what has been done and what is left? (Japan-China-Korea A3 Foresight Summer School, Rusutsu Hokkaido, Japan, August 03-04, 2009).
- [17] S. Uchida: Phenomena in Novel Superconductor-Summary Talk (The 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity-High Temperature Superconductors (M^2 S-IX), Tokyo, Japan, September 12, 2009).
- [18] S. Uchida,: Charge trasport in cuprates and ironpnictides (Japan-China-Korea A3 Foresight Workshop on Novel properties of Emergent Materials, Yellow Mountain, China, October 26, 2009).
- [19] M. Nakajima: Charge Dynamics in Iron-Pnictides Sutudied by Optical Spectroscopy (Japan-China-Korea A3 Foresight Workshop on Novel properties of Emergent Materials, Huangshan, China, October 24-29, 2009).
- [20] S. Ishida: Charge transport in oxygendeficiency controlled iron-pnictide superconductor $LnFeAsO_{1-y}$ (Japan-China-Korea A3 Foresight Workshop on Novel properties of Emergent Materials, Yellow Mountain, China, October 24-29, 2009).
- [21] K. Kojima: Muon Spin Relaxation as a probe of magnetism and superconductivity (2010-APCTP-A3 Winter School on Fronties in Electronic Quantum Matter, Phoenix Park, Korea, February 02, 2010).
- [22] S. Uchida: How to make Tc higher in high temperature superconductors? (The 3rd Yonsei-Tokyo Joint Symposium on Condensed Matter Physics, Yonsei, Korea, February 12, 2010).

[23] S. Uchida: Transport and optical properties of doped iron-pnictide superconductors (The 2nd Nanyang Technological University - University of Tokyo Joint Workshop, Tokyo, Japan, February 22, 2010).

(国内会議)

一般講演

- [24] 中島正道,石田茂之,木方邦宏,富岡泰秀,伊藤利充, 李哲虎,鬼頭聖,伊豫彰,永崎洋,小嶋健児,内田慎
 -:鉄系化合物の光学スペクトル II,日本物理学会
 2009 年秋季大会(熊本大学,2009 年 9 月 26 日).
- [25] 吉田鉄平,W. Malaeb,出田真一郎,藤森淳,R. Moore,D.H. Lu,Z.-X. Shen,久保田正人,小野 寛太,小宮世紀,安藤陽一,永崎洋,藤巻洋介,内 田慎一:アンダードーブ領域La_{2-x}SrxCuO4のアン チノード付近における超伝導ギャップ,日本物理学会 2009 年秋季大会(熊本大学,2009年9月26日).
- [26] 出田真一郎,高島憲一,橋本信,吉田鉄平,藤森淳, 安斎太陽,藤田泰輔,中島陽佑,井野明洋,有田将司, 生天目博文,谷口雅樹,小野寛太,久保田正人,D. H. Lu, Z.-X. Shen,小嶋健児,内田慎一:三層系高 温超伝導体 Bi2Sr2Ca2Cu3OO_{10+δ} におけるフェル ミアークと超伝導ギャップ,日本物理学会 2009 年秋 季大会(熊本大学,2009 年9月26日).
- [27] 藤崎晴信,金谷尚亮,小嶋健児,内田慎一: La_{2-x-y}NdySrxCuO4(LNSCO)の c 軸光学応答,日本物理学会2009年秋季大会(熊本大学,2009年9月26日).
- [28] 石田茂之,中島正道,富岡泰秀,伊藤利充,宮沢喜一, 鬼頭聖,木方邦宏,李哲虎,石角元志,社本真一,伊 豫彰,永崎洋,小嶋健児,内田慎一:鉄ニクタイド系 化合物の輸送特性とドーピング依存性2,日本物理学 会2009年秋季大会(熊本大学,2009年9月28日).
- [29] 出田真一郎,高島憲一,橋本信,吉田鉄平,藤森淳,小 野寛太,久保田正人,安斎太陽,藤田泰輔,中島陽佑, 井野明洋,有田将司,生天目博文,谷口雅樹,D.H. Lu,Z.-X. Shen,小嶋健児,内田慎一,:三層型高温 超伝導体 Bi2Sr2Ca2Cu3O_{10+d}における ARPES ス ペクトル強度の温度依存性,日本物理学会第65回次 大会(岡山大学,2010年3月20日).
- [30] 安斎太陽,加茂剛,藤田泰輔,井野明洋,有田将司, 生天目博文,谷口雅樹,藤森淳,Z.-X. Shen,石角 元志,内田慎一:低エネルギー放射光角度分解光電子 分光による Bi2212 の超伝導ギャップおよび擬ギャッ プのホール濃度依存性,日本物理学会第65回次大会, (岡山大学,2010年3月20日).
- [31] 水野勇希,水貝俊治,木方邦弘,中島正道,李哲虎,伊豫彰,永崎洋,内田慎一: ラマン散乱による BaFe_{1.84}Co_{0.16}As2の超伝導ギャップと電子磁気励起, 日本物理学会第 65 回次大会(岡山大学,2010年3 月 20 日).
- [32] 金谷尚亮,藤崎晴信,内田慎一:L214 系の1/8 におけ る物性特性,日本物理学会第65回次大会(岡山大学, 2010年3月20日).

招待講演

 [33] 内田慎一,石田茂之,中島正道:鉄系高温超伝導体の 光学スペクトルと電気抵抗率、研究会 鉄系高温超 伝導体研究の最前線 (上野(東京)、2009年11月 28日)

4.3 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として植竹智哉、最首祐 樹と坂本裕介が、12月から日本学術振興会外国人招 へい研究者として Sandhya Chandola が新しくメン バーに加わった。3月には、永村直佳が博士課程を修 了し、小森田拓と東野剛之が修士課程を修了した。

当研究室では、表面物性、特に「表面輸送」をキー ワードにして実験的研究を行っている。おもにシリ コン結晶表面上に形成される種々の表面超構造や超 薄膜を利用し、それらナノスケール低次元系に固有 の電子状態や電子輸送特性、スピン状態を明らかに し、3次元結晶の電子状態では見られない新しい現 象を見出し、機能特性として利用することをめざし ている。最近は、ビスマス系合金結晶に表れるとい うトポロジカル表面状態やグラフェンなどの研究も 開始した。このようなナノマテリアルの原子配列構 造や原子層成長の制御・解析、表面電子状態、電子 輸送特性、スピン状態、電子励起など、多角的に研 究を行っている。また、これらの研究のために、新 しい手法・装置の開発も並行して行っている。以下 に、本年度の具体的な成果を述べる。

4.3.1 表面電子輸送

Bi 薄膜におけるスピンホール効果の検出

スピン軌道相互作用の強い Bi においては大きなス ピンホール効果が期待され、スピントロニクスデバ イスへの応用上注目を集めている。スピンホール効 果が起こる系に電流を流すと電子のスピンと電流の 両方に垂直な方向にスピン流が生じ、試料の端にス ピンが蓄積される。ここで誘起したスピンは磁性体 電極を用いて逆スピン効果を利用して電位差として 検出できる。

そこで Si(111)-7 × 7 上に Bi 薄膜を作成し、4 探針 S T Mに磁性体を被覆したカーボンナノチュー プ探針を用いて 4 端子法により電気伝導測定を行っ た。得られた抵抗値の探針の位置依存性からスピン ホール効果の寄与の検出に成功した。得られた結果 からスピンホール伝導度 (スピン流と電場の比)を $2.4 \times 10^4 (\Omega m)^{-1}$ 、スピンホール角 (スピンホール伝 導度と電気伝導度の比)を 3×10^{-2} と見積もった。

トポロジカル絶縁体 $\operatorname{Bi}_{1-x}\operatorname{Sb}_x$ 超薄膜の表面電子構造と輸送特性

スピン軌道相互作用が強い物質において、バルク状 態ではバンドギャップが開いて絶縁体であるが、エッ ジ(表面)に金属的な状態が形成されるというトポ ロジカル絶縁相が発現することがあり、昨今理論的 に話題になっている。しかし実験的には単結晶バル クを用いると十分低温においてもバルク状態に、起 源が不明の金属成分が残っているために、トポロジ カルな性質を担っている表面状態のみの特性を評価

することに成功した例はない。本研究ではトポロジ カル絶縁体を超薄膜にして、その表面状態の性質を 測定できないかと考え、 $Bi_{1-x}Sb_x$ 合金をシリコン表 面上に成長させた。電子回折及び内殻光電子分光の 結果から x < 0.32 ならばエピタキシャルな単結晶 超薄膜が約30 から成長可能なことが分かった。そ の表面電子状態はバルク単結晶の場合と同じでトポ ロジカル絶縁体の実現要件を満たすことが分かった。 また Bi_{0.9}Sb_{0.1} 膜に関して電気伝導測定を行った結 **果**、240 の薄膜は絶縁体的な温度依存性を示した が、98 の膜は150 K で絶縁体金属転移が見られ、 29の膜は室温から低温まで金属伝導であった。こ れは膜が薄くなるにつれてバルク状態の寄与が減少 し、最も薄い膜では電気伝導がほとんど表面のみで 起こっていることを意味する。このようにトポロジ カル絶縁体の表面状態の特性評価に新たな手段を提 案することができた。

サファイア基板上のグラフェンの電気伝導測定

次世代のデバイス材料としてナノマテリアルであ るグラフェンが近年世界中で注目を集めている。こ のようなナノメートルスケールの系では基板結晶表 面の1原子高さ程度のステップによる電子散乱が電 気伝導に支配的に寄与すると考えられる。今後のナ ノテクノロジー発展において、このステップを横切 るときの電気伝導度測定が重要となる。本研究では サファイア基板上のグラフェンの電気伝導を測定し、 グラフェン電気伝導に対してステップが与える影響 を解析することを目的としている。試料はサファイ ア(1102)面上に機械的剥離法を用いてグラフェンを 作成した。サファイア上のグラフェンは基板表面に 密着したものとなり、基板のステップ/テラス構造を 反映した形状をとる。そのため、ステップと平行・垂 直方向で電気伝導度に異方性が生じ、4 探針 STM を 用いてステップの影響を測定出来ると期待され、予 備的な結果を得た。(横浜国立大学との共同研究)

エピタキシャル金属超薄膜の異方的輸送特性

半導体基板上に作成された、膜厚が数nm程度のエ ピタキシャルな金属超薄膜は、量子サイズ効果を示す ことが知られている。我々は以前、等方的なシリコン 基板上に作成された異方的表面超構造Si(111)4×1-In によって、その上に成長させた銀薄膜の量子化準位 を擬1次元的になるように制御できることを、角度 分解光電子分光を用いて発見した。本年度はこの系 について4探針電気伝導度の探針間隔依存性、温度 依存性、膜厚依存性を、別項で述べるように改良に 取り組んできた低温型独立駆動4探針STM 装置で 測定した。

その結果、擬1次元的金属量子薄膜について、輸送特性においても有意な異方性を検出した。電気伝導度の異方性には、大きく分けて緩和時間の異方性とバンド構造の異方性の2つの起源が考えられる。前者は薄膜内部の周期的積層欠陥やランダムな欠陥、

表面界面散乱に依るものであり、後者は角度分解光 電子分光で測定可能な量子井戸状態のフェルミ面や バンド分散関係の異方性で説明できる。今回の測定 の結果、輸送特性の異方性は後者のバンド構造の異 方性に依る所が大きいことが判明し、当初の目的通 り、界面構造を変化させることで、結果的に薄膜量 子井戸の輸送特性も制御できることを示した。

4.3.2 表面ナノ構造

トポロジカル絶縁体 Bi₂Se₃ 超薄膜の電子構造

近年トポロジカル絶縁体というバルクにはバンド ギャップがあるが表面には金属的な電子状態が存在 する物質が注目を浴びている。とくにBi₂Se₃は単一 ディラックコーンの表面状態を持つとされ、バルク 単結晶については盛んに研究がなされている。しか し Bi₂Se₃ 薄膜についての報告はまだ少なく、トポロ ジカル絶縁体の特異な表面状態の物性を評価するた めにも薄膜状の試料を作成することは重要である。 また膜厚を薄くすることで量子サイズ効果により異 なる物性が見られる可能性もある。そこで本研究で は、Si(111) 表面上に Bi₂Se₃ 薄膜をエピタキシャル に作成し、角度分解光電子分光法およびスピン分解 光電子分光法により、そのバンド分散を測定した。 その結果、図 4.3.9(d) に示すように、厚さ約 80 (8 QL(quintuple layer))の薄膜ではバルク単結晶 のものと同様のスピン偏極した単一ディラックコ ンが観測された。しかし厚さ 30 以下の薄膜 (Fig. 4.3.9(a)-(c)) ではそれとは異なるバンド構造であり、 effective four-band model に基づく解析から、厚さ (3 QL) の薄膜は二次元量子スピンホール相に 30 あるが、厚さが 20 (2 QL) 以下の薄膜は trivial な 絶縁体であることが分かった。今後はドーピングに よるフェルミ準位制御を行い、表面電気伝導度を測 定する予定である。

キャリアドープしたモット絶縁体表面

前年度までにマイクロ4端子電気伝導測定により $Si(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Sn 表面が電子相関の強いモット絶 縁体表面であることが示唆されていた。さらにこの 表面に Na を吸着したり、Sn 原子を In 原子で置換し た表面においてはキャリアフィリング制御により電 子相関の変調で一部金属伝導が復活するものの、低 温においては強い局在が起きることが明らかになっ た。今年度は実際にキャリアドープした表面をより 詳細に調べるために光電子分光測定と STM 観察を 行った。Na 吸着によりバンド底がより高エネルギー 側にシフトし、In 置換によりバンドは全体的に低エ ネルギー側にシフトすることが分かり、それぞれ予 想されたとおり電子ドープとホールドープが起きて いることが確認された。また STM 観察ではドープし ていない表面に比べて欠陥密度が増加しており、電 気伝導で観測されたキャリア局在の描像ともよく一 致することが明らかになった。



図 4.3.9: 角度分解光電子分光法によって測定された Bi₂Se₃ 薄膜のバンド分散. 膜厚がそれぞれ、(a) 1 QL, (b) 2 QL, (c) 3 QL, (d) 8 QL である。1 QL= 9.5 で結晶格子の単位胞の厚さを意味する。(d) では、価電 子バンドと伝導バンドをつなぐ交差した直線的な 2 本のバンドが見える。これがディラックコーンと呼ばれ る表面状態である [6]。

Bi 超薄膜の作成

近年、量子スピンホール系に関心が高まっている。 2原子層厚の Bi についてトポロジカルナンバーを 計算することにより、Bi 薄膜が量子スピンホール系 の候補となり得、そのエッジ状態を利用することに より、これまでと全く違ったスピン流生成が期待で きると理論的に予想されている。本研究では、実際 に2原子層 Bi が作成可能か検証することを目的とし た。実験では薄膜生成に適切と考えられた Si(111)-6×6-Au 表面上に Bi を室温蒸着することで試料を 作成し、低温 STM で観察した。その結果、6×6-Au 上にパッチ状に Bi 原子の層が作成されることが判明 した。薄膜内での原子の配列は Bi(012) 面の正方格 子を単位格子とし、それぞれ表面に垂直な軸に対し てランダムに回転をした繊維構造となっていた。今 後は、作成条件の最適化を行うことにより良質の2 原子層 Bi 超薄膜生成が期待される。

SMOKE 装置による Co 薄膜磁気異方性の評価

記録媒体への応用をはじめとして、磁性薄膜の磁 気異方性は非常に重要な物性の一つである。Si(111) 基板上の 7×7 と $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面、および Ag 薄 膜をテンプレートとし、それらの上に Co 薄膜を作成 し、表面磁気光学 Kerr 効果測定を行った。7×7と $\sqrt{3} imes \sqrt{3}$ -Ag 表面上に作成した Co 薄膜がシリサイド 形成によって磁性が損なわれるのに対し、Ag膜上の Co 薄膜は大きな磁化と強い磁気異方性を持つことが 分かった。容易化軸は面内である。この性質は室温 と低温 (80 K, 15 K) ともに見られた。また、Coの膜 厚がちょうど hcp 構造における 1 BL(bilayer) の時 に磁気異方性が最も顕著になることから、この性質 は Co 薄膜の構造に由来することが示唆される。今 後は、STM による Co 薄膜の Morphology 観察と合 わせて、Co薄膜と格子不整合の小さいテンプレート によって薄膜の磁化特性を変調することを目指す。

4.3.3 新しい装置・手法の開発

グリーン関数 STM 装置の改良

当研究室では、約7Kまでの低温で動作可能な独 立駆動型4探針STM装置を開発している。本年度 も引き続き、表面超構造と薄膜の4探針電気伝導測 定に特化したセットアップを進めてきた。具体的に は、(1)動作安定性の向上のために、探針からの信号 線のコンタクト部をばね状のものからピン型にする など、STM ステージに大幅な改良を加えた。さらに セットアップ前に液体窒素温度でのピエゾユニット 動作確認を可能にする機構を確立した。(2) 寒剤の 持ちを良くし、最低到達温度で測定できる時間を増 やすために、輻射を防ぐシールドを追加した。寒剤 の流量による温度調節ができるフロー式冷却に対応 するために熱アンカーも導入した。(3)2次電子検出 器の代わりにマイクロチャンネルプレートを導入し、 SEM の分解能を向上させた。(4) 金属超薄膜など低 抵抗の試料を測定するために、差動増幅回路を導入 するなどヘッドアンプの改良を行った。

以上の改良により、別項に述べたように半導体表 面超構造上のエピタキシャル金属超薄膜の輸送特性 を測定することに成功した。今後は4探針が自由に 動くからこそ可能な、異方的表面超構造や各種ナノ 構造体といった低次元系の、in situ における温度依 存電気伝導度測定を行っていく予定である。

極低温4探針 STM 実証機の開発

上述にように、7Kまでの4探針STMはすでに稼 働中であるが、より低温、とくに4K以下での極低 温での動作と、装置稼働率の向上、さらには集束イオ ンビーム(FIB)による加工,原子間力顕微鏡(AFM) との複合による更なる先端的な応用計測手法の確立、 また、長年の夢である遅延グリーン関数の実空間マッ ピングとモノレイヤー超伝導の検出を狙い、極低温 型4探針STM実証機の開発を行っている。本年度は 特に以下の項目について重点的に開発を行った。(1) STM ユニットの小型・軽量・高剛性化,(2) 寒剤保持 時間の増加、最低到達温度の改善,(3) 制御電子回路 の低雑音化・高速化,(4) STM 室、試料準備室、導入 室、排気系などの一連の真空装置の設計・製作。そ の結果、到達温度 1.8 K を達成し、原子分解能 STM 像もルーチン的に得ることが可能となった。今後は、 更に、(5) FIB の設置・統合,(6) 統合型制御ソフト ウェアの開発を行う。

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。

・日本学術振興会 科研費 基盤研究A「半導体結晶上 の希薄磁性表面状態の形成とスピントロニクスへの 応用」(代表 長谷川修司)

・日本学術振興会 日中韓フォーサイト事業「サブ 10 nm ワイヤ;その新しい物理と化学」(日本側代表 長 谷川修司)

・科学技術振興機構先端計測分析技術・機器開発事業 業プロトタイプ実証・実用化プログラム「マルチプ ローブ顕微鏡プローバーシステム」(代表長村俊彦)

<報文>

(原著論文)

- Y. Kitaoka, T. Tono, S. Yoshimoto, T. Hirahara, S. Hasegawa, and T. Ohba: Direct detection of grain boundary scattering in damascene Cu wires by nanometer-scale four-point probe resistance measurements, Applied Physics Letters 95, 052110 (Aug, 2009).
- [2] T. Hirahara, T. Komorida, Y. Gu, F. Nakamura, H. Izuchi, H. Morikawa, and S. Hasegawa: Insulating conduction in Sn/Si(111): Possibility of a Mott insulating ground state and metallization/localization induced by carrier doping, Physical Review B 80, 235419 (Dec, 2009) (selected as Editors' Suggestions).
- [3] T. Shibasaki, N. Nagamura, T. Hirahara, .H. Okino, S. Yamazaki, W. Lee, H. Shim, R. Hobara, I. Matsuda, G. . S. Lee, and S. Hasegawa: *Phase* transition temperatures determined by different experimental methods: Si(111)4 × 1-In surface with defects, Physical Review B 81, 035314 (Jan, 2010).
- [4] A. Nishide, A. A. Taskin, Y. Takeichi, T. Okuda, A. Kakizaki, T. Hirahara, K. Nakatsuji, F. Komori, Y. Ando, and I. Matsuda: *Direct mapping of the spin-filtered surface bands of a three-dimensional quantum spin Hall insulator*, Physical Review B **81**, 041309(R) (Jan, 2010) (selected as Editors' Suggestions).
- [5] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, and S. Hasegawa: A topological metal at the surface of an ultrathin Bi_{1-x}Sb_x alloy film, Physical Review B, 印刷中 (2010)(selected as Editors' Suggestions).

[6] Y. Sakamoto, T. Hirahara, H. Miyazaki, S. Kimura, and S. Hasegawa: Spectroscopic evidence of a topological quantum phase transition in ultrathin Bi₂Se₃ films, Physical Review B, 印刷中 (2010).

(総説)

[7] S. Hasegawa: Quasi-One Dimensional Metals on Semiconductor Surfaces with Defects, J. Physics: Condensed Matter 22, 084026 (Feb, 2010).

(国内雑誌)

- [8] 平原徹: ビスマス超薄膜の電子構造: Rashba 効果と量 子サイズ効果及びその協奏, 真空 52, 582-588 (Nov, 2009).
- [9] 平原徹、松田巌、山崎詩郎、長谷川修司: ビスマス 量子薄膜における表面状態による電気伝導,表面科学 30,374-379 (Jul, 2009).

(プロシーディングス)

[10] Y. Kitaoka, S. Yoshimoto, T. Hirahara, S. Hasegawa, T. Ohba: Nanometer-scale Four-Point Probe Resistance Measurements of Cu Wires Using Carbon Nanotube Tips, Advanced Metallization Conference 2009, Eds. M. Naik, R. Shaviv, T. Yoda, and K. Ueno, Materials Research Society, pp. 295-299 (2009).

(著書)

[11] 長谷川修司: 振動・波動(講談社基礎物理学シリー ズ2)(講談社サイエンティフィック, Sep, 2009).

(その他)

- [12] アンドリュー・クレランド (長谷川修司 訳): ナノ スケールの振動板を使って量子現象をみる, パリティ 24(7), pp. 37 (丸善, Jul, 2009).
- [13] 長谷川修司:物理はおもしろくないが、研究はおもし ろい,パリティ 24(9), pp. 48 (丸善, Sep, 2009).

(学位論文)

- [14] 小森田拓: 表面状態へのキャリアドーピング (修士論 文).
- [15] 東野剛之:磁性体被覆カーボンナノチューブ探針を用 いた電気伝導測定(修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

[16] S. Hasegawa: Towards Diluted Magnetic Surfaces, TJSPS-KOSEF Asian Core Program The 7th Japan-Korea Symposium on Surface Nanostructures, 2009 年 7 月 15 日 (宮城).

- [17] S. Hasegawa: Quantum Transport with a Four-Tip Scanning Tunneling Microscope, The 10th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces, and Nanostructures (ACSIN-10) , 2009年9月23日 (Granada, Spain).
- [18] T. Hirahara, Y. Kitaoka, T. Tono, S. Yoshimoto, T. Ohba, and S. Hasegawa: Direct detection of grain boundary scattering in damascene Cu wires by nanoscale four-point probe resistance measurements, IUPAC The 5th International Symposium on Novel Materials and Synthesis (NMS-V), 2009 年 10 月 20 日 (上海, 中国).
- [19] S. Hasegawa: Nano-Measurements by Four-Tip STM, The 7th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '09, 2009年12月11日 (Maui, Hawaii, USA).
- [20] S. Hasegawa: Surface States of Rashba Spin-Split Type and Topological Insulators, The 3rd Yonsei-Tokyo Joint Symposium on Condensed Matter Physics, 2010年2月12日 (Yonsei Univ, Korea).
- [21] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, and S. Hasegawa: A topological metal at the surface of an ultrathin BiSb alloy film, Korean Vacuum Society (The 8th Korea-Japan Symposium on Surface Nanostructures), 2010 年 2 月 19 日 (Hyundai Seongwoo Resort, Korea)
- [22] S. Hasegawa: Surface States of Rashba Spin-Split Type and Topological Insulators, The 2nd Nanyang Technological University-University of Tokyo Joint Workshop, 2010年2月22日 (東京大).

一般講演

- [23] T. Komorida, T. Hirahara, Y. Gu, H. Morikawa, S. Hasegawa: Mott insulating ground state and metallization/localization induced by carrier doping on a surface superstructure, A3 Foresight Summer School and Workshop, 2009 年 8 月 30 日 (Yangpyeong, 韓国)
- [24] T. Tono, Y. Kitaoka, S. Yoshimoto, T. Hirahara, T. Ohba, S. Hasegawa: Nanometer-scale four-point probe resistance measurements of nanowires using carbon nanotube tips, A3 Foresight Summer School and Workshop, 2009年8月31日 (Yangpyeong, 韓 国).
- [25] T. Hirahara, T. Komorida, Y. Gu, H. Morikawa, S. Hasegawa: Mott insulating ground state and metallization/localization induced by carrier doping on a surface superstructure, The 10th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-10), September 24, 2009年9月24日 (Granada, Spain).
- [26] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, S. Hasegawa: A topological metal at the surface

of an ultrathin BiSb alloy film, The 2nd UVSOR Workshop on Low-Energy Photoemission of Solids using Synchrotron Radiation (LEPES 09), 2009年 10月3日(岡崎).

- [27] T. Uetake, N. Nagamura, R. Hobara, T. Hirahara, S. Hasegawa, and T. Nagamura: Development of a Low-Temperature Four-Tip STM and Application to Nanoscale Surface Conductivity Measurements, Annual Meeting of A3 Foresight Program Seminar, 2009 年 11 月 16 日 (松島).
- [28] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, S. Hasegawa: A topological metal at the surface of an ultrathin BiSb alloy film, Annual Meeting of A3 Foresight Program Seminar, 2009年11月16日(松 島).
- [29] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, S. Hasegawa: A topological metal at the surface of an ultrathin BiSb alloy film, The11th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure (ICESS-11), 2009 年 10 月 8 日 (奈良).
- [30] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, S. Hasegawa: A topological metal at the surface of an ultrathin BiSb alloy film, The 449. Wilhelm and Else Heraeus Seminar on "Rashba and related spinorbit effects in metals, 2010年1月7日 (Physikzentrum Bad Honnef, Germany)
- [31] N. Nagamura, R. Hobara, T. Uetake, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Electronic and Transport Properties of Low-dimensional Systems Prepared on Si(111) Surfaces*, The 3rd Yonsei-Tokyo Joint Symposium on Condensed Matter Physics, 2010年2月12日 (Yonsei Univ., Korea).
- [32] N. Nagamura, R. Hobara, T. Uetake, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Electronic and Transport Properties of Low-dimensional Systems Prepared on Si(111) Surfaces*, The 2nd Nanyang Technological University-University of Tokyo Joint Workshop, 2010 年 2 月 22 日 (東京大).
- Symposium on Surface and Nano Science 2010 (SSNS '10), 2010 年 1 月 15-18 日 (零石)
- [33] Y. Saisyu, T. Hirahara, Y. Niinuma, R. Hobara, S. Hasegawa: Development of UHV-SMOKE system and application to surface magnetization characterization.
- [34] T. Uetake, N. Nagamura, R. Hobara, T. Hirahara, S. Hasegawa, and T. Nagamura: Development of a low-temperature four-tip STM and application to nanoscale surface conductivity.
- [35] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, S. Hasegawa: A topological metal at the surface of an ultrathin BiSb alloy film.

[36] T. Hirahara, T. Komorida, Y. Gu, F. Nakamura, H. Idzuchi, H. Morikawa, and S. Hasegawa: A Mott-insulator surface and its metallization by carrier doping.

(国内会議)

招待講演

[37] 長谷川修司:4探針型走査トンネル顕微鏡によるナノ 計測,第7回プロープ顕微鏡による表面分析研究会(科 学技術交流財団),2009年10月30日(常滑,愛知).

一般講演

- [38] 永村直佳,長谷川修司:シリコン表面で展開される低次元系の物理,グローバル COE 第2回 RA キャンプ,2009年7月2日 (河口湖,山梨).
- [39] 長谷川修司、平原徹,坂本祐介:トポロジカル絶縁体の表面,平成21年度東北大学通研共同プロジェクト研究会「」半導体サイエンスと半導体テクノロジーの融合技術を先導する半導体サイエンスを目指して,2009年10月17日(仙台).
- 日本物理学会 2009 秋季大会, 2009 年 9 月 26-29 日 (熊本大学)
- [40] 平原徹、坂本裕介,奥田太一,松田巌,長谷川修司: BiSb 合金超薄膜の電子状態及び輸送特性.
- [41] 小森田拓、平原徹, Yan Gu, 守川春雲, 長谷川修司: キャリアドープしたモット絶縁体表面の電気伝導.
- [42] 高瀬恵子,芝崎剛豪,平原徹,長谷川修司:希薄磁 性表面での抵抗異常:近藤効果とRKKY相互作用の 競合.
- [43] 宮田伸弘,成田尚司,平原徹,小河愛美,長谷川修司, 松田巌: 強磁場下独立駆動型多端子装置による Bi/Ag 超薄膜の反局在効果の研究.
- [44] 長谷川修司、鈴木亨,江尻有郷,山田達之輔,種村 雅子,興治文子,田中忠芳,近藤一史,増子寛,呉屋 博,榎本成已,大山光晴,小林雅之:第5回全国物理 コンテスト・物理チャレンジ 2009 報告 I.第1チャレ ンジ.
- [45] 向田昌志、浅井吉蔵,江尻有郷,北原和夫,毛塚博史, 近藤泰洋,真梶克彦,杉山忠男,鈴木亨,田中忠芳, 中屋敷勉,並木雅俊,長谷川修司,原田勲,光岡薫, 山田達之輔:第40回国際物理オリンピック(メキシ コ大会)報告.
- [46] 並木雅俊、北原和夫,二宮正夫,有山正孝,江尻有郷, 原田勲,長谷川修司,波田野彰,光岡薫,金信弘,杉 山忠男,鈴木亨,坪井健司:第5回全国物理コンテス ト・物理チャレンジ 2009 報告 IV.全体報告.
- (社) 日本表面科学会 第 29 回表面科学学術講演会, 2009
 年 10 月 27-29 日 (船掘, 東京)
- [47] 最首祐樹,平原徹,新沼優人,長谷川修司:永久磁石を 用いた超高真空中表面磁化測定装置の開発.

- [48] 東野剛之、北岡佑介、平原徹、長谷川修司: カーボン ナノチューブ探針を用いた FeSi2 ナノワイヤの電気 伝導測定.
- [49] 永村直佳,保原麗,植竹智哉,平原徹,長谷川修司:低 温型独立駆動 4 探針 STM 装置の現状と表面の輸送 特性測定.
- [50] 坂本裕介、平原徹、最首祐樹、宮崎秀俊、木村真一、 奥田太一、松田巌、村上修一、長谷川修司: BiSb 合 金超薄膜上のトポロジカル金属.
- [51] 小森田拓、平原徹, Yan Gu, 守川春雲, 長谷川修司: キャリアドープしたモット絶縁体表面の電気伝導.
- 日本物理学会第65回年次大会,2010年3月20-23日(岡山大学)
 - [52] 平原徹,坂本裕介,最首祐樹,宮崎秀俊A,木村 真一,E.Krasovskii,E.V.Chulkov,長谷川修司: BiSb 合金超薄膜表面状態の光電子分光スペクトルの 偏光依存性.
 - [53] 坂本裕介,平原徹,長谷川修司:シリコン表面上の トポロジカル絶縁体 Bi₂Se₃ 超薄膜の電子構造.
 - [54] 永村直佳,保原麗,植竹智哉,平原徹,長谷川修司: 低温型独立駆動4探針 STM による Si(111)4×1-In 上 Ag 薄膜の輸送特性測定.
- [55] 最首祐樹,平原徹,保原麗,長谷川修司:シリコン 上コバルト薄膜の磁気光学 Kerr 効果測定.
- [56] 有山正孝,並木雅俊,二宮正夫,北原和夫,長谷 川修司,原田勳,江尻有郷:物理チャレンジ・オリ ンピックの5年間を振り返り展望を語る.
- [57] 江尻有郷,毛塚博史,光岡薫,長谷川修司,浅井吉蔵, 向田昌志,真梶克彦,中屋敷勉:第41回国際物理オ リンピック日本代表訓練研修:実験問題.
- (セミナー)
- [58] 長谷川修司:不純物吸着原子:キャリアドーピングと 近藤効果,大阪大学大学院電気電子情報工学専攻森 田研究室セミナー,2009年4月28日(大阪大).
- [59] 長谷川修司: ナノワールドで起こっていること 最先 端のナノサイエンス・ナノテクノロジー,河合塾エ ンリッチ講座,2009 年 6 月 29 日 (河合塾本郷校).
- [60] 長谷川修司:電子線ホログラフィと4探針型走査トンネル顕微鏡によるデバイスの評価、コベルコ科研セミナー、2009年7月29日(神戸).
- [61] T. Hirahara and S. Hasegawa: Electron transport measurements at the surface ?from nanowires, surface superstructures to ultrathin films-, University of Duisburg, 2010年1月5日.

(講義等)

[62] 長谷川修司: ナノ物理とナノエレクトロニクス,大阪 大学大学院電気電子情報工学専攻量子電子デバイス 工学コース「先端集積エレクトロニクス工学特論」, 2009 年 4 月 28 日 (大阪大).

- [63] 長谷川修司: ナノサイエンス・ナノテクノロジー概論、 ナノ電子輸送の基礎,山梨大学工学部電気電子システム工学科 特別講義,2009年7月24日(山梨大).
- [64] 長谷川修司: 兵庫県立大学理学部集中講義「表面科 学」2009 年 8 月 19-21 日.
- [65] 長谷川修司: ナノワールドを見る 1個1個の原子や 分子を観て触って並べる,防衛大学校応用物理学 科課外講演,2009年11月13日(防衛大学校).
- [66] 長谷川修司、平原徹、坂本裕介 (TA)、植竹智哉 (TA):
 物理学実験 I (3年生)電子回折、2009 年度冬学期 (本郷).
- [67] 長谷川修司、溝川貴:現代物理実験学I(学部3年生 講義) 2009 年度夏学期(本郷).
- [68] 長谷川修司、小森文夫:物性物理学特論(表面物理学)(学部4年生・大学院共通講義)2009年度冬学期(本郷).

4.4 福山研究室

熱擾乱のない低温ではじめて現れる超流動・超伝 導、強相関効果、磁気フラストレーション、量子ホー ル効果など多彩な量子現象や相転移現象を、できる だけ単純かつクリーンな物質を対象に実験的に研究 している。特に、空間次元を2次元にしたときに現 れる新奇な量子相に着目して、一般的で新しい物理 概念の構築を目指している。現在扱っている物質は、 代表的な量子液体・固体である液体および固体へリウ ムの超薄膜、グラフェン(炭素の単原子シート)、超 伝導超薄膜などである。

我々の実験手法は多岐に渡るが、中でも独自に開発 した核断熱消磁冷凍機と超低温走査トンネル顕微/分 光装置(ULT-STM)そして、最近導入した無冷媒希 釈冷凍機の三つを主力としている。核断熱消磁冷凍機 は50 μK に至る超低温度で比熱や核磁気共鳴(NMR) 測定を行うことができ、ULT-STM は30 mK に至る 超低温、6 T までの高磁場、10⁻⁸ Pa 以下の超高真 空という多重極限環境下で動作可能である。

4.4.1 2次元フェルミ粒子系の強相関効果

グラファイト表面に物理吸着した単原子層 3 He は、 強く相互作用する 2 次元フェルミ粒子系のモデル物 質である。この系の特徴は、 3 He の面密度 (ρ)を変 えることで、乱れを導入することなく粒子相関を広 範囲かつ自在にコントロールできる点である。我々 は、ボース粒子で核スピンをもたない 4 He を第 1 層 目に吸着させることで、実際のグラファイト基板が もつ吸着ポテンシャルの局所的な乱れをできるだけ 小さくし、第 2 層目以上に吸着した 2 次元 3 He の多 彩な量子物性を広い温度および密度範囲で研究して いる。

面密度が低いとき³Heはフェルミ流体として振る 舞うが、1層目の4/7の密度になったとき($\rho_{4/7} = 6.8$ nm⁻²)、1層目に対して整合な超格子構造(三角格子)をとって量子局在する(4/7相)。我々の過去の研究から、この4/7局在相の核スピンの磁気基底状態は強くフラストレートしたギャップレススピン液体状態であることがほぼ確実である。ここ数年間は、4/7相から粒子を引き抜いたり追加したときにどのような新奇な量子相が出現するかに注目して研究してきた。これまでに得られた結果を密度別にまとめると以下のようになる。i)4/7相より低い密度域は最大20%までの零点空格子点(ZPV)を含む可能性がある(領域II)。

ii)4/7 相より高密度域では、新たに追加された³He
 原子は 20 %までは 2 層目の 4/7 構造は壊さず 3 層
 目に吸着され、そこで自己凝縮したフェルミ流体相
 (パドル相)を形成する (領域 III)。

iii) 20%の粒子が追加されるとパドルが全表面を覆い、それ以上の密度になると、4/7相は2相共存状態を経てより高密度の不整合局在相(三角格子)に構造転移する(領域 IV)。

iV) 追加粒子 40%以上では不整合相の単一相状態と なって密度とともに圧縮が進み、6体までの多体の 交換相互作用の相対比が連続的に変化する強磁性相 となっている(領域 V)。 ここで ZPV 相とは、絶対零度でも結晶としての周期 性と量子流体としての流動性を併せもつ新奇な量子 相である。今年度はこのうち領域 III と領域 V につ いて詳しく研究を進めた。

臨界点の次元性クロスオーバー (領域 III)

粒子質量が小さくなって粒子間相互作用に比べて 量子効果が無視できなくなると、状態相図上の3重 点が消失して、絶対零度まで凍結しない液体すなわ ち量子液体が実現する。これが自然界に安定して存 在する原子・分子中、ヘリウムのみが量子液体を形 成する理由である。量子効果がさらに強まると、臨 界点すら消失し、絶対零度まで液化しない量子気体 状態が形成されるはずである。レーザー冷却した原 子気体では、3体衝突によって固体状態に移行するま での準安定状態として量子気体状態が実現している。 ところが、ヘリウム系の空間次元を2次元に落とし て揺らぎを大きくすると、安定状態としても量子気 体が実現することが数々の量子多体計算から予測さ れている。さらに興味深いことに、量子性パラメー タが³He では臨界点が消失し、⁴He では消失しない という微妙な値になっていると予想されている。グ ラファイト表面に吸着した1層目および2層目の2 次元ヘリウム系に関する過去の実験結果は、これらの理論予測を支持しているように見えるが、³He系 でごく希薄な液相が形成されていないか、吸着ポテ ンシャルの閉じ込めが弱くなる3層目以降で臨界点 の復活が観測できるのか、など実験的に解決すべき 問題も少なくない。



図 4.4.10: 熱容量測定から求めたグラファイト表面 に吸着した 2、3、4 層目の縮退 2 次元 ³He 流体の γ 値の密度依存性。破線は 2 次元理想フェルミ気体に 対する値 (₇₀)。

そこで我々は、2 層目から 4 層目に至る広い範囲 にわたって、グラファイト表面に吸着した 3 He 超薄 膜の熱容量を T = 1 mKまで測定し、縮退したフェ ルミ系特有の温度に比例する熱容量の比例係数 (γ) の密度依存性を詳しく調べた。図 4.4.10 にその結果 を示す。2 層目の γ 値は、低密度の極限で 2 次元理 想フェルミ気体の値 $(\gamma_0$ 値:図中破線) に漸近してい る。一方、3 層目の約 1 nm⁻² 以下の低密度域では、 γ 値は γ_0 を大きく下回り、密度に比例してゼロに近 づくというパドル相特有の振る舞いを見せている。4 層目についてはまだ予備的なデータの段階であるが、 3 層目と似た振る舞いが見られる。以上の結果は、3 層目以上では吸着ポテンシャルの閉じ込めが弱くな り、面直方向の運動の自由度が無視できなくなるた め、3 次元系のように気相-液相転移が復活したと考 えられる。すなわち、臨界点に関する 2 次元-3 次元 のクロスオーバーを実験的に初めて観測したと考え

不整合固相における多体交換相互作用 (領域 V)

2 層目が不整合固相となる密度領域 (9.5 < ρ < 16.3 nm⁻²)において、より細かな密度ステップで熱容量 を 0.3 < T < 80 mK の広い温度範囲で測定した。そ のデータから、高温で支配的となる 2-3 層目由来の フェルミ流体成分を差し引いて2層目の不整合固相 の核磁気熱容量のみを取り出し、6体までの多体交 換相互作用を考慮したスピンハミルトニアンの高温 展開式 (Páde 近似を併用) にデータフィットした。こ の方法によって、図 4.4.11 に示すように、3 体を繰 り込んだ2体の有効交換相互作用 J、5体を繰り込 んだ4体の有効交換相互作用 K、6体の交換相互作 用 J₆の大きさをそれぞれ定量的に求めることができ た。図中で
Jの絶対値が高密度になるにつれ大きく 減少する主原因は、剛体球系の量子トンネル交換が 高密度で急速にその頻度を減ずるためである。高密 度になるとKや J_6 はJに対して相対的に小さくな るが、これは三角格子上の剛体球系に対する理論計 算と符合している。不整合固相は全密度域で3体交 換が支配的なので基底状態は強磁性であるが、高密 度極限ではほとんど理想的な2次元三角格子上スピ ン1/2ハイゼンベルク強磁性体として振る舞う。 方、低密度域では反強磁性的な2体、4体、6体交 換の効果も無視できないので、フラストレーション が密度で調節可能な強磁性体という興味深い性質を もつ。

4/7 吸着構造決定実験の準備

2次元³Heの研究を進める上で重要な課題として、 4/7吸着構造の実験的な観測がまだなされていないと いう問題がある。この問題を解決するために、 $T \approx 1$ K にあると考えられる 4/7相の整合-不整合相転移の ユニバーサリティクラスを決定する精密熱容量測定 と、低速電子線回折(LEED)による逆格子空間での 構造決定測定を準備している。前者では、これまで 標準的に用いられてきたグラフォイルと呼ばれる吸 着基板に代わり、原子レベルで平坦な微結晶子サイ ズがより大きい ZYX グラファイトを使う。この基板 は比表面積がグラフォイルの 1/10 しかないので、ア



図 4.4.11: 不整合固相におけるスピンの多体交換相 互作用の密度依存性。 J_n は n 体の交換相互作用を表 し、 $K = J_4 - 2J_5$ である。

デンダの寄与を低減するために試料セルの材質選択 と構造設計を入念に行い、現在、最終組み立ての段 階にある。試料セルの概念図を図 4.4.12 に示す。一 方、後者の LEED 測定では、過去の実験の最低温度 T = 5 Kより 1 桁低い 0.5 K 以下での測定が必要に なるので、光学系を 80 K に冷却して熱輻射を低減 するなどの特別な設計を行っている。

これらの測定装置を搭載する無冷媒希釈冷凍機を 新たに導入して実験室に設置し、そのテスト冷却を 行った。結果は、室温から 35-48 時間で最低温度 12 mK に到達し、T = 100 mK での冷却能力は 200 μ W であった。続いて、上記の二種類の測定を行うため に必要な試料導入管、低温同軸ケーブルなどの配線・ 配管を施し、現在、配線・配管後の冷却テストを行っ ている。

4.4.2 エピタキシャル・グラフェンの試作 と STS 観測

炭素の単原子層シートであるグラフェンは、ハニ カム格子構造に由来してフェルミエネルギーで線型 に交わる特異な分散関係をもち、その準粒子は質量 ゼロのディラック・フェルミオンとして振る舞うこ とが知られている。このユニークな電子状態のため、 後方散乱が抑制される特異な輸送現象や半整数の量 子ホール効果を示すなど、グラフェンは物理的に非 常に興味深い2次元電子/正孔系である。それだけに 止まらず、大きな電界効果や伝導度をもつなど、次 世代の機能性物質としても期待されている。グラフェ ン表面は化学的に不活性なので、原子レベルで清浄 な表面が得られる期待があり、表面走査プロープ実 験との親和性は基本的に高いと考えられる。

グラフェン試料には、主に2種類の異なる作成法 が知られている。一つは、母物質であるグラファイト をSiO2上に劈開する方法(劈開グラフェン)で、もう



図 4.4.12: ZYX グラファイト吸着基板を使った精密 熱容量測定のための試料セル。

-つは SiC 基板を加熱処理して表面に結晶成長させ る方法 (エピタキシャル・グラフェン) である。後者は 前者と比べて基板との相互作用が大きいため、電子 移動度が上がらないという問題点も指摘されてきた が、ごく最近は量子ホール効果の観測が報告される など、製法も急速に進歩している。この試料は、SiC 基板表面の広い領域にわたって成長するので、STM 観測にはより適していると考えられる。今年度、我々 はエピタキシャル・グラフェンの作成技法の習得と予 備的な STM/STS 観測を行った。基板全面にわたっ て一様にグラフェンが成長する良質な試料は未だ得 られていないが、数原子層の厚みと考えられる領域 に対して走査トンネル分光 (STS) 測定した局所状態 密度を図 4.4.13(a) に示す。 V = -0.2 V 付近に見ら れる状態密度の山は2層グラフェンに対して理論的 に期待される特徴と一致する。ただし、 $B = 6 T \sigma$ 磁場を印加してもランダウ準位は観測されなかった ので (4.4.13(b))、今後、アルゴン雰囲気中加熱や水 素終端法などの試料作成法を試し、より高品質のエ ピタキシャル・グラフェン試料を得ることが課題で ある。

4.4.3 超伝導超薄膜の作成と輸送特性

等方的な近距離相互作用をする純粋な2次元系で は、有限温度で長距離秩序をもち得ない(Marmin-Wagner 定理)。しかし、実際の超伝導や超流動の超 薄膜試料では、有限温度で超伝導や超流動転移が観 測される。この現象は、ある有限温度(T_{KT})以下で、 秩序変数のトポロジカル励起である渦と反渦が対束 縛することで位相が揃い、準長距離秩序が生まれる という Kosterlitz-Thouless(KT)理論で説明されて いる。KT 理論によれば、秩序変数の振幅は有限で



図 4.4.13: B = 0 T(a) と 6 T(b) における走査トン ネル分光法で観測したエピタキシャル・グラフェン の局所状態密度 (T = 2 K)。

あるが、位相がまだ揃っていないという中間温度領 域 $(T_{KT} < T < T_{c0})$ が生じるはずである。しかし、 その領域の存在を直接的に観測した例は未だない。

超伝導2次元膜の製法として、薄膜を分子線エピ タキシャル結晶成長させる方法と、バルク試料をイ オンミリングで削り込んで薄膜化する二通りの方法 がこれまで主に知られている。ところが近年、劈開 グラフェンと同様の手法で層状超伝導体の単ユニッ ト層に迫る超薄膜を作成できることが分かってきた。 この第三の方法で作成すると、母物質の結晶性がよ く保たれ、より欠陥の少ない試料作成が可能となる 期待がある。また、走査プローブ観測との親和性も高 いはずで、秩序変数の振幅の大きさを局所的に調べる ことも可能であろう。今年度はその第一段階として、 劈開法で銅酸化物高温超伝導体 Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x} の超薄膜試料を作成し、その電気伝導度を測定した。

劈開前の母物質として、Yをドープしたものと、 Znをドープしたものの2種類を試した。Yは超伝導 を担う CuO₂ 面と隣の CuO₂ 面の中間にある Ca と、 Zn は CuO₂ 面内の Cu と置換する。それらを SiO₂ 基板上に劈開し、フォトリソグラフィー法によって伝 導度測定用の金電極を微細加工した (図 4.4.14(a))。

作成した6つの試料のうち4つで、電気抵抗がゼ ロとなる超伝導転移温度 (T_{KT}) がバルクのそれ (T_c) から 3-8 K 低下する現象が見られた。残りの二つは T = 4 K まで超伝導は示さなかった。図 4.4.14(b) は、Y ドープした試料の電気抵抗を規格化温度 T' = $\sqrt{(T_{c0}-T)/(T-T_{KT})}$ に対してプロットしたもの である。ここで T_{c0} は平均場近似で期待される転移 温度である。この図から、 $T_{KT} < T < T_{c0}$ の温度 範囲のうち T_{KT} 近傍では抵抗が T^\prime に比例して変化 し、自由渦の密度に比例した抵抗を考える Bardeen-Stephen モデルでよく説明できる。一方、 T_{c0} 近傍で 直線からずれるのは、超伝導ゆらぎの効果によるもの と説明される。図 4.4.14(c)(d) は、IV 特性と $V \propto I^a$ としたときのaの温度依存性である。常伝導状態で は通常のオームの法則(a = 1)に従うが、 T_{c0} 以下 になると温度の低下とともに束縛された渦対の乖離 に対応して a が増加し、KT 理論で期待されるよう に T_{KT} でa = 3となる。なお、Yドープ試料とZn ドープ試料の定性的な違いや電界効果は今のところ 観測されていない。

以上のように、劈開法で作成した超伝導超薄膜試料



図 4.4.14: (a)Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x} 超薄膜に伝導度測 定用の金電極を微細各した試料の光学顕微鏡写真。 (b)(a) に示した試料の抵抗の温度依存性。(c) さまざ まな温度における *IV* 特性。上から順に、T = 95.0, 94.6, 94.2, 94.0, 93.8, 93.6, 93.4, 93.2, 93.0 Kのデー 夕である。(d)(c) 図で $V \propto I^a$ としたときの指数 aの温度依存性。

の超伝導転移は KT 理論でよく説明できることが分かった。図 4.4.14(a) に示した試料の厚さは、走査電子顕微鏡像のコントラスト解析やイオンミリング作成した試料を使った先行研究との T_{KT} の比較から 10 nm 前後と見積もられる。今後はより T_{KT} の低い、すなわち薄い試料について測定し(厚みは原子間力顕微鏡で観測する予定)、中間温度領域($T_{KT} < T < T_{c0}$)での超伝導ギャップをSTSで直接観測したい。なお、この研究で用いた超伝導単結晶試料は本物理学教室・内田研究室から提供いただいた。

4.4.4 超伝導近接効果の STS 実験の準備

超伝導体と常伝導体の接合部や界面で見られる超 伝導近接効果は、ミクロには界面でのアンドレーエ フ散乱の問題として統一的に捉えることができる。 例えば、超伝導側が異方的超伝導体である場合には、 クーパー対の波動関数の異方性を反映した界面方位 依存性をもつ近接効果が現れたり、常伝導側が強磁 性体である場合には、界面からの距離に依存した振 動的な近接効果が期待される。このように界面での 近接効果には超伝導の本質的な性質が表出する場合 が多く、クーパー対の対称性を決定する際にも決め 手となる。さらに、近年注目されている奇数周波数 ペアリングの問題も、近接効果の観測からその真偽 が実験的に確認できる可能性がある。これらの問題 意識の元に、よく制御された超伝導接合・界面を超高 真空中での蒸着や表面自己形成法で作成し、in situ で伝導度測定と STS による秩序変数の空間変調測定

を同時に行う実験を準備している。まず手始めに、グ ラファイト表面にインジウムを室温超高真空中で蒸 着した系で、表面のステップ端に三角形のナノ構造 を多数形成し、これらをSTM 観測した。超伝導ナ ノ構造は渦糸ダイナミクスの観点からも興味深い系 である。

<報文>

(原著論文)

- D. Sato, D. Tsuji, S. Takayoshi, K. Obata, T. Matsui and Hiroshi Fukuyama: Evidence for a Self-bound Liquid State and the Commensurate-Incommensurate Coexistence in 2D ³He on Graphite, Journal of Low Temperature Physics 158, 201-206 (2010).
- [2] D. Sato, S. Takayoshi, K. Obata, T. Matsui and Hiroshi Fukuyama: Density Variation of the Frustrated Ferromagnetism in 2D Solid ³He, Journal of Low Temperature Physics **158**, 544-549 (2010).
- [3] S. Takayoshi and H. Fukuyama: Determination of the Mosaic Angle Distribution of Grafoil Platelets Using Continuous-Wave NMR Spectra, Journal of Low Temperature Physics 158, 672-677 (2010).

(学位論文)

- [4] 中村 祥子: 2 次元ヘリウム 3 に対する基板の効果の 解明に向けた装置開発(修士論文).
- [5] 川端 一成: 超伝導超薄膜の輸送特性測定(修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [6] N. F. Kawai and H. Fukuyama : Anisotropic superconductivity in graphite intercalation compound YbC₆, 15th International Symposium on Intercalation Compounds (ISIC15), (Beijing, China, May 11-15, 2009).
- [7] D. Sato, S. Takayoshi, K. Obata, T. Matsui, H. Fukuyama : Density Variation of the Frustrated Ferromagnetism in 2D Solid ³He, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2009), (Evanston, USA, August 5-11, 2009).
- [8] D. Sato, K. Naruse, T. Matsui, H. Fukuyama : Frustrated Ferromagnetism in Two-Dimensional Solid ³He on Graphite, The 3rd Yonsei-Tokyo Joint Symposium on Condensed Matter Physics, (Seoul, Korea, February 12, 2010).
- [9] N. F. Kawai, T. Matsui, H. Fukuyama : STM/STS Studies of Epitaxially Grown Graphene on SiC, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2010), (Yokohama, Japan, March 9-12, 2010).

- [10] T. Matsui, K. Tagami, M. Tsukada, H. Fukuyama : Topological Dirac Fermion on Graphite, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2010), (Yokohama, Japan, March 9-12, 2010).
- [11] D. Sato, K. Naruse, T. Matsui, H. Fukuyama : Dimensional Crossover of ³He Self-Condensation from 2D to 3D, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2010), (Yokohama, Japan, March 9-12, 2010).
- [12] S. Nakamura, K. Matsui, T. Matsui, H. Fukuyama : Towards Experimental Determination of the Structure of the 4/7 Phase in the Second-Layer Helium on Graphite, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2010), (Yokohama, Japan, March 9-12, 2010).
- [13] S. Matsuo, N. F. Kawai, T. Matsui, H. Fukuyama : STM/STS Studies of Superconducting Ultra-Thin Indium Films on Graphite, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2010), (Yokohama, Japan, March 9-12, 2010).

招待講演

- [14] D. Sato, D. Tsuji, S. Takayoshi, K. Obata, T. Matsui, H. Fukuyama : Evidences for a Self-Condensed Liquid State and the Commensurate-Incommensurate Coexistence in 2D ³He on Graphite, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2009), (Evanston, USA, August 5-11, 2009).
- [15] Y. Shibayama, H. Fukuyama, K. Shirahama : Torsional Oscillator Studies of Non-Classical Rotational Inertia in Two-Dimensional ⁴He Solid, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2009), (Evanston, USA, August 5-11, 2009).
- [16] H. Fukuyama : Landau Quantization of Dirac and Schrödinger Fermions at Graphene and Graphite Surfaces, India-Japan Conference on "Graphene", (Bangalore, India, November 17-18, 2009).
- [17] H. Fukuyama : STS Imaging of Electronic Wave-Functions at Surfaces of Graphite and Graphene Stacks in Magnetic Fields, The 3rd Yonsei-Tokyo Joint Symposium on Condensed Matter Physics, (Seoul, Korea, February 12, 2010).
- [18] Y. Shibayama, H. Fukuyama, K. Shirahama : Non-Classical Rotational Inertia in Two Dimensional ⁴He Solid on Graphite, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2010), (Yokohama, Japan, March 9-12, 2010).
- [19] H. Fukuyama : Novel Quantum Phases in 2D ³He on Graphite, International Symposium on Physics

of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2010), (Yokohama, Japan, March 9-12, 2010).

(国内会議)

一般講演

- [20] 佐藤 大輔、成瀬 公暁、松井 朋裕、福山 寛: グラファ イト上 2 次元固体ヘリウム 3 の相図 III、日本物理学 会 2009 年秋季大会(熊本大学、2009 年 9 月).
- [21] 佐藤 大輔、松井 朋裕、福山 寛:2 次元ヘリウム3 に おける自己凝縮液体相の研究、日本物理学会 2009 年秋季大会(熊本大学、2009 年9月).
- [22] 佐藤 大輔、高吉 慎太郎、小畑 和幸、松井 朋裕、福山 寛:グラファイト上単原子層ヘリウム3の量子相図、特定領域研究「スーパークリーンで実現する新しい量子相の物理」若手秋の学校2009(休暇村 南阿蘇、熊本、2009年9月28日-10月1日).
- [23] 佐藤 大輔、松井 朋裕、福山 寛:弱い吸着ポテンシャ ル下で実現する2次元ヘリウム3の自己凝縮液体相、 物性科学領域横断研究会「凝縮系科学の最前線」(東 京大学、東京、2009年11月29日-12月1日).
- [24] 佐藤 大輔、成瀬 公暁、松井 朋裕、福山 寛 : グラ ファイト上単原子層固体ヘリウム 3 におけるフラス トレートした強磁性、物性科学領域横断研究会「凝縮 系科学の最前線」(東京大学、東京、2009 年 11 月 29 日-12 月 1 日).
- [25] 河合 直樹、松井 朋裕、福山 寛: グラフェンおよびグ ラファイト表面の STM/STS 観測、物性研短気研究 会(物性研究所、2009 年 10 月).
- [26] 松井 朋裕、川端 一成、石田 茂之、内田 慎一、福山 寛:Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x} 超薄膜の超伝導転移、日本物 理学会 第65回年次大会(岡山大学、2010年3月).
- [27] 佐藤 大輔、成瀬 公暁、松井 朋裕、福山 寛: グラファ イト上 2 次元ヘリウム 3 実験における基板の不均一 効果、日本物理学会 第 65 回年次大会(岡山大学、 2010 年 3 月).
- [28] 柴山 義行、福山 寛、白浜 圭也: グラファイト表面 上の2次元⁴He 固体における非古典的回転慣性、日 本物理学会 第65回年次大会(岡山大学、2010年3 月).

招待講演

- [29] 福山 寛: グラフェン・グラファイト表面の磁場中ラン ダウ準位構造、第3回ナノカーボン研究会((財)新 世代研究所、2010年1月15日).
- (集中講義、セミナー)
- [30] H. Fukuyama : STS studies of the Quasi-2D Electronic States at Graphite Surfaces in Magnetic Fields, SIMES SEMINAR (Stanford University, U.S.A., August 13, 2009).

4.5 岡本 研究室

本研究室では、半導体2次元系における新奇な物 理現象の探索と解明を行っている。³He-⁴He 希釈冷 凍機を用いた20mKまでの極低温および15Tまで の強磁場環境において、さまざまな独自技術により 半導体2次元系に新しい自由度を持たせた研究を行っ ている。

単純なバンド理論では動き回る電子同士に働く力 を考えないが、実際にはクーロン斥力が働いている。 電子の運動エネルギーと比べて相関のエネルギーが 強い電子系は、強相関系と呼ばれ、現代物理学の重 要なキーワードの一つである。半導体2次元系は、磁 場や電子密度などにより相関の強さを自由に変える ことができることなどから、強相関物理の理想的な 舞台の一つとなっており、分数量子ホール効果など 他の系では見られない現象も観測されている。

近年、我々のグループでは都市大白木先生と澤野 博士より提供いただいた非常に高い移動度をもつ Si/SiGe 量子井戸試料に対して研究を行っている。

二次元金属相におけるサイクロトロン共鳴

シリコンの電子系や GaAs の正孔系の低電子密度 領域においては、ゼロ磁場下でも、粒子間の平均クー ロンエネルギーがフェルミエネルギーよりも一桁程 度大きくなる強相関2次元系が実現される。これら の系では、電子(正孔)密度をパラメーターとして 金属・絶縁体転移が観測されるが、その機構は未解 明であり、2次元電子分野の重要なテーマとなって いる。また電子間相互作用パラメーターr_sに対する 有効質量、g因子、スピン帯磁率などの依存性を調 べるための理想的な系としても盛んに研究が行われ ている。我々のグループでは磁気抵抗効果の角度依 存性からスピン自由度の重要性を明らかにする研究 を先駆的に行ってきた。

本年度は、金属的温度依存性の機構解明の手がか りを得るために、サイクロトロン共鳴の測定を行っ た。これまで行ってきた、2次元電子自身をボロメー ターとして利用する抵抗検出型のサイクロトロン共 鳴の測定においては、Shubnikov-de Haas 振動が顕 著になる1K以下の領域での解析が複雑になる欠点 があった。そこで、高感度ボロメータをはじめとす る実験技術の開発を行い、透過型のサイクロトロン 共鳴測定を行った。

100 GHz のミリ波照射時の共鳴吸収線幅から得られた緩和時間 τ_{CR} は、温度の低下とともに増大し、 直流極限の電気抵抗から得られる散乱時間 τ_t と、似 通った絶対値および温度依存性を示した。100 GHz における光子のエネルギー $\hbar\omega$ は、金属的振る舞い が顕著観測される温度領域 ($T \sim 1$ K) での熱エネ ルギーよりも高い。実験結果は、散乱時間やその金 属的温度依存性が、 $\hbar\omega = 0$ から $\hbar\omega > k_BT$ の広範囲



図 4.5.15: (a) 透過型サイクロトロン共鳴測定のデー タ(縦軸はボロメータの吸収パワー)。シリコン 2 次元系の電子温度上昇が無視できる微弱なミリ波 (100 GHz)に対して共鳴信号を検出した。(b) 線 幅から得られた τ_{CR} と電気抵抗から得られた τ_t の温 度依存性。

で大きく変わらないことを示唆する。また、電子密度の低下に伴い、 τ_t は急速に短くなっていくが、 $\tau_{\rm CR}$ の減少は比較的緩やかであり、絶縁体領域でも生き残る兆候が観測された。このことは、一体描像では理解できず、電子の集団運動の重要性が示唆される。

高周波領域における電気伝導

金属相における散乱時間の周波数依存性や、絶縁体 相における集団運動を系統的に調べるために、100 MHz ~10 GHz 程度の周波数領域で、対角伝導率を測定す るためのシステムを構築した。GaAs 2 次元電子試 料と³He 冷凍機を用いて行った予備実験において、 明瞭な整数量子ホール効果を観測した。



図 4.5.16: (a) 井戸幅 20 nm の試料における低温での 対角抵抗率 ρ_{xx} 。矢印は、ランダウ準位充填率。(b) ランダウ準位エネルギー。 $\hbar\omega_c$ はサイクロトロンエ ネルギー。 $g\mu_B B$ はゼーマン分離。 E_v は谷分離。(c) 井戸幅 5.3 nm の試料における ρ_{xx} 。(d) 井戸幅 4 nm の試料における ρ_{xx} 。

谷分離エネルギーの測定

電子スピンを qubit とする量子計算機を考えたと き、スピン軌道相互作用や核スピンとの微細相互作 用が小さなシリコンは非常に有望な半導体である。ま た、シリコンテクノロジーの蓄積が使える利点もあ る。ただ、問題点として谷の縮重がスピンデコヒー レンスの原因になることが指摘されている。このよ うな背景から、佐々木が中心となり、シリコンヘテ ロ構造における谷分離エネルギーと閉じ込め幅との 関係を調べた。

井戸幅の異なる4つの試料に対して磁場中の電気 伝導測定を行ったところ、谷分離に相当するランダ ウ準位充填率 = 1 および = 3 における整数量子 ホール効果は、井戸幅の狭い試料ほど明瞭であった。 さらに、縦抵抗の極小値の温度依存性から活性化エ ネルギー Δ を求めたところ、井戸幅 4 nm および 5.3 nm の試料における Δ は、井戸幅 10 nm および 20 nm の試料における Δ は、井戸幅 10 nm および 20 nm の試料における Δ よりも一桁程度大きかった。 Δ には、電子相関による増強効果も含まれるため、 裸の谷分離エネルギーを求めるためには、現時点で は理論の進展を待たねばならない。しかし、ゼーマ ン分離エネルギーと比較することにより、裸の谷分 離エネルギーが、井戸幅が 4 nm および 5.3 nm の 試料では数ケルビン程度の大きさであり、井戸幅が 10 nm および 20 nm の試料では1ケルビンより小さ いことを明らかにした。



図 4.5.17: (a) ホール抵抗の測定より求めた 2 次元電 子密度と表面原子密度との関係。(b) 飽和電子密度 から計算した表面ドナー準位を原子のイオン化エネ ルギーの関数としてプロットした。

4.5.2 劈開表面に形成された2次元電子系

量子ホール効果などの2次元系における重要な輸 送現象は、これまですべてデバイス中に閉じ込められ た界面2次元系に対して行われてきた。一方、InAs や InSb の清浄表面に金属原子などを堆積させること により表面にキャリアが誘起されることが光電子分 光やSTSなどの測定からわかっていたが、面内伝導 の測定は電極技術の困難などから行われていなかっ た。表面に形成された2次元電子系は、表面に堆積 させる物質の自由度や走査型プローブ顕微鏡との相 性の良さなどから非常に大きな可能性を持つ。近年、 我々のグループにおいて、p型 InAs および InSb を 超高真空中で劈開して得られた清浄表面に金属を付 着させて誘起した2次元電子系に対する面内電気伝 導の測定手法が確立され、Ag などを蒸着して得ら れた劈開表面では整数量子ホール効果が観測されて いる。

表面ドナー準位の物質依存性

InAs 劈開表面に Au を蒸着した場合について、表面原子密度と2次元電子密度との関係が小松崎により調べられた。低原子密度領域においては2次元電

子密度は表面原子密度に比例して増加するが、2次 元電子のフェルミエネルギーが表面ドナー準位に達 すると飽和する。飽和電子密度から InAs 劈開表面上 の Au のドナー準位を決定した。原子のイオン化エ ネルギーの増加に伴い表面ドナー準位が減少する傾 向が確認された。

走査型トンネル顕微鏡システムの導入

本年度、走査型トンネル顕微鏡(ヘッド、コント ローラ)を導入し、動作確認を行った。今後、面内 電気伝導測定と組み合わせることで、磁気抵抗効果 のヒステリシスなどから2次元スピングラス状態の 可能性が示唆されているFe吸着系の表面原子の空間 分布の観察や、量子ホール領域での電流分布の観察、 などが可能になると考えている。

<報文>

(原著論文)

- T. Okamoto, K. Sasaki, K. Toyama, R. Masutomi, K. Sawano, Y. Shiraki: Insulating phases induced by crossing of partially filled Landau levels in a Si quantum well, Physical Review B 79, 241302(R) (2009) (also selected in Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology 19 (24), 2009).
- [2] K. Sawano, K. Toyama, R. Masutomi, T. Okamoto, N. Usami, K. Arimoto, K. Nakagawa, and Y. Shiraki: Strain dependence of hole effective mass and scattering mechanism in strained Ge channel structures, Applied Physics Letters 95, 122109 (2009).
- [3] K. Sasaki, R. Masutomi, K. Toyama, K. Sawano, Y. Shiraki, T. Okamoto: Well-width dependence of valley splitting in Si/SiGe quantum wells, Applied Physics Letters 95, 222109 (2009).
- [4] K. Sasaki, R. Masutomi, K. Toyama, K. Sawano, Y. Shiraki, T. Okamoto: Landau level crossing and pseudospin phase transition in Si quantum wells, Physica E 42, 1018-1021 (2010).
- [5] R. Masutomi, A. Sekine, K. Sasaki, K. Sawano, Y. Shiraki, T. Okamoto: Cyclotron resonance of two-dimensional electrons in a Si quantum well, Physica E 42, 1184-1187 (2010).

(会議抄録)

[6] R. Masutomi, M. Minowa, T. Mochizuki, and T. Okamoto: Alkali Metal Induced Two Dimensional Electron Systems at Cleaved Surface of InAs, Proceedings of the 29th International Conference on the Physics of Semiconductors (July 27-August 1, 2008, Rio de Janeiro, Brazil), AIP Conference Proceedings 1199, 27-28 (2010).

[7] T. Mochizuki, R. Masutomi, and T. Okamoto: Evidence for spin-glass ordering in submonolayer Fe films on InAs, Proceedings of the 29th International Conference on the Physics of Semiconductors (July 27-August 1, 2008, Rio de Janeiro, Brazil), AIP Conference Proceedings **1199**, 407-408 (2010).

(学位論文)

- [8] 小松崎一成:「半導体劈開表面への金属吸着による二 次元電子系の形成機構の解明」(修士論文)
- [9] 佐々木 恒平:「シリコン2次元電子系におけるランダ ウ準位交差および谷分離エネルギー」(修士論文)

(著書)

[10] Junya Matsunami and Tohru Okamoto: Electrical Detection of Electron-Spin Resonance in Two-Dimensional Systems, in "Electron Spin Resonance and Related Phenomena in Low-Dimensional Structures", Series: the Topic in Applied Physics, Vol. 115, Ed. Marco Fanciulli, pp. 129-140.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [11] R. Masutomi, A. Sekine, K. Sasaki, K. Sawano, Y. Shiraki, T. Okamoto: Cyclotron resonance of two dimensional electrons in a Si quantum well, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Kobe, Japan), July 19-24, 2009.
- [12] T. Mochizuki, R. Masutomi, T. Okamoto: Hysteresis in magnetoresistance of InAs surface inversion layers covered with submonolayer of Fe films, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Kobe, Japan), July 19-24, 2009.
- [13] K. Sasaki, R. Masutomi, K. Toyama, K. Sawano, Y. Shiraki, T. Okamoto: Landau level crossing and pseudospin phase transitions in Si quantum wells, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Kobe, Japan), July 19-24, 2009.
- [14] K. Sasaki, R. Masutomi, K. Toyama, K. Sawano, Y. Shiraki, T. Okamoto: Pseudospin Phase Transitions during Crossing of Partially Filled Landau Levels in a Si Quantum Well, International symposium on physics of new quantum phases in superclean materials (Yokohama, Japan), March 9-12, 2010.
- [15] R. Masutomi, A. Sekine, K. Sasaki, K. Sawano, Y. Shiraki, T. Okamoto: Cyclotron resonance in the two dimensional metallic phase of Si/SiGe, International symposium on physics of new quantum phases in superclean materials (Yokohama, Japan), March 9-12, 2010.

招待講演

[16] T. Okamoto: Two dimensional electron systems formed at cleaved semiconductor surfaces, The 3rd Tokyo-Yonsei joint symposium (Seoul, Korea), February 12, 2010.

(国内会議)

一般講演

- [17] 佐々木恒平,安田一平,枡富龍一,岡本徹,澤野憲太郎,白木靖寛:Si/SiGe量子井戸二次元電子系における井戸幅と谷分離エネルギーの関係、日本物理学会 秋季大会(熊本大学)2009年9月25日-28日.
- [18] 枡富龍一,関根啓仁,佐々木恒平,安田一平,澤野憲 太郎,白木靖寛,岡本徹:Si/SiGe 2次元金属相にお けるサイクロトロン共鳴、日本物理学会第65回年 次大会(岡山大学)2010年3月20日-23日.
- [19] 池辺洋平,森本高裕,枡富龍一,岡本徹,青木秀夫, 島野亮:量子ホール系における THz 周波数帯光学ホー ル効果の観測、日本物理学会第65回年次大会(岡山 大学)2010年3月20日-23日.

4.6 島野研究室

島野研究室では、レーザー分光の手法を用いて、 凝縮系における光と物質の相互作用の解明、光励起 によって発現する多体の量子現象、量子凝縮相の探 求に取り組んでいる。このために、可視光領域から 低エネルギー、テラヘルツ(THz)周波数帯にわた る広い光子エネルギー範囲での先端分光技術を駆使 し、基底状態、光励起状態における電子相関、多電 子系の相転移ダイナミクスを研究している。本年度 は、以下の研究を進めた。

4.6.1 半導体高密度電子正孔系

半導体中に高密度に光励起された電子正孔系は、 電子正孔対の密度、温度によって励起子ガス、電子 正孔プラズマ、電子正孔液体といった多彩な相を示 す。電子と正孔の複合ボース粒子である励起子は、十 分低温かつ高密度下で励起子ボースアインシュタイン凝縮(BEC)を起こすことが期待され、多くの研究 がなされてきたが未だ実証には至っていない。一方、 励起子が十分高密度になると、多体効果によって励 起子が不安定化し、構成粒子である電子と正孔に乖 離し、電子正孔プラズマへと移行してしまう。この 絶縁体的な励起子気体から金属的な電子正孔プラズ マへの移行、いわゆる「励起子モット転移」は、励 起子密度の原理的上限を与えるため励起子 BEC の 研究にとっても重要である。同時に、電子正孔系の 絶縁体金属「転移」の問題としても興味深い。従来、 この励起子モット転移は平均場近似に基づいて説明 されてきたが、電子正孔の多体のクーロン相関が無 視できない中間密度領域での振舞いは実験的にも理 論的にも完全には解明されていない。そこで我々は モット転移濃度近傍での電子正孔間クーロンカのプ ラズマ遮蔽効果、励起子の安定性を明らかにするこ とを目的として、間接遷移型半導体である Si を対象 に光励起テラヘルツプローブ分光を行った。Si の励 起子の束縛エネルギーは 14 meV(3.5 THz) である。 このため THz 帯の励起子内部遷移(1s-2p 遷移)の 観測により励起子束縛エネルギーの直接的な観測が 可能となる。まず、フェムト秒光パルスによるバン ド間励起を行い、光生成された自由な電子と正孔の 集団から励起子、および電子正孔液体が形成される 様子をナノ秒の時間領域で観測した (図 4.6.18)。こ の結果、励起子形成には光励起後 200ps 程度の比較 的長い時間を要していることがわかった。この励起 子形成ダイナミクスについて、バンド内及びバンド 間フォノン緩和機構を考慮したシミュレーションを 行い実験との比較をした結果、励起子形成に要する 時間は光励起された電子系がフォノンを介して冷却 する時間を反映していることがわかった。次に系が 熱平衡状態に達したとみなせる光励起後 2 ns 後に 時間を固定し、電子正孔の密度の関数として励起子 1s-2p 準位間エネルギーを調べた。その結果、平均 場近似から予測される励起子モット転移濃度の高密 度側、すなわち金属相側でも 1s-2p 間吸収が残存し、 さらに遷移エネルギーがもとの(低密度極限の)位 置のままあまり変化していないことがわかった。こ



図 4.6.18: Si における弱励起下での励起子形成ダイ ナミクス。バンド間光励起後の各時刻における誘電 率、光学伝導度のスペクトル。自由な電子正孔気体か ら励起子が形成される様子を 1S-2P 吸収線 (12 meV) の発現を通して観測した。400 ps 後には励起子微細 構造が現れる。1 ns 以降は電子正孔液滴 (EHD) へ の実空間での凝縮が始まり励起子は EHD に吸収さ れる。実線はドルーデ-ローレンツモデルによる低エ ネルギー領域でのフィッティング。

の結果は、励起子束縛エネルギーが密度の上昇とと もにプラズマ遮蔽効果により連続的に減少し金属相 へと移行するという従来の描像とは異なるものであ る。[9, 27, 29, 37]

4.6.2 擬1次元有機導体

電子相関によって金属相やスピン・電荷密度波相な どの絶縁相、そして超伝導相など多彩な電子相が発 現する低次元有機導体は、光によるわずかな摂動で大 きな相変化が引き起こされる可能性がある。我々は転 移温度 T_c = 12 K 以下においてスピン密度波 (SDW) を形成する擬一次元有機導体 (TMTSF)₂PF₆ に着目 し、近赤外光やテラヘルツ光照射によって生じる光 誘起変化について、近赤外光ポンプ-テラヘルツ光ブ ローブ計測法およびテラヘルツ光ポンプ-直流伝導計 測法を用いて調べた。(試料提供:東京大学鹿児島研 究室)図4.6.19に、温度4Kにおける近赤外パルス 光 (波長: 800 nm, パルス幅:90 fs) 照射に伴う SDW 相の一粒子ギャップ (SDW ギャップ) スペクトルの 時間発展を示す。光照射前に開いていた SDW ギャッ プが光照射後3ps以内に縮小あるいは励起強度が強 い場合は消失し、その後徐々に回復する様子が明瞭 に確認できた。これはパルス光照射によって瞬時(<3 ps)に生成された準粒子によって実効的な電子系の温 度が上昇することで SDW ギャップが閉じ、その後準 粒子の緩和に伴って再びギャップが開くものと解釈 できる。準粒子緩和時間は、ギャップの縮小によって フォノン緩和が抑制されるフォノンボトルネック効 果により、ギャップの大きさの逆数に比例すること が知られている。しかしながら、SDW 転移温度 T_c 近傍でこの関係が破綻し、T_cにおいてギャップは完 全に閉じていないにも関わらず、ギャップ回復時間 が発散することを我々は見出した。これは擬一次元 電子構造に由来する大きなゆらぎの効果と、その結 果として生じる T_c 近傍の広い温度領域に渡る臨界緩 和現象として解釈することが可能である[5,6,34]。 近赤外光に比べて十分光子エネルギーの低いテラへ ルツ光による励起では、準粒子の化学ポテンシャル シフトによって、SDW 相から金属相への一次相転移 が起こることが理論的に予言されている。このこと を確かめるため、テラヘルツ光 (中心周波数:1 THz, ピーク電場強度:70 kV/cm) 照射後の試料の抵抗変化 を直流伝導度計測により調べた。その結果、テラヘ ルツ光照射後1µs以内に試料の抵抗が減少し、その 後~msにかけてゆっくりと抵抗が回復する様子が観 測された。[29,35]

4.6.3 量子ホール系における光学ホール効 果の観測

強磁場下の2次元電子系で観測される整数量子ホ-ル効果では、電子の局在が本質的な役割を果たして いる。通常量子ホール効果は直流領域において観測 されてきたが交流応答、特にランダウ準位間の遷移 が生じるようなテラヘルツ周波数帯において、ホー ル伝導度にプラトー構造が現れるかは明らかではな い。理論的にはそもそも交流領域においてはトポロ ジカルな議論を用いることが出来ない。これに対し 最近森本らは久保公式を用いた厳密対角化計算によ り、ランダウ準位間遷移が生じるような高周波数、 即ちサイクロトロン周波数領域においてもホール伝 導度にプラトー構造が残存することを明らかにした T. Morimoto *et al.* Phys. Rev. Lett. **103**, 116803 (2009)]。このような背景のもと、我々はこれまでに 開発を進めてきた低温磁場下で動作する高感度テラ ヘルツ偏光分光法を用いて、量子ホール系のテラヘ ルツ周波数領域におけるファラデー回転角を測定し、 光学ホール伝導度を調べた。

試料には GaAs/AlGaAs ヘテロ構造の 2 次元電子 系を用いた。図 4.6.20(a) に観測されたファラデー回 転角スペクトルを示す。磁場 5.6 T(占有数 2) 近傍 において、ファラデー回転角が自由電子的なドルー デモデルから予測される値からずれ、量子ホール的 な値へと漸近していく様子がみてとれる。またこの 磁場領域で、観測領域の低周波数側においてファラ デー回転角が、上記森本らの理論で予測されていた 微細構造定数 α と基板屈折率 $n_{\rm sub}$ のみに依存する値 $-4\alpha/(1 + n_{\rm sub})(~6mrad)$ をとることが示された。 ファラデー回転角は光学ホール伝導度に対応してい



図 4.6.19: 近赤外光照射前後における THz 帯光学伝 導度スペクトル(左図)と対応する準粒子エネルギー 分布の模式図(右図)。左図は転移点以下(4K)の スペクトルを転移点以上(15K)のスペクトルで規 格化してある。温度4KではSDW形成に伴いフェ ルミ面に一粒子ギャップが開く(右上図)。光照射に よって光学ギャップより上の準位に準粒子が励起さ れ、実効的な電子系の温度が上昇しギャップが閉じ る(右中図)。その後、準粒子の緩和に伴い再び一粒 子ギャップが回復する(右下図)。左図の矢印は一粒 子ギャップ位置の目安を与える。

るため、観測された回転角スペクトルから光学ホー ル伝導度を求めることができる。図4.6.20(b)に、サ イクロトロン共鳴に由来する周波数依存因子で規格 化して得られた光学ホール伝導度スペクトルを示す。 規格化光学ホール伝導度は観測領域で周波数に依存 せず、さらに磁場5.4-5.6 Tにおいて一定の値(量子 化値)をとることがわかった。この規格化光学ホー ル伝導度の磁場依存性をプロットしたものをinsetに 示す。テラヘルツ周波数領域の光学ホール伝導度に おいてもプラトー構造が明瞭に現れることがわかっ た。このことは、ランダウ準位間遷移近傍の周波数 応答でも、量子ホール効果を引き起こす電子局在の 影響が残存していることを示している。なお本研究 は物理学教室青木研究室、岡本研究室との共同研究 である。[27]



図 4.6.20: GaAs/AlGaAs 2次元電子系における (a) 偏光回転角スペクトルと (b) サイクロトロン共鳴に 起因する周波数依存因子で規格化した光学ホール伝 導度。点線と破線はそれぞれ古典的な Drude Model に従う場合と量子ホール的な場合に予想される推定 値である。Inset:規格化光学ホール伝導度の磁場依 存性。

4.6.4 高強度テラヘルツ波発生

固体内電子系において、強い光電場によるエネル ギーギャップの崩壊や相転移現象、非摂動論領域にお ける光と物質の相互作用を調べるための光源として、 高強度のテラヘルツ波光源の開発を進めてきた。振 動電場中での電子の平均運動エネルギーに相当する ポンデロモーティブエネルギー $U_p=e^2E^2/4m_e\omega^2$ は一定電場振幅では光の波長が長い程(周波数が低 いほど)大きくなる。テラヘルツ帯では可視光領域 に比べてこの影響が顕在化することが予想され、固 体における強光電場効果を調べるのに適していると 考えられる。そこで以下の二つの方法による高強度 テラヘルツ発生法の開発を行った。1)フェムト秒光 パルスの基本波と第二高調波をレーザー誘起空気プ ラズマ中で混合させることによって、高強度のテラ ヘルツ波パルスが発生することが知られている。 の手法で発生するテラヘルツ波電場強度の定量評価 を行い、強度 0.5 mJ、パルス幅 30 fs のフェムト秒光 パルスから、電場尖塔値 200 kV/cm の高強度テラヘ ルツ波を得ることに成功した。2) 非線形光学結晶 LiNbO3 を用いた光整流法によって、高強度のテラ ヘルツ波パルスの発生を行った。パルス面傾斜によ る位相整合条件の最適化、テラヘルツ集光光学系の |最適化を進め、パルス強度 1 mJ、パルス幅 90 fs の 再生増幅システムを用いて、電場尖塔値 800kV/cm の高強度テラヘルツパルスを発生させることに成功 した。この電場強度は、自由電子に対するポンデロ

モーティブエネルギーに換算すると $U_p \sim 8eV$ に相当し、多くの物質系で電磁場との相互作用を摂動として扱えない領域に達していると考えられる。この高強度テラヘルツ電磁波パルス光源を用いてカーボンナノチューブの1次元励起子と強い光電場との相互作用の研究を開始した[30]。

<受賞>

 [1] 鈴木 剛:平成 21 年度理学系研究科研究奨励賞(修 土)、東京大学大学院理学系研究科、2009 年 3 月

<報文>

(原著論文)

- [2] Y. Takahashi, S. Ishiwata, S. Miyahara, Y. Kaneko, N. Furukawa, R. Shimano, Y. Tokura: Electromagnons in the multiferroic state of perovskite manganites with symmetric exchange striction, Phys. Rev. B 81, 100413(R) (2010).
- [3] S. Horiuchi, Y. Tokunaga, G. Giovannetti, S. Picozzi, H. Itoh, R. Shimano, R. Kumai, and Y. Tokura: Above-room-temperature ferroelectricity in a single-component molecular crystal, Nature 463, 789-792 (2010).
- [4] H. Itoh, Y. Tokunaga, N. Kida, R. Shimano, Y. Tokura, Charge-ordering-induced polar domains and domain walls in a bilayered manganite Pr(Sr_{0.15}Ca_{0.85})₂Mn₂O₇, Appl. Phys. Lett.**96**,032902(2010).
- [5] S. Watanabe, R. Kondo, S. Kagoshima, and R. Shimano: Observation of ultrafast photoinduced closing and recovery of the spin-density-wave gap in (TMTSF)₂PF₆, Phys. Rev. B **80**, 220408(R) (2009). (*Editor's suggestion*) (selected for Virtual Journal of Ultrafast Science, Volume 9, No.1 (2010).)
- [6] S. Watanabe, R. Kondo, S. Kagoshima, and R. Shimano: Ultrafast photo-induced insulator-tometal transition in the spin density wave system of (TMTSF)₂PF₆, Physica B, in press.
- [7] N. Kida, D. Okuyama, S. Ishiwata, Y. Taguchi, R. Shimano, K. Iwasa, T. Arima, and Y. Tokura: Electric-dipole-active magnetic resonance in the conical-spin magnet Ba₂Mg₂Fe₁₂O₁₂, Phys. Rev. B 80, 220406(R) (2009).
- [8] T. Suzuki and R. Shimano: Time-Resolved Formation of Excitons and Electron-Hole Droplets in Si Studied Using Terahertz Spectroscopy, Phys. Rev. Lett. 103, 057401 (2009).
- [9] Y. Takahashi, Y. Yamasaki, N. Kida, Y. Kaneko, T. Arima, R. Shimano, and Y. Tokura: Farinfrared optical study of electromagnons and their coupling to optical phonons in Eu_{1-x}Y_xMnO₃ (x=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, and 0.45), Phys. Rev. B **79**, 214431 (2009). (*Editor's suggestion*)

- [10] N. Kida, Y. Takahashi, J. S. Lee, R. Shimano, Y. Yamasaki, Y. Kaneko, S. Miyahara, N. Furukawa, T. Arima, Y. Tokura: Terahertz timedomain spectroscopy of electromagnons in multiferroic perovskite manganites, J. Opt. Soc.Am. B 26, A35 (2009).
- [11] J. Fujioka, S. Horiuchi, N. Kida, R. Shimano, and Y. Tokura: Anisotropic polarization pi-molecular skeleton coupled dynamics in proton-displacive organic ferroelectrics, Phys. Rev. B 80, 125134 (2009).
- [12] J. S. Lee, N. Kida, Y. Yamasaki, R. Shimano, and Y. Tokura: Lattice dynamics in the ab- and bcspiral spin-ordered states of perovskite manganites, Phys. Rev. B 80, 134409 (2009).
- [13] J. S. Lee, N. Kida, S. Miyahara, Y. Takahashi, Y. Yamasaki, R. Shimano, N. Furukawa, and Y. Tokura: Systematics of electromagnons in the spiral spin-ordered states of RMnO₃, Phys. Rev. B **79**, 180403(R) (2009).
- [14] Y. Ikebe, R. Shimano, M. Ikeda, T. Fukumura, and M. Kawasaki: Vortex dynamics in a NbN film studied by terahertz spectroscopy, Phys. Rev. B 79, 174525 (2009). (Selected for Virtual Journal of Applications of Superconductivity, Volume 16, No.11, (2009).)

(学位論文)

- [15] 小川俊明: 「カーボンナノチューブの1次元励起子の 高強度テラヘルツ電場変調」(修士論文)
- [16] 鈴木剛:「Si における励起子・電子正孔液滴のテラへ ルツ時間領域分光」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [17] Yohei Ikebe and Ryo Shimano:Terahertz Hall conductivity measurements in GaAs/AlGaAs 2DEG system, Yonsei-Todai Joint Workshop, Seoul, Korea, Feb.12, 2010.
- [18] S. Tsubota, S. Watanabe, R. Shimano, Quasiparticle injection by intense terahertz pulse in the spin density of wave state of $(TMTSF)_2PF_6$ Nanyang Technology University(NTU)-Todai Joint Workshop, Tokyo, Japan Feb.22-23, 2010.
- [19] S. Watanabe, R. Kondo, S. Kagoshima, and R. Shimano: Direct Observation of Photo-Induced Spin-Density-Wave Gap Closing and Recovery in (TMTSF)₂PF₆ by Terahertz Time-Domain Spectroscopy, 8th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Ferromagnets (ISCOM2009), Niseko, Hokkaido, Japan, Sept. 12-17, 2009.

- [20] S. Watanabe, R. Kondo, S. Kagoshima, and R. Shimano: Ultrafast terahertz probe of spindensity wave dynamics in organic conductor (TMTSF)₂PF₆, 27th International Quantum Electronics Conference (IQEC09), Maryland, USA, May 31-June 5, 2009.
- [21] T. Suzuki, and R. Shimano: Formation dynamics of excitons and electron-hole droplets in Si probed by THz time domain spectroscopy, 27th International Quantum Electronics Conference (IQEC09), Maryland, USA, May 31-June 5, 2009.

招待講演

- [22] Ryo Shimano: Photo-control of spin density wave system in organic conductors. Nanyang Technology University(NTU)-Todai Joint Workshop, Tokyo, Japan, Feb.22-23, 2010.
- [23] Ryo Shimano: Gas-liquid and insulator-metal transition in photo-excited electron-hole system in Si, Yonsei-Todai Joint Workshop, Seoul, Korea, Feb.12, 2010.
- [24] Ryo Shimano: Insulator to metal transition in excitonic system and spin density of wave system studied by terahertz spectroscopy, G-COE Workshop on Condensed Matter and Photo Sciences, Tokyo, Japan, Oct.7, 2009.
- [25] Ryo Shimano: Intense THz generation from two color pumped air plasma and its application to symmetry broken ground state in solids, International Workshop on THz wave Generation and Detection in Filaments, Universite Laval, Quebec City, Canada, May 22-23, 2009.

(国内会議)

一般講演

- [26] 鈴木剛, 島野亮: Si における高密度光励起電子正孔 系の冷却ダイナミクスの観測,日本物理学会第65回 年次大会(2010年3月20日-3月23日、岡山大学)
- [27] 池辺洋平, 森本高裕, 枡富龍一, 岡本徹, 青木秀夫, 島 野亮:量子ホール系における THz 周波数帯光学ホー ル効果の観測, 同上
- [28] 柳済允, 鈴木剛, 池辺洋平, 島野亮: 磁場による Si の 1s 励起子のエネルギーシフトの観測, 同上
- [29] 坪田翔悟,渡邉紳一,近藤隆祐,鹿児島誠一, 島野亮: 高強度テラヘルツ波パルスによる (TMTSF)₂PF₆SDW 相の準粒子注入効果,同上
- [30] 小川俊明,渡邉紳一,南信次,島野亮:高強度 THz パルスによるカーボンナノチューブの励起子シュタル ク効果,同上
- [31] 高橋陽太郎,石渡晋太郎,金子良夫,田口康二郎,島 野亮,十倉好紀:斜方晶 Y_{1-x}Lu_xMnO₃における電 場誘起磁気励起の全体像,同上
- [32] 藤岡淳,井田義明,高橋陽太郎,貴田徳明,島野亮, 十倉好紀: 層状マンガン酸化物 Nd_{1-x}Sr_{1+x}MnO₄ に おける電荷・軌道密度波とテラヘルツ領域の光学応 答,同上

- [33] 熊倉真一,貴田徳明,石渡晋太郎,田口康二郎,島野 亮,有馬孝尚,十倉好紀: Ba2Mg2Fe12O22 結晶のエ レクトロマグノンによる巨大磁気クロミズム,同上
- [34] 渡 邉 紳一,近藤隆祐,鹿児島誠一,島野亮: (TMTSF)₂PF₆ スピン密度波ギャップスペクト ルの光誘起変化と回復過程,日本物理学会 2009 年秋 季大会 (2009 年 9 月 25 日-9 月 28 日 於 熊本大学)
- [35] 坪田翔悟,渡邉紳一,近藤隆祐,鹿児島誠一,島
 野亮: 高強度テラヘルツ波パルス励起による (TMTSF)₂PF₆SDW 相の伝導度変化,同上
- [36] 鈴木剛、島野亮: Si における励起子・電子正孔液滴形 成ダイナミクスの温度依存性,同上
- [37] 貴田徳明 A,石渡晋太郎,田口康二郎,島野 亮,有馬孝尚,十倉好紀: コニカル磁性体 Ba₂(Mg_{1-x}Zn_x)₂Fe₁₂O₂₂ における光の電場で 誘起される磁気励起,同上
- [38] 石渡晋太郎,金子良夫,高橋陽太郎,徳永祐介,徳永 将史,有馬孝尚,島野亮,田口康二郎,十倉好紀:斜 方晶 RMnO₃(R = Y,Ho,Er,Tm,Yb,Lu)におけ る磁気強誘電性のAサイト依存性,同上
- [39] 高橋陽太郎,石渡晋太郎,金子良夫,貴田徳 明,田口康二郎,島野亮,十倉好紀: 斜方晶 RMnO₃(R = Y,Ho,Er,Tm,Yb,Lu) における電 場誘起による磁気励起の観測,同上
- [40] 島野 亮:「テラヘルツ時間領域分光法によるシリコンの高密度励起子系の研究,新学術領域研究「半導体における動的相関電子系における光科学」第3回シンポジウム,平成22年1月7日、京都大学
- [41] 島野 亮:「光・テラヘルツ波による (TMTSF)₂PF₆ のスピン密度波相制御」,新学術領域研究「分子自由 度が拓く新物質科学」第3回領域会議,平成22年1 月5日、仙台市秋保
- [42] 島野 亮:「高感度テラヘルツ光学活性計測技術の開発」, JST さきがけ領域会議, 平成 21 年 12 月, 御茶ノ水, 東京
- 招待講演
- [43] 島野 亮: テラヘルツ分光で探る半導体高密度電子正 孔系の量子多体現象,日本物理学会2009年秋季大会 シンポジウム「テラヘルツ領域における非線形光学・ 高密度励起現象の新展開」(2009年9月25日-9月28 日於 熊本大学)
- (集中講義、セミナー)
- [44] 島野 亮:「テラヘルツ分光法の基礎と物性科学への 応用」、大阪大学理学系研究科物理学専攻集中講義, 平成21年6月22日-24日
- [45] 島野 亮:「テラヘルツ波で探る量子物性」,大阪大 学理学系研究科物理学専攻セミナー,平成21年6月 23日,
- [46] 島野 売:「テラヘルツ波領域の物質科学と量子物性研究」,東京大学大学院理学系研究科理学クラスター 講義「光と物質」,平成21年7月29日
- [47] 島野 売:「テラヘルツ波で探る半導体電子正孔系の 量子凝縮相」、東京大学駒場物性セミナー,平成21年 7月17日

5 一般物理理論

5.1 宇宙理論研究室 (須藤)

宇宙は、微視的スケールから巨視的スケールにわたる多くの物理過程が複雑に絡まりあった物理系であり、具体的な研究テーマは下の図にあるように多岐にわたっている。しかしそれらの共通のゴールは、宇宙の誕生から現在、さらには未来に至る進化史を物理学によって記述することである。そのためには、常に学際的かつ分野横断的な活動が本質的である。 我々は、ビッグバン宇宙国際研究センターや数物連携宇宙連携機構はもちろん、国内外の他研究機関とも積極的に共同研究を実行しており、常に開かれた研究室を目指している。

現在我々が行っている中心的課題は、宇宙のダー クエネルギーと太陽系外惑星の2つである。これら について簡単に説明を加えておこう。

1916年のアインシュタインによる一般相対論の構築によって始まった自然科学としての宇宙論は、ハッブルによる宇宙膨張の発見(1929年)、ガモフによるビッグバン理論の提案(1946年)、宇宙マイクロ波背景放射の発見(1965年)を通じて、理論と観測の双方からの進展を受け現在の標準宇宙論に至る。多くの観測データを組合わせることで、宇宙の全エネルギー密度の3/4がダークエネルギー、1/5がダークマター、残りの約4パーセントが通常の元素、という結論が得られている。これが宇宙の「標準モデル」である。しかしながら宇宙の主成分の正体が全く理解されていないという驚くべき事実は、宇宙・素粒子物理学のみならず、さらにより広く21世紀科学に対して根源的な謎を突きつけている。

第2の地球は存在するか。荒唐無稽にも聞こえか ねないこの疑問に対して、現在の天文学は確実に科 学的に迫りつつある。1995年の初発見以来、太陽系 外惑星はすでに400個以上が発見されている。その ほとんどは木星型(ガス)惑星であると考えられて いるが、2009年3月に打ち上げられたケプラー衛星 を始めとする観測手段の進歩で、地球型(岩石)惑 星の発見自体はもはや時間の問題である。とすれば それら遠方の地球型惑星に生命の兆候を以下にして 見出すか。まさに「第2の地球は存在するか」とい う問いに答える日が現実のものとなりつつある。こ れは、物理学のみならず、天文学、地球惑星学、生 物学などを総動員して取り組むべき、まさに理学部 横断的な研究テーマである。

我々はこのような状況を踏まえつつ、すばる望遠 鏡による広視野深宇宙探査国際共同研究を牽引し、 さらには太陽系外惑星探査の新たな地平を切り開く 研究を展開しつつある。具体的には、ダークエネル ギーの状態方程式の決定、ダークマター分布の重力 進化と銀河のクラスタリング統計、ミッシングバリ オンの起源と観測的検証、ロシター効果による主星 と系外惑星の自転・公転軸のずれの検出、地球型惑星 系の反射光を用いた表面分布の再構築とバイオマー カーの検出などを研究しつつある。さらに既存の枠 にとらわれない独創的なテーマの開拓をも目指して おり、宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測による背 景重力波の検出や、重力波観測を用いた重力理論の 検証など、次世代宇宙論を担う新たな研究テーマに も取り組んでいる。これらに関しては、研究室ホーム ページからより詳細な情報を入手することができる。

5.1.1 観測的宇宙論

バリオン音響振動における赤方偏移歪みの効果と高 精度テンプレート

銀河分布のパワースペクトルに現れるバリオン音 響振動は、その特徴的な振動周期を「宇宙標準もの さし」として用いることで、銀河分布の赤方偏移・ 距離関係を決定できる。近年、このバリオン音響振 動を精密観測することで、宇宙の加速膨張・ダーク エネルギーの正体が探れると注目が集まり、バリオ ン音響振動は次世代分光サーベイの重要な観測ター ゲットになっている。一昨年より我々は、バリオン 音響振動を用いた観測手段の有効性を探るため、N 体シミュレーションと摂動論にもとづく解析的手法 をもとに、バリオン音響振動に現れる様々な観測的 影響(非線形重力進化、赤方偏移歪み、銀河バイア ス)に関する理論的研究を進めている。これまでの 研究で、非線形重力進化を従来の摂動論より高精度 かつ広範囲で記述できる解析計算手法の開発に成功 した [15]。本研究では、この計算手法をもとにさら に研究を一歩進め、赤方偏移歪みの影響を取り入れ たバリオン音響振動の高精度理論テンプレートの構 築を行った。赤方偏移空間におけるパワースペクト ルの厳密な表式を出発点に、赤方偏移歪みに対する 新しい解析表式を得ることに成功し、従来用いられ てきた現象論的な表式には新たな補正項が必要なこ とがわかった。さらに、N体シミュレーションとの 詳細な比較を行い、新たな解析表式は高精度テンプ レートとして十分妥当であることを検証した。赤方 偏移歪みの効果を積極的に用いることで、距離指標 だけでなく密度ゆらぎの成長率の情報も引き出せる ことが知られているが、そのためには赤方偏移歪み の精密なモデル化が本質的である。バリオン音響振 動の精密観測から新たな宇宙論的情報を引き出す上 で、本研究で得られた新たな表式はきわめて重要な (役割を果たすことが期待される。[56,59,67,80,80]

反射光トモグラフィーによる地球型系外惑星の世界 地図作製と赤道傾斜角推定

地球型惑星の直接撮像によって得られる反射光から惑星表面の組成についての情報が得られる。惑星

の公転自転によって変化する反射光の強度変化に着 目し、これを用いて惑星表面の陸地 / 海分布を推定 する方法論を開発した。また、この方法を用いるこ とで惑星の赤道傾斜角を推定できることを見いだし た。この方法は現在、計画されている衛星計画によっ て実現可能であることを示した。

X線輝度による銀河団の形状分布と宇宙論

銀河団の形状は銀河団の力学進化を考える上で重 要である。XMM-Newton による 60 個ほどのデータ 解析を行い、X 線輝度分布を通して銀河団の投影軸比 分布関数を測定した。そしてこれを N 体シミュレー ションから得られている暗黒物質の軸比分布に静水 圧平衡等の単純な仮定を課したモデルで説明するこ とに成功した [75]。

銀河分布を用いた中高温銀河間物質の X 線観測提案

中高温銀河間物質 (WHIM) はミッシングバリオン 問題を解く鍵として注目されているが、その存在の 決定的な証拠がいまだ見つかっていない。WHIMの あるとされるフィラメント構造は銀河によってトレー スされているので、SDSS 銀河サンプルの系統的な解 析により、X 線衛星すざくによる観測に最適な場所 を同定し提案を行った。この提案は採択され、2010 年度中に観測される見通しである。

スニャーエフ・ゼルドビッチ効果によるハッブル定 数の系統誤差

スニャーエフ・ゼルドビッチ効果を用いたハッブ ル定数推定の観測値は、観測によって15%ほどの違 いがある。今回その一方の結果である Bonamente et al.(2006)の解析のX線温度決定について再解析を 行った結果、Chandra キャリブレーションの配布時 期に依存し、推定値にして15%以上の違いがでてし まうことを発見した。すなわち、この方法論はX線 衛星のキャリーブレーションを高精度化が、推定値 のバイアスを抑えるために必要であることを示して いる[36, 68]。

銀河団ガスのゆらぎが宇宙論に及ぼす影響

銀河団は宇宙論プローブとしてよく利用されてき たが、宇宙論の精密化とともに系統誤差の理解が重 要となってきている。我々は銀河団ガスのゆらぎが 温度推定バイアス、ハッブル定数推定に大きな系統 誤差を生み出していることを見いだしてきた。また ゆらぎの観測的制限を行う方法論の開発と実際の解 析を行った [24, 50]。 原始揺らぎの非ガウス性の銀河空間分布への影響

標準的な宇宙モデルでは、宇宙の構造の種はイン フレーション中に形成されたものと考えられている。 この原始揺らぎは、ほぼガウス統計に従うが、これ までの大規模構造及び宇宙マイクロ波背景輻射の温 度揺らぎの観測結果は確かにガウス統計と矛盾がな い。今後の観測では、期待されるガウス統計からの 僅かな差異を検出する可能性がある。そして、この 大きさが測定されれば、インフレーションモデルの 詳細に対して強く制限を課すことができる。

我々は、宇宙論的なN体シミュレーションを用い て、銀河をホストする暗黒物質ハローの空間分布の 持つ統計的性質が、局所型と呼ばれる種類の原始非 ガウス性の存在下でどのように変更を受けるか調査 した。その結果、これまでの研究で明らかにされてき たハローのパワースペクトルのみならず、高次の統計 量である、バイスペクトルも大スケールで大きく影 響を受けることを発見した。一方で、この影響は宇宙 の物質全体(=バリオンと暗黒物質)の空間分布には 見られなかった。故に、我々はハローの形成される場 所が物質全体の分布を非線形にバイアスしているこ とに起因すると結論づけた。また、我々はこの新しい 効果のために、将来観測からの原始非ガウス性の検 出が容易になることを示した [41, 42, 62, 69, 82, 83]。

有質量ニュートリノの重力非線形進化への影響

ニュートリノが有限の質量をもつことは素粒子標準 模型の限界を示す最初の実験的な証拠であり、ニュー トリノがどの程度の質量を持つかという問いに答え ることは重要な問題である。非常に興味深いのは、 ニュートリノ振動実験で測定できるのは質量固有値 の自乗差のみであるのに対して、宇宙論的観測から は重力を通してニュートリノ質量の絶対値の総和を 制限できることである。さらに重要な事実は、ベー タ崩壊から得られる電子ニュートリノ質量の制限と 振動実験で得られた結果を組み合わせる事によって 得られる制限よりも、宇宙論的観測から得られてい る $\sum m_{\nu} < 0.2 - 1.0 \text{eV} (95\% \text{C.L.})$ という制限の方 が厳しいということである。

宇宙論的な観測からニュートリノの質量を制限で きる一つの理由として、有質量ニュートリノは宇宙 の構造形成の成長を均すという効果がある。ニュー トリノは大きな速度分散をもつので、ある特徴的な スケール以下ではニュートリノの密度ゆらぎは存在 できず、重力を弱めるからである。

将来の大規模構造観測を念頭に置くと、重力による非線形進化の影響が無視できないが、ニュートリノの影響を考慮した取扱いはなされていなかった。そこで我々は、摂動論に基づき、有質量ニュートリノの効果を非線形パワースペクトルの計算に組み込むこと手法を確立した。さらに、ニュートリノが成長を均す効果は重力の非線形進化により増幅され、この効果によりニュートリノ質量の制限が非常に強くなりうることを示した [8, 27, 37, 38, 99, 100]。

さらに摂動論的手法により銀河バイアスの効果も 考慮することによって、現存する銀河パワースペクト ルのデータである Sloan Digital Sky Survey (SDSS) の Data-Release 7 (DR7) における銀河カタログの データに我々の確立した手法を適用して、ニュート リノ質量に関するロバストな制限を得る試みを行っ た。WMAP5 と組み合わせることによって、 $\sum m_{\nu} < 0.67 \text{eV} (95\% \text{C.L.})$ という WMAP5 のみに比べて 2.3 倍厳しい制限を得た [27, 39, 40, 60, 66, 70, 84, 100]。 この制限は有質量ニュートリノの効果を正確に取り 扱った上で得られた初めての制限である。

CMB レンジングと銀河の弱重力レンズを用いた宇 宙論パラメータの決定精度

Ia 型超新星、CMB、宇宙大規模構造の観測によっ て標準宇宙モデルが確立してきたが、このモデルに はいくつかの課題が残されている。そのうちの一つ は、物理的起源の不明なダークエネルギーが宇宙の エネルギー密度の70%以上を占めていることであ る。また、素粒子実験からニュートリノの質量はゼ ロでないことが分かっているが、標準宇宙論ではゼ ロとして扱われている。ダークエネルギーやニュー トリノ質量は宇宙の構造形成に影響を与えるため、 密度揺らぎの情報をもつ観測を用い、これらの課題 にアプローチできる。

本研究では、その方法として特に銀河の弱重力レ ンズと CMB レンジングに着目し、次世代サーベイ におけるこれらの測定・検証可能性について見積もり を行った。特に次世代の CMB 観測として Planck、 ACTPol、次世代の銀河の測光サーベイとして HSC を想定した。その結果、今回用いた弱重力レンズ効 果は、DETF で見積もられている Stage-III クラス の他の観測からの制限と同程度であることが分かっ た。また、 CMB レンジングと銀河の弱重力レンズ が宇宙論パラメータの決定精度に与える影響を比較 し、ダークエネルギー・ニュートリノ質量の決定精 度が何で決まっているのか調べた。その結果、銀河 のシェアを用いた場合には、重力の非線形性でダー クエネルギーの状態方程式とエネルギー密度の縮退 が解け、ダークエネルギーに対する制限が改善して いることが分かった。一方、ニュートリノ質量の制 限においては縮退が完全に解けず、制限があまり改 善していないことも分かった。本研究より、ダーク エネルギー・ニュートリノ質量の制限において、重 力の非線形進化を正しく扱うことで、弱重力レンズ サーベイは極めて有効な手段であるということが分 かった [28, 44, 72, 88, 76]。

反射光による地球外系外惑星の表層環境の探査

現在、目覚ましい速度で次々に系外惑星が発見されており、地球質量程度の惑星、さらにはハビタブ ルゾーン(水が惑星表面に液体として存在できる軌 道の範囲)内の惑星の存在も今後数年で明らかになっ てくると考えられる。そこに生命の存在を探ること は、ほとんど必然的に今後の大きな目標となるだろ う。系外惑星の環境の詳細を観測的に知るための鍵 として、系外惑星からくる反射光が注目されている。 海や土壌、雪などの表面はそれぞれに固有の反射特 性を示すが、特に植物の反射特性にはレッドエッジ と呼ばれる著しい特徴があり、生命の存在を示す指 標ともなりうる。これらをふまえて、私達は、反射 光の多バンド測光観測から逆問題的に惑星表面を再 構築する方法を開拓している。今年度は、実際の地 球観測衛星のデータをもとに 10pc 彼方から見た地球 (雲が無い場合)を模擬観測し、その結果をモデルで フィットすることで、海や陸、さらには植物の割合や 分布が推定できることを示した。[30, 64, 74, 104] ま た、現在提案されている観測計画に合わせたシミュ レーションを行った。[47]

トランジット惑星系のロシター効果に対する解析手 法の改良

系外惑星の発見には惑星の重力による主星のふら つきを捉えるドップラー法が多くの系で用いられて いるが、一方で主星の前を惑星が通過して食を起こ すトランジット惑星系も多く見つかっている。トラ ンジット惑星系ではドップラー法だけからは得られ ない多くの情報を引き出すことが可能である。ロシ ター効果と呼ばれるトランジット中の星の視線速度 の特徴的な変化がその1つで、それにより主星の自 転速度と、主星の自転軸の向きと惑星の軌道公転軸 の向きの天球面への射影角を推定することができる。

我々は,ロシター効果に対してこれまで用いられ てきた摂動公式(Ohta et al. 2005)が,実際のすばる の視線速度解析で得られる結果と系統的にずれる原 因について指摘した。Ohta et al. (2005)による摂動 公式では星の視線速度の見積りに吸収線のモーメン ト(重心)を用いるのに対し,実際のデータの視線 速度解析では吸収線の位置の見積りにはトランジッ ト中のスペクトルとトランジット外のテンプレート の相関を取り最もフィットする位置を求めていると いうことがこのずれの原因になっている事を示した。

我々はさらに,星の自転の影響や星の圧力などによるスペクトルの吸収線に対する影響を考慮し,実際の視線速度解析と同じように相関を取る手法によってロシター効果に対する解析公式を導出した。これにより,吸収線の広がりに応じてどのように視線速度が変化するのかを定量的に議論した。 [5,48,49,29,63,73]

星の自転軸と惑星公転軸のなす角度の3次元再構築

ロシター効果がこれまで観測された系は 20 個近 くに上っており,徐々に λ を統計的に議論する段階 に来ている。しかしながら,観測される λ は天球面 上で 2 つの回転軸がなす角度であり,実際の 3 次元 の角度を求めるには主星の自転軸が観測者に対して どの程度傾いているかという情報が必要となる。こ の傾斜角は,主星のスペクトル型に対する代表的な 自転速度と観測される射影された主星の自転速度を 比較する事である程度推定することが可能である。 我々は,主星の自転軸傾斜角に対する観測的制限を 考慮する事により, Fabrycky & Winn (2009) によっ て導入されたロシター効果に対する統計解析を拡張 した。またその統計手法を最新のものを含むこれま での観測結果に適用した。結果,惑星の軌道公転軸 と主星の自転軸が天球面上ではそろっていても3次 元的にはずれているのではずれているのではないか と示唆される系がいくつか見つかった。[77]

SDSS 銀河分光サーベイを用いた密度揺らぎの確率 分布関数

宇宙の大規模構造を記述する最も基本的な統計量 の一つが密度揺らぎの確率分布関数 (PDF) である。 現在の宇宙の構造の起源である原始揺らぎはインフ レーション時に形成されたものと考えられており、多 くのモデルはほぼガウス統計に従う密度揺らぎを予 言する。その後、重力の非線形進化により PDF は大 きく変形を受ける。結果、現在の PDF は対数正規分 布でよく記述できることが数値計算によって示され ている。一方、観測的に PDF を測定しようとする試 みがなされてきたがそれらは必ずしも精度が十分と は言えないままであった。

そこで、我々は大規模な赤方偏移サーベイである SDSSの最新データであるDR7(Data Relase 7)を用 いて、銀河分布のPDFを様々なスケールにわたり 定量的に測定した。その結果、大スケールでは正規 分布に近いといえるPDFが、非線形性の強い小ス ケールでは分布が歪み、対数正規分布に近づいてい くことがわかった。これらの観測結果と我々の数値 シミュレーション結果と比較することで、赤方偏移 歪みがPDFにどのように影響するかを示した。さ らに、PDFが銀河の性質(光度、色、形態)にどのよ うに依存するのかを調べ、考察した。[45, 79]

5.1.2 天体核·素粒子物理

ガンマ線バースト中心エンジンからの重力波

ガンマ線バーストは宇宙で最も激しい爆発現象で ある。2004年に打ち上げられた Swift 衛星をはじめ、 非常に多くの観測があるものの、その中心メカニズ ムはいまだ明らかになっていない。ガンマ線バース トを起こすには非常に小さい角度に絞られた超相対 論的なジェットが必要と考えられているが、その発 生メカニズムは明らかになっていない。中心エンジ ンの候補として有力なのは、コラプサーと呼ばれる ブラックホールと降着円盤の系である。しかし具体 的にどういったメカニズムで GRB に不可欠なジェッ トを生成するのか、というのは光学的に厚いため光 子での観測では制限を加えることができない。その ような中、本研究ではガンマ線バーストの中心エン ジンから放出される重力波の強度を見積もった。そ の結果 LISA や DECIGO といった将来観測器を用 いることで中心エンジンに制限を加えることができ ることを示した [7, 25, 43, 97, 101, 102, 103]。

コラプサーモデルにおける非熱的ニュートリノとガ ンマ線バースト中心エンジン

ガンマ線バーストは宇宙で最も激しい爆発現象の つであり、小さな角度に絞られている相対論的な ジェットから放出されていることが観測から分かって きている。ジェットはブラックホールと降着円盤のシ ステムから駆動されていると考えられているが、そ の生成機構は明らかになっていない。有力な候補と して、降着円盤から放出されるニュートリノの対消 滅によるエネルギー供給が提唱されている。ニュー トリノ対消滅によってガンマ線バーストを起こすの に十分なエネルギーをつくるには、大きなニュート リノ光度が必要である。これはニュートリノ反応の断面積の小ささ $(\sigma\sim 10^{-44}~{\rm cm}^2)$ と幾何学的な構造か ら、実際にジェットに行くエネルギーは全エネルギー の1%程度であるためである。しかし、近年のニュー トリノの光学的厚みを考慮した計算は、十分な大き さのニュートリノ光度が達成できないためニュート リノ対消滅ではガンマ線バーストを起こすのは困難 だということを示唆している。そのような背景の中、 本研究ではニュートリノ輸送方程式を用いて、降着 円盤の動径方向の運動によって非熱的ニュートリノ が生成されることを示した。これまでニュートリノ 輸送は簡略化して扱われてきたのでこのような効果 は考えられておらず、ニュートリノはすべて熱的分 布を持っていると仮定されていた。ニュートリノ対 消滅の効率はニュートリノエネルギーに大きく依存 するため、この非熱的成分によってジェット生成効 率は大きく変化する。今回は、非熱的成分によって どれだけ効率が変化し、それによって、ニュートリ ノ対消滅によってガンマ線バーストを起こすのに十 分なエネルギーを生成できるのかどうかを議論した [65, 97, 101, 102, 103].

二次元軸対称計算によるニュートリノ駆動型超新星 爆発シミュレーション

重力崩壊型超新星爆発は大質量星がその末期に起 :す大爆発であると考えられている。この天体現象 は古来より数多の観測がなされているものの、その爆 発メカニズムは完全には明らかになっていない。その 標準的なシナリオとして、"遅延爆発モデル"がある。 これは、重力崩壊の結果として星の中心部に形成さ れた原始中性子星から放射される莫大な量のニュー トリノの一部が外部の物質と相互作用する(ニュー トリノ加熱と呼ばれる)ことで、星の中心部で解放 された重力エネルギーを外部で爆発エネルギーとし て転換することが肝となっている。このメカニズム で実際に爆発が起こすことが出来るのかを検討する には、流体の動きをニュートリノ輻射輸送とともに 解く必要がある。そのような計算はこれまで球対称 の仮定のもとでは様々なグループにより計算されて きた。しかし、球対称の仮定の元では、ニュートリ ノ加熱を用いても爆発を起こせない、ということが 長年大きな問題になっていた。しかし近年、多次元 の流体現象(対流など)によってニュートリノ加熱 の効率が著しく上がり、遅延爆発シナリオによって 超新星爆発が起こせる可能性があることが明らかに なってきた。今回、我々も2次元軸対称流体計算と 共にニュートリノ輻射輸送を計算できるコードを開 発し、いくつかのモデルで計算を行った。その結果、 球対称計算では先行研究同様爆発は起こらなかった が、2次元計算では爆発の予兆を見せるモデルがあ ることを明らかにした。また、回転が衝撃波の進化 に対してどのような影響を及ぼすのか、についても 明らかにした [25, 57, 61, 71, 85, 86, 95, 97]。

<受賞>

 [1] 平野照幸、平成 21 年度 理学系研究科研究奨励賞、 2010 年 3 月 24 日

<報文>

(原著論文)

- [2] Kevork N. Abazajian et al.: The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey, The Astrophysical Journal Supplement 182(2009) 543–558 (arXiv:0812.0649)
- [3] Joshua N. Winn, John Asher Johnson, Daniel Fabrycky, Andrew W. Howard, Geoffrey W. Marcy, Norio Narita, Ian J. Crossfield, Yasushi Suto, Edwin L. Turner, Gil Esquerdo, and Matthew J. Holman: On the Spin-Orbit Misalignment of the XO-3 Exoplanetary System, The Astrophysical Journal 700(2009) 302–308 (arXiv:0902.3461)
- [4] Norio Narita, Teruyuki Hirano, Bun'ei Sato, Joshua N. Winn, Yasushi Suto, Edwin L. Turner, Wako Aoki, Motohide Tamura, and Toru Yamada: Improved Measurement of the Rossiter-McLaughlin Effect in the Exoplanetary System HD 17156, Publications of the Astronomical Society of Japan **61**(2009) 991–997 (arXiv:0905.4727)
- [5] Teruyuki Hirano, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Norio Narita, Bun'ei Sato, John Asher Johnson, and Joshua N. Winn: Analytic Description of the Rossiter-McLaughlin Effect for Transiting Exoplanets: Cross-Correlation Method and Comparison with Simulated Data, The Astrophysical Journal **709** (2010) 458–469 (arXiv:0910.2365)
- [6] Yuka Fujii, Hajime Kawahara, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Satoru Fukuda, Teruyuki Nakajima, and Edwin L. Turner: Colors of a Second Earth: Estimating the fractional area of ocean, land and vegetation of Earth-like exoplanets, The Astrophysical Journal (2010) 印刷中 (astro-ph/0911.5621);
- [7] Yudai Suwa and Kohta Murase: "Probing the central engine of long gamma-ray bursts and hypernovae with gravitational waves and neutrinos"; Phys. Rev. D 80, 123008 (2009)
- [8] Shun Saito, Masahiro Takada, Atsushi Taruya: "Nonlinear power spectrum in the presence of massive neutrinos: perturbation theory approach, galaxy bias, parameter forecasts"; Phys.Rev.D 80, 083528 (2009).

- [9] Hajime Takami, Takahiro Nishimichi, Kazuhiro Yahata, & Katsuhiko Sato: "Cross-correlation between UHECR arrival distribution and large-scale structure"; JCAP 06 (2009) 031
- [10] Norio Narita, Bun'ei Sato, Teruyuki Hirano, & Motohide Tamura: "First Evidence of a Retrograde Orbit of Transiting Exoplanet HAT-P-7b"; Publications of the Astronomical Society of Japan; 61 (2009) L35
- [11] Norio Narita, Bun'ei Sato, Teruyuki Hirano, Joshua N. Winn, & Motohide Tamura: "Spin-Orbit Alignment of the TrES-4 Transiting Planetary System and Possible Additional Radial Velocity Variation"; Publications of the Astronomical Society of Japan, in press, (2010) (arXiv:1003.2268)
- [12] Takashi Hiramatsu, & Atsushi Taruya: "Chasing the nonlinear evolution of matter power spectrum with a numerical resummation method: Solution of closure equations"; Physical Review D **79** (2009) 103526
- [13] Kazuya Koyama, Atsushi Taruya, & Takashi Hiramatsu: "Nonlinear evolution of the matter power spectrum in modified theories of gravity"; Physical Review D 79 (2009) 123512
- [14] Ryuichi Takahashi, Naoki Yoshida, Masahiro Takada, Takahiko Matsubara, Naoshi Sugiyama, Issha Kayo, Atsushi J. Nishizawa, Takahiro Nishimichi, Shun Saito, & Atsushi Taruya: "Simulations of Baryon Acoustic Oscillations. II. Covariance Matrix of the Matter Power Spectrum"; The Astrophysical Journal, **700** (2009) 479
- [15] Atsushi Taruya, Takahiro Nishimichi, Shun Saito, & Takashi Hiramatsu: "Nonlinear evolution of baryon acoustic oscillations from improved perturbation theory in real and redshift spaces"; Physical Reiview D 80 (2009) 123503

(国内雑誌)

- [16] 須藤 靖: "科学の面白さを伝えているか?"、パリティ 24(2009) 4 月号, p.47
- [17] 須藤靖: "注文の多い雑文 その七: ニュートン算の功 罪"、東京大学出版会 UP 439(2009)5 月号, pp.15 -23
- [18] 西道 啓博・須藤 靖: "暗黒エネルギーは幻か?"(共訳)、(T.Clifton and P.G.Ferreira "Does Dark Energy Really Exist?", Scientific American, April 2009) 日経サイエンス (2009) 7 月号, pp.22–30
- [19] 須藤 靖: "高校物理の教科書は面白いか?"、パリティ 24(2009)7月号, pp.45-47
- [20] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その八: 目に見えないか らこそ大切"、東京大学出版会 UP 442(2009)8月号, pp.48 - 53
- [21] 須藤 靖: "ガリレオが見た宇宙、見なかった宇宙 ~世 界天文年・七夕講演会 ~"、東京大学理学系研究科・ 理学部ニュース 2009 年 9 月号 41 巻 3 号, p.6

- [22] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その九: オフリミット"、 東京大学出版会 UP 445(2009)11 月号, pp.44 - 50
- [23] 須藤 靖: "注文の多い雑文 その十: サクサクでパリパ リ"、東京大学出版会 UP 448(2010)2 月号, pp.46 – 52
- [24] 著者:河原 創「ゆらぐ銀河団ガスと宇宙論」; 天文 月報 Vol.102, No.10 (十月号), pp546-555,2009

(学位論文)

- [25] Yudai Suwa: "The Central Engine of Gamma-Ray Bursts and Core-Collapse Supernovae Probed with Neutrino and Gravitational Wave Emissions"(博 士論文)
- [26] Takahiro Nishimichi: "Numerical Studies on Galaxy Clustering for Upcoming Wide and Deep Surveys: Baryon Acoustic Oscillations and Primordial Non-Gaussianity" (博士論文)
- [27] Shun Saito: "Toward a precise measurement of neutrino mass through nonlinear galaxy power spectrum based on perturbation theory" (博士論文)
- [28] 並河 俊弥: "CMB レンジングと銀河の弱重力レンズ を用いた宇宙論パラメータの決定精度"(修士論文)
- [29] Teruyuki Hirano: "Improved Modeling of the Rossiter-McLaughlin Effect for Transiting Exoplanetary Systems" (修士論文)
- [30] Yuka Fujii: "Toward Remote Sensing of Extrasolar Earth-like Planets" (修士論文)

(著書)

- [31] 須藤 靖: "人生一般二相対論"東京大学出版会 (2010 年 4 月刊行)
- [32] 自然科学研究機構シンポジウム収録集6"宇宙究極の 謎"クパプロ(2009年9月刊行、pp.189-209、立 花隆・観山正見・須藤靖パネルディスカッション)
- [33] 東京大学理学系研究科・理学部 編 "東大式 現代科学 用語ナビ"化学同人 (2009年9月刊行、pp.8-9、宇 宙マイクロ波背景放射の項 執筆)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [34] Atsushi Taruya: "Looking up the sky"; DENET workshop on Dark Universe: from cosmology to planets (Goura, 10/14-16, 2009)
- [35] Atsushi Taruya: "Non-linear evolution of matter power spectrum in modified theory of gravity"; IPMU International conference on dark energy: lighting up the darkness (Kashiwa, 6/22-26, 2009)
- [36] Hajime Kawahara, Erik Reese, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, and Yasushi Suto, "Revisiting the Hubble Constant Measurement from the Sunyaev-Zel'dovich Effect"; (Princeton University, 11.November.2009)

- [37] Shun Saito, Masahiro Takada, Atsushi Taruya: "Probing neutrino masses with WFMOS using nonlinear galaxy power spectrum in redshift space"; Joint Subaru/Gemini Science Conference (Kyoto University, May 2009).
- [38] Shun Saito, Masahiro Takada, Atsushi Taruya: "How can we determine both neutrino masses and dark energy parameter through nonlinear galaxy power spectrum"; IPMU international conferenc dark energy: lighting up the darkness! (IPMU, June 2009).
- [39] Shun Saito, Masahiro Takada, Atsushi Taruya: "Constraint on neutrino mass with galaxy power spectrum based on perturbation theory"; SDSS-III collaboration meeting 2009 (Princeton University, U.S., July 2009).
- [40] Shun Saito, Masahiro Takada, Atsushi Taruya: "Constraint on neutrino mass from SDSS power spectrum with perturbation theory approach"; Science opportunities with Wide-Field Imaging and Spectroscopy (Princeton University, U.S. November 2009).
- [41] Takahiro Nishimichi, Atsushi Taruya, Kazuya Koyama, Cristiano Sabiu: "Bispectrum and nonlinear biasing in primordially non-Gaussian universe"; Focus week on non-Gaussianities in the sky (IPMU, the University of Tokyo, Apr. 6-10, 2009)
- [42] Takahiro Nishimichi, Atsushi Taruya, Kazuya Koyama, Cristiano Sabiu: "Cosmological N-body Simulations with Non-Gaussian Initial Conditions"; The Non-Gaussian Universe (YITP, Kyoto University, Mar. 24-26, 2010)
- [43] Yudai Suwa: "Probing the central engine of long gamma-ray bursts and hypernovae with gravitational waves"; KEK Theory Center Cosmophysics Group Workshop on High Energy Astrophysics 2009 (KEK, Tsukuba, Japan, November 2009)
- [44] Toshiya Namikawa, Shun Saito, Atsushi Taruya & Kiyotomo Ichiki : "Cross correlation study for HSC and CMB experiment: CMB lensing"; Science opportunities with Wide-Field Imaging and Spectroscopy (Princeton University, Nov. 9-11th, 2009)
- [45] Kensuke Fukunaga, Takahiro Nishimichi: "Testing the density Probability Distribution Function of the SDSS galaxies"; Science opportunities with Wide-Field Imaging and Spectroscopy (Princeton University, Nov. 9-11th, 2009)
- [46] Yuka Fujii, Hajime Kawahara, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Satoru Fukuda, Teruyuki Nakajima, Edwin L.Turner: "Color of the second Earth: Estimating the area fraction of ocean and vegetation of the Earth-like exoplanets from multi-band photometry"; DENET workshop on "From Cosmology to Planets" (Goura, 2009.10)
- [47] N. Jeremy Kasdin, David N. Spergel, P. Doug Lisman, Stuart B., Shaklan, Dmitry Savransky, Eric

- [48] Teruyuki Hirano: "The Rossiter Effect of Transiting Planets"; DENET workshop on "dark universe: from cosmology to planets" (Goura, 2009.10)
- [49] Teruyuki Hirano, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Norio Narita, Bun'ei Sato, John Asher Johnson, & Joshua N. Winn: "Improved Modeling of the Rossiter-McLaughlin Effect for Transiting Exoplanetary Systems"; 第6回太陽系外惑星大研究会 (国立天文台三鷹, 2010.1)

招待講演

- [50] Yasushi Suto: "Inhomogeneities in galaxy clusters"; Large-scale structure and galaxy formation with LAMOST (Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics at Pekin University, Beijin, China, April 16, 2009)
- [51] Yasushi Suto: "Concluding Remark"; Joint Subaru/Gemini Science Conference (Kyoto University, Kyoto, May 21, 2009)
- [52] Yasushi Suto: "Ups and Downs of the SUMIRE Project"; Princeton-DENET conference, Science Opportunities with Wide-Field Imaging and Spectroscopy of the Distant Universe (Princeton University, Princeton, US, November 9, 2009)
- [53] Yasushi Suto: "Different cultures, same science" Public lecture at Princeton University (Princeton University, Princeton, US, November 24, 2009)
- [54] Yasushi Suto: "Unveiling orbits of transiting exoplanets with the Rossiter-McLaughlin effect" planet/exoplanet group discussion (Princeton University, Princeton, US, November 30, 2009)
- [55] Yasushi Suto: "HSC: Subaru collaboration with Taiwan and Princeton" Subaru User's Meeting (NAOJ, Tokyo, January 14, 2010)
- [56] Atsushi Taruya: "Modeling baryon acoustic oscillations in 2D"; Science Opportunities with Widefield Imaging & Spectroscopy of the Distant Universe (Princeton, 11/9-11, 2009)
- [57] Yudai Suwa: "Axisymmetric Simulation of Core-Collapse Supernovae"; New Frontiers in QCD 2010 (YITP, Kyoto, Japan, February 2010)
- [58] Yuka Fujii, Hajime Kawahara, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Satoru Fukuda, Teruyuki Nakajima, Edwin L.Turner: "Colors of Earth-like planets"; 第 6回太陽系外惑星大研究会(国立天文台三鷹, 2010.1)

(国内会議)

- 一般講演
- ・第9回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究 会 (沖縄, 2009 年 8~9 月)

- [59] Atsushi Taruya: "Modeling non-linear clustering in redshift space"
- [60] 斎藤 俊, 高田 昌広, 樽家 篤史: 「Constraint on cosmological parameters from SDSS power spectrum with perturbation theory \lrcorner
- [61] 諏訪 雄大: "超新星はついに爆発したか?"
- [62] 西道啓博、樽家篤史、小山和哉、Cristiano Sabiu: ^r The effect of primordial non-Gaussianity on the galaxy bispectrum]
- [63] Teruyuki Hirano, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Norio Narita, Bun'ei Sato, John Asher Johnson, & Joshua N. Winn: "Analytic Expressions for the Rossiter-McLaughlin Effect of Transiting Exoplanets"
- [64]藤井 友香、河原 創、須藤 靖、樽家 篤史、福田 悟、中 島 映至、Edwin L. Turner: "Estimating planetary surface from its light curves"
- ・日本物理学会 2009 年秋季大会(甲南大学, 2009 年 9) 月)
- [65] 諏訪 雄大: "コラプサーモデルにおける非熱的ニュー トリノ生成とガンマ線バースト中心エンジン?
- [66] 斎藤 俊, 高田 昌広, 樽家 篤史: 「銀河のパワースペク トルを用いた摂動論的アプローチに基づくニュート リノ質量の制限」
- ・日本天文学会 2009 年秋季年会(山口大学, 2009 年 9) 月)
- [67] 樽家篤史,斎藤俊,西道啓博:「赤方偏移歪みとバリ オン音響振動」
- [68] 河原 創、Erik Reese、北山哲、太田直美、佐々木伸、 須藤靖:「SZ 効果から導かれるハッブル定数の系統誤 差の発見:Chandra の再解析」
- [69] 西道啓博、樽家篤史、小山和哉、Cristiano Sabiu: 「銀河分布のバイスペクトルを用いた原始揺らぎの非 ガウス性の研究」
- [70] 斎藤 俊, 高田 昌広, 樽家 篤史: 「宇宙大規模構造の観 測によるニュートリノ質量の決定」
- [71] 諏訪 雄大、滝脇 知也、固武 慶、佐藤 勝彦、M. Liebendörfer、S. Whitehouse: "定在降着衝撃波に よって引き起こすニュートリノ駆動型超新星爆発"
- [72] 並河 俊弥、斎藤 俊、樽家 篤史、市來 浄與 :「CMB レンジングと銀河の弱重力レンズの相関を用いた宇 宙論パラメータの制限」
- [73] 平野 照幸, 須藤 靖, 樽家 篤史, 成田 憲保, 佐藤 文 衛, Joshua N. Winn, & John Asher Johnson:「口 シター効果に対する摂動公式の改良:吸収線の形状の 効果」
- [74] 藤井 友香、河原 創、須藤 靖、樽家 篤史、福田 悟、 中島 映至、Edwin L. Turner: "測光観測による地球 型系外惑星の表面組成の推定法"
- ・日本天文学会 2010 年春季年会(広島大学, 2010 年 3) 月)

- [75] 河原 創:「銀河団の軸比分布:XMM-Newton 銀河団 カタログの解析」
- [76] 並河 俊弥、斎藤 俊、樽家 篤史、市來 浄與:「宇宙 論パラメータの決定における CMB レンジングの有 効性」
- [77] 平野 照幸,須藤靖,樽家 篤史:「ベイズ統計を用い た星の自転軸と惑星軌道公転軸のなす角度の3次元 再構築」
- [78] 藤井 友香、河原 創、須藤 靖、樽家 篤史、福田 悟、 中島 映至、Edwin L. Turner: 「反射光による地球 型系外惑星の特徴付け」
- [79] 福永 健介、 西道 啓博、 柏木 俊哉、 河原 創、 樽家 篤史、須藤 靖:「SDSS 銀河分光サーベイを用いた密 度揺らぎの確率分布関数」

・その他

- [80] 樽家篤史:「東大活動報告」; HSC 研究会(弘前,2010 年3月15~17日)
- [81] 樽家篤史,西道啓博,斎藤俊:「赤方偏移歪みとバリ オン音響振動」;HSC研究会(弘前,2010年3月 15~17日)
- [82] 西道啓博、樽家篤史、小山和哉、Cristiano Sabiu:
 「銀河分布のバイスペクトルを用いた原始揺らぎの非 ガウス性の研究」;第22回理論懇シンポジウム(名 古屋大学,2009年12月20-22日)
- [83] 西道啓博、樽家篤史、小山和哉、Cristiano Sabiu:「銀河バイスペクトルを用いた原始非ガウス性の研究」;
 第4回 HSC 研究会(弘前,2010年3月15-17日)
- [84] 斎藤 俊, 高田 昌広, 樽家 篤史:「銀河の非線形パワー スペクトルを用いたニュートリノ質量の制限」; 理論 懇シンポジウム 2009(名古屋大学, 2010年12月).
- [85] 諏訪 雄大: "ニュートリノ駆動型超新星の2次元軸対称シミュレーション";第22回理論懇シンポジウム「2010年代の理論天文学」(名古屋大学,2009年12月21日)
- [86] 諏訪 雄大: "2 次元軸対称計算によるニュートリノ駆動型超新星爆発シミュレーション"; 超新星の爆発機構とガンマ線バースト源エンジンの統一的解明(国立天文台, 2010年1月6日)
- [87] 諏訪 雄大: "物質降着によるブラックホールスピンの 上限値は?"; 宇宙ジェットのエンジンとしてのブラッ クホールとその進化(京都大学, 2010年2月26日)
- [88] 並河 俊弥、斎藤 俊、樽家 篤史、市來 浄與:「CMB レンジングと銀河の弱重カレンズを用いた宇宙論パ ラメータの決定精度」; HSC 研究会(弘前,2010年 3月15-17日)

招待講演

- [89] 須藤靖:「系外惑星探査:その次」;南半球宇宙地球 観測シンポジウム(名古屋大学、2009年6月25日)
- [90] 須藤 靖:「宇宙生物学研究の推進:東大の場合」国際高等研究所研究プロジェクト「宇宙における生命の総合的考察とその研究戦略」第1回(国際高等研究所、2009年7月18日)

- [91] 須藤 靖:「太陽系外惑星:影から光へ」すばる望遠
 鏡10周年記念シンポジウム(一橋記念講堂、2009年 10月5日)
- [92] 須藤 靖: 「SUMIRE プロジェクトの現状」光赤天連 シンポジウム (国立天文台、2009 年 10 月 22 日)
- [93] 須藤靖:「第二の地球の色:測光観測による海、陸、 植生の推定」国際高等研究所研究プロジェクト「宇 宙における生命の総合的考察とその研究戦略」第2回 (国際高等研究所、京都、2009年12月18日)
- [94] 樽家篤史:「Standard cosmological model and dark energy」;第2回GCOE若手リトリート(タナベ名 古屋研修センター,2009年10月31日~11月1日)
- [95] 諏訪雄大: "超新星爆発におけるニュートリノ輻射輸送";宇宙磁気流体力学のフロンティア(京都大学, 2009年11月18日)

(セミナー)

- [96] Atsushi Taruya: "Scale dependence of halo bispectrum from non-Gaussian initial conditions"; Institut de Physique Theorique, CEA Saclay (2009 年 12月15日)
- [97] Yudai Suwa: "The Central Engine of Gamma-Ray Bursts and Core-Collapse Supernovae"; Max-Planck Institute for Astrophysics, Garching, Germany, April 2009.
- [98] 西道啓博:「Recent Interests in the Large-Scale Structure of the Universe」;早稲田大学(2009年 5月29日)
- [99] 斎藤 俊:「次世代の大規模構造観測で探る素粒子標準 模型を超える物理の兆候:ダークエネルギーとニュー トリノ質量」;高エネルギーセミナー(国立天文台, 2009年7月).
- [100] Shun Saito: "Constraint on Neutrino Mass with Galaxy Surveys"; Research Progress Meeting (Laurence Berkeley National Labolatory, Dec 2009).
- [101] 諏訪 雄大: "Neutrino and the central engine of gamma-ray bursts";国立天文台 (2009年10月15日)
- [102] 諏訪 雄大: "Neutrino and Gravitational Wave Emission from the Central Engine of Gamma-Ray Bursts"; 高エネルギー加速器研究機構 (2009 年 11 月 5 日)
- [103] Yudai Suwa: "Memory effect of gravitational wave"; 15th Joint Seminars on Cosmology and Gravitation, KEK, Tsukuba, Japan, February 2010.
- [104] Yuka Fujii: "Colors of a second Earth"; Princeton University (2009.11)

(講演)

- [105] 須藤 靖:「これからの宇宙物理学」川越高校 SSH 特別講義「ミクロな世界からマクロな世界へ」(川越 高校、2009 年 6 月 20 日)
- [106] 須藤 靖:「21世紀宇宙物理学の課題」高知工科大学 サイエンスカフェ(高知工科大学、2009年7月3日)

- [107] 須藤靖:「大切なものは目に見えない」高知工科大学 平成 21 年度連続講演第二回 (高知工科大学、2009 年 7 月 3 日)
- [108] 須藤靖:「ガリレオが見た宇宙、見なかった宇宙」 日本天文学会世界天文年企画「全国同時七夕講演会」 (東京大学小柴ホール、2009年7月7日)
- [109] 須藤靖:「宇宙は何からできている?」ビッグバン 宇宙国際研究センター 第4回公開講演会「暗黒エ ネルギーと宇宙の未来」(東京大学オープンキャンパ ス、2009年8月6日)
- [110] 須藤 靖:「第2の地球の色」金沢大学物理学科宇宙 物理学研究室セミナー(金沢大学、2009年8月27日)
- [111] 須藤 靖:「夜空のムコウを探る」金沢大学物理学 教室セミナー(金沢大学、2009年8月28日)
- [112] 須藤靖:「宇宙の始まり、そして未来」つくばエキ スポセンター秋季講演会(つくばエキスポセンター、 2009年10月3日)
- [113] 須藤 靖:「見えない宇宙の彼方を探る ~ ダークマ ター・ダークエネルギー ~」現代天文学の最前線「シ リーズ現代の天文学」刊行記念シンポジウム(東大小 柴ホール、2009 年 12 月 20 日)
- [114] 須藤 靖: 「太陽系外惑星から宇宙生物学へ」ビッグ バン宇宙研究センター クリスマス講演会 (東大小柴 ホール、2009 年 12 月 25 日)
- [115] 須藤靖:「我々は何も知らなかった」渋谷教育学園 進路講演会(渋谷学園渋谷中学高等学校、2010年2 月19日)

(集中講義)

[116] 須藤 靖:「暗黒宇宙の組成」; 金沢大学理学部物理学 教室集中講義 (金沢大学、2009 年 8 月 26 日 ~28 日)

5.2 村尾研究室

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

量子情報を活用したシステムとしては、多量子ビットの重ね合わせ状態を利用した量子計算(因数分解 アルゴリズム・データベースサーチアルゴリズム) 未知量子ビット状態の測定における不確定性を利用 した量子暗号、2量子ビットの重ね合わせ状態に現 われる非局所的量子相関である「エンタングルメント(entanglement)」を利用した量子テレポテーショ ンなどの量子通信が提案されている。そして、量子 情報を用いることで古典情報処理を超えて何が可能 になるのか、そしてそのような量子情報処理をどの ように実現するのか、という問いに対して、数学・計 算機科学から物理・化学、また電子工学や情報工学 等多岐にわたる学際的なアプローチで研究が進めら れている。

量子情報に関する研究は1990年代から大きく発展 してきたが、この背景には、ナノテクノロジーに代 表されるような科学技術の発展によって,量子力学 で記述されるようなミクロスコピックな世界を実際 に制御・操作することが可能となってきた、という事 実がある。つまり、我々の「器用さ」が全く新しい段 階に進歩し,受動的のみならず能動的に「アクセス」 できる自然界の範囲が , 古典力学で記述される世界 から,量子力学で記述される世界へと広がってきた ことを示している。従来のテクノロジーでは,量子力 学で記述されるような世界とのやりとりは,マクロ スコピックな制御変数の操作や,統計的に平均化さ れた物理量の観測を通じて行うことしかできなかっ たため,古典力学で記述される世界にはないような 量子的な世界の持つ全ポテンシャルを自由に「利用 する」ことはできなかった.量子の世界を同じ量子 スケールで直接扱うことが可能となってきて初めて 我々は,量子の世界の持つ全ポテンシャルを,利用 可能な「資源」として手にいれたことになる.

そこで本研究室では、情報と情報処理という新し い観点から自然の基本法則である量子力学への理解 を深め、量子力学特有の「資源」を活用した新たな情 報処理システムの提案を行うことを目的として、「資 源」として多体系や多準位系におけるエンタングル メント(量子もつれ)や非局所性に注目して研究を 進めている。

エンタングルメントとは,複数の部分系からなる

量子系において,個々の部分系状態の積では表され ないような「分離不可能 (inseparable) な状態」」(例 えばスピン1/2系のような量子2準位系における $\operatorname{singlet}$ 状態 ($|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle$) / $\sqrt{2}$) に現れる, 距離を越え て瞬時に働く相関(非局所的相関)である.エンタ ングルメントを持つ状態(エンタングル状態)では, 非局所的相関の作用により,一方の部分系の状態を 観測などにより変化させると,もう一方の部分系の 状態が自動的に他方の観測結果に応じた状態に瞬時 に変化する.この非局所的相関は,ある時点で部分 系間に相互作用が存在していたことによって生じる が,一度相関ができてしまえば,エンタングル状態 を保持する限り部分系間の距離には関係なく「作用」 する.エンタングルメント(のドイツ名)がシュレ ディンガーによって命名されたことからわかるよう に、エンタングルメントの存在は量子力学の創生期 から量子系特有の性質として知られており、その非 局所性に関してはアインシュタインらが EPR パラ ドックスに関する論文を提出し、量子力学を「攻撃」 する材料ともなったという歴史的いきさつがある。

現在では、エンタングルメントの存在は実験で確 認されており、古典力学には存在しない量子力学の 本質的な資源として、量子計算の優位さや量子通信 の安全性に関連していると考えられている。しかし ながら、多体系や混合状態においてエンタングルメ ントを評価することは、一般的には計算量的に難し い問題であることが示されており、エンタングルメ ントの性質に関しては依然未解明な点が多い。また、 エンタングルメントが存在せずとも非局所的な性質 を持つ量子情報タスクの存在が発見されたり、エン タングルした状態を作るような量子計算の中には古 典的にシミュレーション可能であるものが存在する ことが指摘されるなど、単純にエンタングルメント の存在のみが量子情報処理の優位性が特徴づけてい るとは言えないことも明らかになっており、量子情 報処理の本質を理解するために、より多角的な視点 からの研究が望まれている。

今年度は、村尾美緒准教授、Peter Turner 助教、 博士課程大学院生の添田彬仁氏、中田芳史氏 (JICA 青年海外協力隊でエチオピアに赴任のため休学中)、 修士課程大学院生である杉山太香典氏、染谷将人氏、 金城慶之氏、仲山将順氏のメンバーで、分散型量子 計算、エンタングルメント理論、量子トモグラフィ、 量子開放系に関する研究を行い、多角的な視点から 量子情報処理の性質を解析した。

5.2.1 分散型量子計算

分散型量子計算に必要なエンタングルメント資源の 解析

分散型量子情報処理においては、異なるノード間 で2量子ビット制御ユニタリ演算を行なう必要があ る。そこで、このような2量子ビット制御ユニタリ演 算を、エンタングルメント資源と局所操作及び古典 通信(LOCC)のみを用いて確実に実装するために必 要なエンタングルメントリソースの量を解析し、ユ ニタリ演算のエンタングルメント生成力に関わらず 1 ebit のエンタングルメント資源が必要であること を証明した。1 ebit を使った2量子ビット制御ユニタ リ操作のLOCC実装法はすでに知られているので、 今回の結果により、2量子ビット制御ユニタリ演算 に必要十分なエンタングルメント資源は1 ebit であ ることが判明した。[担当:添田、Turner、村尾]

バタフライ通信路を用いた分散型量子計算

通信容量や通信方向に制限があるような(量子) ネットワークで接続されたノード間で分散型量子計 算を効率良く行なうための方法を求めるために、バ タフライ通信路と呼ばれるネットワークにどのよう なエンタングルメントリソースを追加するとユニ リ演算が可能になるかを解析した。このようなバタ フライ通信路に関する先行研究では、これまで、ユ ニタリ演算の一つである入れ替え演算に焦点をおい た研究が行われており、入れ替え演算を分散型量子 計算として行うためには、入力ノード間でベル状態 2個のエンタングルメントを共有する必要があるこ とが知られていたが、より一般的なユニタリ演算の 分散型量子計算に注目した点が我々の研究の特色で ある。解析の結果、入力ノード間でベル状態を1個 のエンタングルメントを共有している場合に、被制 御部のトレースが0となるような制御ユニタリ演算 を行う方法を導くことに成功した。また、ネットワー クがボトルネックを持つことによって、このような ネットワークで量子テレポテーションに基づいた分 散型量子計算を行うためには、古典情報を圧縮しな ければならないことを示した。[担当:金城、Turner、 村尾]

2体ユニタリ演算が持つ量子情報の非局在化力の解析

量子計算においては、2体ユニタリ演算が大きな 役割を果たす。この研究では、未知の純粋状態がそ の自由度で表せる最小のヒルベルト空間を占める際 に量子情報が局在化していると定義し、この局在化 した量子情報に対して2体ユニタリ演算を行なうこ とで量子情報がより大きなヒルベルト空間に非局在 化するとみなし、qudit と呼ばれる d 次元量子系の 2 体ユニタリ演算の非局在化力を解析した。非局在化 の程度を評価するためには、非局在化された2つの quid の量子情報のうち、片方の qudit の量子情報の みを再局在化させるために必要な量子操作の種類を 考察し、この再局在化が LOCC のみで実行可能であ るための必要十分条件を求めた。その結果、LOCC のみを用いてこのような1 gudit の再局在化が可能 であるためには、非局在化に使われた2体ユニタリ 演算が、制御ユニタリ演算に局所ユニタリ同値であ ることが必要十分条件であることを証明した。この 結果は、制御ユニタリ演算よりもエンタングルメン ト生成力はより弱くても、LOCC での再局在化は不 可能であるようなな、より強い非局在力を持つ2体 ユニタリ演算が存在することを示唆する。そのため、

エンタングルメント生成力とこの非局在化力は2体 ユニタリ演算の異なる性質を表していることが判明 した。[担当:添田、村尾]

5.2.2 エンタングルメント理論

多量子ビット対称系における多体エンタングルメント

置換対称性を持つ多量子ビット系の多体エンタン グルメントを、球面上の離散的な点の配置である Majorana 表現を用いて、幾何学的な観点から解析する 手法を提案し、置換対称性を持つ3量子ビットから 12量子ビットまでの最大エンタングル状態の候補 となる状態を見つけることに成功した。また、多体 エンタングルメント量(幾何学的測度)を求める問題 と、他の球面上の離散的な点の配置に関する最適値問 題である、Toth 問題、Thompson 問題などと比較し て解析した。この研究は、英国 Leeds 大学の Martin Aulbach 氏、フランス CNRS – Télécom ParisTech の Damian Markham 博士との共同研究である。[担 当:村尾]

測定ベース量子計算におけるグラフの特性評価

測定ベース量子計算は、入力・出力の指定されたグ ラフ (open graphs) によって指定されたグラフ状態と 呼ばれるエンタングル状態をリソースとし、これに 対して LOCC を実行してすることで、入力量子情報 に対してユニタリ演算を実装する。そこで、グラフと 実装される演算の関連に注目し、特にgflow と呼ばれ る決定論的な演算が実現されるためのグラフの十分 条件について詳しく解析した。具体的には、focused gflow と呼ばれる性質のよい gflow を導入することに よって、入力と出力のサイズが同じならば gflow の存 在条件が入力と出力の入れ替えに対して不変である ことを示した。また、この場合の条件が、全ての測 定結果を等確率で得るためのグラフの条件と同値で あることも示した。この研究は、フランス Grenoble 大学の Mehdi Mhalla 博士、Simon Perdrix 博士と の共同研究である。[担当: 染谷、Turner、村尾]

数値計算を用いたエンタングルメント存在判定基準の特徴解析: EVM vs. CMC

エンタングルメント存在判定基準には、PPT (Positive Partial Transpose criterion)、EVM (Expectation Value Matrix)、CMC (Covariance Matrix Criterion) など様々な基準が知られている。そのうち、 EVM と CMC は測定可能な物理量が制限されてい る系にも利用できるため、光子などの無限次元系の 実験におけるエンタングルメント存在の判定に非常 に有用である。EVM と CMC が同等な判定基準では ないことは、EVM では検出可能だが CMC では検出 不可能なエンタングル状態が既に発見されており知 られていたが、EVMがCMCよりより多くのエンタングル状態を判定できるより優れた基準であるかどうかについては、知られていなかった。

そこで、無限次元系と有限次元系の合成系でのエン タングル状態を考察することにより、Horodecki らが 発見した4個の量子ビットからなる束縛エンタングル 状態の一部をコヒーレント状態に置き換えたものが、 CMCで検出できることを semidefinte programming を用いて、数値的に証明した。EVM は原理的に束縛 エンタングル状態を検出できないため、この新しい 状態は自動的に EVM で検出不可能である。よって、 EVM が CVC がより優れた基準というのではなく、 CMC と EVM が真に異なるエンタングルメント存 在判定基準であることが実証できた。本研究は、カ ナダ Waterloo 大学の Norbert Lutkenhaus 教授とイ ギリス St. Andrews 大学の Hauke Haseler 博士との 共同研究である。[担当: 添田]

ホップ束と量子ビットのエンタングルメント

2量子ビットの場合、積空間を因子に分解する方法 の一つであると考えられるホップ束が、2量子ビット のエンタングルメント測度の一つであるコンカレン スに対応する状態空間の座標系に帰着することが知 られている。我々は、同じくホップ束と見なすこと のできる3量子ビットの空間に対しても、この手法 が有効であるかどうかの検証を行なっている。本研 究は、6月から8月の間、日本学術振興会のサマー プログラムフェローとして本研究室に滞在した英国 Imperial College, London の William Rubens 氏と の共同研究である。[担当: Turner, 村尾]

正四面体状態における LOCC のみ用いた古典情報 の符号化

置換対称性を持つ4量子ビット系の正四面体状態 と呼ばれる多体エンタングル状態に対して、LOCC のみを用いて、4ビットの古典情報を符号化すること が可能であることを示した。我々のこれまでの研究か ら、正四面体状態に符号化された古典情報をLOCC のみを用いて復号化するしようとすると、4ビット の古典情報のうち2.41ビット以下しか情報を取 り出せないことが判明しており、LOCCによる符号 化と復号化の差が最も大きくなる置換対称性を持つ 状態となる。[担当:村尾]

5.2.3 量子トモグラフィ

量子トモグラフィにおける推定誤差の漸近的振る舞 いの解析

量子状態トモグラフィとは、量子測定を用いて未 知の量子状態(=密度行列)を完全に同定する手法 である。近年の実験技術精度の向上に伴い、量子状 態トモグラフィは様々な系で実現されており、量子 力学の基礎の更なる探求に役立つ手法の一つとして 注目されている。これまで量子状態トモグラフィの 理論研究では、推定誤差(測定試行回数が有限であ ることから生じる誤差と、得られた測定結果の解析 法に由来する誤差)の影響はほとんど調べられてこ なかった。そこで我々は、大偏差定理を用いて量子 トモグラフィにおける推定誤差の漸近的(試行回数 が非常に大きい場合)振る舞いを解析し、誤差確率 と平均誤差が測定試行回数に対してそれぞれ指数関 数的・反比例的に減少することを証明した。また、誤 差確率・平均誤差の減少率の上限の具体形を導出し、 その上限が共に最尤推定再構成法によって達成され ることを証明した。[担当: 杉山、Turner、村尾]

量子トモグラフィにおける操作的な識別不可能性

近年の量子性の強い量子状態や量子操作の実験的 達成に伴い、実験データから『真の』量子状態や量子 操作を決定(推定)する際の基準及び手法の選択に 対して、ますます慎重にならなければならなくなっ ている。我々のグループでは現在、量子トモグラフィ に使用されている手法(再構成法と呼ばれる)のう ち最も良い再構成法は何なのか、ということに興味 がある。昨年度から我々は、多光子状態に対するト モグラフィにおける不可鑑別性の問題に取り組んで いる。その研究の結果、実験において直接的には検 出できない自由度の差が、検出できる自由度に対し て無視できない影響を与える可能性があることが分 かった。現在はこの結果のさらなる解析を進めてい るところである。また、トモグラフィを行うために 必要な情報完全な測定は t-design という数学の問題 とも関連しており、今後はこの方向にも研究を進め ようと考えている。この研究は、カナダ Perimeter Institute の R. Blume-Kohout 博士、カナダ Toronto 大学の A. Steinberg 教授との共同研究である。[担当: 杉山、Turner、村尾

連続変数の t-design

量子系を完全に把握するには量子トモグラフィー を行わなければならない。トモグラフィーのデータか ら演算子を再構成するには、問題にしている系に関 する演算子の完全情報集合が必要である。対称情報完 全正定値演算子測度(SICPOVMs)と呼ばれる特別 な状態の情報完全集合があることは知られていたが、 これを見出すことは有限次元系では難しかった。我々 は、連続変数系(無限次元系)において、SICPOVMs に対応するものを求めている。連続変数系は特に量 子光学の分野では実験室で扱われており、本研究は 実験とも関連したものになっている。この研究は、カ ナダ Perimeter Institute の Robin Blume-Kohout 博 士との共同研究である。[担当: Turner]

5.2.4 量子開放系

Lindbrad 型マスター方程式の解析

量子開放系とは、外界と相互作用する量子系のこ とであり、このような系では時間発展はシュレディ ンガー方程式とならず、系が純粋状態から確率的混 合状態へと遷移してゆくデコヒーレンスが観察され る。このような量子開放系における時間発展を、量 子計算を用いて効率的にシミュレートする方法が存 在するかどうかを理解するために、量子開放系の時 間発展を記述する際に用いられるLindbrad型のマス ター方程式に対して、ハミルトニアンおよび状態に 課された条件を緩めても導くことができるかどうか の解析を行なっている。[担当: 仲山、Turner、村尾]

(原著論文)

- M. Hayashi, D. Markham, M. Murao, M. Owari and S. Virmani, *The geometric measure of entan*glement for a symmetric pure state with positive amplitudes, J. Math. Phys. 50, 122104 (2009)
- [2] Yoshifumi Nakata, Damian Markham, and Mio Murao, Thermal robustness of multipartite entanglement of the 1-D spin 1/2 XY model, Phys. Rev. A 79, 042313 (2009)
- [3] M. Aulbach, D. Markham, and M. Murao, The maximally entangled symmetric state in terms of the geometric measure, arXiv:1003.5643 (2010)
- [4] S. D. Bartlett, T. Rudolph, R. W. Spekkens, P. S. Turner, Quantum communication using a boundedsize quantum reference frame, New J. Phys. 11, 063013 (2009)
- [5] G. Gour, B. C. Sanders, R. W. Spekkens, P. S. Turner, Overcoming time reversal superselection: reference frames and resources, J. Math. Phys. 50, 102105 (2009)

(学位論文)

- [6] 染谷将人, Characterization of graphs in measurement based quantum computation, 修士論文
- [7] 杉山太香典, Analysis of quantum tomographic reconstruction schemes, 修士論文

< 学術講演 >

(国際会議)

- 一般講演
- [8] Takanori Sugiyama, Peter Turner, Mio Murao, Comparison of maximum-likelihood and linear reconstruction schemes in quantum measurement tomography, Conference on Quantum Information and Quantum Control, Fields Institute, Toronto, (Canada), August 2009

<報文>

- [9] Takanori Sugiyama, Peter S. Turner, Mio Murao, Comparison of maximum-likelihood and linear reconstruction schemes in quantum measurement operator tomography, The second international workshop on dynamics and manipulation of quantum systems, Tokyo (Japan), October 2009
- [10] Takanori Sugiyama, Peter S. Turner, Mio Murao, De Finetti Theorems for Quantum Measurement, International Symposium on Quantum Nanophotonics and Nanoelectronics, Tokyo (Japan), November 2009
- [11] Masato Someya, Peter Turner, Mio Murao, Uniform unitarity versus the existence of gflow, International conference on quantum information and technology, NII, Tokyo (Japan), December 2009
- [12] Akihito Soeda, Peter Turner, and Mio Murao, Minimum Entanglement Resource for Distributed Quantum Computation, International Symposium on Quantum Nanophotonics and Nanoelectronics, Tokyo (Japan), November 2009.
- [13] Akihito Soeda and Mio Murao, *Delocalizing Quantum Information*, The International Conference on Quantum Information and Technology, Tokyo (Japan), December 2009.
- [14] Akihito Soeda, Peter Turner, and Mio Murao, Optimal entanglement for LOCC implementation of controlled-unitaries, 13th International Workshop on Quantum Information Processing, Zürich (Switzerland), January 2010.

招待講演

- [15] Mio Murao, Yu Tanaka, Damian Markham, LOCC encoding and decoding of classical information using multipartite entangled states, NII-CNRS workshop, National Institute for Informatics, Tokyo, (Japan), March 2010
- [16] Peter Turner, Takanori Sugiyama, Distinguishability and quantum tomography, NII-CNRS workshop, National Institute for Informatics, Tokyo, (Japan), March 2010
- [17] Takanori Sugiyama, Peter Turner, Mio Murao, Comparison of maximum-likelihood and linear reconstruction schemes in quantum measurement tomography, Workshop on Mathematics in Experimental Quantum Information Processing, Institute for Quantum Computing, Waterloo, (Canada), 10 August 2009.
- [18] Masato Someya, Mehdi Mhalla, Simon Perdrix, Peter Turner, Mio Murao, Characterization of graphs in measurement based quantum computation, NII-CNRS workshop, National Institute for Informatics, Tokyo, (Japan), March 2010

(国内会議)

一般講演

- [19] Akihito Soeda and Mio Murao, 2体ユニタリ操作:実装に必要な量子ビット数と情報を非局所化する 力,ナノ量子情報エレクトロニクス連携研究拠点公開 シンポジウム, Tokyo (Japan), April 2009
- [20] 杉山太香典、Peter S. Turner、村尾美緒, 測定演算子 トモグラフィにおける線形法と最尤推定法の比較, ナ ノ量子情報エレクトロニクス連携研究拠点公開シン ポジウム, Tokyo (Japan), April 2009
- [21] Takanori Sugiyama, Peter S. Turner, Mio Murao, Comparison of maximum-likelihood and linear reconstruction schemes in quantum measurement tomography, 第 20 回量子情報技術研究会, Hiroshima (Japan), May 2009

5.3 上田研究室

当研究室では冷却原子気体の理論および量子情報 の研究を行っている。前者では、ボース・アインシュ タイン凝縮体 (BEC) やフェルミ超流動に関する研究 を行っている。後者では、量子情報と測定および、情 報処理に対する熱力学的制約を研究する情報熱力学 ともいうべき分野の開拓を行っている。

5.3.1 冷却原子気体

リチウムガスにおける Efimov3 体状態

Efimov 状態とは、粒子の3体問題において、2粒 子間の相互作用が強い場合に存在する3体の束縛状 態である。これは、2体の束縛状態は存在しないが、 3体で初めて束縛状態になるという現象であり、純粋 に量子理学的効果のよる。Efimov 状態は一般的な3 体問題の解であり、40年前に原子核の分野で Efimov により予言された。近年では、この Efimov 状態が冷 却原子気体系において観測されている。しかし、実 験では直接3体状態を観測することができないため、 理論計算との比較が必要となる。我々は、特に、3つ の内部自由度の混合されたリチウムガスでの Efimov 状態を調べ、実験を定量的に説明し、Efimov 状態が 観測されていることを示した。

この研究は Physical Review Letters 誌 103 巻に掲載された [6]。

多成分量子気体における散乱長制御

多成分量子気体では粒子間相互作用は内部自由度 に依存するため、単一の散乱長では記述できず複数 の散乱長が必要となる。この散乱長の内部自由度依 存性は系の磁性や Efimov 状態の出現にかかわって くるため、実験的に散乱長の制御が可能になれば量 子相転移や新奇な量子状態などの様々な物理現象が 観測可能になると期待される。我々は、文献 [1] に おいてこれらの散乱長を独立かつ同時に制御する方 法を開発した。まず、磁気的フェッシュバッハ共鳴点 が2つ近くにあるような場合を考える。ここで誘導 ラマン過程により異なるハイパーファイン状態を相 互作用させる。このときに生じるドレスド状態のエ ネルギーは、ハイパーファイン状態間の相互作用に よって制御できる。したがって、フェッシュバッハ共 鳴の起こる点は磁場一定のもとでラマン過程により 制御できる。我々は、この方法により少なくとも3 つのうち2つの散乱長が独立に制御できることを示 し、⁴⁰K 原子気体および⁴⁰K と⁶Liの混合気体への 応用を議論した。

この研究は Physical Review Letters 誌 103 巻に掲載された [7]。

スピノール BEC における非可換量子渦

量子渦などのトポロジカル欠陥はトポロジカル不 変量によって特徴づけられる。非可換量子渦とは非 可換な代数によって記述されるトポロジカル不変量 を持つような量子渦として定義され、宇宙・高エネ ルギー物理から、素粒子物理、固体物理、ソフトマ ターにいたる広範な研究領域で重要なテーマである。 内部自由度を持つスピノル BEC はその内部自由度を 反映して様々なトポロジカル欠陥を有するため、ト ポロジカル欠陥の性質やそのダイナミクスを研究す る理想的な系である。本研究において私たちは、非 可換量子渦がスピンが2のスピノル BEC のサイク リック相において実現され、その非可換性が渦の衝 突ダイナミクスにおいてユニークな効果を示すこと を明らかにした。具体的には、2本の非可換量子渦 が衝突すると、可換量子渦で起こっていたつなぎ換 えやすり抜けのダイナミクスがトポロジカルに禁止 され、衝突する2本をつなぐ新たな量子渦が形成さ れる。このような量子渦は梯子の段(ラング)との アナロジーからラング渦と呼ばれる。また2本の非 可換量子渦の渦輪が絡み目を形成している場合には、 渦輪の衝突によってラング渦が形成されるため、そ の絡み目ははずれない。これは渦輪の絡み目がはず れる可換量子渦と対照的であり、量子渦の可換・非 可換性を峻別する決定的なダイナミクスとなってい る。この衝突ダイナミクスの著しい特徴は、それが 非可換性のみによって決定され、他の系における非 可換量子渦においても普遍的に起こることである。

この研究は Physical Review Letters 誌 103 巻に掲載された [8]。

5.3.2 量子情報・量子測定・情報熱力学

ノイズの存在する系における最適測定

量子コンピュータや量子ネットワークなどを実現 する上での最大の障壁はデコヒーレンスによる情報 の損失である。デコヒーレンスは外界との相互作用 によって生じるが、ほとんどのシステムにおいて外 界との相互作用を完全に断ち切ることは不可能であ る。したがって、デコヒーレンスが存在する系にお いて元の量子状態についての情報を得る最適な測定 を明かにすることが必要である。

我々は、外界との相互作用によるデコヒーレンス の影響を受けた状態 $\mathcal{E}(\hat{\rho})$ から、元の量子状態 $\hat{\rho}$ に おける物理量 \hat{X} の期待値 $\langle \hat{X} \rangle \equiv tr[\hat{\rho}\hat{X}]$ について の情報を得る最適な測定を求めた。ここで、 $\mathcal{E}(\hat{\rho}) \equiv \sum_i \hat{M}_i \hat{\rho} \hat{M}_i^{\dagger}$ であり、 $\{\hat{M}_i\}$ は Kraus 演算子と呼ばれ、 $\sum_i \hat{M}_i^{\dagger} \hat{M}_i = \hat{I}$ を満たす。デコヒーレンスした状態 を測定し、元の状態についての情報を得るためには、 測定結果から推定論的手法を適用する必要がある。 したがって、このような問題における情報量として は、推定の精度を表す Fisher 情報量を用いることが 適当である。しかし、一般に測定の自由度は無限に あり、したがって Fisher 情報量を最大にするような 測定を導くことは非常に困難である。我々は、Lie 代
数を用いて量子状態,量子測定,物理量,量子系への ノイズが統一的に効率よく扱えることを発見し、それによって $\langle \hat{X} \rangle$ についての Fisher 情報量を最大に する測定を求めることが出来た。我々の求めた最適 な測定は、 $\mathcal{E}^{\dagger}(\hat{Y}) = \hat{X}$ を満たす物理量 \hat{Y} のスペク トル分解に対応した射影測定 $P_{\hat{Y}}$ である。ここで、 $\mathcal{E}^{\dagger}(\hat{Y}) \equiv \sum_{i} \hat{M}_{i}^{\dagger} \hat{Y} \hat{M}_{i}$ は \mathcal{E} の随伴写像であり、物理 的には八イゼンベルグ描像における時間発展を表す。 Fisher 情報量は一般に量子状態 $\hat{\rho}$ に依存するが、に もかかわらず物理量 \hat{Y} は $\hat{\rho}$ に依存しない。したがっ て最適な測定 $P_{\hat{Y}}$ も状態に依存せず、 $\langle \hat{X} \rangle$ について の情報を最大限に得るためにはただ射影測定 $P_{\hat{Y}}$ を $\mathcal{E}^{\dagger}(\hat{\rho})$ に対して行えばよいことがわかる。

この研究は Physical Review Letters 誌 104 巻に掲載された [10]。

微小非平衡系における情報処理とフィードバック制御

熱ゆらぎが無視できないスケールの微小非平衡系 において、測定や情報の消去といった情報処理に原 理的にどのくらいのエネルギーが必要かという問題 は、Landauer らによって研究がなされ、半世紀以上 の間、大きな議論を引き起こしてきた。本研究では、 量子統計力学と量子測定理論に基づいて、この問題 に厳密な解答を与えた。その結果、測定や情報の消去 に必要なエネルギーコストの原理的な下限を示す熱 力学的な不等式が明らかになった。この不等式は情 報量と熱力学変数が同等に扱われる形に熱力学第二 法則を一般化したものになっている。本研究の内容は 昨年度に完成していたが、今年度に Physical Review letters 誌から出版され、Editor 's Suggestion に選 ばれるとともに Physics 誌にハイライトされた [4]。

微小系の非平衡統計力学は、この 15 年ほどで大 きな進歩をとげた。実験的にはレーザーピンセット などによって(高分子などの)微小非平衡系を制御・ 計測する技術が進歩したこと、理論的には「ゆらぎ の定理」や「Jarzynski 等式」が発見されたことがあ げられる。とくに 1997 年の Jarzynski 等式の発見に よって、すべての次数のゆらぎ (キュムラント)を 取り入れると熱力学第二法則は等式として表現でき ることが明らかになった。Jarzynski 等式は、その1 次キュムラントの性質として、古くから知られてい る不等式の形の第二法則を含んでおり、その意味で 伝統的な熱力学第二法則の一般化になっている。 方、以前の我々の研究によって、フィードバック制御 を含む状況下では熱力学第二法則(不等式)は一般 化され、測定で得た相互情報量を含む形に書かれる ということが明らかになっていた。これは、フィー ドバック制御を利用して従来の第二法則を超えてど こまで仕事を取り出せるか、という原理的な限界を 与える不等式である。

本研究では、単一の熱浴と接触する古典系の非平 衡ダイナミクスにおいて、フィードバック制御を含 む状況下でも成り立つ形に Jarzynski 等式を一般化 することに成功した。この一般化 Jarzynski 等式は測 定で得た相互情報量を含んでおり、その1次キュム ラントの性質として(我々の以前の結果である)一般 化された第二法則を再導出することが出来る。また 2次のキュムラントからは、情報と散逸をともに含む 形に一般化された揺動散逸定理を導出することが出 来た。一般化Jarzynski等式の導出によって、フィー ドバック制御が熱力学第二法則に与える影響を、す べての次数のキュムラントを含む形で明らかにした ことになる。さらに我々は、Jarzynski等式を、(測定 で得た情報量だけでなく)フィードバックの効率を 含む形にも一般化することに成功した。このフィー ドバック制御の効率を特徴づけるパラメータは、散 逸(エントロピー生成)と測定で得た情報量の間の一 種の相関を表しており、測定で得た情報量の間の一 種の相関を表しており、測定で得た情報をどれだけ 効率的に使ったかを定量的に特徴づける尺度になっ ている。さらにこのパラメータは実験で直接検証す ることができる。本研究の結果はPhysical Review Letters 誌から出版された [12]。

<受賞>

 [1] 小林未知数:第4回日本物理学会若手奨励賞(日本物 理学会、2009年11月)

<報文>

(原著論文)

- [2] J. Metz, T. Lahaye, B. Frohlich, A. Griesmaier, T. Pfau, H. Saito, Y. Kawaguchi, and M. Ueda: Coherent collapses of dipolar Bose-Einstein condensates for different trap geometries, New Journal of Physics 11, 055032(1)-055032(12) (2009).
- [3] H. Saito, Y. Kawaguchi, and M. Ueda: Ferrofluidity in a two-component dipolar Bose-Einstein Condensate, Phys. Rev. Lett. **102**, 230403(1)-230403(4) (2009).
- [4] T. Sagawa and M. Ueda: Minimal Energy Cost for Thermodynamic Information Processing: Measurement and Information Erasure, Phys. Rev. Lett. **102**, 250602(1)-250602(4) (2009).
- [5] P. B. Blakie, C. Ticknor, A. S. Bradley, A. M. Martin, M. J. Davis, and Y. Kawaguchi: Numerical method for evolving the dipolar projected Gross-Pitaevskii equation, Phys. Rev. E 80, 016703(1)-016703(16) (2009).
- [6] P. Naidon and M. Ueda: Possible Efimov Trimer State in a Three-Hyperfine-Component Lithium-6 Mixture, Phys. Rev. Lett. **103**, 073203(1)-073203(4) (2009).
- [7] P. Zhang, P. Naidon, and M. Ueda: Independent Control of Scattering Lengths in Multicomponent Quantum Gases, Phys. Rev. Lett. **103**, 133202(1)-133202(4) (2009).
- [8] M. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda: Collision Dynamics and Rung Formation of Non-Abelian Vortices, Phys. Rev. Lett. 103, 115301(1)-115301(4) (2009).
- [9] S. Tojo, T. Hayashi, T. Tanabe, T. Hirano, Y. Kawaguchi, H. Saito, and M. Ueda: Spindependent inelastic collisions in spin-2 Bose-Einstein condensates, Phys. Rev A 80, 042704(1)-042704(7) (2009).

- [10] Y. Watanabe, T. Sagawa, and M. Ueda: Optimal Measurement on Noisy Quantum Systems, Phys. Rev. Lett. **104**, 020401(1)-020401(4) (2010).
- [11] M. Horikoshi, S. Nakajima, M. Ueda, T. Mukaiyama: Measurement of Universal Thermodynamic Functions for a Unitary Fermi Gas, Science **327**, pp. 442-445 (2010).
- [12] T. Sagawa and M. Ueda: Generalized Jarzynski Equality under Nonequilibrium Feedback Control, Phys. Rev. Lett. **104**, 090602(1)-090602(4) (2010).

(国内雑誌)

- [13] C. A. R. サ・デ・メロ 川口由紀 (訳): フェルミオ ンがボソンに変わるとき、パリティ No.5, pp. 4-13, 2009.
- [14] 川口由紀、斎藤弘樹、上田正仁:磁気双極子相互作用 するボース・アインシュタイン凝縮体、日本物理学会 誌 Vol. 64, No.8, pp.623-627, August, 2009.

(学位論文)

修士論文

[15] 小林伸吾:ホモトピー理論を用いたトポロジカル励起 の研究(2010年3月、東京工業大学)

(著書)

- [16] H. Saito, Y. Kawaguchi, and M. Ueda: Topological defect formation in spinor and dipolar Bose-Einstein, Electromagnetic, Magnetostatic, and Exchange-Interaction Vortices in Confined Magnetic Structures, ed by E. O. Kamenetskii, Research Signpost Publisher, pp.107-131, 2009.
- [17] M. Ueda: Fundamentals and New Frontiers of Bose-Einstein Condensation, World Scientific Publishing, Singapore, 2010.

(国際会議)

招待講演

- [18] M. Ueda: Symmetry Breaking in Bose-Einstein Condensation (Plenary Talk), OIST Workshop –Fundamentals of Quantum Mechanics and Its Applications– (Okinawa, Japan), May, 2009.
- [19] M. Ueda: Topological Excitations in Bose-Einstein Condensates, The 2009 Summer Program of the Aspen Center for Physics: Quantum Simulation, Computation with Cold Atoms and Molecules (Colorado, USA), May-June, 2009.
- [20] Y. Kawaguchi: New Physics in Dipolar Bose-Einstein condensates, The 19th International Conference on Laser Spectroscopy (Hokkaido, Japan), June, 2009.
- [21] M. Ueda: Topological Excitations in Bose-Einstein Condensates, Kyoto workshop on Cold Atoms and Molecules: Collisions, Field effects and Applications (Kyoto, Japan), June, 2009.

- [22] M. Ueda: Lee-Yang cluster-expansion approach to BEC-BCS crossover, The 18th International Laser Physics Workshop (Barcelona, Spain), July, 2009.
- [23] M. Ueda: Topological Excitations in Spinor-Dipolar Bose-Einstein Condensates, International workshop –The second international workshop on dynamics and manipulation of quantum systems– (Tokyo, Japan), October, 2009.
- [24] M.Ueda: Topological excitations in Spinor-dipolar Bose-Einstein condensates, CUA Seminar in MIT-Harvard, The center for Ultracold Atoms (Massachusetts, USA), November, 2009.
- [25] M.Ueda: Topological excitations in Bose-Einstein condensation International workshop 2009 (Reisensburg, Germany), November, 2009.
- [26] M.Ueda: Topological excitations in spinor-dipolar Bose-Einstein condensates, The 5th CAS Cross-Strait and International conference on quantum manipulation (Beijing, China), December, 2009.
- [27] M.Ueda: Topological excitations in Bose-Einstein condensates, The 2nd Joint Symposium by Nanyang Technological University and The University of Tokyo (Tokyo, Japan), February, 2010.
- [28] Y. Kawaguchi: Topological Excitations in Spinor BECs New Frontiers in QCD 2010 –QCD Phase diagram–, Yukawa Institute for Theoretical Physics (Kyoto, Japan), March, 2010.
- [29] M. Ueda: Topological Excitations in Bose-Einstein Condensates, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (Kanagawa, Japan), March, 2010.

一般講演(口演)

- [30] P. Naidon, M. Ueda: A possible Efimov trimer state in 3-component lithium 6, Colloquium for Francoise Masnou-Seeuws's retirement (Paris, France), May, 2009.
- [31] P. Zhang: Independent Control of Multiple Scattering Lengths, LENS-ERATO joint workshop (Firenze, Italy), September, 2009.
- [32] P. Naidon: Efimov trimers of three different lithium atoms, LENS-ERATO joint workshop (Firenze, Italy), September, 2009.
- [33] M. Tezuka, Y. Yanase and M. Ueda: Effect of trap shape on imbalanced Fermi superfluids, American Physical Society Meeting 2010 (Oregon, USA), March, 2010.

一般講演(ポスター)

[34] P. Naidon, M. Ueda: A possible Efimov trimer state in 3-component lithium 6, The 40th Annual Meeting of the Division of Atomic, Molecular, and Optical Physics (DAMOP2009) (Virginia, USA), May, 2009.

- [35] P. Naidon and M. Ueda: A possible Efimov trimer state in three-component lithium 6, Kyoto workshop on Cold Atoms and Molecules: Collisions, Field effects and Applications (Kyoto, Japan), June, 2009.
- [36] P. Zhang, P.Naidon, M.Ueda: The three body Feshbach resonance in cold atom system, Kyoto workshop on Cold Atoms and Molecules: Collisions, Field effects and Applications (Kyoto, Japan), June, 2009.
- [37] Y. Watanabe, T. Sagawa, and M. Ueda: Optimal Measurement on Noisy Quantum Systems, The 4th Feynman Festival (Olomouc, Czech Republic), June, 2009.
- [38] T. Sagawa and M. Ueda: Minimal Energy Cost for Quantum Information Processing: Measurement and Information Erasure, The 4th Feynman Festival (Olomouc, Czech Republic), June, 2009.
- [39] S. Nakajima, M. Horikoshi, S. Pradhan, M. Ueda, and T. Mukaiyama: Atomic loss features in the ultrscold three-component mixture of 6Li, International Conference on Quantum Foundation and Technology: Frontier and Future (Shanghai, Chaina), July, 2009.
- [40] M. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda: Non-Abelian Vortices in Spinor Bose-Einstein Condensates, The 11th J. J. Giambiagi Winter School (Buenos Aires, Argentina), July-August, 2009.
- [41] M. Tezuka and M. Ueda: Imbalanced Fermi condensates: effect of trap shapes, Bose-Einstein Condensation 2009: Frontiers in Quantum Gases (Sant Feliu de Guixols, Spain), September, 2009.
- [42] M. Tezuka: Formation of condensates with finitemomentum pairs in population-imbalanced Fermi gases, FINESS 2009 (Durham, UK), September, 2009.
- [43] P. Naidon and M. Ueda: Efimov trimers in 3component lithium 6, ITAMP Workshop- Efimov (Rome, Italy), October, 2009.
- [44] Y.Watanabe, T. Sagawa, and M. Ueda: Optimal Measurement on Noisy Quantum Systems, The 2nd Nanyang Technological University and University of Tokyo Joint Workshop (Tokyo, Japan), February, 2010.
- [45] S. Nakajima, M. Horikoshi, M. Ueda, and T. Mukaiyama: Magnetic Field Dependence of Atom-Dimer Loss in an Ultracold Three-Component Mixture of 6Li, The 2nd Nanyang Technological University and University of Tokyo Joint Workshop (Tokyo, Japan), February, 2010.
- [46] M. Tezuka, Y. Yanase and M. Ueda: Effect of confinement geometry on imbalanced Fermi condensates, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (Kanagawa, Japan), March, 2010.

- [47] M. Kobayashi, Y. Kawaguchi, and M. Ueda: Vortex Tiling in Spinor Condensates, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (Kanagawa, Japan), March, 2010.
- [48] P. Naidon, M. Ueda: Efimov physics with three lithium atoms, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (Kanagawa, Japan), March, 2010.

(国内会議)

招待講演

- [49] 川口由紀: 双極子相互作用するボーズ・アインシュタ イン凝縮体、科研費新学術領域研究「動的相関光科 学」第2回シンポジウム(京都大学 ICEMS、京都) 2009 年8月
- [50] 上田正仁:ボーズアインシュタイン凝縮、レーザー誕 生 50 周年記念シンポジウム(千里ライフサイエンス センター、大阪)、2010年2月
- [51] 小林未知数:量子乱流の数値解析研究(第4回若手奨 励賞受賞記念講演)、日本物理学会第65回年次大会 (岡山大学、岡山)、2010年3月
- [52] 上田正仁: 冷却原子気体におけるトポロジカル励起 (シンポジウム講演)、日本物理学会第65回年次大会 (岡山大学、岡山)、2010年3月
- 一般講演(口演)
- [53] 小林未知数、川口由紀、上田正仁:スピン2ボース・ アインシュタイン凝縮体における渦芯構造、日本物理 学会秋季大会(熊本大学、熊本)2009年9月
- [54] 沙川貴大、上田正仁:フィードバック制御された系に おける Jarzynski 等式、日本物理学会秋季大会(熊本 大学、熊本)、2009 年 9 月
- [55] 中島秀太、堀越宗一、Swarupananda Pradhan、上 田正仁、向山敬:冷却 6Li 原子 3 成分混合系におけ る原子数のロス、日本物理学会秋季大会(熊本大学、 熊本) 2009 年 9 月
- [56] 小林未知数:量子乱流の数値解析、日本物理学会秋季 大会(熊本大学、熊本) 2009 年 9 月
- [57] 渡辺優、沙川貴大、上田正仁: Optimal Measurement on Noisy Quantum Systems、日本物理学会秋季大 会(熊本大学、熊本)、2009年9月
- [58] 沙川貴大、上田正仁:情報熱力学の構築:ランダウ アー原理を超えて、RIMS 共同研究・基研研究会-量 子科学における双対性とスケール-(京都大学基礎物 理学研究所、京都)2009年11月
- [59] 小林未知数:ボース・アインシュタイン凝縮体の様々な 位相欠陥とトポロジー、東北大学応用数学連携フォー ラム第11回ワークショップ(東北大学、宮城) 2010 年1月
- [60] 沙川貴大、上田正仁: 非平衡フィードバック制御における Jarzynski 等式、古典および量子ダイナミクス・ 非平衡統計力学に関するワークショップ(東京大学、 東京) 2010年2月

- [61] 内野瞬、小林未知数、上田正仁: スピノール BEC に おける Bogoliubov 理論及び Lee-Huang-Yang 補正、 日本物理学会年次大会(岡山大学、岡山) 2010 年 3 月
- [62] 川口由紀、上田 正仁:対称性によるスピン3スピノー ル BEC 基底状態の分類、日本物理学会年次大会(岡山大学、岡山)、2010年3月
- [63] 小林未知数、川口由紀、上田正仁: スピン 2・スピノー ル・ボース凝縮体における vortex tiling、日本物理学 会年次大会(岡山大学、岡山)、2010 年 3 月
- [64] 中島秀太、堀越宗一、上田正仁、向山敬:冷却 6Li 原 子 3 成分混合系における原子-分子散乱、日本物理学 会年次大会(岡山大学、岡山)、2010 年 3 月
- [65] 沙川貴大、上田正仁:エントロピー生成くりこみ群、 日本物理学会春季大会(岡山大学、岡山) 2010 年 3 月
- [66] 渡辺優、沙川貴大、上田正仁:ノイズを含む状態転写 に対する最適な量子測定、日本物理学会年次大会(岡 山大学、岡山)、2010年3月
- 一般講演(ポスター)
- [67] 渡辺優、沙川貴大、上田正仁: Optimal Measurement on Noisy Quantum Systems、第 20 回量子情報技術 研究会(広島大学、広島) 2009 年 5 月
- (研究会 及び セミナー)
- [68] 川口 由紀、上田 正仁:二次元スピノルボース気体にお ける Kosterlitz-Thouless 転移、特定領域研究 A03-A04 合同研究会(ホテル箱根パウエル、神奈川)、2009 年 4 月
- [69] 沙川貴大、上田正仁: Information Thermodynamics、 お茶の水大学物理学教室談話会(お茶の水女子大学、 東京) 2009 年 4 月
- [70] 渡辺優、沙川貴大、上田正仁: Visualization of Quantum Operations、お茶の水大学物理学教室談話会(お 茶の水大学、東京) 2009 年 4 月
- [71] 沙川貴大、上田正仁: Information Thermodynamic、
 第7回生命・情報セミナー(東京大学、東京) 2009
 年6月
- [72] 渡辺優、沙川貴大、上田正仁: Optimal Measurement on Noisy Quantum Systems、第6回量子情報関東 StudentChapter (東京工業大学、東京)、2009年7 月
- [73] 渡辺優:古典および量子推定入門、基礎物理セミナー 合宿(箱根、神奈川)、2009 年 12 月
- [74] 沙川貴大、上田正仁:情報熱力学、名古屋量子情報セ ミナー(ルブラ王山、愛知)、2010年1月
- [75] 渡辺優、沙川貴大、上田正仁: Optimal Measurement on Noisy Quantum Systems、名古屋量子情報セミ ナー(ルブラ王山、愛知)、2009年1月
- [76] 渡辺優、沙川貴大、上田正仁: Optimal Measurement on Noisy Quantum Systems、量子情報科学 ウィン タースクール 2010(東北大学 川渡セミナーセンター、 宮城) 2010年2月

- [77] 渡辺優、沙川貴大、上田正仁: Optimal Measurement on Noisy Quantum Systems、QMKEK3「量子論の 諸問題と今後の発展」(高エネルギー加速器研究機構、 茨城)、2010年3月
- [78] P. Naidon, M. Ueda: Efimov physics in ultracold atoms、理化学研究所セミナー(理化学研究所、埼 玉)、2010年3月

6 一般物理実験

6.1 牧島研究室 + 中澤研究室

6.1.1 科学衛星の運用と稼働状況

○ 宇宙X線衛星「すざく」

2005 年 7 月 10 日に打ち上げられた宇宙 X 線衛星 「すざく」は、観測の 4 年目に入り、搭載された X 線 CCD カメラ (XIS; X-ray Imaging Spectrometer) と 硬 X 線検出器 (HXD; Hard X-ray Detector) は、順 調に稼働を続けている。我々は本年度も、衛星およ び硬 X 線検出器 (HXD) の運用を支援するとともに、 HXD の軌道上較正をさらに進めた。山田、鳥井ら は、HXD の高エネルギー部を受け持つ GSO シンチ レータのエネルギー較正を改良し、全世界の「すざ く」ユーザー向けに情報を公開した。

図 6.1.1 は、「すざく」で観測された、さまざまな 種類の宇宙X線源のスペクトルを、*νFv*形式で示し たものである。このように 2.5 桁に及ぶ「すざく」の 広い帯域は、X線源の示す多彩な物理学を理解する 上で、かつてない優れた手段を提供してくれる。



☑ 6.1.1: Broad-band $\nu F\nu$ spectra of some cosmic Xray sources obtained with *Suzaku*. Cyg X-1 is a prototypical black-hole binary with a Comptonized hard continuum, Her X-1 is a binary X-ray pulsar exhibiting an electron cyclotron absorption at ~ 40 keV, V2400 Oph is an accreting magnetized white dwarf, and 4U 0142+61 is a magnetar having a magnetic field of ~ 10¹⁴ G. The Galactic-Center diffuse emission exhibit emission lines from highly ionized heavy elements.

我々は 2009 年 6 月 29 日~7 月 2 日、北海道小樽 市において、「すざく」の成果を次期衛星 ASTRO-H に繋げるべく、第 3 回「すざく」国際会議"The Energetic Cosmos: from Suzaku to ASTRO-H"を開催 した。これは物理学教室、ビッグバン宇宙国際研究セ ンター、理研基幹研究所など共催で、牧島は組織委員 長、中澤は開催地委員長を務めた。図 6.1.2 に示すよ うに、外国人およそ90 名を含め、全体で 260 名を越え る参加者があり、日本の宇宙 X 線研究の国際的な求心 力の高さを示すことができた。詳細は、http://wwwutheal.phys.s.u-tokyo.ac.jp/SuzakuConference2009/ を参照して欲しい。



 \boxtimes 6.1.2: A get-together photo of the 3rd *Suzaku* conference held at Otaru, on 2009 June 29 – July 2.

HXD の外周シールド部(HXD-WAM)は、ガン マ線バーストや太陽フレアの検出器となる。2009年 7月9日に受けたガンマ線バーストGRB090709Aで は、信号に周期8.06秒の周期性が見られ、釜江名誉 教授、埼玉大、青学大などと協力して、その有意性 の解析を進めた[113]。

○ フェルミガンマ線宇宙望遠鏡

米日伊などの共同で開発され、2008 年 6 月 11 日 に打ち上げられた、フェルミガンマ線宇宙望遠鏡は、 20 MeV-300 GeV 帯で高感度の全天サーベイを続 け、多彩な成果を導出している。なかでも、オリオ ン分子雲 (\S ?6.1.4)をはじめとする分子雲や星間ガス [14, 18, 24, 91]、地球大気 [25]、さらには W51C や Cas A などの超新星残骸 [16, 17] などから、 π^0 崩壊 ガンマ線を検出しつつある。これは宇宙線ハドロン 成分の貴重な情報源であり、宇宙線物理学に画期的 な進展がもたらされつつある。

○ 国際宇宙ステーション搭載 MAXI

MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image; 全天X 線監視装置)は、理研、JAXA、東工大、青学大、日 大などにより開発されたX線観測装置で、2009年7 月16日、スペースシャトルにより打ち上げられ、国 際宇宙ステーション日本実験モジュール「きぼう」の 曝露部に搭載された。MAXIは、12台の大型比例計 数管や、単一光子モードの国産X線 CCDを搭載し、 宇宙ステーションの地球周回を利用して、2-30 keV のエネルギー範囲で全天のスキャンを行なう。我々は MAXI プロジェクトに直接には関与していないが、 MAXI がX線新星の出現や既知X線源の増光を検知 した場合、その天体を「すざく」により速やかに緊 急観測できるよう、連携を推進している。

6.1.2 質量降着するブラックホール

ブラックホール (BH) に物質が吸い込まれる際は、 静止質量エネルギーの~10% が外界に放射される。 そのため降着物質は、~0.01 keV から~100 MeV まで、広範囲なエネルギーをもつことができ、その放 射は光子エネルギーにして5桁以上にもわたる。図 6.1.1 の Cyg X-1 に見られるように、「すざく」の広 帯域は、これらの天体の研究に圧倒的な強みを発揮 する。

○ 恒星質量ブラックホール

我々は質量降着する恒星質量 BH を広範に研究し ている [45, 68, 86]。鳥井、山田らは、「すざく」で 16 回にわたり観測された Cyg X-1 の広帯域スペクトル (図 6.1.1 参照) や短時間 ($0.01 \sim 10$ 秒) の変動を統 一的に解析した結果、Low/Hard 状態の中でも質量 降着率が増加するにつれ、(i) 硬X線スペクトルを熱 的 Compton 放射で記述する y-パラメータが減少し、 (ii) 反射体の立体角が増加し、(iii) 短時間変動の相 対振幅が減り、かつ (iv) 変動の特徴的な周波数が高 くなることを見出した [85, 101]。これは降着率の増 大にともない、Compton コロナがより小さくなると ともに、光学的に厚い降着円盤がその中に、より深 く侵入する結果と解釈でき、画期的な成果である。

スペクトルの 6–7 keV に見られる鉄 K_{α} 線は、し ばしば広がっており、BH 直近での、特殊相対論お よび一般相対論の効果と解釈できる。諸外国の一部 の理論家は、この相対論的効果がきわめて大きく、 降着円盤は非回転 BH まわりの最終安定軌道 3 $R_{\rm S}$ ($R_{\rm S}$ は Schwarzschild 半径)より内側まで存在してお り、よって多くの BH は極端 KerrBH であると論じ ている。しかし我々は「すざく」データを注意深く 再解析し、こうした結論は連続成分の選び方に強く 依存するものとして、世界的に注意を喚起している [15, 50, 65, 45, 60, 86]。

山田らは、ソフト状態で観測される光学的に厚い 降着円盤からの放射を、改良された理論モデルと詳 細に比較している [86, 110]。理研の Gandhi らとの 共同研究では、GX 339-4 からの速い (< 0.1 秒) 可 視光の変動を、昨年度に引き続き解析した [46]。

○ 巨大ブラックホールと活動銀河核

銀河の中心にある巨大 BH にガスが降着すると、 活動銀河核 (AGN) となる。一部のセイファート銀河 では、鉄の K_{α}線が異常に幅広く、恒星質量 BH の 場合と同様、それらは極端 Kerr BH であると論じら れてきた。しかし現状では、観測データからこの解 釈が一意的に導かれるとは言い難い。そこで野田ら は、昨年度の上原らに引き続き、「すざく」で得たセ イファート銀河 MCG-6-30-15 のデータをさらに解 析した。その結果、スペクトルの 20-40 keV 付近に、 連続成分と独立に強度変動する成分があること、そ れは光学的厚みの大 (~ 10) な熱的コンプトン放射 と考えられること、この成分の存在を考えると、時 間平均スペクトルに寄与する冷たい物質での反射は 弱くなり、かつ鉄輝線の広がりも減少することを示 した [51, 66, 68, 45, 87, 99]。よって、この AGN を Kerr BH と断じる証拠は、不十分と結論される。

○ ULX 天体

近傍銀河に見られる ULX 天体 (Ultra-Liminous X-ray Sources) は、恒星質量 BH と巨大 BH の間を 結ぶ、「中質量 BH」の候補として注目されている。 我々は京大の磯部らと協力し、「すざく」により ULX 天体を観測し、ULX と恒星質量 BH の類似性を強化 した [47, 88]。カリフォルニア大学バークレイ校か ら、学振 Pre-Doc として来日した Diane Wong が、 可視光による ULX の研究を行なった。NGC 6946 に ある ULX をハッブル宇宙望遠鏡で観測した結果、紫 外線光度もひじょうに高く、この天体の放射は強い 異方性をもたないことが判明した [21, 49, 63]。



☑ 6.1.3: Strong dependences of wide-band spectral properties of magnetars on their characteristic age, revealed with *Suzaku* observations [59]. Two circled objects were observed in their activity, while the others in their quiescence. (a) Hardness ratio, defined as the 1–60 keV flux of the hard component divided by the 1–20 keV flux of the soft component. (b) The photon index of the hard component.

6.1.3 強磁場コンパクト天体の研究

○ マグネター天体

銀河系内にあるX線パルサーのうち15個ほどは、 10¹⁴⁻¹⁵Gの超強磁場をもつ特殊な中性子星「マグ ネター」で、磁気エネルギーを消費してX線を放射し ていると考えられる。榎戸、牧島、理研の中川らは、 INTEGRAL衛星の先駆的な成果に触発され、「すざ く」によるマグネターの広帯域観測を進めている。

2008 年 8 月 22 日に出現した新マグネター SGR 0501+4516 からは、昨年度の第一報に続き、活動期 の定常放射にも顕著なハード成分を検出することに 成功した [20]。同様なハード成分は、弱いバースト を重ね合わせたスペクトルにも存在する [76, 112]。 これらと酷似した結果は、2009 年 1 月に活動期に 入ったマグネター 1E1547.0-5408 からも得られた [8, 89, 100]。「すざく」第4期公募観測(2009 年度) には、キープロジェクトの1つとして「マグネター 大研究」が採択され、470 ksec の観測が行なわれた。

こうした新しい観測結果をまとめると、マグネター に関して以下の新しい描像が明らかになった [44, 90, 121, 100, 111, 122, 124]。

- 図 6.1.1 の 4U 0142+61 に代表されるように、 マグネターは普遍的に、ソフト成分とハード成 分からなるスペクトルを示す。
- 2. この2成分特性は、バースト放射にも見られる。
- 3. バースト活動期には、両成分がほぼ足並みを揃 えて光度増加を示す。
- 2. 図 6.1.3a に示すように、ハード成分とソフト成分のフラックス比は、特性年齢と強く相関し、年齢とともにハード成分が弱くなる。
- 5. 定常放射のハード成分は異常に硬い光子指数を もち、しかも加齢につれ硬くなる(図 6.1.3a)。

これらのうち、定常放射に関する部分は、榎戸輝揚の 博士学位論文となった [59, 40, 62, 70, 71, 111, 123]。 奇妙なハード成分は、電子陽電子対消滅線が、強い 磁場中で「光子分裂」した結果かもしれない。

○ 降着型 X 線パルサー

降着型パルサーは、中性子星に相手の星からガス が降着することでX線を放射し、それらのX線スペク トル中に現れる電子サイクロトロン共鳴吸収線は、中 性子星の磁場計測の切り札となる。牧島らは、理研、 埼玉大などと協力し、その研究を続行した[19,39]。 再帰型 Be トランジェント天体 X0331+53 が明るく なったことを、MAXI が捕えたので、2010 年 2 月 16 日に「すざく」による緊急観測を実施した。牧島 は、中性子星の磁場が、中性子の核磁気モーメント 整列による強磁性の発現である可能性を論じている [107]。中澤らは引き続き、連星パルサー Her X-1 か らの不規則な dip 現象の研究を進め、成果を発表し た [44, 61]。

○ 強磁場の白色わい星と広がった銀河系X線放射

白色わい星の一部は、10⁶⁻⁷ G の強磁場をもつ。 我々はこれまで埼玉大などと協力し、高速自転する 強磁場白色わい星 AE Aqr を「すざく」で観測し、 粒子加速の徴候を発見した。今年度は埼玉大などと 協力し、「すざく」で、この種の天体のプロトタイプ と考えられる AM Her を観測した結果、やはり非熱 的な放射の徴候をえることができた [41, 41, 83, 105]



☑ 6.1.4: A spectrum (multiplied by the energy squared) of diffuse gamma-ray emission associated with the Orion A molecular cloud, observed with the LAT instrument onboard the *Fermi* Gamma-ray Space Telescope. The dashed line show a prediction for a π^0 decay component, assuming a cosmic-ray spectrum close to that in the Solar vicinity, and the Orion A mass estimated using radio observations [58].

6.1.4 星間空間における高エネルギー現象

○ 星間分子雲からの GeV ガンマ線

宇宙では、加速された陽子が標的陽子に衝突するさ いπ⁰ 粒子が作られ、その崩壊でエネルギー 70 MeV 以上のガンマ線が生成する。それを検出することは、 宇宙線ハドロン成分の分布や生成を光子により知る、 ほとんど唯一の方法で、フェルミ衛星の大きな目的 の1つでもある。奥村、釜江名誉教授らはフェルミの 初期データを用い、オリオン分子雲からの広がった ガンマ線を解析した。その結果この放射は、図 6.1.4 に示すように、宇宙線が分子雲と衝突して作られる π^0 粒子が崩壊したものとして説明できること、また 電波観測から推定した分子雲の質量を仮定すると、 オリオン領域での宇宙線強度は、太陽系近傍のもの と~20%以内で一致することが、明らかになった。 太陽系近傍から隔たった場所で、宇宙線強度が測定されたのは、初めてである。逆に、宇宙線強度を仮 定して良い場合は、ガンマ線強度から、標的分子雲 の質量を推定できることになる。これらの成果は奥 村暁の博士論文となった [58, 57, 77, 115, 126]。

○ 強磁場の白色わい星と広がった銀河系X線放射

湯浅らは、質量降着する強磁場白色わい星を研究 している。これらの天体では、降着物質が白色わい 星の磁極に降着するさい衝撃波加熱され、図 6.1.1 の ように、高温の熱的制動放射と3本の鉄輝線が放射 される。そこで硬X線連続成分の折れ曲がりと、鉄ラ イン強度比を同時に評価することで、衝撃波の温度 が精度よく決定でき、そこから個々の白色わい星の 質量と半径の比を決定できる。これを白色わい星の 理論的な質量-半径関係と組み合わせることで、個々 の白色わい星の質量が推定可能となる。「すざく」で 得た 17 個の激変星の広帯域スペクトルを解析した結 果、それらの質量は $0.4 \sim 1.3 M_{\odot}$ に分布し、平均 値は 0.88 M_☉ と求められた [42, 64, 84, 114]。

このテーマは、我々の銀河面、バルジ、銀河中心な どを満たす、広がったX線放射にも、深く関係する。 これら広がった放射のスペクトルは、SiやSの電離 輝線を伴う低温の熱的放射、強い3本の鉄輝線を伴 う高温熱的放射、および光子指数2~3の硬い連続 成分から成る。これが星間空間での真にディフュー ズな放射なのか[2,3]、多数の点源の集まりなのか、 熱い議論が続いている。点源の候補として最有力な のが、上述の白色わい星である。今後、「すざく」で 得た白色わい星の平均スペクトルが、広がったX線 放射の硬Xスペクトルや表面輝度をどこまで説明で きるか、見極めてゆきたい。

○ 超新星残骸の観測

理研の玉川、早藤、山口、平賀らと協力し、超新 星残骸の研究を継続した。チコ・ブラーエの残骸で は、非熱的な硬×線放射に加え、弱電離した Cr と Mn の特性×線を検出することに成功した。また膨 張のドップラー効果に起因すると思われる鉄輝線の 広がりを検出し、Fe に比べ Si や S が外側に分布す る「玉ねぎ構造」の徴候を得た [31]。

○ 渦巻き銀河の星間ガスの化学組成比

理研の小波らと協力し、「すざく」で観測した渦巻 き銀河 NGC 4258、NGC 1316、NGC 3079 などの データを解析し、O、Mg、Ne、Si、S、Fe などの電 離輝線の強度から、高温星間ガスの化学組成の推定 を行なった。その結果、渦巻銀河 NGC 4258 だけで なく、S0 銀河 NGC 1316 でも、化学組成比率は我々 の銀河系でのものに近いことがわかった [1, 38]。

6.1.5 銀河団および銀河群の研究

・非熱的硬X線と超高温成分

昨年度の Abell 3667 に続き、かみのけ座銀河団の 「すざく」データを、米国バージニア大学、山形大学 などと協力して解析し、非熱的な硬 X 線放射に厳し い上限をつけることができた [11, 32]。同様に Abell 2199 では、理研との協力により、低エネルギーと高 エネルギーでの非熱的な超過成分が、どちらも存在 しないことを確認した [7]。これらの結果により、銀 河団からの非熱的放射の有無に関しては、従来から 論争となっていた強度レベルでは、存在しないこと が明らかとなって来た。「いくつかの銀河団では、シ ンクロトロン電波に比べ逆コンプトン硬 X 線が異常 に強く、平均磁場は 0.1 μ G となる」という結果は ほぼ否定され、電波の偏光面の観測から推定される ~ μ G レベルの磁場と矛盾のない描像が確立しつつ ある。

中澤らは昨年度、衝突銀河団 Abell 3667 銀河団か ら、予期しない超高温の熱的成分を発見した [32]。そ こで中島らは「すざく」で得た、みなみのさんかく座 銀河団のスペクトルを解析した。形状が対称でなく、 高温で質量も大きいために、多くの衝突を経験して いるはずであるが、銀河団プラズマは~9.5 keV と ほぼ等温であり、超高温成分の担う光度は、全体の 7%以下であることがわかった [94]。これは、銀河団 どうしの合体で生成された超高温成分が、どのよう な時間スケールで冷却・散逸するかを教えてくれる 結果である。山形大と協力して観測して、別の近傍 の高温銀河団 Abell 2319 でも同様の結果を得てお り、超高温成分は衝突の途中のごく短時間に現れる ものであるというシミュレーションの結果と、定性 的に一致している [5, 35]。

○ 銀河団の周辺の研究

理研の川原田らと協力し、Abell 1689 銀河団 (z = 0.183)の「すざく」データを解析した。X線放射は、 ビリアル半径付近まで検出され、大規模構造のフィ ラメントに接する方向では、プラズマ温度が高く、ボ イドに接する部分では、温度が低いことを発見した [36,93]。これは大規模構造の中で、銀河団の成長し てきた痕跡と解釈され、注目される。

山形大と協力して、弱重力レンズ効果で発見され た銀河団のX線対観測も実施し、ZwCl0823.2+0425 領域の4つのダークマターハロー候補のうち、3つ から銀河団X線で検出した。鉄輝線からこの領域に z=0.22と0.47の2つの大規模構造フィラメントが あることを確認した[52]。

磁気流体的な描像

牧島らは10年来のX線観測にもとづき、銀河団の 磁気流体的な描像を追求している。今年度は、XMM-Newton衛星で観測した、ケンタウルス座銀河団に関 する結果を、理研の川原田らの協力により出版する ことができた[12]。すなわちこの銀河団の中心付近 では、高温(~3.8 keV)と低温(~1.9 keV)のプラ ズマが共存していることが、観測から明らかになっ た。これは中心銀河の磁気圏に低温プラズマが閉じ 込められているという、牧島の提唱する「中心銀河 コロナ」の描像を支持するものである。低温領域は、 細い磁気ループに閉じ込められていることから、太 陽コロナで知られた Rosner-Tucker-Viana 機構によ り、熱的に安定化されていると想像される[12]。

我々の磁気流体的描像によれば、銀河団のメンバー 銀河が高温プラズマ中を運動するさい、銀河は抵抗 を受けて中心に落下し、プラズマは加熱されると考 えられる。この落下の証拠を探るため今年度は、理 研の稲田、小波、川原田らと協力し、近傍から遠方 までの銀河団に対し、可視光で決めた銀河団のメン バー銀河の空間分布と、X線で求めた高温プラズマ の空間分布を比較し、その相対関係がどう進化する か研究を進めた [53]。

6.1.6 雷活動に伴う静電加速現象の研究

我々は 2006 年度より、宇宙での電場加速の手掛か りを得るため、榎戸、湯浅、山田、鳥井らを中心に理 研の土屋らと協力し、新潟県柏崎刈羽原子力発電所 にて、冬期雷雲からのガンマ線を探査する GROWTH (Gamma-Ray Observations of Winter THunder clouds) 実験を行なっている [67, 75]。今年度の冬には、新た に 2 例が検出され、まとめると表 6.1.1 にようにな る。ここには 2008 年夏に、乗鞍山山頂で行なった実 験の結果も含めた [23]。

このように雷活動に付随する放射線の発生には、 大別すると、短い (<1秒) イベントと長い (1-2分) ものがあり、前者のみが落雷に同期する。ガンマ線 のスペクトルはどの例でも、~10 MeV まで延びる ので、電子が 20 MeV 程度まで加速されていること は疑いない。ガンマ線に加え電子も検出される場合 があり、その場合は発生源の距離が、20 MeV 電子の 飛程 (大気中では~100 m) より近いと考えられる。

長いイベントは、雷雲そのものに付随すると考え られる。雷雲内部で、鉛直方向に強い静電場が発達 すると、宇宙線などで高エネルギーの種電子が作ら れた場合、それらはイオン化でエネルギーを損失よ リ早く電場により加速されうる(逃走電子加速)。電 子は制動放射を出し、それは相対論的効果により、前 方に鋭くビームする。このビームが検出器を掃くと き、ガンマ線が検出されると考えられる。

 \mathbf{a} 6.1.1: List of radiation bursts from thunderclouds.

場所	日時 (JST)	継続 (秒)	線	電子*
柏崎	07/01/07 06:43	40	あり	なし
柏崎	07/12/14 01:59	110	あり	なし
乗鞍	08/09/21 00:45	90	あり	あり
乗鞍	08/09/21 11:01	< 1		—
乗鞍	08/09/21 23:15	< 1		—
乗鞍	08/09/21 23:20	< 1		—
柏崎	08/12/23 14:48	0.2-0.4	あり	あり
柏崎	08/12/25 18:29	110	あり	なし
柏崎	09/01/13 $05:30$	< 1	あり	あり
柏崎	09/01/25 22:32	137	あり	なし
柏崎	09/02/11 19:40	12	あり	なし
柏崎	10/01/08 07:02	90	あり	不明
柏崎	10/01/08 16:53	60	あり	不明

* もしくは高エネルギーのガンマ線



 \boxtimes 6.1.5: Spectra of gamma-ray bursts from winter thunder clouds (open and filled circles), summed over three events detected with the GROWTH experiment. Open triangles show an average spectrum of Terrestrial Gamma-Ray Flashes, detected with the solar satellite *RHESSI*.

6.1.7 ASTRO-H衛星計画

● ASTRO-H 衛星とその搭載装置

ASTRO-H 衛星は 2014 年の打ち上げを目指して 開発の進められている、次世代の宇宙 X 線衛星で、 長さ 14 m、重さ 2.5 t と日本最大の科学衛星である。 この衛星は、X 線マイクロカロリーメータを搭載し て、6 keV の X 線に対して、4-7 eV という世界最高 精度の分光能力を持ち、多数の天体のドップラー速 度を測定できると同時に、5-80 keV で分角の撮像分 光を行う硬 X 線イメージャ(HXI)を2台搭載し、厚 いガスに隠された天体に高い感度を持つ。この他に、 広視野 X 線 CCD カメラ1台と、60-600 keV で最高 感度の観測を行う軟ガンマ線検出器 SGD が2台搭 載される。このように広帯域、高感度、高精度での 分光観測を得意とし、天体における高エネルギー物 理現象の理解を大きく進めるツールである。本研究 室では、JAXA 等と共同で、HXI と SGD の開発を 進めている。アメリカ、フランスとも協力している。



 \boxtimes 6.1.6: Drawing of the ASTRO-H satellite, to be launched into orbit on 2014. Overall length is 14 m, weight is 2.5 t. Also plotted to the left are the cross section view of the HXI (right: 40 cm tall) and SGD (left: 50 cm tall). Pairs of each detector are mounted.

◦ HXI 装置と SGD 装置

HXI は、硬 X 線望遠鏡 (HXT) の焦点面検出器で あり、5–70 keV の帯域を 9 分角の視野、1.7 分角の 分解能で撮像し、1.5 keV の精度で分光する。HXT は名古屋大学が中心となって開発している、新しい 多層膜スーパーミラー技術を用いている。集光撮像 により、既存の検出器と比較して、2 桁の感度向上が 見込まれる。星間物質により強い吸収を受けた天体 など、現在は見ることのできない、新しい天体現象 に迫る。HXI は、井戸型に組み上げた BGO シンチ レータを用い、反同時計数により低バックグラウン ド環境を実現し、4 段の両面シリコンストリップ検 出器と1 段の両面 CdTe ストリップ検出器を重ねた イメージャーを用いる。BGO は、約 4 cm 厚で 9 ユ ニットに分割される (図 6.1.6)。 SGD は、それ自体が数度の角度分解能を持つ半導体コンプトンカメラを、10度以下まで視野を絞った 井戸型の BGO シンチレータの内側に置く。金属製のファインコリメータにより、150 keV 以下では視野を 1 度以下に絞っている。反同時計数に加え、2 種の角度制限の一致という、2 重のバックグラウンド除去を行い、60-600 keV までの感度をこれまでより 一桁上げ、巨大ブラックホールや、衝突銀河団からの硬 X 線信号を 100 keV より上でとらえることができる。半導体コンプトンカメラは、32 層のシリコンパッド検出器と、8 層の CdTe パッド検出器、および側面を囲む 2 層の CdTe パッド検出器で構成される。BGO は、約 3 cm 厚で、30 ユニットに分割される(図 6.1.6)。

2009 年度の全体計画の進捗

2014年の打ち上げへ向けて、装置開発は佳境にさ しかかっている。2009年度は、個々の要素技術の実 験、および熱、構造、電気的な検討を進めて、検出器 の具体的な設計を行い、Preliminary Design Review (PDR:2009年2月~4月)でその妥当性を確認して いる。世界の代表的な硬X線、ガンマ線の専門家の意 見もあおぎ、設計上の課題を特定し、対応策を決定し た。PDR が2009年4月末に無事終了すれば、2010 年度は、衛星搭載品と基本的に同じ設計の試作機の 製造へ移行する。2010年度末に予定される、Critical Design Review (CDR)で、衛星搭載品の最終製造図 面が確定する。



 \boxtimes 6.1.7: (*left*) HXI CdTe imager bread-board model, and (*right*) SGD Si-CdTe Compton Camera mechanical model.

○ HXI 用の軌道上ゲイン較正システムの基礎試験

HXI イメージャ部の各読み出しチャンネルの軌道 上でのゲインのモニターは、原則として電気的なテス トパルスに依存するが、ガンマ線信号を用いた Endto-End のゲインモニターの必要性がレビューで指摘 された。HXI は焦点面検出器であり、そのバックグラ ウンドは低いため、放射化などに伴う輝線がほとん ど利用できない。これを受けて、湯浅らは、他の硬 X 線検出器で採用されているシステムを参考に、²⁴¹Am 線源とプラスチックシンチレータを APD で読み出 すことで、 α 崩壊と同時計数をとり、18-60 keV ま での較正輝線を得るシステムを実証した(図 6.1.8)。 BGO の読み出し用に用いている APD の回路の予備 ラインを用いることで、実現できる。今後、最終的 な構造や、線源の強度などの詳細を詰めて行く。

◦ BGO 結晶シンチレータの支持構造の開発



⊠ 6.1.8: ²⁴¹Am timing-tagged source experiment. α particle deposit its energy into the plastic scintillator molded within (*left* panel, vertical axis), and simultaneously emits gamma-rays, which is then detected by a CdTe (and Si) sensors (*left* panel, horizontal axis). When no signal is detected in the plastic, there is no gamma-rays in CdTe.

中島、中澤らは、HXI/SGD 双方の感度向上の鍵 を握る BGO シールドの構造開発を進めた。HXI や SGD では、内部の主検出器が大きく、「すざく」で 用いられたように結晶を少数のユニットに接着して 支持する技法が困難である。そこで、CFRP とネジ を使った全く新しい概念の固定方法を開発している。 BaSO₄ 粉の反射材の接着強度を、工学部の引っぱり 試験器をお借りして測定し、その強度が過去の簡単 な測定から推定していた値と10%の精度であってい ること、3つの供試体での再現性が

< 10%であるこ とを確認した。再現性の高さも確認できたことは、今 後の製造手順を考える上で重要である。H-II ロケッ トでの打ち上げを考慮した振動試験 (図 6.1.9) を実施 し、破壊が全く生じない事を確認した [103]。また、 より細長い BGO ユニットの支持構造の検討を開始 した。なお、本開発に伴い、関連特許 [127] を得て いる。この開発を受けて、三菱重工とともに HXI お よび SGD の全体構造 (ハウジング構造他)の構造検 討を進めている。



 \boxtimes 6.1.9: (*left*) A HXI-BGO module mechanical model. (*right*) Vibration test following the H-IIA rocket standard of a BGO crystal for SGD. Performed at ISAS/JAXA on 30 Nov.-1 Dec. 2009.

○ 結晶シンチレータの集光効率の研究

西岡、奥村らは、光学シミュレーションを導入して、BGO等の結晶シンチレータにおいて、光検出素子へいかに効率よく集光するかを評価している。 BGO結晶は屈折率が2.15と最も高く、シンチレーション光をいかに読み出しのAvalanche Photo Diode (APD)へ導くかが大きな課題である。実験により、 ゴアテックやESR、BaSO4粉の反射材の特性、および光学研磨面と曇りガラス面の反射特性の評価に成 功した。一面を BaSO4 粉の反射材にして接着強度を 稼ぎ、残った面は ESR とゴアテックを組み合わせた 反射材とすることで、SGD および HXI を構成する、 ほとんどの BGO 結晶について、~100 keV 以上の 信号が入った時にそれを検知できるだけの光収集効 率が実現できる目処が立ちつつある [108]。今後は、 収集率を一段と改善することに加え、衛星搭載品の 具体的な反射材設計に入る。

○ 半導体コンプトンカメラの構造開発

中澤らは、Stanford 大、ISAS/JAXA、三菱重工 業とともに、SGD の根幹部である半導体コンプトン カメラの構造開発を進めている。この検出器は、40 層もの半導体を重ねるもので、製造に伴う様々な誤 差などを吸収しきれる柔軟で、かつ部品点数の少な いデザインが必要である。また、アナログ LSI の実 装密度が高いため、廃熱の工夫も重要である。野田 は、Stanford 大の田島博士らとともに熱計算を行い、 半導体の乗っているトレーの素材を変えるなどの対 応の必要性を確認した。

○ スペースワイヤ (SpaceWire) 通信技術の開発

SpaceWireは、次世代のシリアル通信規格であり、 通信速度が可変、ロジックがコンパクトで、リモー トノードのバスに直接アクセスする機能(RMAP機能)が実装されており、次世代の衛星内の通信規格 として事実上の標準の一つとなっている。湯浅らは、 このデジタル技術の開発を中心となって進めてきた。 2009年度は、これまでの開発をもとに、データ転送 速度の向上、ロジックの最適化などを進めた。また、 埼玉大と共同で、時刻付け機能の評価を行っている [120]。

6.1.8 将来の衛星計画 (ASTRO-H 以外)

◦小型ガンマ線衛星 CAST 計画

中澤をワーキンググループ主査として、次世代の MeV ガンマ線全天観測のために、半導体コンプトン カメラに基づく小型衛星、CAST (Compton All Sky Telescope) 計画の検討を、ISAS/JAXA、Stanford 他 とともに進めている。本計画は、ASTRO-H SGD で 用いられる半導体コンプトンカメラを改良し、数度 の撮像能力で、全天をマップするアイデアである。特 に、SGD では 600 keV までだった帯域を、2 MeV 以上にまで広げ、一光子当たりの角度分解能が 1-2° での観測を目指す。エネルギー帯域を広げるために、 Si および CdTe 半導体の体積の増大が求められる。 現在、SGD の開発の進捗に合わせて、検出器の基本 構成の設計を進めている。フランスの技術であるガ ンマ線ミラーとの組み合わせも模索している。

 ○ 大型国際 X 線天文台 (International X-ray Observatory) 計画

International X-ray Observatory (IXO) 計画は、 2020 年代を想定し、2 keV で 2 m² 以上の有効面積 をもち、5 秒角の精度で X 線を撮像する。ASTRO-H のものを発展させた大型の X 線カロリーメータを搭

載し、高精度で X 線輝線、吸収線を分光する。これ により、 z > 6 の宇宙で活発に行われていると考え られる、銀河およびその中心ブラックホールの形成 などに迫る大型計画で、2020年代の打ち上げを目的 として、日米欧の大きな国際協力で検討、開発を進 めている。中澤らは、検出器の帯域を 40 keV にま で拡大する Hard X-ray Imager の設計を担当してい る。X 線帯域を観測する、Wide Filed Imager の下部 に Hard X-ray Imager を固定し、宇宙を同時に観測 することで、初期宇宙で多く存在するはずの強く吸 収された天体を、他の天体と区別することができる。 2009 年度は、三菱重工業および、Olivier Limousin 博士らフランス Sacley 研究所の共同研究者ととも に、Phase-A スタディーの一環で、検出器の基本構 成、重量、消費電力などを確定した。これにより現 在、欧米の衛星メーカーが衛星全体の基礎設計を進 めている。2010年の夏には、基本仕様の確定を行い、 次の審査に臨むことになっている。

<【報文】>

(原著論文)

- Konami, S., Sato, K., Matsushita, K., Yamada, S., Isobe, N., Senda, A., Hayato, A., Gandhi, P., Tamagawa, T. & Makishima, K.: "Suzaku Observation of the Metallicity in the Interstellar Medium of NGC 4258", *Publ. Astr. Soc. Japan* 61, 941–948 (2009)
- [2] Dogiel, V.A., Chernyshov, D., Yuasa, T., Cheng, K.-S., Bamba, A., Inoue, H., Ko, C.-M., Kokubun, M., Maeda, Y., Mitsuda, K., Nakazawa, K. & Yamasaki, N.Y.: "Particle Propagation in the Galactic Center and Spatial Distribution of Non-Thermal X-Rays ", Publ. Astr. Soc. Japan 61, 1093–1098 (2009)
- [3] Dogiel, V.A., Chernyshov, D., Yuasa, T., Prokhorov, D., Cheng, K.-S., Bamba, A., Inoue, H., Ko, C.-M., Kokubun, M., Maeda, Y., Mitsuda, K., Nakazawa, K. & Yamasaki, N.Y.: "Origin of Thermal and Non-Thermal Hard X-Ray Emission from the Galactic Center", *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 1099–1105 (2009)
- [4] Yuasa, T., Nakazawa, K. & Makishima, K.: "The Origin of an Extended X-Ray Emission Apparently Associated with the Globular Cluster 47 Tucanae", *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 1107–1115 (2009)
- [5] Sugawara, C., Takizawa, M. & Nakazawa, K.: "Suzaku Observation of the Radio Halo Cluster Abell 2319: Gas Dynamics and Hard X-Ray Properties", *Publ. Astr. Soc. Japan* **61**, 1293–1303 (2009)
- [6] Nishino, S., Fukazawa, Y., Hayashi, K., Nakazawa, K. & Tanaka, T.: "Study of the Large-Scale Temperature Structure of the Perseus Cluster with Suzaku", *Publ. Astr. Soc. Japan* **62**, 9–18 (2010)
- [7] Kawaharada, M., Makishima, K., Kitaguchi, T., Okuyama, S., Nakazawa, K. & Fukazawa, Y.:

"Suzaku Constraints on Soft and Hard Excess Emissions from Abell 2199", *Publ. Astr. Soc. Japan* **62**, 115–129 (2010)

- [8] Enoto, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Nakagawa, Y. E., Sakamoto, T., Ohno, M., Takahashi, T., T., Yamaoka, K., Murakami, T. & Takahashi, H.: "Suzaku Discovery of a Hard X-Ray Tail in the Persistent Spectra from the Magnetar 1E 1547.0-5408 during its 2009 Activity", *Publ. Astron. Soc. Japan* 62, in press (2010)
- [9] Kubota, K., Ueda, Y., Kawai, N., Kotani, T., Namiki, M., Kinugasa, K., Ozaki, S., Iijima, T., Fabrika, S., Yuasa, T., Yamada, S. & Makishima, K.: "Suzaku and Optical Spectroscopic Observations of SS 433 in the 2006 April Multiwavelength Campaign", *Publ. Astron. Soc. Japan* 62, in press (2010)
- [10] Uchiyama, Y., Tanaka, T., Takahashi, T., Mori, K. & Nakazawa, K.: "Suzaku Observations of PSR B1259-63: A New Manifestation of Relativistic Pulsar Wind", Astrophys. J. 698, 911–921 (2009)
- [11] Wik, D. R., Sarazin, C. L., Finoguenov, A., Matsushita, K., Nakazawa, K. & Clarke, T. E.: "A *Suzaku* Search for Nonthermal Emission at Hard X-Ray Energies in the Coma Cluster", *Astrophys.* J. 696, 1700–1711 (2009)
- [12] Takahashi, I., Kawaharada, M., Makishima, K., Matsushita, K., Fukazawa, Y., Ikebe, Y., Kitaguchi, T., Kokubun, M., Nakazawa, K., Okuyama, S., Ota, N. & Tamura, T. "X-ray Diagnostics of Thermal Conditions of the Hot Plasmas in the Centaurus Cluster", Astrophys. J. 701, 377–395 (2009)
- [13] Abdo, A., (abc順,全183名), Okumura, A.: "Fermi LAT Observations of LS I +61 °303: First Detection of an Orbital Modulation in GeV Gamma Rays", Astrophys. J. Let. 701, L123–L128 (2009)
- [14] Abdo, A., (abc順,全177名), Okumura, A.: "Fermi LAT Observation of Diffuse Gamma Rays Produced Through Interactions Between Local Interstellar Matter and High-energy Cosmic Rays", Astrophys. J. 703, 1249–1256 (2009)
- [15] Yamada, S., Makishima, K., Uehara, Y., Nakazawa, K., Takahashi, H., Dotani, T., Ueda, Y., Ebisawa, K., Kubota, A. & Gandhi, P.: "Is the Black Hole in GX 339-4 Really Spinning Rapidly?", Astrophys. J. Let. **707**, L109–L103 (2009)
- [16] Abdo, A., (abc順,全177名), Okumura, A.: "Fermi LAT Discovery of Extended Gamma-Ray Emission in the Direction of Supernova Remnant W51C", *Astrophys. J. Let.* **710**, L1–L6 (2009)
- [17] Abdo, A., (abc 順, 全 174 名), Okumura, A.: "Fermi-Lat Discovery of GeV Gamma-Ray Emission from the Young Supernova Remnant Cassiopeia A", Astrophys. J. Let. **710**, L92–L95 (2009)

- [18] Abdo, A., (abc順,全154名), Okumura, A.: "Fermi Observations of Cassiopeia and Cepheus: Diffuse Gamma-ray Emission in the Outer Galaxy", Astrophys. J. 710, 133–149 (2010)
- [19] Nakajima, M., Mihara, T. & Makishima, K.: "Energy-Dependent Harmonic Ratios of the Cyclotron Features of X0331+53 in the 2004-2005 Outburst", Astrophys. J. 710, 1755–1768 (2010)
- [20] Enoto, T., Rea, N., Nakagawa, Y. E., Makishima, K., Sakamoto, T., Esposito, P., Götz, D., Hurley, K., Israel, G. L., Kokubun, M., Mereghetti, S., Murakami, H., Nakazawa, K., Stellar, L., Tiengo, A., Turolla, R., Yamada, S., Yamaoka, H., Yoshida, A. & Zane, S.: "Wide-Band Suzaku Analysis of the Persistent Emission from SGR?0501+4516 during the 2008 Outburst", Astrophys. J., in press (2010)
- [21] Kaaret, P., Feng, F., Wong, D. S. & Tao, L.: "Direct Detection of an Ultraluminous Ultraviolet Source", Astrophys. J., in press (2010)
- [22] The Fermi-Lat Collaboration (全 268 名) including Okumura, A.: "A change in the optical polarization associated with a gamma-ray flare in the blazar 3C279", *Nature* 463, 919–923 (2010)
- [23] Tsuchiya, H., Enoto, T., Torii, T., Nakazawa, K., Yuasa, T., Torii, S., Fukuyama, T., Yamaguchi, T., Kato, H., Okano, M., Takita, M. & Makishima, K.: "Observation of an Energetic Radiation Burst from Mountain-Top Thunderclouds", *Phys. Rev. Let.* **102**, id.255003 (2009)
- [24] Abdo, A., (abc順,全178名), Okumura, A.: "Fermi Large Area Telescope Measurements of the Diffuse Gamma-Ray Emission at Intermediate Galactic Latitudes", *Phys. Rev. Let.* **103**, id.251101 (2009)
- [25] Abdo, A., (abc順,全155名), Okumura, A.: "Fermi large area telescope observations of the cosmic-ray induced gamma-ray emission of the Earth's atmosphere", *Phys. Rev. D* 80, id.122004 (2009)
- [26] Tamagawa, T., Hayato, A., Asami, F., Abe, K., Iwamoto, S., Nakamura, S., Harayama, A., Iwahashi, T., Konami, S., Hamagaki, H., Yamaguchi, Y. L., Tawara, H. & Makishima, K.: "Development of thick-foil and fine-pitch GEMs with a laser etching technique", Nucl. Instr. Meth. Phys. A 608, 390–396 (2009)
- [27] Watanabe, S., Ishikawa, S., Aono, H., Takeda, S., Odaka, H., Kokubun, M., Takahashi, T., Nakazawa, K., Tajima, H., Onishi, M. & Kuroda, Y.: "High Energy Resolution Hard X-Ray and Gamma-Ray Imagers Using CdTe Diode Devices", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 56, 777–782 (2009)
- [28] Takeda, S., Aono, H., Okuyama, S., Ishikawa, S., Odaka, H., Watanabe, S., Kokubun, M., Takahashi, T., Nakazawa, K., Tajima, H. & Kawachi, N.: "Experimental Results of the Gamma-Ray Imaging Capability With a Si/CdTe Semiconductor Compton Camera", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 56, 783–790 (2009)

- [29] Ando, M., (全140名, 順不同), Nakazawa, K.: "DE-CIGO and DECIGO pathfinder", *Class. Quant. Gravity*, **26**, 094019 (2010)
- [30] Ando, M., (全136名, 順不同), Nakazawa, K.: "DE-CIGO and DECIGO pathfinder", *Class. Quant. Gravity*, 27, 084010 (2010)

(会議収録)

Proc. The Energetic Cosmos: from Suzaku to ASTRO-H (eds. ****)

- [31] Hayto, A., Tamagawa, T., Yamaguchi, H., Furuzawa, A., Ozawa, M., Kunieda, H., Hughes, J. P., Hwang, U., Bamba, A. & Makishima,K.: "The Onion-like Metallicity Structure of Tycho 's Supernova Remnant as Revealed by Doppler Broadened X-ray Emission Lines", p.58–61
- [32] Sarazin, C. L., Wik, D. R., Nakazawa, K., Finoguenov, A., Clarke, T., Fukazawa, Y., Inoue, S., Kawaharada, M. & Takizawa, M.: "Non-Thermal and Thermal Hard X-ray Emission from Clusters of Galaxies", p.78–81
- [33] Makiya, R., Totani, T. & Nakazawa, K.: "Suzaku Observation of 3EG J1234-1318: -Ray Emission from Forming Galaxy Clusters?", p.86-87
- [34] Nishino, S., Fukazawa, Y., Hayashi, K., Nakazawa, K. & Tanaka, T.: "Study of the Large-scale Temperature Structure of the Perseus Cluster with *Suzaku*", p.96–97
- [35] Takizawa, M., Sugawara, C. & Nakazawa, K.: "Suzaku Observation of the Radio Halo Cluster Abell 2319", p.98–99
- [36] Kawaharada, M., Okabe, N., Nakazawa, K., Takizawa, M. & Umetsu, K.: "Suzaku Detection of the ICM Emission out to the Virial Radius in Abell 1689", p.100–101
- [37] Sato, S., Matsushita, K., Ota, N., Nagino, R., Nakazawa, K. & Sarazin, C. L.: "Suzaku observations of K lines of iron from intracluster medium of the Coma cluster", p.102–103
- [38] Konami, S., Sato, K., Matsushita, K., Yamada, S., Isobe, N., Senda, A., Hayato, A., Gandhi, P., Tamagawa, T. & Makishima, K.: "Suzaku Observation of the Metallicity in the Interstellar Medium of NGC 4258". p.110-111
- [39] Iwakiri, W., Terada, Y., Tashiro, M. S., Mihara T., Makishima, K., Enoto, T., Nakajima, M., Yoshida, A. & Angelini, L.: "Possible Detection of Cyclotron Resonance Scattering Emission Features from an Accretion-powered Pulsar 4U 1626 - 67", p.170–173
- [40] Enoto, T.. Rea, N., Nakagawa, Y., Nakazawa, K., Sakamoto, T. & Makishima, K.: "Suzaku Studies of the Extremely Hard Emission Components of Magnetars", p.186-189

- [41] Terada, Y., Ishida, M., Bamba, A., Mukai, K., Makishima, K., Harayama, A., Hayashi, A., Shionome, T. & Morigami, K.: "Discovery of possible non-thermal emission from AM Hercules in the very low state with Suzaku", p.200–201
- [42] Yuasa, T., Nakazawa, K., Makishim, K., Ebisawa, K., Saitou, K., Ishida, M. & Kokubun, M.: "Constructing an Average Hard X-ray Spectrum of Intermediate Polars", p.208–209
- [43] Nakajima, M., Mihara, T. & Makishima, K.: "Change of Cyclotron Resonance Energies of Binary X-ray Pulsar", p.214–215
- [44] Nakagawa, Y. E., Yoshida, A., Hurley, K., Yamaoka, K., Shibazaki, N., Enoto, T., Sakamoto, T. & Makishima, K.: "Uniting Burst and Quiescent Emission Mechanisms of Magnetars", p.220–221
- [45] Makishima, K.: "Continua and Iron-K lines from Accreting Black Holes", p.252–255
- [46] Gandhi, P., Makishima, K., Durant, M., Fabian, A., Dhillon, V., Marsh, T., Miller, J., Shahbaz, T. & Spruit, H.: "Rapid timing studies of black hole binaries in Optical and X-rays: correlated and nonlinear variability", p.256–259
- [47] Isobe, N., Ohsuga, K., Makishima, K., Mizuno, T., Kubota, A. & Gandhi, P.: "Suzaku detections of luminosity-dependent spectral changes from the two ultraluminous X-ray sources, X1 and X2, in NGC 1313", p.260–263
- [48] Nakazawa, K., Ueda, T., Enoto, T., Yamada, S., Suzuki, M. & Makishima, K.: "Suzaku wide-band observation of anomalous dips in Hercules X-1", p.264–267
- [49] Wong, Diane S., Kaaret, P. & Feng, H.: "Optical Observations of the ULX in NGC 6946", p.296–297
- [50] Yamada, S., Makishima, K., Uehara, Y., Nakazawa, K., Takahashi, H., Dotani, T., Ueda, Y., Ebisawa, K., Kubota, A. & Gandhi, P.: "A Truncated Disk of the Black Hole in GX 339-4 Observed with Suzaku", p.292-293
- [51] Noda, H., Uehara, Y., Yamada, S., Makishima, K. & Nakazawa, K.: "Suzaku Discovery of a Hard Component that Varies Independently of the Power-Law in Several Seyfert Galaxies", p.318–319
- [52] Watanabe, E., Takizawa, M., Nakazawa, K., Okabe, N., Kawaharada, M., Hamana, T. & Miyazaki, S.: "Suzaku Observation of Large Scale Structure Filaments around ZwCl0823.2+0425 Found through the Local Cluster Substructure Survey", p.378–379
- [53] Inada,N., Kawaharada,M., Konami,S., Gandhi, P., Misawa, T., Ota, K., Makishima, K. & Takahashi, R.: "Probing Evolution of Hot Gas and Galaxy Distributions in Galaxy Clusters", p.380–381
- [54] Murakami, H., Matsushita, K., Komiyama, M., Sato, K., Nagino, R., Ohashi, T., Yamasaki, N.,

Takei, Y. & Nakazawa, K.: "Suzaku and XMM-Newton Observations of the Metallicity Distribution in the Intracluster Medium of the Fornax cluster", p. 384–385

- [55] Iwahashi, T., Tamagawa, T., Hayato, A., Konami, S., Asami, F., Makishima, K., Swank, J. & Jahoda, K.: "Development of Gas Electron Multipliers for the X-ray Polarimetry Mission GEMS", p.442–443
- [56] Watanabe, S., Kokubun, M., Sato, R., Takahashi, T., Nakazawa, K., et al.: "The Hard X-ray Imager for ASTRO-H mission", p.422–423

その他の会議収録

[57] Okumura, A., Kamae, T. & the Fermi LAT Collaboration, "Diffuse Gamma-ray Observations of the Orion Molecular Clouds", 2009 Fermi Symposium, eConf Proceedings C091122

(学位論文)

- [58] Okumura, Akira: "Gamma-Ray observations of the Orion Molecular Clouds using the *Femi* Large Area Telescope",博士学位論文
- [59] Enoto, Teruaki: "X-ray Studies of Magnetars with *Suzaku*", 博士学位論文

(国内雑誌)

<【学術講演】>

(国際会議)

- The 3rd Suzaku Conference: "The Energetic Cosmos: from Suzaku to ASTRO-H" (2009 June 29 – July 2; Otaru, Hokkaido)
- [60] Makishima, K.: "Continua and Iron-K lines from Accreting Black Holes" (invited talk)
- [61] Nakazawa, K., Ueda, T., Enoto, T., Yamada, S., Suzuki, M. & Makishima, K.: "Suzaku wide-band observation of anomalous dips in Hercules X-1" (contributed talk)
- [62] Enoto, T., Rea, N., Nakagawa, Y. E., Nakazawa, K., Sakamoto, T., Makishima, K.: "Suzaku Studies of the Extremely Hard Emission Components of Magnetars" (contributed talk)
- [63] Wong, Diane S., Kaaret, P. & Feng, H.: "Optical Observations of the ULX in NGC 6946" (poster)
- [64] Yuasa, T., Nakazawa, K., Makishim, K., Ebisawa, K., Saitou, K., Ishida, M. & Kokubun, M.: "Constructing an Average Hard X-ray Spectrum of Intermediate Polars" (poster)
- [65] Yamada, S., Makishima, K., Uehara, Y., Nakazawa, K., Takahashi, H., Dotani, T., Ueda, Y., Ebisawa, K., Kubota, A. & Gandhi, P.: "A Truncated Disk of the Black Hole in GX 339–4 Observed with Suzaku" (poster)

[66] Noda, H., Uehara, Y., Yamada, S., Makishima, K. & Nakazawa, K.: "Suzaku Discovery of a Hard Component that Varies Independently of the Power-Law in Several Seyfert Galaxies" (poster)

その他の一般講演

- [67] Enoto, T., Tsuchiya, H., Yuasa, T., Yamada S., Kato, H., Nakazawa, K., Makishima, K. & GROWTH Collaboration: "Observation of highenergy electrons and gamma rays from winter thunderclouds", *Japan Geoscience Union Meeting* 2009 (2009 May 18; Chiba)
- [68] Yamada, S., Makishima, K., Nakazawa, K., Noda, H., Takahashi, H., Dotani, T., Kubota, A., Ebisawa, K., Ueda, Y. & Done, C.: "Suzaku wide-band observations of black-hole binaries and AGNs: continuum and Fe-K lines '', The X-ray Astronomy 2009 (2009 September 7-11; Bologna, Italy)
- [69] Wong, Diane S.: "Engaging Future Astronautics with Inquiry-Based Activities", 60th International Astronautical Congress 2009 (2009 October 12 and 16; Daejeon, Republic of Korea)
- [70] Enoto, T., Makishima, K., Rea, N., Nakagawa, Y. E., Nakazawa, K., Sakamoto T., Terada, Y. & Ohno M.: "Suzaku Results on Extremely Hard X-rays from Magnetars", 2009 Fermi Symposium (2009 November 2-5; Washington DC)
- [71] Enoto, T., Makishima, K., Rea, N., Nakagawa, Y. E., Nakazawa, K. & T. Sakamoto: "Wide-band Xray Studies of Magentars with Suzaku", ICREA Workshop on The High-Energy Emission from Pulsars and their Systems (2010 April 14; Barcelona, Spain)

(国内会議)

- 日本物理学会・秋季大会(2009年9月10~13日、甲 南大学)
- [72] 福山太郎、渡辺伸、小高裕和、石川真之介、杉本宗一郎、斉藤新也、国分紀秀、高橋忠幸、鳥井俊介、山田真 也、中澤知洋:「次世代 X 線天文衛星『ASTRO-H』搭 載用 CdTe 検出器の基礎特性と性能評価」、10aSD-5
- [73] 国分紀秀、渡辺伸、佐藤理江、大野雅功、高橋忠幸、中 澤知洋、牧島一夫ほか:「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載硬 X 線イメージャ(HXI)の開発の現状」、 10aSD-10
- [74] 深沢泰司、田島宏康、水野恒史、片桐秀明、高橋弘 充、田中孝明、高橋忠幸、国分紀秀、渡辺伸、大野雅 功、佐藤理江、牧島一夫、中澤知洋ほか:「次期 X 線 衛星 ASTRO-H 搭載軟ガンマ検出器 (SGD)の開発 状況」、10aSD-13
- [75] 土屋晴文、榎戸輝揚、山田真也、湯浅孝行、川原田 円、北口貴雄、国分紀秀、加藤博、岡野眞治、牧島一 夫:「2008 年度における冬季雷活動からの高エネル ギー放射線の観測」、10pSD-6

- [76] 中川友進、榎戸輝揚、牧島一夫、吉田篤正、山岡和 貴、坂本貴紀、Nanda Rea ほか:「『すざく』衛星に よる超強磁場中性子星 SGR 0501+4516 の小バース トの観測」、10pSD-7
- [77] 奥村曉、牧島一夫、釜江常好、Seth Digel、水野恒史、 福井康雄ほか:「フェルミ望遠鏡によるオリオン分子 雲からの広がったガンマ線の観測」、10pSD-8
- [78] 阿佐美ふみ、玉川徹、早藤麻美、岩橋孝典、小波さお り、俵裕子、浜垣秀樹、山口頼人、牧島一夫:「GEM の電子増幅度のマッピング調査」、11aSB-8
- [79] 片桐秀明、西野翔、上原岳志、水野恒史、高橋弘充、 深沢泰司、大杉節、山崎了、田島宏康、釜江常好、内 山泰伸、田中孝明、福井康雄、河合誠之、浅野勝晃、 谷津洋一、片岡淳、尾崎正伸 E、高橋忠 E、牧島一夫 ほか:「フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡による超新星 残骸 W28 の観測」、11aSE-1
- [80] 川村静児、安東正樹、瀬戸直樹、佐藤修一、中村卓 史、坪野公夫、(順不同)、中澤知洋ほか:「スペース 重力波アンテナ DECIGO 計画 (20):設計・計画」、 10aSE-4
- [81] 穀山渉、安東正樹、森脇成典、石徹白晃治、高橋走、 新谷昌人、麻生洋一、高島健、中澤知洋、高橋忠幸、 国分紀秀、吉光徹雄、小高裕和、湯浅孝行、石川毅彦、 榎戸輝揚、苔山圭以子、坂井真一郎、佐藤修一、高森 昭光、坪野公夫、戸田知朗、橋本樹明、若林野花:「宇 宙実験実証プラットホーム (SWIM)を用いた超小型 重力波検出器の開発 VIII(軌道上運用)」、10aSE-13
- [82] 古関優、国分紀秀、高橋忠幸、渡辺伸、勝田隼一郎、小 高裕和、石川真之介、佐々木智香子、Peter von Ballmoos、中澤知洋、内山泰伸:「ガンマ線レンズを用いた 新世代ガンマ線検出システムの開発(II)」、10pSD-9

日本天文学会・秋の年会(2009年9月14~16日、山 口大学)

- [83] 寺田幸功、石田学、馬場彩、原山淳、林多佳由、塩野 目雄、向井浩二、牧島一夫:「『すざく』、第二の白色 矮星パルサー発見か?」、J07a
- [84] 湯浅孝行、中澤知洋、牧島一夫、石田学、海老沢研、 齊藤慧:「磁場を持つ白色矮星の連星系の質量推定;
 X 線連続スペクトルの解析から」、J08a
- [85] 鳥井俊輔、牧島一夫、山田真也、中澤知洋:「『すざ く』衛星を用いた CygX-1 の広帯域スペクトルの長 期詳細観測、J34a
- [86] 山田真也、牧島一夫、上原悠一、中澤知洋、高橋弘 充、堂谷忠靖、久保田あや、上田佳宏:「『すざく』が 捉えた Very High 状態: GX 339-4 の 広帯域 X 線 観測 (その2), J35a
- [87] 野田博文、山田真也、上原悠一、中澤知洋(東大理)、 牧島一夫:「『すざく』を用いた MCG-6-30-15の硬 X 線放射の新解釈」、J36a
- [88] 磯部直樹、大須賀健、水野恒史、久保田あや、牧島 一夫、Gandhi Poshak:「『すざく』による超光度 X 線源 NGC 1313 X1, X2 のスペクトル変動の観測」、 K45a

- [89] 榎戸輝揚、牧島一夫、坂本貴紀、中川友進、山岡和 貴、大野雅功、高橋忠幸、中澤知洋、高橋弘充、村上 敏夫、寺田幸功:「マグネター天体 1E 1547.0-5408 の『すざく』ToO 観測」、J51a
- [90] 牧島一夫、榎戸輝揚、中川友進、森井幹雄、坂本貴紀、 馬場彩、早藤麻美、平賀純子、中島基樹ほか:「『すざ く』によるマグネターの観測:現状と見通し、J52a
- [91] 水野恒史、佐田貴幸、林克洋、高橋弘充、片桐秀明、 深沢泰司、大杉節、山崎了、谷津陽一、河合誠之、浅 野勝晃、片岡淳、尾崎正伸、高橋忠幸、奥村曉、牧島 ー夫ほか:「フェルミ衛星による、拡散 線放射の観 測と銀河系宇宙線、Q29a
- [92] 渡邉瑛里、中澤知洋、浜名崇、宮崎聡、岡部信広、 滝沢元和、川原田円:「X線と弱重カレンズによる ZwCl0823.3+0425銀河団周辺の大規模構造フィラメ ントの解析」、T04a
- [93] 川原田円、岡部信広、中澤知洋、滝沢元和、梅津敬 ー:「『すざく』による Abell 1689 銀河団外縁部の高 温ガスの研究」、T06a
- [94] 中島健太、中澤知洋、奥山翔、山田真也、牧島一夫: 「『すざく』による Triangulum-Australis 銀河団の観 測 、 T09a
- [95] 玉川徹、早藤麻美、岩橋孝典、阿佐美ふみ、牧島一 夫、Jean Swank、Keith Jahoda **ほか**:「X 線偏光観 測専用衛星 GEMS」、W43a
- [96] 岩橋孝典、玉川徹、中村聡史、早藤麻美、小波さお り、阿佐美ふみ、牧島一夫:「気球実験に向けた光電 子追跡型 X 線偏光計の開発」、W48b
- [97] 西岡博之、奥山翔、中澤知洋、山田真也、榎戸輝揚、 湯浅孝行(東大理)、牧島一夫:「結晶シンチレータの 光量シミュレータの開発」、W62a
- [98] 神頭知美、寺田幸功、田代信、岩瀬かほり、湯浅孝行、 能町正治、高橋忠幸、国分紀秀、石崎欣尚ほか:「次 期 X 線天文衛星 Astro-H における SpaceWire を用 いた時刻配信方法の検証」、W64a
 - 日本物理学会・春の年会(2010年3月20~23日、岡山大学)
- [99] 野田博文、山田真也、上原悠一、中澤知洋、牧島-夫:「『すざく』によるセイファート銀河の広がった鉄 輝線の新解釈」、20aBP-1
- [100] 牧島一夫、榎戸輝揚、中川友進、早藤麻美、寺田幸 功ほか:「『すざく』による超強磁場中性子星『マグネ ター』のX線観測、20aBP-2
- [101] 鳥井俊輔、山田真也、牧島一夫、中澤知洋:「『すざ く』を用いた Cyg X-1 の広帯域スペクトルと短時間 変動の長期詳細観測」、20aBP-3
- [102] 山岡和貴、杉田聡司、田代信、寺田幸功、恩田香織、 遠藤輝、岩切渉、菅佐原たか子、玉川徹、中川友進、 洪秀徴、国分紀秀、鈴木素子、大野雅功、高橋忠幸、 深沢泰司、高橋拓也、上原岳士、花畑義隆、中澤知洋、 榎戸輝揚、牧島一夫、浦田裕次ほか:「すざく衛星搭 載硬 X 線検出器広帯域全天モニタ部 (HXD-WAM) の現状 (VI)」、20aBP-5

- [103] 中島健太、中澤知洋、上田剛、西岡博之、牧島一夫、 花畑義隆、深沢泰司ほか:「ASTRO-H 衛星硬 X 線・ 軟ガンマ線検出器アクティブシールドの開発 (II):機 構開発」、20aBP-10
- [104] 国分紀秀、渡辺伸、太田方之、佐藤理江、大野雅功、田中康之、高橋忠幸、中澤知洋、牧島一夫ほか:「ASTRO-H衛星搭載硬X線撮像検出器(HXI)の開発」、20aBP-12
- [105] 寺田幸功、原山淳、馬場彩、石田学、堂谷忠靖、林 多佳由、中村良子、牧島一夫 D ほか:「可視・X 線・ TeV 多波長同時観測を通じた白色矮星における粒子 加速の検証」、20aBP-13
- [106] 玉川徹、太田真秀、岩橋孝典、阿佐美ふみ、吉川瑛 文、早藤麻美、小波さおり、牧島一夫:「ガス電子増 幅フォイルの静電容量と放電の関係」、20aBP-1
- [107] 牧島一夫:「中性子星のX線観測の現状」、22pBX-2
- [108] 西岡博之、奥山翔、湯浅孝行、山田真也、奥村曉、 中澤知洋、牧島一夫:「結晶シンチレータの蛍光伝搬 シミュレータの開発」、23pBW-10
 - 日本天文学会・春の年会(2010年3月24~27日、広 島大学)
- [109] 寺田幸功、原山淳、石田学、馬場彩、堂谷忠靖、林 多佳由、向井浩二、牧島一夫、新田敦子ほか:「『すざ く』、H.E.S.S.、可視光による白色矮星パルサーの多 波長同時観測」、J38a
- [110] 山田真也、牧島一夫、中澤知洋、鳥井俊輔:「『すざ く』データを用いた降着円盤からの熱的放射モデル の検証」、J49a
- [111] 榎戸輝揚、牧島一夫、中川友進、 早藤麻美、寺田幸 功、神頭知美、坂本貴紀ほか:「『すざく』の観測によ るマグネター硬X線放射の起源の探究」、J54a
- [112] 中川友進、牧島一夫、榎戸輝揚、山岡和貴、吉田篤 正、坂本貴紀、Kevin Hurley、Nanda Rea ほか:「『す ざく』衛星による SGR 0501+4516 のバーストに付 随する硬 X 線放射の検出」、J55a
- [113] 岩切渉、田代信、寺田幸功、遠藤輝、恩田香織、菅 佐原たか子、中川友進、大野雅功、山岡和貴、杉田聡 司、深沢泰司、山内誠、Nicolas Vasquez、浦田裕次、 洪秀徴、榎戸輝揚、牧島一夫、釜江常好:「『すざく』 衛星搭載 WAM 検出器による GRB090709A の周期 解析」、J61a
- [114] 湯浅孝行、中澤知洋、牧島一夫、石田学、海老沢研、 齊藤慧:「磁場を持つ激変性の質量推定と、銀河面 X 線放射への寄与」、Q18a
- [115] 奥村曉、牧島一夫、釜江常好、Seth Digel、福井康 雄ほか:「オリオン分子雲からの広がったガンマ線放 射の観測」、Q22a
- [116] 岡部信広、川原田円、梅津敬一、滝沢元和、松下恭 子、深沢泰司、浜名崇、宮崎聡、中澤知洋、大橋隆 哉: Suzaku Observation of Abell 1689: Anisotropic Temperature and Entropy Distributions Associated with the Large-Scale Structure」、T03a

- [117] 渡邉瑛里、滝沢元和、中澤知洋、岡部信広、川原田 円、浜名崇、宮崎聡:「X線と弱重カレンズによる ZwCl0823.2+0425銀河団周辺の大規模構造フィラメ ントの解析」、T05a
- [118] 岩橋孝典、玉川徹、早藤麻美、小波さおり、阿佐美 ふみ、吉川瑛文、太田真秀、牧島一夫、Jean Swank、 Keath Jahoda ほか:「X 線偏光観測衛星 GEMS を 模擬した X 線偏光計のバックグラウンドシミュレー ション」、W32a
- [119] 中澤知洋、牧島一夫、国分紀秀、渡辺伸、高橋忠幸、 深沢泰司、片岡淳、寺田幸功、山岡和貴、玉川徹、田 島宏康ほか:「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H (ex-NeXT) 搭載硬 X 線イメージャ(HXI)の開発の現状 (IV) 、W45a
- [120] 神頭知美、寺田幸功、田代信、岩瀬かほり、湯浅孝 行、能町正治、高橋忠幸、国分紀秀、尾崎正伸、石崎 欣尚ほか:「ASTRO-H 衛星における SpaceWire を 用いた時刻配信方法の検証 (2)」、W55a

その他の学会、セミナー

- [121] 牧島一夫、榎戸輝揚、中川友進、早藤麻美、寺田幸 功、神頭知美ほか:「『すざく』衛星によるマグネター 研究の最新成果(1)」,第10回宇宙科学シンポジウ ム,2010年1月7-8日,JAXA宇宙科学研究本部
- [122] 榎戸 輝揚:「宇宙最強の磁石"マグネター"のX線 観測、GCOE「未来を拓く物理科学結集教育研究拠 点」第3回RAキャンプ,(2010年2月19日,静岡)
- [123] 榎戸 輝揚「『すざく』衛星によるマグネター天体の X線観測」、高エネルギー宇宙物理連絡会(高宇連)第 10回博士論文発表会(2010年3月8日, JAXA宇宙 科学研究本部)
- [124] 榎戸 輝揚:「『すざく』衛星によるマグネター天体のX線観測、分子雲ジェット研究会(2010年3月19日,名古屋大学南半球宇宙観測研究センター)
- [125] Yamada, S.: "New observational insights into from Low/Hard to ery High state of black hole binaries with *Suzaku* satellite", High Energy Astrophys. Div. lunchtalk, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, USA (2010 March 19)
- [126] 奥村暁:「フェルミ望遠鏡で見る宇宙線と星間物質」、 名古屋大学宇宙電波グループ談話会(2010年4月6 日)
- <【特許】>
- [127] 複合繊維化プラスチック及び補強パネル、中澤知洋、 上原 聡、特願 2009-101259

6.2 高瀬研究室

高瀬研究室では,核融合研究に用いられる「トカ マク」と呼ばれるプラズマ閉じ込め装置の高性能化 に向けた研究を行っている。特に磁場によるプラズ マ閉じ込め効率の指標である β (=プラズマ圧力/磁 場圧力)を高くとれる「球状トカマク」(ST)という 方式の TST-2 装置を用いて研究を行っている。トカ マクプラズマは大域的には電磁流体力学(MHD)で 記述され、その安定性を維持するにはトーラス大周 方向の電流 (プラズマ電流 I_p)を駆動し, 定常的に 保つ必要がある。その有力な候補が高周波(RF)波 動による電流駆動である。現在2種類の方法を用い, 原理検証実験を行っている。また共同研究を通じて 高性能トカマクプラズマの自発電流発生機構の分析 を実施している。トカマクプラズマは遠非平衡の代 表的な物理系の典型例であり,その輸送現象は微視 的乱流揺動によって支配され,乱流の理解と制御法 の確立がプラズマ閉じ込めの高性能化を可能にする。 TST-2 装置の乱流揺動の詳細な計測を通じ,乱流揺 動の物理機構の解明を目指し,共同研究でプラズマ 中の乱流揺動に関わる遷移現象の分析を行っている。

6.2.1 TST-2 実験

TST-2 は柏キャンパスに設置された小型球状トカ マク型装置であり、プラズマ電流約100 kAの電磁 誘導で駆動されるオーミックプラズマや電子サイク ロトロン波(ECW)で駆動される RF プラズマを安 定に生成できる。ST は高 β で優れた MHD 安定性を もつが,核融合炉の小型化を実現するにはトーラス 内側に位置する中心ソレノイド(CS)を撤去する必 要がある。定常核融合燃焼時にはプラズマ電流をほ ぼ自発電流のみで維持することが可能であるが, ゼ ロから核融合燃焼に必要とされるレベルまでプラズ マ電流を非誘導法により立ち上げる方法はまだ確立 されていない。当グループでは3種類のRFを使った 実験研究を行っている。(1) 21 MHz の高次高調速波 (HHFW)によるプラズマ加熱, (2) 2.45 GHz の電子 サイクロトロン共鳴を利用したゼロからのプラズマ 立ち上げ, (3) 200 MHz の低域混成波(LHW)によ る RF 電流駆動の研究である。2009 年度には, LHW 電流駆動実験用の RF 電力伝送系等の整備, ECW を使ったプラズマ立ち上げの最適化,トムソン散乱 計測器やマイクロ波干渉計による観測研究が進捗し た。また, HHFW 加熱実験時の波動分析を行い, 強 いRF 電場による非線形波動物理現象の更なる解明 を目指した研究が行われた。

高周波加熱・電流駆動実験

TST-2 ではこれまで HHFW による電子加熱を研 究してきた。HHFW はイオンサイクロトロン周波数 の高次高調波帯の周波数を持ち,高 β プラズマ中で も伝播可能であり,ランダウ減衰や走行時間減衰に よる電子加熱が期待できる。TST-2 を含む ST 装置



 \boxtimes 6.2.10: Comparison of autopowers of the pump wave (black), lower sideband wave (blue), low frequency oscillation (red) and the bispectral power of the three components. The *y*-intercept corresponds to the propagating mode component. The low frequency oscillation has a zero *y*-intercept, indicating that it is driven entirely by nonlinear beating of the pump and lower sideband waves. The pump and lower sideband waves have finite *y*-intercepts, indicating the presence of propagating wave components. [Y. Nagashima, et al., Physical Review Letters, 2010 in press.]

で, HHFW 加熱実験中に, 非線形波動現象の代表例 であるパラメトリック崩壊不安定性(PDI)が発生 し,外部から入射されたポンプ波の周辺に低域・広 域サイドバンドやイオンサイクロトロン周波数帯の 低周波振動が観測されている。PDI はポンプ波強度 の空間勾配程度の空間スケールを持つ局所的な非線 形現象であるが, TST-2 では局所的磁場強度が大き く異なる場所でも同様の周波数にスペクトルピーク が観測されている。これは局所的であるはずの PDI の非局所性を表す興味深い結果であり,近年注目さ れている非局所的輸送現象の一つのチャンネルとし て ,その物理機構の解明は大きな関心事である。 我々 は,新しい非線形データ解析手法であるバイスペク トルパワー解析を実験データに適用し,以下のよう な物理機構と矛盾しない実験解析結果を得た。まず PDI がある空間点で発生することによって,低域サ イドバンド周波数をもつ伝搬モードと,伝搬しない イオンサイクロトロン準モードが励起される。次に その伝搬モードはプラズマ中を伝搬し、そのエネル ギーは離れた場所に伝達される。そして,ポンプ波 と低域サイドバンドとのビートによってプラズマを 振動させ,その結果観測位置によらず,同様なポン プ波・低域サイドバンド・低周波振動のスペクトル ークが観測される。この分析によって,単純なパ ワースペクトル解析からでは判別不可能な, ビート 成分と伝搬モード成分の差別化に初めて成功し, 観 測の背景に潜む物理機構の解明につながった。

昨年度までのHHFW加熱実験で,ポンプ波(HHFW) 成分の有意な周波数広がりが観測され,ポンプ波が プラズマ中を伝搬するにつれ散乱を重ね,周波数幅 が増大していくことが明らかとなった。今年度は,周 波数広がりの原因がPDIである可能性を検証すべく, 閾値パワーを見出すため低パワー(数W~1kW)で 実験を行った。低パワー入射時の周波数幅を昨年の



 \boxtimes 6.2.11: (a) Locations on RF magnetic probes on the midplane cross section of TST-2. (b) RF power dependence of the frequency width of the pump wave, measured by magnetic probes.

高パワー (30 kW ~ 250 kW) 入射時の周波数幅と比較 したところ,図 6.2.11 に示すように周波数幅に,入 射パワーに対する非線形な振る舞いは見られなかっ た。従って,周波数広がりの原因が PDI である可能 性は低いと考えられる。



 \boxtimes 6.2.12: Wave field distribution in the cross section of TST-2 plasma.

LHW による電流駆動の有効性を検討するため TST-2における波動の励起, 伝搬, 吸収を数値解析 コードを用いて評価した。波動励起は有限要素法コー ド COMSOL に基づく RF アンテナ解析コードを用 いて計算した。プラズマは冷たいプラズマ近似の誘電 率をもち ,強い損失をもつ媒体としてモデルされてい る。計算の結果, TST-2 で使用予定のコムラインア ンテナにより , 電場はポロイダル成分 , 磁場はトロイ ダル成分がそれぞれ支配的である速波(FW)の進行 波が励起されることが確認された。効率よい電流駆動 を達成するには FW が LHW にモード変換される必 要がある。回折効果を正しく取り扱える TORIC-LH 全波コードにより, TST-2 における LHW 電流駆動 実験の解析を行った。ECW で生成した低密度,低 電流プラズマでは LHW による中心電流駆動が可能 であることが示された。電流を増加させている間は 低密度に保つことが重要であり,中心電流駆動を保



 \boxtimes 6.2.13: Power spectrum of the RF signal measured by an RF magnetic probe inside TST-2 vacuum vessel.

つためには,電流が増加するにつれて磁力線方向の 波数を減少させる必要がある。これらの計算結果お よびTST-2における初期実験結果に基づき,電流立 ち上げ実験のために適正な偏波および波数スペクト ルの制御性をもつ,最適化されたLHWアンテナの 設計を行う。電流駆動効率を保守的に見積もっても TST-2において200kWのRFパワーで駆動できる 電流は150kA程度であり,本手法による100kAレ ベルへの電流立ち上げの有効性を評価するのに適切 であると判断できる。本手法は核融合発電炉でも,低 密度,低電流の初期プラズマを追加熱をするのに十 分な電流レベルまで立ち上げるのに使うことができ る。TST-2における実験の成功は低アスペクト比の 核融合炉に必要な CS 性能を定量的に評価する科学 的基盤を与える。

LHW 非誘導電流駆動実験に向けて,本年度は RF 発振器(周波数200 MHz)4系統および伝送路の整 備を進め,HHFW 励起用アンテナを用いて200 MHz RFパワーのプラズマ入射を行った。図6.2.13 に,プ ラズマに RFパワーを入射した場合と入射しなかっ た場合の真空容器内磁気プローブで測定した RF 信 号のパワースペクトルを示す。2010年度には,進行 波を励起できるコムラインアンテナを用い,電子加 熱および電流駆動の効果を調べる予定である。

非誘導立ち上げ実験

ST型核融合炉の成立性は,非誘導立ち上げの成否 にかかっている。TST-2では,プラズマの無い状態 からST型トーラスプラズマをECWを使った非誘 導法で立ち上げる研究を行っている。本年度は,イ オン種の違いによる相違を,水素プラズマと重水素 プラズマを用いて調べ,密度・温度の計測および平 衡解析を行った。異なるイオン種の比較を行うため には,十分な壁洗浄を行い放電波形の再現性を確保 する必要がある。放電波形の履歴やプラズマからの 発光を調べたところ,オーミック放電による壁の放 電洗浄が有効であることがわかった。また,重水素 と水素の発光強度の解析から,重水素プラズマでも, 放電中に水素が壁から叩き出され,放電後半では水 素と重水素が同程度存在することが分かった。水素 放電と重水素放電を比較すると,後者の方がトカマ ク配位を形成するまでの時間が短いことがわかった (図 6.2.14)。加熱パワーを下げるとこの時間は長く なるので,重水素は水素よりも効率よく加熱されて いる可能性がある。加熱に用いる波の伝搬・吸収を 反映する漏洩電磁波を測定したところ,トーラス配 位形成直前に特徴的な振る舞いを示した。



 \boxtimes 6.2.14: Time evolutions of the plasma current for hydrogen (red) and deuterium (blue) plasmas.

5つの異なる経路のマイクロ波 (50 GHz) 干渉計を 整備し,経路積分密度を測定して2次元密度分布を 推定した。その結果,トーラス外側にバナナ状の高 密度領域が存在することがわかった。下記に述べる 温度測定から,この領域は温度も高いことがわかっ た。すなわちバナナ状の高圧力領域が存在する[12]。 平衡の観点から考えると,これは,非等方圧力の存 在,磁気軸付近の圧力が周辺部に比べて低くなるホ ロー型圧力分布の存在を意味する。新たに非等方圧 力を考慮した平衡解析を行った結果,バナナ状高圧 力領域を再現できる平衡解が存在することが分かっ た(図 6.2.15) [H. Kurashina, et al., Plasma Fusion Res., submitted]。

中性ヘリウムの発光線(706.5 nm, 728.1 nm)の 強度比は電子温度に依存することが知られている。 分光システムを新たに製作・設置して測定を行った。 衝突輻射モデルを用いて電子温度分布を推定したと ころ,電子温度が中心部より周辺部の方が高くなる 傾向がみられた。測定温度の絶対値は他の計測と系 統的な違いがみられた。これは,準位分布が低電子 密度では平衡に達していないためと考えられる。

非誘導電流立ち上げを補助するため,電子銃を用 いて電子を供給し,磁力線に沿った電流を供給する (coaxial helicity injection)ためのバイアス電源を製 作し,試験運転を行った[13]。

トムソン散乱計測

トムソン散乱計測は,プラズマの基本パラメータ である電子温度・電子密度を測定する手法として知ら れているが,散乱信号が微小であること,精度のよ



 \boxtimes 6.2.15: (a) Magnetic flux surfaces obtained from equilibrium analysis, and (b) shape of the high density region (red) and equilibrium pressure contours.



 \boxtimes 6.2.16: Relative error of the time integrated signal (open circles). Theoretical thermal noise (dashed line) and theoretical shot noise (solid line) are also plotted.

い絶対校正が必要であることから,システム構築に は高度な技量と経験が要求され,国内でも稼働して いるシステムは数少ない。本年度,レーザーパワー の増強による S/N 比の改善,多チャンネル化の準備 として新規ポリクロメータの設計・製作,マルチパ ス散乱光学系のための準備研究を行った。

現在用いているポリクロメータは,核融合科学研 究所の LHD 装置のために開発されたものである。 TST-2では,LHD で用いられているファイバーより も開口数の大きなファイバーを採用しており,新規 にポリクロメータを製作するにあたり,より大きな 開口数に対応できる光学系を設計した。また,後述 するマルチパスによる前方散乱,後方散乱計測を行 うためには,高速検出系が必須であり,APDのプリ アンプを設計・試作・評価した。試作した検出系では, パルス測定時の半値全幅は10 nsであり,従来に比 べて高速応答を得ることに成功した。また,測定誤 差を実験的,理論的に評価したところ,検出光子数 が500以上でショットノイズが支配的となり,ほぼ 理想的な特性であることが確認できた(図 6.2.16)。

前方・後方散乱による温度の非等方性の検出,低 密度プラズマの測定には,マルチパス入射光学系が 適している。マルチパス光学系として,簡便で効果 的であると考えられる球面鏡共焦点システムについ て検討・予備実験を行った。レーザー光路の解析的な 近似式を導出し,十分な精度を持つことを数値計算 と比較して確認した。また実際に,可視光を用いた 実験を行い,この近似式が成立していることを確認 した。近似式によって,光学系の設置・軸合わせ誤差 の影響を評価することが可能となり,実際にTST-2 装置に共焦点システムを導入した場合のアライメン ト精度の許容誤差を求めた。

トムソン散乱計測に用いるレーザーを出力 0.45 J のものから 1.6 J のものに交換した結果, S/N 比が 増加した。また,ポリクロメーターの校正分解能を 0.4nm に改善し,計測する波長分解チャンネルを 3 から 5 に増やした。このシステムを用いてオーミッ クプラズマの電子温度分布を求めることに成功した (図 6.2.17) [10]。



 \boxtimes 6.2.17: Electron temperature profile measured by Thomson scattering.

オーミックプラズマの揺動計測

TST-2 では MHD 緩和現象に伴う間欠的揺動, お よび間欠的/非間欠的な乱流揺動が観測されている。 本年度は硬エックス線測定器や周辺ラングミュアフ ローブを整備し,観測を行った。硬エックス線観測で は,オーム加熱によって高速電子が生成され,MHD 緩和現象に伴う揺動により高速電子が径方向外側に 輸送され,真空容器と衝突することによって硬エッ クス線が発生することが判明した[11]。またプラズマ 周辺部における,ラングミュアプローブによる間欠 的乱流揺動の解析により,周辺プラズマでは間欠的 揺動が径方向輸送を大きく担うことが明らかになっ た[14]。一方,トカマクの乱流輸送モデルでは,温 度勾配に起因する乱流揺動が重要な役割を担ってい るが,その同定には乱流温度揺動の計測が必要であ り、本年度は条件付き場合分けによる電子温度揺動 の計測法を開発した [Y. Nagashima, et al., Plasma Fusion Res., Special Issue, in press. J. Ozaki, et al., Plasma Fusion Res., submitted.

6.2.2 UTST 実験



 \boxtimes 6.2.18: Spatial distribution of the RF toroidal magnetic field amplitude on the *R*-*z* plane for (a) single-strap excitation and (b) double-strap excitation. The field amplitude decreases rapidly in the evanescent region outside the plasma boundary shown by the black ellipse. [T. Wakatsuki, et al., Plasma Fusion Res., in press.]

ST で実現できる高 β および高閉じ込め特性を活用 すれば,小型装置で体積中性子源或いは発電実証を 実現し,核融合開発の加速に貢献できる。UTST は ST の特徴である高 β を更に高めた「超高ベータ ST プラズマ」を生成・維持する新手法の開発を目的とし て建設された。ST 核融合炉で採用されるためには, トーラス中心部に位置する CS を用いない方法でな ければならない。UTST では,真空容器外に配置さ れた上下2 対のコイルが作る磁気中性点付近に2 個 の ST プラズマを生成し,軸対称合体させる。磁場強 度は 0.15 T 程度で,合体後には大半径 0.4 m, アス

ペクト比2, 最大プラズマ電流100kA 程度の高ベー タ ST プラズマ生成に成功している。プラズマ加熱 は合体に伴う磁気リコネクション(磁力線の繋ぎ換 え)による磁場から粒子へのエネルギー変換による と考えられる。このようにして生成された高ベータ ST プラズマの加熱・維持を目的として HHFW の入 射を行った。ダブルストラップアンテナによりトロ イダルモード数 ±8 の波,シングルストラップアン テナによりモード数0を中心とした幅広いモード成 分をもつ波を励起した。UTST 内部に挿入されてい るトロイダル方向,鉛直方向の磁場を計測する9×9 の磁気プローブアレイを用いて, RF磁場の空間分 布を直接計測した。波動磁場はトロイダル方向偏波 が強く,HHFWの励起と矛盾しない。またRF磁場 振幅分布からは,真空容器内側で磁場振幅が小さく なっていることが分かった 6.2.18。更に遅延時間解 析から波動の吸収は弱く,波動が長い距離をトロイ ダル方向に伝播していることを示す結果が得られた。 しかし, TST-2 における HHFW 加熱実験で見られ たような PDIは, UTST 実験では今のところ観測さ れていない。

6.2.3 CHS 装置の閉じ込め遷移現象の実 験解析

高閉じ込めモード (H-mode) プラズマへの遷移を トリガーする物理機構は現在でも判明していない重 要な研究テーマである。H-mode で観測されている 速度シアの生成要因として,乱流渦の傾斜による乱 流から平均速度シアへの運動量輸送が重要な役割を 担うと考えられている。核融合研・九州大学との共同 研究で CHS プラズマの H-mode プラズマの乱流揺 動の実験解析の結果,遷移前に乱流レイノルズ応力 の増大とそれに対応した静電ポテンシャル構造の変 動の観測に成功した [Y. Nagashima, Plasma Fusion Res., in press]。ポロイダル方向と径方向の速度揺動 間の位相解析を行い,遷移の前で平均的なポテンシャ ル変動の兆候が無い時間帯では位相差が -π/2 程度 であったのが,遷移の前に平均ポテンシャルの変動 が始まるのとほぼ同期して0に近づくことが判明し, 確かに乱流渦の傾斜の発生の観測に成功した。

<報文>

(原著論文)

- M. Sasaki, K. Itoh, A. Ejiri and Y. Takase: "Transient excitation of zonal flows by geodesic acoustic modes", Plasma Phys. Control. Fusion **51** 085002 (2009).
- [2] Y Nagashima, K Itoh, A Fujisawa, K Shinohara, S-I Itoh, T Ido, M Yagi, K Hoshino, A Ejiri, Y Takase, K Uehara and Y Miura: "Boundary of the geodesic acoustic eigenmode in the vicinity of the magnetic separatrix", Plasma Phys. Control. Fusion **51** 065019 (2009).
- [3] A. Ejiri, Y. Takase, T. Oosako, T. Yamaguchi, Y. Adachi, O. Watanabe, Y. Nagashima, B.I.

An, H. Kobayashi, H. Kurashina, H. Hayashi, H. Matsuzawa, K. Yamada, H. Tojo, T. Masuda, M. Sasaki, R. Kumazawa, H. Kasahara and F. Shimpo: "Non-inductive plasma current start-up by EC and RF power in the TST-2 spherical tokamak", Nucl. Fusion **49** 065010 (2009).

- [4] T. Oosako, Y. Takase, A. Ejiri, Y. Nagashima, Y. Adachi, H. Kasahara, T. Yamada, O. Watanabe, H. Tojo, S. Kainaga, J. Sugiyama, T. Yamaguchi, B. An, H. Hayashi, H. Kobayashi, H. Kurashina, H. Matsuzawa, K. Yamada, R. Kumazawa, F. Shimpo, Y. Ono, T. Masuda and M. Sasaki: "Parametric decay instability during high harmonic fast wave heating experiments on the TST-2 spherical tokamak", Nucl. Fusion **49** 065020 (2009).
- [5] H. Tojo, A. Ejiri, Y. Takase, Y. Nagashima, O. Watanabe, Y. Adachi, T. Oosako, T. Yamaguchi, B.I. An, H. Kobayashi, H. Kurashina, H. Matsuzawa, K. Yamada, M. Sasaki, T. Masuda: "Phase Alignments between MHD Modes Followed by Minor Collapses on TST-2", Plasma Fusion Res. 4 015 (2009).
- [6] Y. Nagashima, A. Ejiri, A. Fujisawa, and Y. Takase: "Calculation of Beam Trajectories of a Heavy Ion Beam Probe Diagnostic in the TST-2 Spherical Tokamak", IEEJ Trans. FM, **129** pp.575 (2009).
- [7] M. Sasaki, K. Itoh, A. Ejiri, Y. Takase: "Poloidal eigenmode of the geodesic acoustic mode in the limit of high safety factor", J. Plasma Phys. 75 721 (2009).
- (学位論文)
- [8] 増田鉄也: "Analysis of Tokamak Plasmas with High Self-Driven Current (高自発電流をもつトカマクプ ラズマの解析)"(博士論文).
- [9] 大迫琢也: "A Study of the High Harmonic Fast Wave in Spherical Tokamak Plasmas (球状トカマ クプラズマにおける高次高調速波の研究)"(博士 論文).
- [10] 山口隆史: "Electron temperature and density measurements by Thomson scattering in the TST-2 spherical tokamak (TST-2 球状トカマクにおける トムソン散乱による電子密度・温度計測)"(修士 論文).
- [11] 安秉日: "X 線測定による球状トカマクプラズマにお ける電磁流体力学的現象の研究"(修士論文).
- [12] 倉品博樹: "TST-2 球状トカマクにおける非誘導立ち 上げプラズマの電子密度分布計測"(修士論文).
- [13] 林裕之: "電子サイクロトロン共鳴加熱プラズマにお ける熱放出型電子銃を用いた電流制御の研究"(修士 論文).
- [14] 山田幸太郎: "TST-2 プラズマのスクレイプオフ層に おける静電プローブを用いた揺動測定"(修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [15] T. Oosako, et al.: "High Harmonic Fast Wave experiments on TST-2 and UTST": The 18th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas, Gent, Belgium, June 24-26, 2009.
- [16] A. Ejiri, et al.: "Microwave reflectometry and interferometry in the TST-2 spherical tokamak": International Workshop on Microwave - Laser Diagnostics for burning plasma experiment (IWML-2009) Toki, Aug. 17-18, 2009.
- [17] T. Yamada, et al.: "Merging Start-up and Sustainment Experiments on UTST": The 15th International Workshop on Spherical Tori 2009, Madison, USA, Oct. 22-24, 2009.
- [18] Y. Takase, et al.: "RF Experiments on TST-2": American Physical Society 51st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Atlanta, USA, Nov. 2-6, 2009.
- [19] Y. Nagashima, et al.: "Observation of non-locality of parametric decay during rf injection experiments on TST-2": American Physical Society 51st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Atlanta, USA, Nov. 2-6, 2009.
- [20] T. YAMADA, et al.: "Spherical tokamak start-up and sustainment experiments on UTST": American Physical Society 51st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Atlanta, USA, Nov. 2-6, 2009.
- [21] R. Imazawa, et al.: "Experimental Demonstration of Double Null Merging Start-up on UTST": American Physical Society 51st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Atlanta, USA, Nov. 2-6, 2009.
- [22] T. Wakatsuki, et al.: "Measurements of HHFW profile in UTST": American Physical Society 51st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Atlanta, USA, Nov. 2-6, 2009.
- [23] A. Ejiri, et al.: "Development of a bright polychromator for Thomson scattering measurements": 19th International Toki Conference, Toki, Japan, Dec. 8 - 11, 2009, P1-81
- [24] T. Yamaguchi, et al.: "Development of a Thomson scattering system in the TST-2 spherical tokamak": 19th International Toki Conference, Toki, Japan, Dec. 8 - 11, 2009, P1-82
- [25] M. Sugihara, et al.: "Density regime of low-aspectratio RFP plasmas in RELAX": 19th International Toki Conference, Toki, Japan, Dec. 8 - 11, 2009, P2-34
- [26] Y. Nagashima, et al.: "Nonlinear phenomena of edge fluctuations in RF range during high harmonic fast wave heating experiments in the TST-2 spherical tokamak": US-Japan RF WorkShop, General Atomics USA, Mar. 8-10, 2010.

招待講演

- [27] Y. Takase, for the TST-2 Group: "Equilibrium Analysis of EC-Sustained and RF-Sustained ST Plasmas": The 18th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas, Gent, Belgium, June 24-26, 2009.
- [28] Y. Takase, Y. Ono, T. Maekawa, H. Zushi: "ST Research in Japan (invited)": MAST Research Forum, Culham, UK, Sep. 14-15, 2009.
- [29] Y. Takase, TST-2 Team, UTST Team: "RF Startup, Heating and Current Drive Studies on TST-2 and UTST (invited)": The 15th International Workshop on Spherical Tori 2009, Madison, USA, Oct. 22-24, 2009.
- [30] H. Idei, et al.: "Recent Progress in QUEST and Development of CW EBWH/CD System (invited)": The 15th International Workshop on Spherical Tori 2009, Madison, USA, Oct. 22-24, 2009.

(国内会議)

一般講演

- [31] 江尻晶,高瀬雄一:"非誘導トカマク立ち上げ過程に おける電場,粒子軌道,電流":日本物理学会2009年 秋季大会(熊本)2009年9月25日-28日:28pYP-6
- [32] 花田和明,他: "QUEST における高周波を用いた電 流立ち上げ":日本物理学会 2009 年秋季大会(熊本) 2009 年9月 25日-28日:28pYP-2
- [33] 永島芳彦,他: "高次高調速波入射実験中のパラメト リック崩壊に伴う揺動のプラズマ表面近傍の振る舞 い":日本物理学会 2009 年秋季大会(熊本)2009 年 9月25日-28日:25aYP-2
- [34] 大迫琢也,他: "UTST 球状トカマクにおける 高次 高調速波空間分布測定":日本物理学会 2009 年秋季 大会(熊本)2009 年 9 月 25 日-28 日:25aYP-1
- [35] 江尻晶: "TST-2 における非誘導立ち上げ実験 とモ デリング":自律燃焼系プラズマでの特性予測の高精 度化に向けたトロイダルプラズマの閉じ込め・輸送に 関する体系的研究」及び核融合エネルギーフォーラム 「閉じ込め・輸送サブクラスター会合」合同研究会プ ログラム(土岐)2009年1月8-9日
- [36] 江尻晶,高瀬雄一: "高周波波動およびマイクロ波反射計を用いた高周波 tae 計測模擬実験":特定領域「プラズマ燃焼のための先進計測」及び核融合エネルギーフォーラム計測サブクラスター合同シンポジウム/ 講演会(土岐)2010年2月24-26日
- [37] 平塚 淳一,山口 隆史,高瀬 雄一,江尻 晶: "共焦点ミラーを用いたトムソン散乱計測":第13回若手科学者によるプラズマ研究会(那珂)2010年3月10-12日
- [38] 山口隆史,他:"ECH スタートアッププラズマにおけるトムソン散乱計測":第13回若手科学者によるプラズマ研究会(那珂)2010年3月10日-12日
- [39] 永島芳彦,他: "コンディショナル法による電子温度 揺動の推定":第65回日本物理学会年次大会(岡山) 2010年3月21日

招待講演

- [40] 永島芳彦: "若手企画講演 プローブデータの揺動解析 入門": プラズマ科学のフロンティア 2009 研究会(土 岐) 2009 年 9 月 2 日-4 日
- [41] 永島芳彦: "乱流プラズマの構造形成と選択則の総合 的研究 4. 基礎プラズマ乱流実験研究": プラズマ・核 融合学会第 26 回年会(京都)2008 年 12 月 1 日-4 日, シンポジウム IV-5

6.3 坪野研究室

本研究室では重力および相対論に関する実験を行っているが、その中でも重力波検出実験は一貫して最大の研究テーマとなっている。今年度はそれまで助教を務めていた安東正樹氏が京大准教授に転出し、かわりに麻生洋一氏が助教に着任した。

重力波は光速度で伝搬する時空のひずみであり、 超新星爆発や連星中性子星の合体などの非常に激し い天体現象にともなって発生する。また宇宙のごく 初期に起源をもつ重力波も予想されており、将来的 には重力波によって、電磁波では決して見ることが できない宇宙の姿をとらえるようになると期待され る。これらの重力波観測によって、新しい分野「重 力波天文学」を確立することが現在の重力波研究の 目的である。重力波を使って宇宙を見ることは、人 類の新たな知の開拓につながる。

これまでの研究では、TAMA300による重力波探 査と、次世代レーザー干渉計 LCGT の開発が2つの 主軸となっていた。最近これにくわえて、宇宙空間 を利用した重力波検出計画が構想されるようになっ た。地上に干渉計を作る限り、基線長の制限や地面 振動といった障害は避けることができない。しかし 自由な宇宙空間ではこれらの制限が取り払われ、理 想的な環境が期待できる。特に、地上では不可能な 低周波の重力波検出が可能となることが大きな魅力 である。われわれは、日本独自のスペース重力波検 出器 DECIGO を提唱している。これを実現するため の基礎研究として、小型衛星を用いた予備実験など の準備を進めている。これらの基礎研究をもとにし て、DECIGO によって巨大ブラックホールや宇宙初 期のインフレーションに起源をもつ重力波をとらえ ようとする計画を推進中である。[42, 52, 55, 57, 58]

6.3.1 地上レーザー干渉計重力波検出器

次期大型レーザー干渉計計画 LCGT

日本のグループが中心となって進めている LCGT 計画は、基線長 3km のレーザー干渉計型重力波検 出器を神岡地下のサイトに建設するものである。こ の重力波検出器では、干渉計を構成する鏡を 20 K の 低温に冷却するとともに、高出力レーザー光源を用 い、干渉計方式を RSE と呼ばれる方式を採用する 事で、TAMA より 2 桁以上高い感度が実現される。 それによって、連星合体からの重力波については約 200 Mpc 遠方のイベントまで観測する事ができる見 込みである。その範囲にある銀河数を考慮すると、1 年に 10 回程度の頻度で重力波イベントを観測できる ことが期待できる。また、もし我々の銀河系内で超新 星爆発が発生すれば、そこからの重力波も、LCGT によって十分観測可能である。[2, 13, 32, 49]

LCGT の設計

坪野研究室では麻生が LCGT 干渉計制御グルー プ及び SPI 特別作業部会のリーダーとして、LCGT の設計をさらに深める作業を進めた。干渉計制御グ ループでは、複雑な光学構成を持つ LCGT の制御系 設計を最新のシミュレーション手法で見直し、単純に 制御可能であるというのにとどまらず、制御雑音が 目標感度を損なわないような変調方法、信号ポート、 フィードバックトポロジーを開発した。また、SPI 作 業部会では、干渉計のロック手法、動作時の安定化 方法について、最新の R&D 成果を取り入れて、大 幅な改訂を行った。[2, 3, 4, 16, 17]

6.3.2 宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO

DECIGO

DECIGO(DECi-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory)は、日本のグループが中心とな り、2027年ごろの打ち上げを目指して検討が進められ ている宇宙空間重力波望遠鏡計画である.DECIGO は、互いに1000km離れた3台のスペースクラフ ト内に収められた鏡の間の距離をレーザー干渉計を 用いて精密に測定することで重力波を観測する装置 である.DECIGOは、連星中性子星や連星ブラック ホールの合体現象に関してはほぼ宇宙全体を観測範 囲に持ち、また、初期宇宙で発生した重力波を直接 捕らえることができるだけの感度を持つ、非常に強 力な観測装置になるはずである.

DECIGOは,2025年ごろの観測を目指して,検討 が進められている.[1,9,12,24,25,22,23,27,45,56]

DECIGO パスファインダー

DECIGO 計画では, その前に2つの前哨衛星を打 ち上げ,技術成熟度を段階的に向上させていくロード マップが立てられている.DECIGOパスファインダー (DPF) はその最初の前哨衛星であり,高度 500 kmの 地球周回軌道に投入される 350 kg 級の小型衛星とし て設計が進められている、衛星内にはミッション機 器として,ドラッグフリー制御によって衛星内に非接 触保持された2つの試験質量(鏡)と安定化レーザー 光源,小型・低雑音スラスタを搭載する.これらの 鏡で構成された基線長 30 cm のファブリ・ペロー干 渉計の基線長変化を,安定化 Nd:YAG レーザー光源 を用いて測定することで,0.1-1 Hz 付近での重力波 観測を行う. DPF では, 中間質量ブラックホール合 体からの重力波をターゲットとしており,我々の銀 河内のイベントを観測できるだけの感度を持ってい る.また,地球重力場観測や,宇宙空間での精密計 測のための先進科学技術の実現など幅広い成果が期 待できる.

DPFは, JAXA が進めている小型科学衛星シリーズの候補の1つになっており,衛星システム検討と

基本サブシステムの試作と性能評価が進められている.[6,11,26,28,40,47,53]

DPF レーザーセンサー

DPFのミッションには重力波の測定だけではなく, 地球の微細な重力場構造を示すジオイド高を測定す るという計画もある.このジオイド高は主に,地球 の水分量が変化する事に伴う地球の質量密度分布の 変化に影響されるため,重力場を長期間にわたり観 測すれば地球上の水の貯蓄量,流れ,質などを見積 もる事ができる.これにより,近年増加する人口の 増加に伴い増え続ける水の需要への対策などといっ た社会的貢献が期待されている.

マスを加速度計として用いる方法では、衛星中に 非接触に置いたマスが衛星に追随するように制御を 行う。この時,衛星にかかる力は重力場と太陽風な どによる外乱となり,マスにかかる力は重力場と制 御信号となるため,制御信号から外乱を見積もる事 ができ,GPSによる衛星の位置情報と合わせれば重 力場が測定できるという仕組みになっている.

制御の際には,レーザーセンサーによってマスの位 置を感知して行う。レーザーセンサーは,波長1550nm の光を用いた差動マイケルソン干渉計型のものであ る.まず制御を行うための地上実験として、懸架し たマス (アルミ製,約700g)をレーザーセンサーのフ リンジが飛ばない範囲にまで振動を抑える制御実験 を行った.この際, xPC target という MATLAB 上 で起動できるデジタル信号処理システムを用いてデ ジタル制御フィルターを用いた.これにより,マスの 振動をおよそ 1µm 程度にまで抑えることに成功し, レーザーセンサーでの制御が可能である事を実証し た.また,重力場の観測精度がレーザーセンサーだ けで決定されると仮定すれば,ジオイド高を 0.1µm の精度で決定できる事が明らかになったが,実際は GPS などの他の機器の精度で制限されてしまう可能 性が高く,現在検討中である.[29,46]

DPF 向け Fabry-Perot 干渉計実験

DPFには鏡をとりつけた2つの試験質量からなる Fabry-Perot 共振器、ガラス板の上に光学素子をシリ ケートボンディングして作られるモノリシックな入出 射光学系、そして全体を囲う熱シールドからなる干渉 計モジュールが搭載される。DPFではFabry-Perot 共振器の共振器長をPound-Drever-Hall(PDH)法を 用いて、試験質量の周りに取り付けられた静電アク チュエータによって制御することで重力波の観測を 行う。ここでPDH法とは共振器に入射するレーザー 光に位相変調をかけることで、反射光から共振器長 変動に比例した信号を取り出す手法である。

坪野研究室ではこの干渉計モジュールの Bread Board Model(BBM)を開発し、地上における動作確認や性 能評価を行っている。

2009 年度はこの BBM に向けた準備として、試験 質量の懸架系を製作し、光学定盤上にバラック組み した入射光学系を用いて Fabry-Perot 共振器の共振 器長制御実験を行った。アクチュエータとしてはコ イル-マグネット型のものを用いており、現在までに SWIM_µ, の気球実験で用いられた FPGA を使った デジタル制御を成功させている。

今後は入射光学系としてモノリシック光学系を導入し、共振器長制御に加えて Wave Front Sensing を 用いた鏡のアラインメント制御を行うなど、引き続 き干渉計モジュールの BBM 開発を進めていく予定 である。[31]

DPF を利用した地球重力場観測

DPFでは、2つのテストマスに取り付けられたミ ラーがFabry - Perot 共振器をつくる。この2つの テストマスは潮汐力によって距離が伸縮するので、こ れを利用すると高感度な重力勾配計として機能させ ることが可能である。計算によると短波長の重力変 動に対しては、これまでのGRACE やGOCE など の重力探査衛星を凌ぐような高感度が実現可能であ る。このような超高感度な重力勾配計は、海洋探査、 気候変動、地殻変動などの研究分野で求められてい るものであり、DPF が達成するサイエンスのひとつ として重要である。[30, 41]

$\mathbf{SWIM}_{\mu\nu}$

SWIM (SpaceWire Interface demonstration Module) は、次世代の宇宙用通信規格 SpaceWire を持った 汎用小型演算処理・制御システムである。JAXA(宇宙 航空研究開発機構)が開発した小型実証衛星 (SDS-1) に搭載され、2009 年 1 月 23 日に打ち上げ・軌道投 入が成功裏に行われた。

この SWIM の超小型宇宙実験プラットホーム開発 の一環として、我々は超小型重力波検出器 (SWIM_{$\mu\nu$}) を開発し、その運用を現在まで順調に行っている。こ の超小型重力波検出器は、小型であるために、地上の 大型重力波検出器に匹敵する感度は実現できないが、 試験質量変動の検出や非接触制御など、将来の本格 的な宇宙空間重力波検出器のための実証試験をする 最初のステップとなる。また、DECIGO Pathfinder で適用されるものとほぼ同等の機能部品を用いてい るため、それらによって構築されたシステムの宇宙 実証を行う、という重要な役目も担っている。

2009 年 2 月から 1 年以上にわたって行われている SWIM 運用により、SpaceCube2 の宇宙における動 作実証、SpaceWire/RMAP を用いた信号処理シス テムの実証を達成した。SpaceWire/RMAP 通信は すでに累積 100 万回以上のアクセスをエラーなく実 施できている。さらに、SWIM_{µν} を運用しデータを 回収することで、その正常動作を確認し、重力波検出 器としての性能評価を進めてきた。具体的には、2009 年 5 月に SWIM_{µν} が内部で保持する「試験マス」の 完全非接触な支持に成功したことを確認した。さら に 2009 年後半に SWIM_{µν} 試験マス制御の伝達関数 の測定を、少ないデータ量の制限を克服しつつ完了 した。2010年1月以降は、SDS-1衛星が3軸姿勢制 御に移行した状態においてSWIM_{$\mu\nu$}のノイズレベル を測定し、定常時のスピン安定状態のそれに比べて悪 化しないことを確認した。これは、観測時にセンサを 天球上の一定の方向に向けることができるという良 好な結果を意味するものである。[10, 21, 39, 48, 54]

6.3.3 磁気浮上型重力波検出器の開発

超伝導磁気浮上型重力波検出器による観測

低周波重力波にはブラックホール合体や初期宇宙 に天文学的-宇宙論的に非常に興味深い重力波源があ る。しかし、現在の地上レーザー干渉計型重力波検 出器は懸架系の共振周波数がその観測帯域の下限を 制限する。そこで、我々は0.1-1Hz帯域の低周波で 重力波を探索するために、磁気浮上を利用した新し い検出器を提案している。

本年度は、観測とデータ解析まで含むプロトタイプ 実験を行った。プロトタイプ検出器は、超伝導磁気 浮上で非接触支持された棒状の試験質量(質量133g、 長さ20cm)と重力波による試験質量の回転変動を読 み取るための Michelson 干渉計からなっている。超 伝導磁気浮上は、試験質量上部に取り付けたネオジ ウム磁石(22mm,t10mm)とその上部に置かれた 第2種超伝導体とのピン止め効果で実現されている。 我々は、各種雑音対策の結果、地面振動と磁場雑音 で決まるデザイン雑音レベルでプロトタイプ検出器 を動作させることに成功した。

また、2009年夏に一晩の簡易観測を行い、0.1-1Hz 帯 域ではじめて、宇宙論的な背景重力波に対する制限 と最長の電波パルサー (PSR J2144-3933)に対する上 限値を求めた。0.2Hz の帯域 10mHz で宇宙の臨界密 度で規格化された背景重力波の上限値は、8.1×10¹⁷ であった。また、パルサー起源の重力波振幅に対し てはベイズ的な上限値 8.4×10⁻¹⁰ を得た。それぞれ 95%の信頼度である。

こられにより、我々の提案する新しい検出器の原理 的な動作と将来の可能性に対する指針を得た。[5,8, 14,18,19,20,35,43]

超伝導磁気浮上重力波検出器における磁場雑音の研究

超伝導磁気浮上型重力波検出器においては外部磁 場が重力波に対する検出器の雑音となる。これは重 力波の潮汐力を受けるねじれ振り子に浮上磁石が取 り付けられており、これが外部磁場により外力を受 けるためである。大型のコイルと磁場センサーを用 いてこの外部磁場による雑音の推定を行ったところ、 およそ0.1 Hz 以下において検出器の雑音と一致して おり、重力波に対する感度を制限していることがわ かった。また、磁場センサーにより外部磁場の測定 を行ったところ夜の1時半から4時半の時間帯に低 減しているということが観測され、検出器の雑音も この時間帯に下がっている。現在、この磁場の発生 源は特定できていないが、磁気シールドによる対策 を考えている。外部磁場を十分に遮蔽するには装置 全体を覆う大掛かりな磁気シールドを構築する必要 があり、その前段階として有限要素法による磁場シュ ミレーションを行う予定である。[15,33,44]

6.3.4 非古典光を用いたレーザー干渉計の 高感度化

スクイーズド光を用いたレーザー干渉計の高感度化

現在、レーザー干渉計型重力波検出器の高周波帯 における感度はレーザーパワーの量子論的揺らぎ(散 射雑音)によって制限されている。散射雑音は、準 古典的にはレーザー光源から発せられる光子数の統 計的な揺らぎとも解釈できるため、レーザーの強度 を大きくし、光子数を増やすことで低減することが できる。従来、散射雑音はこのようなレーザーの大 出力化によって低減してきたのであるが、近年の量 子光学の発達により、量子揺らぎそのものを低減す ることが可能になった。大出力のレーザー開発やそ れに耐えうる光学素子の研究が成熟しつつある中で、 この新しい手法による散射雑音の低減は大きな注目 を集めている。

具体的な手法としては、非線形光学結晶を用いる。 これによって相関を持った2つの光子による対を作 成し、量子雑音を低減することができる。この際、低 減した雑音の共役な物理量は反対に増大してしまう ので、増大した物理量の影響が干渉計に現れないよ う適切なコントロールを行う必要がある。

坪野研究室ではこのようなスクイーズド光(実際 には、強度を持たないスクイーズド真空場)を用い た干渉計の散射雑音低減実験を行っている。2009年 度はスクイーズド光生成に必要な非線形光学結晶を 購入し、その特性評価やスクイーズド光生成光学系 (スクイーザー)の設計を行った。また、干渉計部分 の構成や、スクイーズド光導入の実装などの計画を 行っている。[37, 38, 50]

スクイーズド光の発生

スクイーズド光とは、共役な物理量の揺らぎが等 しくない状態であり、かつその一方は対称的な量子限 界よりも小さくなっている。我々の実験では、直交位 相振幅の揺らぎの一方を小さくした直交位相振幅ス クイーズド光を生成する。このような光を発生させ るには光子間に相関をもたせる必要があり、そのた めに非線形光学効果を用いる。具体的には、2次の非 線形光学効果である縮退パラメトリック増幅を共振 器の中で行う OPO (Optical Parametric Oscillator) を作成し、スクイーズド光を生成する。また、この 際必要になる第二次高調波を生成する。

重力波検出への応用では、その検出帯域である10Hz~ 10kHz において、量子限界を基準として-10dB 程 度揺らぎを小さくしたスクイーズド光の生成が目指 している。2009年度には、そのための目標値として 実験系のロスや、サーボ系の安定度などの上限値を 見積り、そして実験環境の整備を行った。[34,53]

6.3.5 超高安定レーザー光源の開発

低温サファイア光共振器を用いた超高安定光源

現在、光格子時計に代表される原子分光型周波数 標準の性能は、分光に用いるプローブレーザーの周 波数安定度によって制限されている。そこで坪野研 では今年度から光格子時計への応用を念頭に置いた 超高安定レーザーの開発に着手した。

周波数安定化には、長さを安定化した光共振器に レーザー光をロックするのが標準的な手法であるが、 この場合の安定度は光共振器の熱雑音で制限されて いることが知られている。そこで我々は、サファイア 製の共振器を低温にすることで熱雑音の低減を図る。 低温サファイアは高いヤング率や高熱伝導率、低熱 膨張率等、共振器材料として良好な性質を示す。ま た、この実験では、低温における高反射率コーティ ングの熱雑音を直接測定することも可能であると見 積もられている。これは、LCGTのような低温重力 波検出器にとって非常に有用な情報である。

本年度は低温サファイア共振器製作の可能性につ いて、その概念設計と理論計算によるノイズ見積り 等を行った。その結果、原理的には従来の安定度を 二桁ほど向上可能であることが示された。[36]

光共振器の支持法の研究

周波数基準として用いる光共振器に地面からの振 動が伝わると、弾性変形を通じて共振器の長さが変 動してしまう。この変動量は共振器の形状及び支持 方法の対称性によって大きく変わる。この変動を最小 化するような方法が既にいくつか提案されているが、 そのどれもが等方材料を用いたものである。サファ イアのような異方性結晶の場合については、有限要 素解析によって最適形状、支持方法を決定する必要 がある。我々は、有限要素解析パッケージ COMSOL を用いて共振器の変形をシミュレーションを行って いる。今年度は基礎的な形状についてシミュレーショ ンを行える所まで進んだ。

<報文>

(原著論文)

- Masaki Ando, Seiji Kawamura, Naoki Seto, Shuichi Sato, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono *et al.*, *DECIGO and DECIGO Pathfinder*, Class. Quantum Grav. 27 (2010) 084010.
- [2] Y. Aso, E. Goetz, P. Kalmus, L Matone, S. Márka,
 B. O'Reilly, J. Myers, R. Savage, P. Schwinberg,
 X. Siemens, D. Sigg, N. Smith, Accurate measurement of the time delay in the response of the

LIGO gravitational wave detectors, *Class. Quantum Grav.* **26** 055010, 2009.

- [3] B. Abbott, et al., Search for gravitational-wave bursts in the first year of the fifth LIGO science run, *Phys. Rev. D*, **80** 102001, 2009.
- [4] B. Abbott, et al., Search for high frequency gravitational-wave bursts in the first calendar year of LIGO's fifth science run, *Phys. Rev. D*, 80 102002, 2009.
- [5] Akiteru Takamori, Akito Araya, Yuji Otake, Koji Ishidoshiro, Masaki Ando: R&D Status of a New Rotational Seismometer Utilizing the Flux Pinning Effect of a Superconductor Bull. Seism. Soc. America, 99 (2009) 1174.
- [6] Masaki Ando, Seiji Kawamura, Shuichi Sato, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono *et al.*, DE-CIGO Pathfinder, Class. Quantum Grav. 26 (2009) 094019.
- [7] K Arai, R Takahashi, D Tatsumi, K Izumi, Y Wakabayashi, H Ishizaki, M Fukushima, T Yamazaki, M-K Fujimoto, A Takamori, K Tsubono, R De-Salvo, A Bertolini, S Marka, V Sannibale (for the TAMA Collaboration), T Uchiyama, O Miyakawa, S Miyoki, K Agatsuma, T Saito, M Ohashi, K Kuroda, I Nakatani, S Telada, K Yamamoto, T Tomaru, T Suzuki, T Haruyama, N Sato, A Yamamoto and T Shintomi (for the CLIO Collaboration) and (The LCGT Collaboration), Status of Japanese gravitational wave detectors , Class. Quantum Grav. 26-20 (2009) 204020.
- [8] Koji Ishidoshiro, Masaki Ando, Akiteru Takamori, Kenshi Okada, Kimio Tsubono: Gravitational wave detector realized a superconductor, Physica C, (in press).

(会議抄録)

[9] Masaki Ando, Seiji Kawamura, Shuichi Sato, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono, Akito Araya, Ikkoh Funaki, Kunihito Ioka, Nobuyuki Kanda, Shigenori Moriwaki, Mitsuru Musha, Kazuhiro Nakazawa, Kenji Numata, Shin-ichiro Sakai, Naoki Seto, Takeshi Takashima, Takahiro Tanaka, and the DECIGO working group, *DECIGO: the Japanese Space Gravitational Wave Antenna*, The ISTS Special Issue of Transactions of JSASS, Space Technology Japan, 2009-0-4-11v.

(会議抄録)

- [10] 安東正樹,穀山渉,石徹白晃治,森脇成典,新谷昌人,高橋走,麻生洋一,湯浅孝行,中澤知洋,高島健,高橋忠幸:SWIM に搭載した大学発の宇宙実験モジュール (SWIM_{µν}) 電子情報通信学会技術研究報告.SANE,宇宙・航行エレクトロニクス 109(101), 59-64, 20090618.
- [11] 安東正樹,川村静児,佐藤修一,中村卓史,坪野公夫, 田中貴浩,他,小型重力波観測衛星 DPF,宇宙科学 シンポジウム 集録 (2008 年 1 月 9 日,宇宙科学研究 本部).

[12] 安東正樹,川村静児,佐藤修一,中村卓史,坪野公夫, 田中貴浩,他,宇宙重力波望遠鏡 DECIGO,第52回 宇宙科学技術連合講演会集録(2008年11月07日 淡路夢舞台国際会議場,兵庫).

(国内雑誌)

[13] 安東 正樹, レーザー干渉計重力波検出器による精密 計測技術, レーザー研究 第 37 巻 (2009) pp.101-106.

(学位論文)

- [14] 石徹白晃治: Search for low-frequency gravitational waves using a superconducting magneticallylevitated torsion antenna, 博士論文, 2010 年.
- [15] 岡田健志:低周波重力波探査のための超伝導磁気浮上 型ねじれ振り子の研究、修士論文、2010年.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [16] Y. Aso, Remedies for low frequency vibration problems: SPI and other alternatives, 2009 Fujihara Seminar, Shonan Village Center, May 2009.
- [17] Y. Aso, R. Adhikari, S. Ballmer, A. Brooks, J. Betzwieser, J. Driggers, P. Kalmus, J. Miller, A. Stochino, R. Taylor, S. Vass, R. Ward, A. Weinstein, D. Yeaton-Massey, Testing Advanced LIGO length sensing and control scheme at the Caltech 40m interferometer, 8th Amaldi Conference on Gravitational Waves, Columbia University, NY, June 2009.
- [18] Koji Ishidoshiro, Masaki Ando, Hirotaka Takahashi, Akiteru Takamori, Kenshi Okada, Yoichi Aso, Nobuyuki Kanda, Kimio Tsubono, Search for continuous gravitational waves from PSR J2144-3933 using a magnetically-levitated torsion antenna, 14th Gravitational Wave Data Analysis Workshop (Jan. 26-29, 2010, Rome, Italy).
- [19] Koji Ishidoshiro, Masaki Ando, Akiteru Takamori, Kenshi Okada, Kimio Tsubono, Gravitational wave detector realized by a superconductor magnet, 22nd International Symposium on Superconductivity (Nov. 02 - 04, 2009, Epochal Tsukuba, Japan).
- [20] Koji Ishidoshiro, Masaki Ando, Akiteru Takamori, Kenshi Okada, Kimio Tsubono, Development of a low-frequency gravitational-wave detector using magnetically-levitated torsion antenn, 8th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (June 21 - 06, 2009, Columbia University, New York, USA).
- [21] Wataru Kokuyama, Masaki Ando, Shigenori Moriwaki, Koji Ishidoshiro, Kakeru Takahashi, Akito Araya, Yoichi Aso, Takeshi Takashima, Kazuhiro Nakazawa, Tadayuki Takahashi, Motohide Kokubun, Tetsuo Yoshimitsu, Hirokazu

Odaka, Takayuki Yuasa, Takehiko Ishikawa, Teruaki Enoto, Keiko Kokeyama, Shin-ichiro Sakai, Shuichi Sato, Akiteru Takamori, Kimio Tsubono, Tomoaki Toda, Tatusaki Hashimoto, Ayako Matsuoka: In-Orbit Operation of a Compact Gravitational Wave Detector on a Small Satellite, 8th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (June 24, 2009, Columbia University).

- [22] Masaki Ando, Seiji Kawamura, Shuichi Sato, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono et al., and the DECIGO working group, *DECIGO: the Japanese* Space Gravitational Wave Antenna, 27th International Symposium on Space Technology and Science (July 9, 2009, Tsukuba, Ibaraki).
- [23] Masaki Ando, Seiji Kawamura, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono, Takahiro Tanaka *et al.*, DECIGO and Pathfinder Missions, KEK Theory Center Cosmophysics Group Workshop (November 11, 2009, Tskuba, Ibaraki).

招待講演

- [24] Masaki Ando, Seiji Kawamura, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono, Takahiro Tanaka *et al.*, DECIGO and Pathfinder Missions, 8th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (June 24, 2009, New York, USA).
- [25] Masaki Ando, Seiji Kawamura, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono, Takahiro Tanaka *et al.*, DECIGO, the 58th Fujihara Seminar (May 29, 2009, Shonan Village Center, Kanagawa).

(国内会議)

一般講演

- [26] 安東正樹,川村静児,佐藤修一,中村卓史,坪野公夫, 新谷昌人,他,スペース重力波アンテナ DECIGO 計 画(15)パスファインダー,日本天文学会2010年春 季年会(2010年3月27日,広島大学).
- [27] 川村静児,安東正樹,瀬戸直樹,佐藤修一,中村卓 史,坪野公夫,高島健,船木一幸,沼田健司,神田展 行,田中貴浩,井岡邦仁,青柳巧介,我妻一博,浅田 秀樹 , 麻生洋一 , 新井宏二 , 新谷昌人 , 池上健 , 石川 毅彦 , 石崎秀晴 , 石徹白晃治 , 石原秀樹 , 和泉究 , 市 來淨與,伊東宏之,伊藤洋介,井上開輝,上田暁俊, 植田憲一,歌島昌由,江尻悠美子,榎基宏,戎崎俊 - , 江里口良治 , 大石奈緒子 , 大河正志 , 大橋正健 , 大原謙一,大渕喜之,岡田健志,岡田則夫,河島信 樹 , 川添史子 , 河野功 , 木内建太 , 岸本直子 , 國中均 , 國森裕生,黑田和明,小泉宏之,洪鋒雷,郡和範,穀 山涉,苔山圭以子,古在由秀,小嶌康史,固武慶,小 林史步,西條統之,齊藤遼,坂井真一郎,阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親, 佐々木節, 佐藤孝, 柴田大, 真貝寿明,杉山直,鈴木理恵子,諏訪雄大,宗宮健 太郎,祖谷元,高野忠,高橋走,高橋慶太郎,高橋忠 幸, 高橋弘毅, 高橋史宜, 高橋龍一, 高橋竜太郎, 高 森昭光,田越秀行,田代寛之,谷口敬介,樽家篤史, 千葉剛,辻川信二,常定芳基,豊嶋守生,鳥居泰男, 内藤勲夫,中尾憲一,中澤知洋,中須賀真一,中野寛

之,長野重夫,中村康二,中村真大,中山宜典,西澤 篤志,西田恵里奈,西山和孝,丹羽佳人,能見大河, 橋本樹明,端山和大,原田知広,疋田渉,姫本宣朗, 平林久,平松尚志,福嶋美津広,藤田龍一,藤本眞克, 二間瀬敏史,細川瑞彦,堀澤秀之,前田恵一,松原英 雄,蓑泰志,宮川治,宮本雲平,三代木伸二,向山信 治,武者満,森澤理之,森本睦子,森脇成典,八木綯 外,山川宏,山崎利孝,山元一広,柳哲文,横山順一, 吉田至順,吉野泰造,若林野花,スペース重力波アン テナ DECIGO 計画(24):設計・計画,日本物理学会 2010 年年次大会(2010 年 3 月、岡山大学、岡山).

- [28] 佐藤修一,鳥居泰男,若林野花,江尻悠美子,鈴木 理恵子,上田暁俊,川村静児,新谷昌人,安東正樹, 大渕喜之,岡田則夫,正田亜八香,道村唯太,坪野公 夫,麻生洋一,穀山渉,DECIGO pathfinderのため の試験マスモジュールの開発(4),日本物理学会2010 年年次大会(2010年3月、岡山大学、岡山).
- [29] 正田亜八香,道村唯太,穀山渉,麻生洋一,坪野公夫, 安東正樹,新谷昌人,佐藤修一,DECIGO Pathfinder 用レーザーセンサーの性能評価,日本物理学会2010 年年次大会(2010年3月、岡山大学、岡山).
- [30] 坪野公夫,正田亜八香,道村唯太,穀山渉,麻生洋一, 佐藤修一,川村静児,安東正樹,DECIGO pathfinder のFP 共振器を用いた高感度重力勾配計,日本物理学 会 2010 年年次大会(2010 年 3 月、岡山大学、岡山).
- [31] 道村唯太,正田亜八香,麻生洋一,佐藤修一,安東正 樹,川村静児,坪野公夫,DECIGO Pathfinder 向け プロトタイプ干渉計実験,日本物理学会2010年年次 大会(2010年3月、岡山大学、岡山).
- [32] 梶田隆章,黒田和明,中谷一郎,大橋正健,藤本眞克, 川村静児,斎藤芳男,鈴木敏一,坪野公夫,三尾典 克,神田展行,中村卓史,LCGT Collaboration,大 型低温重力波望遠鏡(LCGT)計画 XII,日本物理学会 2010 年年次大会(2010 年 3 月、岡山大学、岡山).
- [33] 岡田健志,石徹白晃治,高橋走,坪野公夫,安藤正樹, 麻生洋一,重力波検出器に用いる超伝導磁気浮上型ね じれ振り子の基礎特性研究 II,日本物理学会2010年 年次大会(2010年3月、岡山大学、岡山).
- [34] 松本伸之,高橋走,麻生洋一,坪野公夫,政田元太, 古澤明,重力波検出器の感度向上に向けたスクイー ズド光の生成実験 II,日本物理学会 2010 年年次大会 (2010 年 3 月、岡山大学、岡山).
- [35] 石徹白晃治,安東正樹,高森昭光,岡田健志,高橋弘 毅,麻生洋一,坪野公夫,超伝導磁気浮上型ねじれア ンテナによる PSR J2144-3933 起源の重力波探索,日 本物理学会 2010 年年次大会(2010 年 3 月、岡山大 学、岡山).
- [36] 穀山渉,麻生洋一,坪野公夫,高本将男,香取秀俊, 低温サファイア共振器を用いた超高安定レーザーの 開発,日本物理学会2010年年次大会(2010年3月、 岡山大学、岡山).
- [37] 高橋走,松本伸之,麻生洋一,坪野公夫,政田元太, 古澤明,子光学的手法を用いた重力波検出器の感度向 上実験 II,日本物理学会2010年年次大会(2010年3 月、岡山大学、岡山).

- [38] 高橋走, squeezed 光を用いた重力波検出器の感度向 上実験, GCOE「未来を拓く物理科学結集教育研究拠 点」 第 3 回 RA キャンプ (2010 年 2 月, ヤマハリ ゾートつま恋).
- [39] 穀山渉,安東正樹,森脇成典,石徹白晃治,高橋走, 新谷昌人,麻生洋一,高島健,中澤知洋,高橋忠幸, 国分紀秀,吉光徹雄,小高裕和,湯浅孝行,石川毅彦, 榎戸輝揚,苔山圭以子,坂井真一郎,佐藤修一,高森昭 光,坪野公夫,戸田知朗,橋本樹明,若林野花 SWIM 搭載超小型重力波検出器の開発・運用第 10 回宇宙科 学シンポジウム (2010 年1月8日,JAXA/ISAS).
- [40] 安東正樹,川村静児,佐藤修一,中村卓史,坪野公夫,新 谷昌人,他,小型重力波観測衛星 DPF と DECIGO, 第10回 宇宙科学シンポジウム (2010 年 1 月,宇宙 科学研究本部).
- [41] 坪野公夫,衛星搭載型重力勾配計,DPF サイエンス検 討会 (2009 年 11 月,東京大学、本郷).
- [42] 坪野公夫, 重力波プロジェクト成果報告, RESCUE 夏 の学校 (2009 年 9 月, カルチャーリゾート・フェス トーネ, 沖縄).
- [43] 石徹白晃治,安東正樹,高森昭光,岡田健志,松本伸之,坪野公夫,磁気浮上を利用した低周波重力波検出器の開発V,日本物理学会2009年秋季大会(2009年9月、甲南大学、兵庫).
- [44] 岡田健志,石徹白晃治,安東正樹,麻生洋一,坪野公 夫,重力波検出器に用いる超伝導磁気浮上型ねじれ振 リ子の基礎特性研究,日本物理学会2009年秋季大会 (2009年9月、甲南大学、兵庫).
- [45] 川村静児,安東正樹,瀬戸直樹,佐藤修一,中村卓史, 坪野公夫,船木一幸,沼田健司,神田展行,田中貴浩, 井岡邦仁,高島健,青柳巧介,我妻一博,浅田秀樹, 麻生洋一,新井宏二,新谷昌人,池上健,石川毅彦, 石崎秀晴,石徹白晃治,石原秀樹,市來淨與,伊東宏 之,伊藤洋介,井上開輝,上田暁俊,植田憲一,歌島 昌由,江尻悠美子,榎基宏,戎崎俊一,江里口良治, 大石奈緒子,大河正志,大橋正健,大原謙一,大渕 喜之,岡田則夫,小野里光司,河島信樹,川添史子, 河野功,木内建太,岸本直子,國中均,國森裕生,黒 田和明,小泉宏之,洪鋒雷,郡和範,穀山涉,苔山圭 以子,古在由秀,小嶌康史,固武慶,小林史步,西條 統之,齊藤 遼,坂井真一郎,阪上雅昭,阪田紫帆里, 佐合紀親,佐々木節,佐藤孝,柴田大,真貝寿明,杉 山直,鈴木理恵子,諏訪雄大,宗宮健太郎,祖谷元, 高野忠,高橋走,高橋慶太郎,高橋忠幸,高橋弘毅, 高橋史宜,高橋龍一,高橋竜太郎,高森昭光,田越秀 行,田代寛之,谷口敬介,樽家篤史,千葉剛,辻川信 二,常定芳基,豊嶋守生,鳥居泰男,内藤勲夫,中尾 憲一,中澤知洋,中須賀真一,中野寛之,長野重夫, 中村康二,中山宜典,西澤篤志,西田恵里奈,西山和 孝, 丹羽佳人, 能見大河, 橋本樹明, 端山和大, 原田 知広, 疋田渉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志, 福嶋美 津広,藤田龍一,藤本眞克,二間瀬敏史,細川瑞彦, 堀澤秀之,前田恵一,松原英雄,蓑泰志,宮川治,三 代木伸二,向山信治,武者満,森澤理之,森本睦子, 森脇成典,八木絢外,山川宏,山崎利孝,山元一広, 柳哲文,横山順一,吉田至順,吉野泰造,若林野花、 スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (20): 設計・

計画,日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月、 甲南大学、兵庫).

- [46] 正田亜八香,道村唯太,穀山渉,麻生洋一,坪野公夫, 安東正樹,新谷昌人,佐藤修一,DECIGO pathfinder における試験マスモジュールの制御実験,日本物理学 会 2009 年秋季大会(2009 年 9 月、甲南大学、兵庫).
- [47] 佐藤修一,鳥居泰男,若林野花,江尻悠美子,鈴木 理恵子,上田暁俊,川村静児,新谷昌人,安東正樹, 大渕喜之,岡田則夫,正田亜八香,道村唯太,坪野公 夫,麻生洋一,穀山渉,DECIGO pathfinder のため の試験マスモジュールの開発(3),日本物理学会2009 年秋季大会(2009年9月、甲南大学、兵庫).
- [48] 穀山渉,安東正樹,森脇成典,石徹白晃治,高橋走, 新谷昌人,麻生洋一,高島健,中澤知洋,高橋忠幸, 国分紀秀,吉光徹雄,小高裕和,湯浅孝行,石川毅彦, 榎戸輝揚,苔山圭以子,坂井真一郎,佐藤修一,高森 昭光,坪野公夫,戸田知朗,橋本樹明,若林野花,宇 宙実験実証プラットホーム (SWIM)を用いた超小型 重力波検出器の開発 VIII(軌道上運用),日本物理学会 2009 年秋季大会(2009 年 9 月、甲南大学、兵庫).
- [49] 黒田和明,中谷一郎,大橋正健,藤本眞克,川村静 児,斎藤芳男,鈴木敏一,坪野公夫,三尾典克,神田 展行,中村卓史,LCGT Collaboration,大型低温重 力波望遠鏡(LCGT)計画 XI,日本物理学会 2009 年 秋季大会(2009 年 9 月、甲南大学、兵庫).
- [50] 高橋走,松本伸之,麻生洋一,坪野公夫,政田元太, 古澤明,量子光学的手法を用いた重力波検出器の感度 向上実験,日本物理学会2009年秋季大会(2009年9 月、甲南大学、兵庫).
- [51] 松本伸之,高橋走,麻生洋一,坪野公夫,政田元太,古 澤明,重力波検出器の感度向上に向けたスクイーズド 光の生成実験,日本物理学会2009年秋季大会(2009 年9月、甲南大学、兵庫).
- [52] 麻生洋一, Robert Ward, Rana Adhikari, Peter Kalmus, Lock Acquisition of a Dual Recycled Fabry-Perot Michelson Interferometer with DC Readout, 日本物理学会 2009 年秋季大会(2009 年 9月、甲南大学、兵庫).
- [53] 安東正樹,川村静児,佐藤修一,中村卓史,坪野公夫, 新谷昌人,他,スペース重力波アンテナ DECIGO 計 画 (23) DECIGO パスファインダー,日本物理学会 2009 年秋季大会(2009 年 9 月、甲南大学、兵庫).
- [54] 安東正樹,穀山渉,石徹白晃治,森脇成典,新谷昌人,高橋走,麻生洋一,湯浅孝行,中澤知洋,高島健,高橋忠幸:SWIM に搭載した大学発の宇宙実験 モジュール (SWIM_{µν}) 電子情報通信学会 宇宙・航行 エレクトロニクス研究会 (2009 年 5 月 29 日, JAXA 筑波宇宙センター)

招待講演

- [55] 坪野公夫,重力波を求めて、「天地人 三才の世界」 第3回研究会 (2009 年 8 月,国際高等研、京都).
- [56] 安東 正樹 他 DECIGO グループ, 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO と DPF, UNISEC 講演会 (2009 年 7 月, 東京大学).

(セミナー)

- [57] Wataru Kokuyama and Kenji Numata: Iodine Wavemeter for LISA, LISA Frequency Control Working Group Meeting (Dec.8, 2009, California Institute of Technology).
- [58] 安東 正樹, 重力逆二乗則の検証実験, KEK 宇宙物理 理論・実験合同セミナー (2009 年 5 月, 高エネルギー 加速器研究機構).

6.4 佐野・原田研究室

佐野・原田研究室では、熱平衡から遠く離れた系 における法則を探索・解明することを目指し、実験・ 理論両面から研究を行っている。非平衡系の研究は 大きく分けて、熱ゆらぎが無視できるようなマクロ な非平衡系と熱ゆらぎと非平衡ゆらぎが競合するよ うなミクロな非平衡系の研究に分けることができる。 マクロな非平衡系においては、外部からエネルギー や物質が絶えず流入・流出することにより、自発的 な秩序や乱れが生じることが知られており、これら は一般に自己組織化現象と呼ばれている。平衡から 遠く離れた系における自己組織化現象の普遍的性質 を明らかにすることが第一の大きな課題である。 方で、近年の1分子計測技術やナノテクノロジーの 発展は、非平衡統計力学に急速な変革をもたらしつ つある。そこでは例えば、平衡近傍で成り立つ法則 である揺動散逸定理がどのように破れるのか、破れ 方の形式が問題となる。このように非平衡統計力学 の源流につながるミクロ非平衡系の分野でも最近大 きな進展があり、新たな法則の探究や検証を行うこ とが第二の大きな課題である。

非平衡状態において自発的にパターンや乱れが生 じる自己組織化現象は、流体現象などにおいてその 存在が知られていた。しかし、力学系の分岐理論や 相空間アトラクターの概念、カオスなどの理解の進 展により、流体系に限らず、より広範な物理現象を 含む大きなクラスとしての非線形力学系が持つ一般 的性質として学問体系が再編成されつつある。その ような観点からは、流体力学、固体力学、粉体、化 学反応系、生命システムまで含めて、パターン形成 や非線形振動、カオスや乱流といった自己組織現象 の動力学は共通した特徴を持っており、系の詳細に よらず統一的に記述し扱うことが可能である。以上 に加えてごく最近では, 平衡から遠く離れた系に対 する統計力学に関しても著しい進展が見られ,非平 衡系における揺らぎの性質についての理解が飛躍的 に進みつつある.こうした研究の行く先に,非平衡 状態にある系に適用可能な一般的な熱統計力学的枠 組みを構築することも視野に入りつつある.また-方で、非平衡現象は多彩であり、系の対称性や境界 条件、初期条件、有効な自由度の数などにより多様 な運動形態が生じ、普遍性だけではくくりきれない 多様性と新奇な現象が発見される自然現象の宝庫で もある。したがって研究の戦略としては、典型的と 思われる非平衡系の実験系を選び、良く制御された 実験を行い非平衡度を上げていった時に見られる新 たな現象を詳細に観測するというアプローチを取っ ている。また、実験結果と理論との緊密なフィード バックにより新たな手法開発と概念構築を目指した 研究を行っている。

6.4.1 非線形非平衡系の物理

液晶電気対流の乱流界面成長における普遍揺らぎ測定

界面成長は1つの典型的な非平衡プロセスであり、 特にスケール不変性から普遍的な巨視的挙動が生ま れる代表的な非平衡現象として、実験的にも理論的 にも熱心に研究がなされてきた。しかし、実験の示唆 する多様なスケール不変性と理論の示すロバストな 普遍性は一見相いれず、Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 方程式に代表される豊かな理論構造の実験検証は不 可能であった。そこで、当研究室では KPZ 理論の詳 細かつ定量的な実験検証を目的とし、液晶電気対流 で見られる乱流界面成長の実験を行った。

ネマチック液晶に高い交流電圧を印加するとDSM2 と呼ばれる位相欠陥乱流が生する。我々は近年、DSM2 が定常的に存在する転移点近傍では、臨界的な異方 的浸透現象が系を支配することを示した [6, 12, 18, 35, 67, 68]。一方、電圧を上げ、転移点から離れる と、DSM2 乱流ドメインは成長し、その界面は自己 アファインな roughening を示すことを発見した(図 6.4.19a)。そこで、界面の局所半径の標準偏差によっ て界面の厚みを定義し、その荒さを定量化したとこ ろ、測定した界面の厚みは空間依存性・時間依存性 の双方で(1+1)次元 KPZ 普遍クラスの特徴指数と スケーリング関数形を明瞭に示し、KPZ スケーリン グの冪則をかつてない精度で実験的に確認すること ができた。

さらに我々は KPZ 界面成長のスケーリングを超 えたレベルの普遍性を検証することに成功した。特



図 6.4.19: (a) 成長する DSM2 クラスター。(b) 局所 半径の揺らぎ分布と GUE ランダム行列の最大固有 値分布。

に界面の揺らぎ分布に関しては、円形界面の局所半

径が GUE ランダム行列の最大固有値分布(Tracy-Widom 分布)に従うという近年の理論的予言を極 めて高い精度で実証し(図 6.4.19b)、漸近分布に至 る過程の有限時間効果も決定した。ランダム行列に よる記述は二点相関関数についても確認でき、さら に円形界面か平面界面かというジオメトリによって 普遍分布が変わることも明瞭に示した。これにより、 界面成長における揺らぎの詳細な形を規定するユニ バーサリティに初めての定量的な実験証拠が与えら れたことになる [8, 12, 33, 36, 37, 38, 70]。

2相共存系における非平衡定常状態と熱輸送・熱乱流

容器中に流体を封入し、下面より加熱、上面より 冷却すると生じる熱対流現象は、非平衡系の典型例 として近年、物理の分野でも理論、実験の両面から盛 んに研究が行われてきた。一方で、気液共存系に温度 勾配があり、沸騰や凝縮を伴って定常的に熱が輸送さ れるような実験系は、その熱輸送効率の高さから二 相共存密閉式サーモサイフォン(ヒートパイプ)とし て工学的見地にから研究がなされてきたが、系の熱 輸送に関する法則や内部状態の相関など、物理学的 見地からの研究はあまり行われてこなかった。本研 究では、沸騰と凝縮を伴う非平衡定常系における熱 輸送の内部状態依存性を明らかにすることを目的と して、熱対流系と同様のジオメトリを持つ単純化さ れたヒートパイプを設計製作し詳細な実験を行った。



図 6.4.20: 熱流 Q と過熱度 (ΔT_b ,加熱面と蒸気温度 との差)及び過冷却度 (ΔT_t ,蒸気温度と冷却面との 差)の関係。過熱度側で熱流が急激に立ち上がってい る一方で、過冷却度と熱流の関係は比例関係を保っ ている。これより、熱流の立ち上がりの前後で律速 部分が切り替わっていることが分かる。

これまで得られた結果として、底面近傍での沸騰 と上面近傍での凝縮が共存するような平衡から極め て遠く離れた状態でありながら、蒸気相部分のバル クにおける蒸気温度と圧力の関係は平衡下で決まる 共存曲線(飽和蒸気圧曲線)の関係を満たしている ことを見出した。また、この蒸気の温度を用いて沸 騰や凝縮の素過程について解析を行ったところ、系 の熱流を決定する律速過程は上下の境界層近傍にあ り、熱流を増加させていくと律速部分が底面の沸騰 部分から上面の凝縮部分へ遷移していることを発見 した(図 6.4.20) [13, 39]。

濃厚懸濁液の界面不安定性とパターンダイナミクス

垂直加振下の複雑流体の界面はファラデー波、オ シロン等、様々な不安定性を示す。垂直加振下に限ら ず、気液界面に現れる不安定性はレイリーテイラー 不安定性や表面張力に駆動される不安定性など多く の種類があり界面不安定性だけで一つの大きな研究 対象となっている。一方で、濃厚懸濁液は降伏応力、 shear thinning、shear thickening、dilation など非常 に特徴的なレオロジーを示すことが知られている。濃 厚懸濁液ではこれらのレオロジーを反映した特異な 界面不安定性が見られると考えられる。

我々は、垂直加振下のシリコンオイルとガラスビー ズ懸濁液系において界面の変形が穴に成長し、穴が容 器とほぼ同じ大きさまで広がっていく不安定性(Expanding hole)を発見した。我々は擬一次元系による 実験により Expanding hole の周りには対流が出来て いることを示し、この対流の大きさに対するスケー リングを発見した。またこのスケーリングを説明す るモデルを立て、対流の重要性を示した[2,9,20]。

次に我々は垂直加振下のポテトスターチ懸濁液界面 において、分裂する穴 (replicating hole)を発見した (図 6.4.21(a))。自発的に分裂を繰り返すパターンは 反応拡散系や化学反応系では発見されているが、複雑 流体の系では初めての報告である。replicating hole は生成・消滅を繰り返しながら界面全体へと広がって ゆくが、十分に加振強度が大きいと spatiotemporal chaosを示すようになる事が分かった。そこで我々は defect-mediated turbulence やグレイスコットモデル での spatiotemporal chaos で使われている、確率的 な解析方法を使い穴の個数のダイナミクスを解析し



図 6.4.21: 充填率 33%、周波数 100Hz、加振強度 180m/s² で観測されるパターンダイナミクス。(a) 穴の分裂の様子(b)穴の個数の確率分布関数。○は時 系列データから直接求めた結果であり、実線はマス ター方程式から計算した理論値である。 た。その結果、定常状態での穴の個数の時間ゆらぎ はマスター方程式で良く記述できることが分かった (図 6.4.21(b))[40, 41]。本研究は実験において自発的 に分裂を繰り返すパターンの spatiotemporal chaos に対し確率的な解析を行った初めての報告となって いる。

6.4.2 非平衡ソフトマターの物理

Experimental observation of dynamics of selfpropelled colloidal particle

Self-propulsion arouses interests among scientists because of its interesting dynamics, physical mechanism, and possible applications, including microswimmer, nano-machine and drug delivery. Several kinds of micro-scale self-propulsions are reported recently in pure physical systems, such as nanorods move in hydrogen peroxide solutions, which uses chemical energy. However, self-propelled particles powered by chemical energy are hard to control by external manipulations, which would limit its usages for applications and studies. Our study shows that by inducing a local field around a colloidal particle, a phoretic motion would become a self-phoretic motion. By adopting this strategy, we study self-propelled Janus particles driven by induced thermophoresis and induced electrophoresis [3, 21, 64].

Janus particles are known for containing two different surfaces in two different sides. Janus particles and laser irradiation are used for realizing inducedthermophoresis by utilizing the half-side light absorbing property of Janus particles. The metal coating of the particle absorbs laser energy and then generates an asymmetric temperature gradient around the particle. The particle moves along the local temperature gradient. In induced electrophoresis, we study self-propelled Janus particles between two electrode surfaces in alternating electric (AC) field. The mechanism of the motion for a Janus particle in AC field is discussed in induced charge electrophoresis (ICEP) and an induced dipole- quadrupole transition.

We also study the motion of self-propelled particles. We find the motion show transitions from Brownian motion to directed propulsion and then to random walk again in different time scales (Fig. 6.4.22). The probability density functions of steps also change with different time intervals.

自己駆動粒子の集団運動と相図

外力を与えることなく、なんらかのエネルギーを 消費して運動する自己駆動物体が集団を成すと、さ



⊠ 6.4.22: (a)-(c) Trajectories of $3\mu m$ self-propelled particles in 90 seconds. (a) 0V. (b) 1V. (c) 1.5V. Bar: $10\mu m$. (d)-(f) Probability density functions of steps in (d) 1/15s, (e) 0.4s, and (f) 5s for selfpropelled particles.

まざまな興味深い現象が生じる。特に、リーダーや ペースメーカーがない場合に見られる集団現象は、 この領域における関心の的となっている。コーヒー レントな協同運動を自発的に生み出すメカニズムを 理解することを目的として、粒子の前後対称性を破っ た自己駆動粒子(Janus 粒子)を用いていくつかの 実験を行った [11, 42]。

Janus 粒子は2つの異なった性質の面を持つ大きさ 数ミクロンの粒子である。この粒子を純水と共に厚 さ数十ミクロンのセルに入れ、交流電場をかけると、 2次元平面を自己駆動するという新しい知見を得た。 このような運動は、粒子表面に交流電場によって誘 起される流れの非対称性によって生じる。これまで は直線的な動きしか知られていなかったが、今回は 平面上を運動させることができるようになり、粒子 速度の変化だけでなく、角度方向の揺らぎに伴う粒 子の自発的な方向転換をも含む運動が認められ、集 団現象を小さいスケールにおいて研究するための良 い実験系を確立することに成功した。

この実験系は全く新しい系であるため、今年度は 自己駆動するための最適な実験条件や相互作用など、 系の基本的な理解するための実験を行った。Janus 粒 子の運動は交流電場の強さ、周波数、粒子径に依存 していることを確認した。さらに、多くの粒子を駆 動させることに成功し、相図を得ることができた(図 6.4.23)。



図 6.4.23: 交流電場中における Janus 粒子系の相図。 周波数、電場強度によって自発的運動、凝集といっ た相が生成する。

温度勾配における粒子の運動

温度勾配の下で粒子が一方向に運動することは古 くから経験的に知られており、物質ごとに、温度勾 配に対してどの程度の速度で運動するのか (Soret 係 数と呼ばれている)は非常に精力的に研究されてき た。一方で、粒子の運動の物理的なメカニズムについ ての議論が成されるようになったのは最近のことで、 それは、実験技術の発展により一分子レベルでの粒 子の解析が可能になったことによるところが大きい。 我々は、粒子の周りの流体場の計算を行い、粒子の |運動速度を理論的に導いた (図 6.4.24) [3]。実験と比 較した結果、これらの結果は非常によく合うことが 分かった。重要な点として、粒子は、外力によって 押されているのではなく、また流体に圧力差が生じ て運動しているわけではないということである。温 度勾配によって粒子の周りに流れ場が誘起され、ま るで人間が水中で泳ぐように粒子は「泳ぐ」ことに よって一方向に運動するということである。



図 6.4.24: 不均一な温度分布 (B) による自律的な粒子 の運動 (A)。粒子は、温度勾配により生じる周りの流 れ (左向きの矢印) によって一方向に運動する (右向 きの矢印)。粒子の周りの流線を (A) で示している。 微小な物理系に対するパラメータ推定論

生体分子の一分子計測技術は、新しい顕微鏡技術 や新規プローブの開発等、近年目覚ましい進展を収 めており、生体分子の機能を明らかにする基盤的技 術となりつつある。しかし最新の技術を駆使しても、 未だ我々の観測できる自由度は系の持つすべての自 由度のうちの僅かである。従って、生体分子の詳細を 明らかにするためには、限られた自由度の測定データ から直接観測することの出来ない自由度の動きや分 子の物性値を推定するという逆問題に直面する。我々 はこの問題に対してベイズ推定の枠組みで取り組み、 隠れた自由度を持つ微小系に対するパラメータ推定 の一般的な枠組みを確立した。我々の構築した推定 法を用いると、観測時間が無限長という理想的な条 件では正しい推定値が得られ、観測時間が有限な場 合は、推定誤差が観測時間に反比例して減少するこ とが一般的に示せた。簡単なモデル (図 6.4.25(a)) で 数値実験を行い、我々の提案した手法が標準的な従来 法に比べて精度の高い推定値を与えることを確認し た。また、プローブの選択によっては精度の良い推定 が極めて困難になるという一種の転移現象が起こる ことを見いだした (図 6.4.25(b)) [24, 47, 48, 49, ?]。 今後は転移現象の詳細を調査することと、提案した 手法の有効性を実験的にも証明していくことが課題 である。



図 6.4.25: (a) 隠れた自由度を持つ線形モデ ル。プローブの時系列 y(t) から系の4パラメータ $\{\gamma, \Gamma, k, h\}$ を同時に推定する。(b) 系のパラメータ (*は真の値を意味する)の条件と推定値のばらつき の関係。オーダーパラメータは評価関数の最適化の 困難さを特徴づける値。プローブの選択を誤るとパ ラメータ推定が急激に困難になることがわかる。(左 上の領域は推定値が発散してしまう領域)

小さい非平衡系の制御

シラードエンジンに代表される、観測の情報を用 いてフィードバック制御を行う実験系は、マクスウェ ルの悪魔や熱力学第二法則と深くかかわり、ごく最 近では情報量概念を取り入れた新しい熱力学として 近年再び注目を集めている。この研究では、光トラッ プのような小さい熱力学系をもちいてこれを実現・ 検証することを目指している。今年度は、シラード・ エンジンを実験的に作り出し、検証することを目標 に、数値計算によって実現可能な系を提案した。[44]

実験系の設定によってはフィードバック操作その ものが粒子に仕事をしてしまう可能性があり、真の 意味で情報からエネルギーへの変換を見るためには 工夫が必要である。準静的膨張するポテンシャル中 の粒子から取り出せる仕事は、無限時間の極限では 情報量を最大限に活かせるフィードバックとなるが、 有限時間の操作では、壁に衝突する回数 N の計数 誤差 \sqrt{N}/N が取り出せる仕事量の分布をきめるこ とから、相当にゆっくりなポテンシャル壁の移動を 必要とすることが明らかになった。そこで、シリン ダーサイズの自由度方向と駆動力の方向が直交する ワイン・ボトル型ポテンシャルを考案し、単純な直 線状のポテンシャルに比べて短時間での操作でも高 いフィードバック効率を得られることを見出した。

6.4.3 生命現象の物理

バクテリアの物質表面上における細胞運動とコロニー 形成

バクテリアを寒天培地上で培養すると、バクテリ アが増殖と運動を繰り返し、様々な形のコロニーを 形成することが知られている。中でも、周期的な細 胞密度の増減によって形成される同心円状コロニー (図 6.4.26) は、複数のバクテリアで確認されている 興味深い現象であるが、まだメカニズムの本質的な 理解には至っていない。我々はこれまでに、バクテ リアの中でも最も馴染み深い大腸菌においても同心 円コロニーが形成されることを見出し、その形成過 程を詳細に解析した。

解析にあたり、寒天培地上における細胞認識を行 う手法を開発し、大腸菌の細胞運動を特徴付けるこ とができた。また実験により、コロニーが拡大する 際に、細胞の運動性でなく細胞の分泌物の流れが重 要な役割を果たしている可能性があることがわかっ た[15,54,55]。

今後、分子機構を含めて同心円状コロニーの形成 メカニズムを探るとともに、集団運動を示す種々の バクテリアについて本研究で行ったような定量的な 解析を行うことが求められる。

細胞運動の力学的特性の解明

細胞運動は多数の要素が協奏的に働く複雑な過程 であり、その物理的な記述のためには、形・速度・力 場などの細胞レベルのマクロな量の間の関係が手掛 かりとなる。本研究室では、細胞 - 基盤間の接着強 度が形・速度・力場にどのように影響するかを調べ ることで、それらの量の間の関係を明らかにするこ とを目指している。

本年度は、早い細胞運動のモデル細胞である細胞 性粘菌を用い、基盤上のコラーゲン密度を変えるこ とで細胞 - 基盤間の接着を制御して形・重心運動・



図 6.4.26: 大腸菌の同心円状コロニー。中心に大腸 菌を接種し、30時間培養。

力場の測定を行った [25, 51, 52, 53, 76]。その結果、 (1) 細胞の形は接着強度が大きくなるにつれて秩序 的、進行波的になる、(2) 細胞の重心運動は中間の接 着強度で最大になる、(3) 細胞の力場は接着強度と正 に相関する、の3つを明らかにした(図 6.4.27)。細胞 の形がいくつかの秩序的なモードをとることは、本 研究室のものも含めいくつかの報告があるが、それ らのモードの切り替えのメカニズムはいまだ不明で ある。本研究は形のモードを外部からの摂動によっ て切り替えた初めての結果であり、そのメカニズム に何らかの示唆を与えるものである。

重心運動の接着依存性は哺乳類の培養細胞につい て同様の結果が20年以上も前から報告されている が、そのメカニズムはよくわかっていない。本研究は 速い細胞でも同様の関係が見られることを初めて明 らかにしたものであり、以下の力測定と組み合わせる ことでそのメカニズムに迫りうる実験系となると考 えている。力場の接着強度依存性を報告した論文は いまだ少数であり(Gaudet C, et al. 2003 Biophys. J)、その時間・空間ダイナミクスについてはほとん ど調べられていない。本年度行った力場の測定は先 行研究に比べ長時間・高分解能のものであり、この 結果を詳細に解析することで細胞運動に関する新し い知見が得られることが期待される。

細胞運動を記述する決定論的理論の構成

真核生細胞は、細胞運動と呼ばれる魅惑的な形態 変化を起こしながらその重心移動を行っている。我々 はこれまでも細胞性粘菌と呼ばれる真核生物の運動 の解析を行い、その結果粘菌細胞は非常に規則正し い運動パターンを示すことをつきとめていた。本研 究では、このような規則的な細胞運動のパターンがど のようなメカニズムで起こっているかを理解するた めに、数理モデルによる理論研究を行った。特に我々 は、細胞運動は運動のない球対称な細胞から対称性



図 6.4.27: A:細胞の変形モードの接着強度依存性(下 から伸長、回転、振動) B:力場の絶対値の時間発展

の破れを経由して生成することに着目し、細胞運動 が回転対称性の破れとして普遍的に記述されるとい う仮説を提起した。これによって細胞運動は、回転対 称性の破れを記述するものとして細胞の形を記述す る位相方程式および重心運動を決定するする界面方 程式として採用できると結論した。そしてこの位相 方程式を解くことよって、観測されるすべての細胞 運動のパターンが普遍的結果として導かれることが わかった (図 6.4.28)。このように、多くの細胞運動の 性質が回転対称性の破れからの要請として規定され ることが本研究の結果からわかった [26, 57, 56, 58]。



図 6.4.28: 能動細胞モデル (active cell model) によっ て構成された細胞運動。(a) カオス運動、(b) 準周期 運動、(c) ジグザグ運動 ①、(d) ジグザグ運動 ②。

変形する粒子の揺らぎの理論の構成と細胞への適用

近年、自ら能動的に駆動する粒子系、すなわちア クティブ粒子の研究が盛んに行われている。我々は、 このようなアクティブな粒子の一種として自発的に 変形をする粒子系を考え、そのモデルを構成してそ の振る舞いを研究している。本研究では、このよう な自己変形粒子の自発変形が特にランダムな過程で あった場合、変形が特に粒子の重心運動へどのよう な影響を及ぼすかを議論した。特に自発変形が空間 的に回転対称な場合、および自発変形の方向が運動 と結合している場合の二種類の特徴的粒子があるこ とを指摘し、それらの種類の自発変形粒子の運動を、 確率微分方程式を用いて解析した結果、両方の粒子 ともに truncated power law と呼ばれる速度分布を 示すことが明らかになった。これは自発変形する粒子 が Lévy flight と呼ばれる異常なブラウン運動を示す ことを示唆している。またそれらのべき則の指数は、 ともに変形のゆらぎの大きさに逆比例するという関 係が得られたが、さらにそこに付加させる無次元の 定数が二つの場合で異なるという結果が得られた。

また、このような自発変形粒子の理論を応用とし て細胞の運動に適用した。生細胞を画像処理するこ とによって得られた変形の大きさおよびトラッキン グデータを解析し、データと理論とを照らし合わせ た結果、細胞が富栄養状態から飢餓状態に移る過程 によって、自発変形の方向が運動とが結合していな い状態から結合した状態に遷移していると解釈され るという結果が得られた [59]。

<受賞>

[1] 竹内一将,理学系研究科研究奨励賞(博士),東京大 学理学系研究科,2010年3月24日.

<報文>

(原著論文)

- [2] H. Ebata, S. Tatsumi and M. Sano, Expanding holes driven by convectionlike flow in vertically vibrated dense suspensions, Phys. Rev. E 79, 066308 (2009).
- [3] Hong-Ren Jiang, Hirofumi Wada, Natsuhiko Yoshinaga, and Masaki Sano: Manipulation of Colloids by Nonequilibrium Depletion Force in Temperature Gradient, Physical Review Letters, **102**, 208301 (2009).
- [4] Takahiro Sakaue and Natsuhiko Yoshinaga: Dynamics of Polymer Decompression: Expansion, Unfolding and Ejection, Physical Review Letters, 102, 148302 (2009).
- [5] Kazumasa A. Takeuchi, Francesco Ginelli, and Hugues Chaté: Lyapunov Analysis Captures the Collective Dynamics of Large Chaotic Systems, Physical Review Letters, **103**, 154103 (2009).

- [6] Kazumasa A. Takeuchi, Masafumi Kuroda, Hugues Chaté, and Masaki Sano: Experimental realization of directed percolation criticalityin turbulent liquid crystals, Physical Review E, 80, 051116 (2009).
- [7] Soichi Tatsumi, Yoshihiro Murayama, Hisao Hayakawa, and Masaki Sano: Experimental Study on the Kinetics of Granular Gases under Microgravity, J. Fluid Mech. 641, 521-539 (2009).
- [8] Kazumasa A. Takeuchi and Masaki Sano: Growing Interfaces of Liquid Crystal Turbulence: Universal Scaling and Fluctuations, arXiv:1001.5121 (2010).

(会議抄録)

[9] H. Ebata, S. Tatsumi and M. Sano, Dynamics of expanding holes in vertically vibrated wet granules, AIP Conf. Proc., 1145, 733-736, (2009).

(国内雑誌)

- [10] 竹内一将,及川典子,稲垣紫緒,坂上貴洋,和田浩史: Self-organization and Dynamics of Active Matter
 - 研究会の私的会議録、雑感、その他-,物性研究,93, 247-270 (2009).
- [11] 佐野雅己、鈴木量、村山能宏:「ジェルのダンス 加 振による複雑流体の対流現象 - 」、日本物理学会誌 第64巻第10号、767-772、2009年.

(学位論文)

- [12] 竹内一将:液晶電気対流の乱流状態に見る巨視的非平 衡系の普遍挙動(博士論文).
- [13] 松井裕太郎: 気液共存系熱対流の熱輸送と動的圧力変 動 (修士論文).
- [14] 江端宏之: 垂直加振下における wet granular matter の界面不安定性に関する研究 (修士論文).
- [15] 杉浦晴香: バクテリアのパターン形成と集団運動に関 する研究 (修士論文).

(著書)

[16] 佐野雅己(分担執筆):「自己組織化ハンドブック」 (NTS 出版、2009).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [17] Kazumasa A. Takeuchi and Hugues Chaté: Collective Dynamics and Effective Dimension of Large Chaotic Systems from Lyapunov Vector Analysis, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, May 17-21, 2009, Snowbird, Utah, USA.
- [18] Kazumasa A. Takeuchi, Masafumi Kuroda, Hugues Chaté, and Masaki Sano: Directed Percolation Criticality in Turbulent Liquid Crystals, Symposium YKIS2009, Frontiers in Nonequilibrium Physics, Jul. 31 - Aug. 1, 2009, Kyoto, Japan.
- [19] Kazumasa A. Takeuchi, Francesco Ginelli, and Hugues Chaté: Lyapunov Analysis and the Collective Dynamics of Large Chaotic Systems, Giant Fluctuations in Population Dynamics, Aug. 3-7, 2009, Leiden, Netherlands.
- [20] H.Ebata, S.Tatsumi, M.Sano, Dynamics of expanding holes in vertically vibrated wet granules, Powders and Grains 2009, Colorado School of Mines, July 13-17, 2009, Colorado, USA.
- [21] Hong-Ren Jiang, Masaki Sano: Self-propelled particles, Workshop on Active Matter - Physics of Biokinetics -, 24-25 July 2009, Tokyo, Japan.
- [22] N. Yoshinaga: Thermophoresis and induced flow near surface under temperature gradient, Soft Active Materials: From Granular Rods to Flocks, Cells and Tissues, 18-21 May 2009, Syracuse, USA.
- [23] N. Yoshinaga: Hydrodynamics of self-propulsion induced by inhomogeneous temperature distribution, Workshop on Active Matter - Physics of Biokinetics -, 24-25 July 2009, Tokyo, Japan.
- [24] Makito Miyazaki and Takahiro Harada: Uncovering the hidden structure of the protein using Bayesian inference, FEBS Advanced Lecture Course on "Cytoskeleton, Contractility and Motility" Pierre-Gilles de Gennes Winter School 2010, Feb. 22-26, 2010, Institut Scientifique de Cargese, Corsica, France.
- [25] Hirokazu Tanimoto, Miki Matsuo, and Masaki Sano: Cellular shape, motion and forces on various adhesive surfaces, : Pierre-Gilles de Gennes Winter School 2010, Feb. 22-26, 2010, Cargese, France.
- [26] Miki Matsuo: Deterministic organization of active movement of amoeboid cell, Workshop on Active Matter - Physics of Biokinetics -, 24-25 July 2009, Tokyo, Japan.
- [27] Masaki Sano, How do cells deform in motion?, Workshop on Active Matter - Physics of Biokinetics -, July, 24, 2009, Tokyo, Japan.

招待講演

- [28] Kazumasa A. Takeuchi, Francesco Ginelli, and Hugues Chaté: Lyapunov analysis captures the collective dynamics of large chaotic systems, Thematic Institute on Lyapunov Analysis from theory to geophysical applications, Oct. 26-30, 2009, Paris, France.
- [29] M. Sano, H.R. Jiang, H. Wada, and N. Yoshinaga, Understanding Cross coupling effect of Thermophoresis in Colloid Polymer Mixtures, International workshop on dynamic cross-effect in softly condensed matter, Nov. 5, 2009, Tokyo, Japan.
- [30] M. Sano, Simming and crawling of self-propelling deformable objects, Breaking Barriers from Physics to Biology, Jan. 9, 2010, Bangalore, India.

- [31] M. Sano, S. Toyabe, H-R. Jiang, H. Wada, N. Yoshinaga, Out-Of-Equilibrium Small Systems and Micromanipulation, the 1st POSTECH International Workshop on Physics of Self-organization in Bio/Nano Systems, Jan. 29, Pohang, Korea.
- [32] M. Sano, M. Matsuo, Y. Maeda and H-R. Jiang, Deformable self-propelling microsystems in physics and biology, Pattern Formation in Chemistry and Biophysics, Feb. 25, 2010, Goslar-Hahnenklee, Germany.

(国内会議)

一般講演

- [33] 竹内一将,佐野雅己:液晶乱流におけるアクティブ界 面のダイナミクス(I)-界面成長,日本物理学会2009 年秋季大会(熊本大学),2009年9月25-28日.
- [34] 竹内一将,佐野雅己:液晶乱流におけるアクティブ界 面のダイナミクス (II) - 拮抗する界面の coarsening, 日本物理学会 2009 年秋季大会(熊本大学),2009 年 9月 25-28 日.
- [35] 竹内一将,黒田真史,Hugues Chaté,佐野雅己:液 晶乱流の時空間欠性に見る吸収状態相転移のユニバー サリティ,九大応力研研究集会,乱流現象及び非平衡 系の多様性と普遍性,2009年11月12-14日.
- [36] 竹内一将,佐野雅己:液晶電気対流における乱流界面のダイナミクスと普遍性,特定領域研究「ソフトマター物理」第3回公開シンポジウム,非平衡ソフトマター物理学のフロンティア,2009年11月20-21日.
- [37] 竹内一将,佐野雅己:液晶電気対流における乱流界 面成長-スケーリングと揺らぎ分布-,日本物理学会 2010 年年次大会(岡山大学),2010 年3月 20-23 日.
- [38] 竹内一将:界面成長における揺らぎと相関の普遍性 - 液晶乱流が示す実験証拠-,東京大学グローバル COE「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」先端 融合物理「非平衡・生命」研究グループ・ワークショッ プ,物質科学と生命科学における非平衡法則を求め て,2010年3月30日.
- [39] 松井裕太郎,佐野雅己:気液共存系熱対流における熱 輸送と圧力変動,日本物理学会第65回年次大会(岡 山大学)2010年3月20-23日.
- [40] 江端宏之,佐野雅己,濡れた粉体界面におけるパター ンダイナミクス,日本物理学会2009年秋季大会,熊 本大学,2009年9月26日.
- [41] 江端宏之,佐野雅己,濡れた粉体界面におけるパター ンダイナミクス II,日本物理学会第65回年次大会, 岡山大学,2010年3月20日.
- [42] 江宏仁、鈴木量、佐野雅己:「自己駆動する非対称粒子の相互作用」、2009年9月25~28日、日本物理学会2009年秋季大会、熊本大学.
- [43] 黒田真史,佐野雅己:「流れ場における位相欠陥のダ イナミクスとサイズ依存性」日本物理学会2009年秋 季大会,2009年9月26日,熊本大学.
- [44] 黒田真史,佐野雅己:「小さい非平衡系における観測・ 制御と散逸過程」日本物理学会第65回年次大会,2010 年3月23日,岡山大学.

- [45] 義永那津人,北畑裕之,住野豊,永井健:変形しなが ら自発的に運動する液滴,日本物理学会第65回年次 大会(岡山大学)2010年3月20-23日.
- [46] 義永那津人: Self-propelled particles driven by inhomogeneous temperature distribution on surface, 日本物理学会第 2009 秋季大会(熊本大学) 2009 年 9 月 25-28 日.
- [47] 宮崎牧人,原田崇広:タンパク質の内部構造に対する ベイズ推定,日本物理学会2009年秋季大会(熊本大 学)2009年9月25-28日.
- [48] 宮崎牧人,原田崇広:タンパク質の内部構造に対す るベイズ推定,第47回日本生物物理学会年会(ア スティとくしま&徳島文理大学)2009年10月30 日-11月1日.
- [49] 宮崎牧人,原田崇広:1分子計測における逆問題:タンパク質の内部構造に対するベイズ推定,定量生物学の会第2回年会(大阪大学)2010年1月10-11日.
- [50] 宮崎牧人,原田崇広:タンパク質の内部構造に対する ベイズ推定 II,日本物理学会 2010 年春季大会(岡山 大学) 2010 年 3 月 20-23 日.
- [51] 谷本博一、松尾美希、佐野雅己「異なる接着強度の基盤上における細胞性粘菌の形・運動・力」細胞性粘菌研究会、山口、2009 年 10 月 10 日.
- [52] 谷本博一、松尾美希、佐野雅己「異なる接着強度の基盤上における細胞の形・運動・力」生物物理学会、徳島、2009 年 10 月 31 日.
- [53] 谷本博一、松尾美希、佐野雅己「細胞の形・動き・力 の接着強度依存性」生体運動班会議、東京、2010年 1月10日.
- [54] 杉浦晴香,佐野雅己:バクテリアコロニーにおける細胞の集団運動の解析,第47回日本生物物理学会年会(徳島文理大学)2009年10月30日-11月1日.
- [55] 杉浦晴香, 佐野雅己: バクテリアの集団運動とパター ン形成,日本物理学会2010年年次大会(岡山大学) 2010年3月20-23日.
- [56] 山本美希,前多裕介,谷本博一,佐野雅己:細胞運動の 位相方程式と最小記述,日本物理学会2009年秋季大 会(熊本大学)2008年9月25-28日.
- [57] 山本美希,前多裕介,谷本博一,佐野雅己:細胞性粘 菌の細胞運動を支配する位相方程式第47回日本生 物物理学会年会(アスティとくしま&徳島文理大学) 2009年10月30日-11月1日.
- [58] 松尾美希、前多裕介、谷本博一、佐野雅己:細胞運動 における形と動きの普遍的関係性、2010 年 生体運動 研究合同班会議プログラム 2009 年1月 9-11 日.
- [59] 山本美希,谷本博一,佐野雅己:変形する粒子の自発的変形に由来する大きな運動揺らぎ,日本物理学会2010年春季大会(岡山大学)2008年9月20-23日.
- [60] 佐野雅己、「膜のアクティブなゆらぎと細胞運動の協調、特定領域研究「ソフトマター物理」第4回領域研究会、2009年7月1日、北海道大学
- [61] 佐野雅己: 「ソーレ効果と非平衡枯渇力」、古典および量子ダイナミクス・非平衡統計力学に関するワークショップ、2010 年 2 月 14 日、東京大学

- [62] 佐野雅己:「細胞運動と接着・剥離のダイナミクス」、 特定領域「ソフトマター物理」班会議、2010年3月 13日、京都大学
- [63] 佐野 雅己「非平衡系に法則はあるか:ソフトマター と微小非平衡系」、東京大学グローバル COE「未来 を拓く物理科学結集教育研究拠点」先端融合物理ワー クショップ:「物質科学と生命科学における非平衡法 則を求めて」、2010年3月30日、東京大学

招待講演

- [64] Hong-Ren Jiang, Masaki Sano: Self-propelled Colloidal Particles; 日本物理学会 2010 年春季大会シン ポジウム (岡山大学) 2010 年 3 月 20-23 日.
- [65] 佐野雅己、「コロイド系における非平衡輸送:熱泳動 現象における非平衡枯渇力と流体効果」特定領域研究 「ソフトマター物理」第3回公開シンポジウム、2009 年11月20日、京都大学.
- [66] 佐野雅己、アクティブマターの物理を目指して:自己 駆動粒子と細胞運動、INSAMシンポジウム2009、 「生物・非生物の形態形成と運動」、2010年2月10 日、広島大学.
- (セミナー)
- [67] Kazumasa A. Takeuchi: Directed percolation criticality in turbulent liquid crystals, Technische Universität München, Applied Probability Theory / Statistical Physics Group セミナー, 2009 年 8 月 10 日.
- [68] 竹内一将: Directed Percolation Criticality in Turbulent Liquid Crystals, 京都大学 非線形動力学研究 室 非線形動力学セミナー, 2009 年 9 月 14 日.
- [69] 竹内一将: Lyapunov 'ベクトル' 解析 協同現象 お よび 散逸系の有効自由度を捉える - , 京都大学 非線 形タゼミ, 2009 年 9 月 14 日.
- [70] 竹内一将:液晶電気対流における乱流界面成長 ス ケーリングと揺らぎ分布 - , 中央大学 松下研究室 パ ターン形成セミナー, 2009 年 11 月 27 日.
- [71] 江端宏之,佐野雅己,濡れた粉体界面における selfreplicating hole の挙動解析,鳥取非線形研究会 2009, 鳥取大学,2009 年 11 月 20 日.
- [72] 江端宏之,佐野雅己,垂直加振下の懸濁液界面におけるパターンダイナミクス,京都大学 数理解析研究所 共同研集会「乱流の動力学的記述と統計力学的記述の相補性」,京都大学,2010年1月15日.
- [73] 江端宏之,佐野雅己,濡れた粉体界面に見られるパ ターンの挙動解析,京都大学 太田・吉川研究室合同 セミナー,京都大学,2010年2月19日.
- [74] 佐野雅己、「アクティブマターの物理を目指して」、九 州大学大学院工学研究院甲斐研究室、2009 年 12 月 3 日、福岡.
- [75] 江端宏之,佐野雅己,Vibration-induced Convection, PicoSymposium Role of Analog Experiments in Earth Science,東京大学地震研究所,2010 年 3 月 29 日.

- [76] Hirokazu Tanimoto :Cellular shape, motion and forces on various adhesive surfaces, Laboratoire de Physique de la Matiere Condensee et des Nanostructures, Universite de Lyon I, 2010 年 2 月 8 日.
- [77] Masaki Sano, Tunable Soret effect of colloidal particles by a nonequilibrium depletion, Seminar Series on" Physics of Colloidal Dispersions in external Fields", Heinrich-Heine-Universitat Dusseldorf, Institut fur Theoretische Physik, Mar. 4, 2010, Dusseldorf, Germany.
- [78] Masaki Sano, Manipulation of Colloids by a Nonequilibrium Depletion Force in a Temperature Gradient, Public Seminar at the Max-Planck Institute for Polymer Research, Mar. 5, 2010, Mainz, Germany.
- (その他)
- [79] 竹内一将:無秩序に潜む秩序を探せ! ~この世にあ ふれるカオスとフラクタル~,数理の翼 ワークショッ プ 2009 少人数セミナー,2009 年 9 月 5 日.
- [80] 佐野雅己、藤本仰一、三浦岳、西川貴雄、パネルディ スカッション「差異・パターン形成と拡散方程式の現 在」、数理研短期共同研究「離散力学系の分子細胞生 物学への応用数理」、1月5日、京都大学
- [81] 佐野雅己、「非平衡系の物理学:不安定なものを科学 する」、東京大学 EMP 講義第2期、2009 年6月27 日、東京大学
- [82] 佐野雅己、「非平衡系の物理学:不安定なものを科学 する」、東京大学EMP講義第3期、2009年12月6 日、東京大学
- [83] 佐野雅己:集中講義「非平衡系の物理」、九州大学大学院工学研究院、2009 年 12 月 2~4 日、福岡.

6.5 山本研究室

【星・惑星系形成】 恒星および惑星系の形成は、宇宙における最も基本的な構造形成過程の1つであり、 観測的にも理論的にも活発な研究が行われている。 また、我々の太陽系の起源、生命の起源に直結する 重要なテーマでもある。本研究室では、星・惑星系 形成とそこでの物質進化を、電波観測(主にミリ波、 サブミリ波、テラヘルツ波)により研究している。

新しい星は、星間ガスが自己重力で収縮して形成 される。星間ガスの集まり(星間雲)の中で最も密 度が高いものが星間分子雲で、新しい恒星と惑星系 が形成される直接の現場である。星間分子雲の主成 分は水素分子であるが、様々な原子・分子も僅かに 存在している。これらの組成は、星間分子雲の物理 進化の歴史を克明に記憶している。即ち、微量分子 の組成を調べることにより、現在の物理状態だけで なく、「過去」を辿ることができる。本研究室では、 このような独創的視点を含む多面的手法により、星・ 惑星系形成過程の総合的理解を目指している。

【なぜ電波を観測するのか】 星間分子雲の温度はお よそ 10 K 程度と低い。この「宇宙の中でも最も低 温の天体」を観測するには、最もエネルギーの低い 電磁波である「電波」が有効である。電波は光など に比べて星間物質による吸収散乱を受けにくく、透 過力が高い。厚い星間物質に包まれた星形成の核心 部分を、電波では容易に見通すことができる。また、 電波領域には原子・分子のスペクトル線が多数存在 する。それらの観測により、星・惑星系形成過程の みならず、そこでの物質進化も捉えることができる。

【ALMA (アルマ)に向けて】近年、ミリ波、サブ ミリ波観測の進展は著しい。超伝導技術を用いた低 雑音ヘテロダイン受信機の実現がその背景にある。 我々は国内外の大型電波望遠鏡を駆使して、星・惑星 系形成領域の観測を展開している。しかし、星形成 から惑星系形成への進化を追う場合、感度、分解能 の点でまだまだ不十分である。それを解決するのが ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) である。ALMA は、南米チリの標高 5000 m のアタカマ高原に作られる 12 m アンテナ 54 台と 7 m アンテナ 12 台からなる巨大電波望遠鏡(電波干 渉計)で、日本、北米、欧州による共同建設が進ん でいる。2011年から部分運用を、2013年から本格運 用を予定している。ALMA は既存装置よりも 1-2 桁 高い感度と解像度を実現し、星・惑星系形成の理解 を一挙に進展させるであろう。

【テラヘルツ帯観測技術の開拓】テラヘルツ帯は電波 と赤外線との中間にあたり、観測的研究がまだ十分 に進んでいない波長域である。そこには C⁺, N⁺ な どの原子スペクトル線の他、CH, H₂D⁺, HD⁺₂ など の基本的分子のスペクトル線がある。それらの観測 により、上で述べた星・惑星系形成における物質進化 の根源を把握できると期待される。世界的には 2009 年 5 月に打ち上げられた Herschel 衛星によりテラヘ ルツ帯観測のフロンティアが開かれつつある。本研 究室では、それとは相補的に、チリに設置されている ASTE 10 m 望遠鏡による高分解能観測を目指している。本研究室は、1998 年から 2005 年までの間、 富士山頂に口径 1.2 m のサブミリ波望遠鏡を設置、 運用した実績がある。この経験を発展させて、テラ ヘルツ天文学の創生に寄与したいと考えている。

6.5.1 星形成の観測研究

原始星円盤から原始惑星系円盤への物質進化は、 惑星環境の多様性や生命の起源などと関連する重要 なテーマである。その研究は、近年大きな進歩を遂 げつつある。第1は、HCOOCH3などの大型飽和有 機分子が原始星近傍の数100 AU以内の領域(ホット コリノ)で発見されたことである。この成果は、隕石 に含まれる先太陽系有機分子との関係で注目された。 第2は、我々自身によるもので、炭素鎖分子が異常に 豊富な低質量星形成領域(おうし座のL1527、おお かみ座のIRAS15398-3359)の発見である。これらの 天体では、原始星近傍で CH₄ が星間塵から蒸発し、 それが原料となって炭素鎖分子が爆発的に形成さて いると見られる (Warm Carbon-Chain Chemistry: WCCC)。一方で、ホットコリノ天体とは対照的に、 WCCC 天体では大型飽和有機分子は検出されない。 このように、物理的に同じように見える星形成領域 でも分子組成が大きく異なることが明らかになり、そ の原因の探究と惑星系への進化が新たなテーマとし て提起されつつある。本研究室では、低質量星の形成 過程およびそこでの物質進化の理解を中心に、それ に関連するテーマについて幅広く研究を進めている。

L1527 における炭素鎖分子の高分解能観測

フランスにある IRAM のミリ波干渉計 (Plateau de Bure Interferometer: PdBI)を用いて、低質量 星形成領域 L1527 における炭素鎖分子 CCH、C₄H、 HC₅N とその関連分子 c-C₃H₂ の高分解能観測を行 い、WCCC メカニズムの検証を行った。その結果、 予想通り、それらの分子が原始星近傍の半径 1000 AU 程度内にコンパクトに分布していることがわかった (図 1 a)。また、青方偏移・赤方偏移した成分がそれ ぞれ原始星の北側・南側の 500 AU 程度以内に分布し ていることもわかり、炭素鎖分子が原始星に向かっ て回転しながら落ち込んで行くガスの中にも存在し ていることが確立した。

炭素鎖分子の輝線強度は原始星から半径 500-1000 AU 程度の場所で急激に強くなる (図 1(a, d, e))。そ の原因を究明するため、L1527 の温度、密度分布を 取り入れた統計平衡励起計算を行って励起温度と分 布数を場所ごとに求め、それをもとに輻射輸送を数 値的に解いて輝線強度分布をシミュレーションした。 その結果、この急激な強度上昇は励起条件では説明 できず、存在量の大幅な増加 (10 倍程度)を反映し ていることがわかった (図 1(b, c))。また、増加がお こっている領域の温度が 20-30 K であることも示さ れた。 CH_4 は星間塵から約 25 K で蒸発するので、こ の結果は、CH₄の蒸発によって炭素鎖分子が再生成 される WCCC のメカニズムと矛盾しない。

一方で、炭素鎖分子の存在量は、原始星から 300-600 AU 程度より内側の領域では上記の増加領域よ り少なくなっていることもわかった。今回の観測の 分解能では定量的議論はできなかったが、原始星円 盤の形成や星間塵への再吸着の効果などが減少の原 因と考えられる。ホットコリノ天体との比較や原始 惑星系円盤への物質進化の理解の観点から、ALMA などを用いたより高分解能の観測が求められる。



 \boxtimes 6.5.29: (a)Integrated intensity of the c-C₃H₂ line. (b-c) Calculated intensity profiles along the south-north cut indicated by the dashed line in (a). (d-e) Observed intensity profiles along the dashed lines in (a)

炭素鎖分子が豊富な星なしコア Lupus 1A の発見

WCCC の原因として、分子雲コアの比較的早い収 縮が考えられている。もしそうなら、WCCC 天体の 近くには化学的に若いコアが取り残されている可能 性がある。実際、おうし座にある WCCC 天体 L1527 の近くには、有名な星なしコア TMC-1 がある。同 様にもう1つの WCCC 天体、おおかみ座の IRAS 15398-3359の周辺にも同様の星なしコアが存在する 可能性がある。そこで、野辺山 45 m 望遠鏡を用い て、IRAS15398-3359 周辺で炭素鎖分子のマッピン グ観測を行った。その結果、IRAS 15398-3359 の北 西約 3' の位置に新しい星なしコアを発見し、Lupus 1A と名付けた。このコアでは C₄H, HC₃N, HC₅N, CH₃CCH, c-C₃H₂, などの炭素鎖分子が高強度で受 信された。特に C₄H などの強度は TMC-1 のそれを 上回り、柱密度も TMC-1 を凌駕する。TMC-1 は炭 素鎖分子が異常に豊富な天体として知られ、それを 超える天体はこれまで見つかっていなかった。Lupus 1A の発見はそれを覆すものとして意義が大きい。

Lupus 1A における負イオンの検出

星間分子雲は、電離度 10^{-8} 程度の弱電離プラズマ であり、これまで H_3^+ や HCO^+ など 10 種以上の正 イオンが検出されてきた。一方、負イオンについて は、2006 年 12 月に C_6H^- が TMC-1 で初めて同定 され、分子形成や電離度などへの影響に注目が集ま りつつある。上で述べた Lupus 1A では炭素鎖分子 が豊富なので、アメリカ国立電波天文台の GBT 100 m 望遠鏡を用いて負イオンの探査を行った。

観測の結果、 C_6H^- および C_8H^- のスペクトル線を 検出した(図2)。対応する中性分子 C_6H および C_8H のピーク強度は、これまで最強と思われていたTMC-1よりも 2-3 倍も強かった。また、 C_6H^- 、 C_8H^- も 同様に非常に強い。一方、中性分子に対する負イオ ンの存在量比は C_6H^- 、 C_8H^- についてそれぞれ 2.1 %、4.8%と、TMC-1での値とほぼ同じであった。炭 素鎖分子は、一般に電子親和力が大きく負イオンに なりやすい。今後、この天体で、より長い炭素鎖分 子の負イオンや、 C_3N^- や C_5N^- などの分子雲で未 検出の負イオンの検出が期待される。

HCL2 における CH と OH の分布

希薄な星間雲から星間分子雲コアが形成される過 程において、炭素の主要な形態は C^+ イオンからC原 子、CO分子へと変化する。その典型例はおうし座の Heiles Cloud 2 (HCL2) 領域である。C原子はHCL2 の南側 (CI $\ell - 0$)で非常に強く、一方で C^{18} Oは北 側で強く観測される。このことから、北から南に分 子雲コア形成が進んでいると考えられている。その 過程をより詳細に調べるため、昨年度、CHのスペ クトル線 (3.3 GHz)のマッピング観測を MPIfR の 100 m 望遠鏡で行った。CH は C や C⁺ から最初に 作られる分子で、CO への中間体とも言える。今年 度は、CH の観測を完結するとともに、酸素を含む 最も簡単な分子 OH についても観測を行った。

その結果、CH と OH の分布は、いずれも C¹⁸O の分布と炭素原子の分布をつなぐ構造をしているこ とがわかった。CH のスペクトル線は CI ピーク周辺 ではややブロード (3 km s^{-1} 程度) であるのに対し、 C¹⁸O が強い北側の領域ではブロード成分に細い (0.5 km s⁻¹) 成分が重畳した形をしており、分子雲コア 方向では細い成分が卓越していた。このように、分 子雲コア形成に伴ってスペクトル線の形が系統的に 変化していることがわかった。一方、OH では、そ の分布と線幅に大きな偏りはなかった。しかし、場 所によって 10 km s^{-1} の高速度成分が検出され、特 に HCL2 の北側の領域で顕著であった。この結果は、 HCL2 領域が北側から何らかの圧力を受けている可 能性を示しており、この領域での北から南への分子 雲コア形成とよく対応している。



 \boxtimes 6.5.30: Spectral line profiles of C₆H⁻, C₈H, and C₈H⁻ toward Lupus 1A

¹³C 同位体の希釈

星間分子雲において、分子の 12 C/ 13 C 比は、原 子と同様に 60 程度の値をとると考えられてきた。 しかし、CCH の 13 C 同位体種の観測を代表的星な しコア TMC-1 および星形成領域 L1527 に対して 行ったところ、TMC-1 では [CCH]/[13 CCH]=250、 [CCH]/[C 13 CH]=170 であり、L1527 でもそれぞれ 80 と 135 となった。このことは、CCH において 13 C 同位体が希釈していることを意味する。分子雲にお ける 13 C 同位体種の希釈は、Langer らによって 1984 年に予想されていたが、これまで全く注目されてこ なかった。今回、非常に明らかな希釈が見られたこ とで、その重要性が改めて認識された。

星間分子雲中での炭素の主要な存在形態は CO で ある。従って、CCH のような様々な炭素を含む分子 種は、CO と He⁺ の反応で生じる C⁺ から生成されて いる。 13 C⁺ も 13 CO から作られるが、 13 C⁺ + 12 CO \rightarrow 13 CO + 12 C⁺ + 35 K という交換反応によって再 度 CO に取り込まれてしまう。冷たい分子雲中では この逆反応はおこらないため、 12 C⁺ / 13 C⁺ 比が上が り、その結果、他の分子種における 12 C/ 13 C 比も上 がるというわけである。CCH の結果を踏まえ、改め て、TMC-1 における 13 C 同位体の存在量比をまと めたところ、ほとんどの分子で存在量比は 70-80 程 度、もしくはそれ以上の値であることが確認された。 今後、 13 C 同位体比の希釈の程度は、星間雲の進化 段階や分子の生成メカニズムについて新しい情報源 になると期待される。 大質量原始星候補天体 NGC2264 CMM3 におけ る第2の双極分子流

NGC2264-C 領域は太陽系近傍にある大質量星形 成領域であり、その中で最も強いミリ波源が CMM3 である。CMM3には非常に若い大質量星が含まれて いると考えられている。以前、CMM3に対してサブ ミリ波干渉計 (SMA) を用いて CO(J=2-1) 輝線の 高分解能観測を行ったところ、明らかに CMM3 を駆 動源とする 10 "スケールのコンパクトな双極分子流 を検出し、CMM3の内部に若い原始星があることを 示した。本研究では SMA では捉えられなかった数 10 "スケールの構造を調べるため、NMA (野辺山ミ リ波干渉計)を用いて HCO+ (J=1-0) 輝線の観測 を行った。その低速度成分に注目すると、SMA で検 出されたものに対応する南北に伸びる双極分子流が 検出された。一方、高速度成分に注目すると北西か ら南東に伸びる構造が検出された。この構造の赤方・ 青方偏移成分の分布は、これまで知られていた双極 分子流のものとは明らかに異なり、第2の双極分子 流と言える。このことは、CMM3に2つ以上の原始 星が生まれていることを意味している。

6.5.2 スペクトル線サーベイ

我々は国立天文台野辺山観測所のレガシープロジェ クトの一つとして、衝撃波領域L1157と低質量星形 成領域L1527(WCCC天体)におけるスペクトル線 サーベイ観測を推進している。ある周波数範囲のス ペクトル線をくまなく観測することで、それぞれの 化学組成の特徴を先入観なく把握し、衝撃波化学と WCCCの理解を格段に深めることを目標としている。

L1157の衝撃波領域

昨年度に引き続き、低質量原始星 L1157-mm 近傍 の衝撃波領域 L1157 B1 においてラインサーベイ観測 を行った。この領域では、衝撃波により星間塵マント ルから蒸発したと考えられる CH₃OH や HCOOCH₃ などの有機分子をはじめ、高温高密度下での多様な 化学現象が観測されており、それらの理解を通して 衝撃波化学の新たな局面を切り開きつつある。本年 度は新たに10GHzに及ぶ周波数帯域を観測し、いて 座やオリオン座の大質量星形成領域など高温高密度 環境下で特有の、NH₂CHO や PN といった分子を、 この領域で初めて検出した。特に PN は、これまで 気相反応で生成するのか、星間塵マントルで生成し たものが衝撃波で気相に放出されたのか、議論がな されてきたが、原始星から L1157B1 方向に吹き出す 分子流の時間規模では、気相反応で生成するのは困 難であるため、星間塵マントルからの放出を観測し ている可能性が高いことがわかった。

低質量原始星 L1527

本年度は、昨年度の 85-92 GHz, 109 GHz 帯に加 え、83-85 GHz の 2 GHz について高感度観測を行っ た。これにより、今期まででほぼ 10 GHz の帯域を カバーすることができた。 $rms(T_{mb})$ は昨年度同様 5 mK から 9 mK を達成した。 $HC^{18}O^+(J=1-0)$ や $c-C_3H_2(2_{1,2}-1_{0,1})$ などの比較的簡単な分子をはじめ として、HNC3 や $l-C_3H_2$ 、DC3N などの炭素鎖分子 輝線が強く検出された。さらに、C5H の高励起輝線 も 100 mK 以上の強度で検出された。また、 $c-C_3H_2$ については、¹³C 同位体種の高励起遷移が見えてきたこと で、 $^{12}C/^{13}C$ 比を正確に求めることが可能になり、 ¹³C 同位体の希釈問題や、分子生成過程を探る上で 重要な手掛かりが得られた。

重水素濃縮度の観測を目指した 70 GHz 帯新受信機 の開発

重水素を含む分子のノーマル種に対する存在比は DとHの原子存在比よりも高くなる。これを重水素 濃縮という。重水素濃縮は、分子雲の進化段階、分 子のダストへの吸着度、分子雲の温度を鋭敏に反映 するため、星形成領域の化学診断に非常に有効な指 標である。HCNやCCHなどの重元素2個からなる 分子の重水素化物は、70 GHz帯にJ=1-0の基 本遷移を持つ。本研究室では、この帯域を高感度観 測するために、野辺山45m電波望遠鏡に搭載する 69-85 GHz帯の新受信機を天文学教育研究センター・ 国立天文台などの研究者と共同で開発している。サ イドバンド分離型SISミクサを2個搭載し、2偏波 を同時受信できる設計になっている。本年度は、冷 却デュワーの製作など、性能評価の準備を進めた。

6.5.3 テラヘルツ帯観測技術の開拓

テラヘルツ帯における観測を行うためには、そこで動作する低雑音の周波数混合器(ヘテロダインミクサ)の開発が不可欠である。サブミリ波帯においては、 SIS (Superconductor Insulator Superconductor) ミ クサ素子が広く用いられてきた。ジョセフソン接合 の非線形性を利用したもので、Nb(ニオブ)を超伝 導物質に用いたものは、750 GHz 以下では量子雑音 限界に迫る性能を発揮している。しかし、750 GHz 以上の周波数では、超伝導キャップ間の吸収による 損失が増大するため、急激に性能が低下する。

そこで、本研究室では、超伝導ホットエレクトロン・ボロメータ(HEB)ミクサ素子に注目している。 HEBミクサ素子は電磁波吸収による超伝導状態の破壊を利用し、受信信号と局部発振信号の「うなり」 中間周波信号 に伴う電力変化をバイアス電流の変化として検知するものである。そのためには、超伝 導体をサブミクロンサイズにすること、そして、素 子内に生じた熱電子を「うなり」の周期よりも早く 冷却し、超伝導状態を回復させる必要がある。この 冷却メカニズムには、(1)熱電子の拡散によって電極 に逃がす方法(拡散冷却)と、(2)フォノンとの相互 作用を介して基板に逃がす方法(格子冷却)の2つ がある。我々は、主にNbTiNやNbNを用いた格子 冷却型 HEB ミクサ素子の開発研究を進めている。

AlN 緩衝層を用いた T_c の改善 II

本研究室で主に開発している NbTiN HEB ミクサ は格子冷却型なので、超伝導薄膜の膜厚を数 nm 程 度まで薄くすることで性能向上を図ることができる。 しかし、スパッタ法で成膜した場合、膜厚を薄くする と膜の不均一性のために超伝導転移温度 (T_c) が急激 に低下する。そこで、膜の均一性を高めるため、基板 と超伝導薄膜の間に緩衝層を導入した。NbTiN に対 しては AIN 緩衝層が有効であることがすでに報告さ れている。本研究室の NbTiN においても AlN 緩衝 層は有効で、6 nmの膜厚で T_c が6 K から 10 K へ大 幅に上昇した。また、NbTiN と同じ結晶構造の NbN についても AlN 緩衝層を導入したところ、NbTiN と 同等の改善が見られることがわかった。立方晶系の NbTiN/NbN に対して六方晶系の AlN は、緩衝層と して一般的な組合せではない。しかし、NbTiN/NbN の 111 面に AlN の 001 面が 1%以下の範囲で非常に 良く整合するため、この改善が起こるのではないか と考えた。この点を確認するために、X線解析を行っ た結果、AlN 緩衝層の存在で NbN の 111 面が卓越 して成膜されることが確認できた。また、AlN 緩衝 層を (多結晶) (001 面配向) と変化させた時、T_c の上昇幅、常温抵抗率の低減幅が相転移のように変 化する様子が観察された(図3)。



 \boxtimes 6.5.31: Variation of T_c and ρ as a function of the N₂/Ar flow ratio that is related to the degree of the (111) orientation of the AlN buffer layer

加熱成膜装置の導入とテスト

薄膜の高品質化のためには、緩衝層導入の他に製 膜時の基板加熱が有効である。これはスパッタ中に 基板の温度を数 100 まで上げて成膜することで均 ーな膜を得る方法である。今年度、本研究室の複合 成膜装置の NbTi ターゲットに赤外線基板加熱装置 を導入し、初期テストを行った。装置としては 800 程度まで加熱できる能力があるが、まず比較的低い 400 で動作確認を行った。すると、NbTiN 15 nm の厚みで $T_c = 11K$ となり、若干の改善が見られる ことがわかった。今後、最適化を進め、HEB ミクサ の製作プロセスに組み込む予定である。

NbN/AlN 膜を用いた HEB ミクサの開発

現在、世界的に見て HEB ミクサに用いられる超 伝導素材は NbN と NbTiN である。天文観測に適し た導波管型の HEB ミクサでは、基板に誘電率の小 さい石英を用いる必要がある。NbTiN は石英上でも 比較的良い膜が成膜できるが、NbN では難しいこと が知られている。そのため、本研究室ではこれまで NbTiN を用いて HEB ミクサを製作してきた。しか し、AlN 緩衝層が NbN に有効であることがわかった ので、この方法を用いて NbN を使った導波管型 HEB ミクサを製作し、性能評価を行った。製作した 54 個 の素子すべてで良好な I-V 曲線が得られたが、臨界 電流密度がやや低い傾向にあった。それでも、800 GHz 帯での測定で、受信機雑音温度 2400 K (DSB) を得ることができた。この結果はまだ満足できる値 ではないが、NbN を使った導波管型 HEB ミクサを 実現できたことは大きな意義がある。

NbTiN を用いた準光学 HEB ミクサの開発

導波管型ミクサでは周波数が高くなるにつれ導波 管部の製作が困難となる。そこで、より高周波数化を 目指し、準光学型のミクサ素子の開発を進めている。 本研究では振動の少ないパルス管冷凍機を導入して HEB ミクサの測定系を構築し、評価実験をおこなっ た。その結果、受信機雑音温度として 3400 K、安定 時間として約 10 秒の結果を得た。これまで HEB ミ クサでは受信機雑音性能と安定性を両立させること は難しく、安定性を高めるためには雑音性能を犠牲 にするなどの方法がとられてきた。本研究では、IF 出力が HEB ミクサに流れる電流量 (バイアス電流) に強く依存していることに注目し、バイアス電流を 調整することで受信機雑音性能と安定性が両立し得 ることを見出した。今後、光学系の改善で、受信機 雑音を 1600 K まで低減できると見込まれる。この 研究は、名古屋大学 STE 研究所および筑波大学の研 究者との共同研究である。

テラヘルツ帯量子カスケードレーザーの開発

ヘテロダイン受信機では周波数純度の高い(~10 kHz)局部発振器が必要である。しかし、2 THz 以上 の周波数では満足できる発振器が確立していない。そ こで、量子カスケードレーザ(QCL)に着目し、情報 通信研究機構(NICT)との共同で開発を進めている。 QCL の製作は NICT で行っている。GaAs/AlGaAs を用いた共鳴LOフォノン引き抜き型のQC構造で、 3-4 THz での発振に成功している。現在はパルス駆 動であるが、発振のしきい値電流を低減することで 消費電力を抑えて連続発振を実現すべく、製作プロ セスの開拓を含めた実験を進めている。また、QCL の発振出力を HEB ミクサに導入して検出する実験 も進めている。QCL と HEB をそれぞれ別の液体 He デュワーに組み込んで冷却し、QCL の出力を HEB ミクサの I-V 特性の変化として検出することに成功 した。本研究で用いた HEB ミクサは QCL の発振 周波数 (3.9 THz) に最適化したものではなく、また、 QCL の出力はデューティ比が5%のパルス発振であ る。それにもかかわらず、QCL の光を HEB で受信 できたことは大きな前進と言える。

<受賞>

 [1] 坂井南美、井上研究奨励賞、井上科学財団、2010 年 2月4日。

<報文>

(原著論文)

- [2] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., Burton, M., and Yamamoto, S., "Discovery of the Second Warm Carbon-Chain-Chemistry Source, IRAS 15398-3359 in Lupus", ApJ, 697, 769-786 (2009).
- [3] Hirota, T., Ohishi, N., and Yamamoto, S., "A Search for Carbon-Chain-Rich Cores in Dark Clouds", ApJ, 699, 585-602 (2009).
- [4] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., "Deuterated Molecules in Warm Carbon Chain Chemistry: The L1527 Case", ApJ, 702, 1025-1035 (2009).
- [5] Shiino, T., Shiba, S., Sakai, N., Yamakura, T., Jiang, L., Uzawa, Y., Maezawa, H., and Yamamoto, S., "Improvement of the Critical Temperature of Superconducting NbTiN and NbN Thin Films Using the AlN Buffer Layer", Supercond. Sci. Technol. 23, 045004 (2010).
- [6] Sakai, N., Saruwatari, O., Sakai, T., Takano, S., and Yamamoto, S., "Abundance anomaly of the ¹³C species of CCH", Astron. Astrophys., in press.
- [7] Jiang, L., Shiba, S., Shiino, T., Shimbo, K., Sakai, N., Yamakura, T., Irimajiri, Y., Ananthasubramanian, P.G., Maezawa, H, and Yamamoto, S., "Development of 1.5 THz Waveguide NbTiN Superconducting Hot Electron Bolometer Mixers", Supercond. Sci. Technol. in press.
- [8] Sakai, T., Sakai, N., Hirota, T., and Yamamoto, S., "A Survey of Molecular Lines toward Massive Clumps in Early Evolutionary Stages of High-Mass Star Formation", ApJ, in press.

(学位論文)

- [9] 椎野竜哉、「AIN 緩衝層を用いた NbN/NbTiN 超伝 導テラヘルツ HEB ミクサ素子の開発」、修士論文、 2010 年 3 月
- [10] 猿渡修、「大質量原始星候補天体 NGC2264 CMM3 の高分解能観測」、修士論文、2009 年 3 月

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [11] Shiino, T., Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S. "Discovery oc Carbon-Chain Rich Core in Lupus", Advancing Chemical Understanding through Astronomical Observations, Virginia, U.S.A, May 27-29, 2009
- [12] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., Burton, M., and Yamamoto, S. "Chemical Variation in Low-Mass Star Forming Regions", Millimeter and Submillimeter Astronomy at High Angular Resolution, Taipei, Taiwan, June 8-12, 2009
- [13] Shiino, T., Todoroki, K., Minh. N. D., Jiang, L., Shiba, S., Uzawa, Y., Maezawa, H., Sakai, N., and Yamamoto, S. "Improvement of Critical Temperature of Superconducting NbN and NbTiN Thin Films Using an AlN Buffer Layer", 12th International Superconductive Electronics Conference, Fukuoka, June 16-19, 2009
- [14] Saruwatari, O., Sakai, N., Sakai, T., Liu, S.-Y., Su, Y.-N., Yamamoto, S., "SMA Observation of NGC2264 MMS3, a Candidate for 'High-Mass Class 0' Protostar", Millimeter and Submillimeter Astronomy at High Angular Resolusion, Taiwan, June 8-12, 2009

招待講演

- [15] Sakai, N. "Chemical Composition of Low-Mass Star-Forming Regions", Advancing Chemical Understanding through Astronomical Observations, Robert C. Byrd Green Bank Telescope, WV, US, May 26-29, 2009
- [16] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., "Distribution of Carbon-Chain Molecules around Low-Mass Protostars", Submillimeter and THz Astrochemistry, Tokyo, Japan, March17-18, 2010
- [17] Yamamoto, S. and Sakai, N., "¹³C Isotope Fractionation in Cold Clouds", Data Needs for ALMA, Cologne, Germany, October 5-7, 2009
- [18] Yamamoto, S, "Molecules with ALMA", ALMA-J User Meeting 2009, Tokyo, December 22-23, 2009

(国内会議)

一般講演

[19] 芝祥一、入交芳久、山倉鉄矢、前澤裕之、関根徳 彦、寶迫巌、山本智、「HEB ミクサを用いた THz-QCLの周波数安定化」、第70回応用物理学会学術講 演会 9a-M-11、富山大、2009年9月8-11日

- [20] 山口貴弘、酒井剛、梅本智文、高野秀路、杉村美佳、 坂井南美、山本智、他 NRO ラインサーベイプロジェ クトメンバー「L1157 の衝撃波領域におけるライン サーベイ」、日本天文学会秋季年会 Q43a、山口大学、 2009 年 9 月 14-16 日
- [21] 猿渡修、榊原祐介、古屋隆太、坂井南美、酒井 剛、Sheng-Yuan Liu、Yu-NungSu、山本智、「大質 量'Class 0' 候補天体 NGC2264MMS3 の双極分子 流」、日本天文学会秋季年会 P25a、(同上)
- [22] 坂井 南美、酒井 剛、廣田朋也、山本 智:「Deuterated Molecules in Warm Carbon Chain Chemistry」、日 本天文学会秋季年会 P24a、(同上)
- [23] 椎野竜哉、坂井南美、酒井剛、廣田朋也、山本智、「お おかみ座における炭素鎖分子の豊富な星なしコアの 発見」、日本天文学会秋期年会 P26a、(同上)
- [24] 椎野竜哉、Jiang Ling、芝祥一、鵜澤佳徳、山倉鉄矢、 前澤裕之、坂井南美、山本智、「AIN 緩衝層を用いた NbN, NbTiN 薄膜の超伝導転移温度の改善」、日本 天文学会秋期年会 V75b、(同上)
- [25] 芝祥一、入交芳久、小山知記、山倉鉄矢、前澤裕之、関根徳彦、寶迫巌、山本智、「HEB ミクサを用いたTHz-QCLの周波数安定化」、研究討論会「テラヘルツ電子デバイスの新展開」、秋保リゾート・ホテルクレセント 仙台、2010年2月25-26日
- [26] 椎野竜哉、山倉鉄矢、芝祥一、Jiang Ling、鵜澤佳徳、 前澤裕之、坂井南美、山本智、「NbN/AlN 薄膜を用 いた THz 帯超伝導 HEB ミクサの開発」、第 57 回応 用物理学関係連合講演会 19p-V-5、東海大学、2010 年 3 月 17-20 日
- [27] 芝祥一、入交芳久、小山知記、山倉鉄矢、前澤裕之、関根徳彦、寶追巌、山本智、「HEB ミクサを用いた THz-QCL の周波数安定化 (II)」、第57回応用物理学関係連合講演会 18a-M-6、(同上)
- [28] 坂井 南美、酒井 剛、廣田朋也、山本 智:「Abundance Anomaly of the ¹³C Species of CCH」、日本天文学 会春季年会 Q46a、広島大学、2010 年 3 月 24-27 日

招待講演

- [29] 坂井 南美: Chemical Variation in Low-Mass Star-Forming Regions、第9回分子分光研究会、富山大 学、2009年5月15-16日
- (セミナー他)
- [30] Yamamoto, S., "Chemical Evolution of Molecular Clouds", Department of Physics, University of Stockholm, May 11, 2009
- [31] 坂井 南美: 「星と惑星ができるまで」、サイエンスカ フェ本郷、東京大学、2009 年 6 月 14 日
- [32] 坂井 南美:「星の誕生と化学進化」、ビッグバンセンタークリスマス講演会、東京大学、2009 年 12 月25 日

6.6 酒井広文 研究室

本研究室では、(1)高強度レーザー電場を用いた分 子操作、(2)高次の非線形光学過程(多光子イオン化 や高次高調波発生など)に代表される超短パルス高 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、(3)アト秒領域の現象の観測とその解明、(4) 整形された超短パルスレーザー光による原子分子中 の量子過程制御を中心に活発な研究活動を展開して いる。

始めに、分子の配列と配向の意味を定義する。分 子の頭と尻尾を区別せずに分子軸や分子面を揃える ことを配列(alignment)と呼び、頭と尻尾を区別し て揃えることを配向(orientation)と呼ぶ。英語では 混乱はないが、日本語では歴史的経緯からしばしば 逆の訳語が使用されて来たので注意する必要がある。 また、実験室座標系で分子の向きを規定する三つの オイラー角のうち、一つを制御することを1次元的 制御と呼び、三つとも制御することを3次元的制御 と呼ぶ。以下に、研究内容の経緯とともに、本年度 の研究成果の概要を述べる。

6.6.1 レーザー光を用いた分子配向制御技 術の展開

本研究室では、レーザー技術に基づいた分子操作 と配列あるいは配向した分子試料を用いた応用実験 を進めている。分子の向きが揃った試料を用いるこ とが出来れば、従来、空間平均を取って議論しなけれ ばならなかった多くの実験を格段に明瞭な形で行う ことが出来る。そればかりでなく、化学反応における 配置効果を直接的に調べることができるのを始めと し、物理現象における分子軸や分子面とレーザー光 の偏光方向との相関や分子軌道の対称性や非対称性 の効果を直接調べることができるなど、全く新しい 実験手法を提供できる。実際、配列した分子試料の 有効性は、I2分子中の多光子イオン化過程を、時間 依存偏光パルスを用いて最適制御することに成功し たり (T. Suzuki et al., Phys. Rev. Lett. 92, 133005 (2004))、配列した分子中からの高次高調波発生実験 において、電子のド・ブロイ波の打ち消しあいの干 渉効果を観測することに成功したり (T. Kanai et al., Nature (London) **435**, 470 (2005)) するなどの、本 研究室の最近の成果でも実証されている。

分子の配向制御については、静電場とレーザー電 場の併用により、既に1次元的および3次元的な分 子の配向が可能であることの原理実証実験に成功し た。これらの実験は、分子の回転周期に比べてレー ザー光のパルス幅が十分長い、いわゆる断熱領域で 行われたものである。この場合、分子の配向度はレー ザー強度に追随して高くなり、レーザー強度が最大 のときに配向度も最大となる。一方、光電子の観測 や高精度の分光実験では、高強度レーザー電場が存 在しない状況で試料分子の配向を実現することが望 まれる。本研究室では、静電場とレーザー電場の併 用による手法が断熱領域で有効なことに着目し、分 子の回転周期 $T_{\rm rot}$ に比べて立ち上がりのゆっくりし たパルスをピーク強度付近で急峻に遮断することに より、断熱領域での配向度と同等の配向度を高強度 レーザー電場が存在しない状況下で実現する全く新 しい手法を提案した (Y. Sugawara *et al.*, Phys. Rev. A 77, 031403(R) (2008))。昨年度、ピーク強度付近 で急峻に遮断されるようなパルスをプラズマシャッ ターと呼ばれる手法を用いて整形する技術を開発し、 レーザー電場の存在しない条件下で分子配向を実現 することに初めて成功した (A. Goban *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 013001 (2008))。

一方、本研究室では先に、分子の回転周期よりも十 分長いパルス幅をもつ高強度非共鳴2波長レーザー 電場を用いて断熱的に分子配向を実現する手法を提 案していた(T. Kanai and H. Sakai, J. Chem. Phys. 115,5492 (2001))。この手法では、使用するレーザー の周波数がパルス幅の逆数よりも十分大きな場合に は、分子の永久双極子モーメントとレーザー電場と の相互作用はパルス幅にわたって平均するとゼロと なる。したがって、分子の配向に寄与しているのは 分子の超分極率の異方性とレーザー電場の3乗の積 に比例する相互作用、すなわち、それによって形成 されるポテンシャルの非対称性である点に注意する 必要がある。

昨年度は、この手法に基づいて、2波長レーザー電 場を用いて OCS 分子を配向制御することに初めて成 功した。今年度は新たに C₆H₅I 分子を用い、本手法 の汎用性の実証を行った。実験の概略はつぎのとお りである。高強度2波長レーザー電場には、ナノ秒 Nd:YAG レーザーの基本波 (波長 $\lambda = 1064 \text{ nm}$) と その第2高調波 ($\lambda = 532 \text{ nm}$)を用いた。1/2 波長板 を用いて2波長の偏光方向を平行にして実験に使用 した。2波長間の相対位相は溶融石英板の回転により 制御した。2波長レーザー光を色消しレンズで集光 し、真空チェンバーの相互作用領域に導いた。典型 的なピーク強度は、1064 nm 光が 1.6×10¹² W/cm² 532 nm 光が 5.0 × 10¹¹ W/cm² であった。分子試料 には背圧 90 atm の He をキャリアガスとして室温で の分圧が約1 Torr の C_6H_5I 分子を用い、パルスバ ルブを使用して超音速分子線として供給した。分子 が配向している様子は、velocity map 型の2次元イ オン画像化装置を用いて観測した。2波長レーザー 光のピーク強度付近で高強度フェムト秒 Ti:sapphire レーザーパルス (ピーク強度 $\sim 3 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$)を 集光照射することにより、C₆H₅I分子の2価イオン を生成し、クーロン爆裂で生成されるフラグメント イオン I⁺ の角度分布を観測した (フラグメントイオ ン C₆H⁺ は、2 波長レーザー電場の存在下で解離し てしまうため、観測できなかった)。2波長レーザー パルスによって配向した分子のみを検出する為に、 Ti:sapphire レーザー光の光路にテレスコープを挿入 してビーム径を制御し、Ti:sapphire レーザー光の集 光径が2波長レーザー光の集光径よりも小さくなる ように調整した。2波長レーザー光の偏光方向は検出 器面に平行にし、Ti:sapphire レーザー光のそれは、 多光子イオン化率の角度依存性の影響を避ける為、 検出器面に垂直にした。2次元検出器はマイクロチャ ンネルプレートと蛍光板で構成されており、蛍光板 のイメージを CCD カメラで撮影した。

最も大きな配向度が観測されたときの相対位相差を

便宜的に $\phi = 0$ とし、配向度の指標である $\langle \cos \theta \rangle$ (θ は、2波長レーザー光の偏光方向と分子軸のなす角) を、相対位相差 ϕ の関数として測定すると、 $\langle \cos \theta \rangle$ が、2πを周期として変調している様子が確認でき た。この観測結果は、高強度非共鳴2波長レーザー 電場を用いて、C₆H₅I分子の配向制御が実現してい ることの明確な証拠と解釈することができる。先に General valve を用い、背圧 9 atm の Ar をキャリア ガスとして使用したとき、配向を示す明確な証拠は得 られなかったが、今回 Even-Lavie valve を用い、背 圧 90 atm の He をキャリアガスとして使用すること によって配向を示す明確な証拠を得ることができた。 General value を用いたときの配列度 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ が 0.65 程度であったのに対し、Even-Lavie valve を用いたと きのそれが0.92 にまで増大したことは、Even-Lavie valve の採用により分子の初期回転温度を下げるこ とができたことを意味している。すなわち、今回の 観測結果は、配向度の増大に初期回転温度の低下が 有効であることを示すとともに、非共鳴2波長レ-ザー電場を用いる本手法の汎用性を示している。

·方、Even-Lavie valve を用いても、OCS やC₆H₅I 分子の配向度は、0.01のオーダーであり、劇的な配 向度の増大を図ることは困難であることが明らかに なった。この困難は、回転量子状態が Boltzmann 分 布している thermal ensemble では、いわゆる right way に向く状態と wrong way に向く状態が混在して いることに起因している。本研究室では、配向した 分子試料を用いた分子内電子の立体ダイナミクスに 関する研究の推進を目指しており、配向度の高い分 子試料の生成が不可欠である。そこで、初期回転量 子状態を選別した試料に対し、静電場とレーザー電 場を併用する手法や非共鳴2波長レーザー電場を用 いる手法により高い配向度の実現を目指すことを決 断した。具体的には、主として対称コマ分子の状態 選別に適した六極集束器 (hexapole focuser) と主と して非対称コマ分子の状態選別に適した分子偏向器 (molecular deflector) を組み込んだ実験装置の開発 に着手し、現在立上げを進めている。六極集束器の 立上げに当たり、大阪大学大学院理学研究科化学専 攻の笠井俊夫教授の全面的な協力を得た。ここに記 して謝意を表する。

6.6.2 偏光方向の直交した2波長レーザー パルスを用いた配列分子中からの高 次高調波発生

近年、配列した分子中からの高次高調波を観測す ることにより、分子軌道に関する情報を抽出する研究 が大変注目されている。Itataniらは、非断熱的に配 列させた N₂ 分子を用い、分子の配列方向に対し様々 な方向に偏光したプローブ光を照射して発生する高 調波のスペクトルを観測し、Fourier slice theorem に 基づいて、N₂ 分子の分子軌道を再構成して見せた (J. Itatani *et al.*, Nature (London) **432**, 867 (2004))。 この手法では、高調波発生の第1ステップであるイ オン化の配列依存性を本来別に評価する必要がある が、Itataniらの実験ではイオン化ポテンシャルがほ ぼ等しい Ar のイオン化過程とほぼ同じであると仮 定して、その高調波スペクトルを参照用として用い ている。また、Fourier slice theorem に基づく分子 軌道の再構成を行うために、数多くの方向から高調 波スペクトルを観測する必要がある。実際、Itatani らの実験では19の方向から観測している。

一方、偏光方向の直交した2波長レーザーパルス を用いて配列した分子中からの高調波を観測すれば、 隣合う偶数次と奇数次の高調波発生に寄与する電子 のトラジェクトリーはほぼ等しいと考えることがで きるので、それらの強度比を取ることにより、高調 波発生の第1ステップであるイオン化の配列依存性 の影響を打ち消すことができる。また、高調波の次 数によって再結合角が異なるので、2波長の相対位 相差を変えながら高調波を測定すれば、分子軌道の 再構成に必要な情報が一挙に得られるので、1波長 を用いる手法に比べ、高調波の観測過程を大幅に簡 略化できると期待される。

本研究では、非断熱的に配列した N₂ 分子や O₂ 分 子を試料とし、フェムト秒 Ti:sapphire レーザー増幅 器からの出力 (ω) と BBO 結晶を用いて発生させた 第2高調波 (2ω) の偏光方向を直交させて、 ω の偏光 方向が分子軸と平行なときと 2ω の偏光方向が分子 軸と平行なときについて、2波長の相対位相差を変 えながら高調波スペクトルを観測した。観測された 高調波スペクトルには、最高被占分子軌道 (HOMO: Highest Occupied Molecular Orbital) $onumber \sigma_g$ の対称 性をもつ N_2 と π_g の対称性をもつ O_2 との間で顕著 な差を認めることができた。具体的には、N2分子の 場合には、カットオフ近傍の偶数次の高調波の強度 が奇数次の高調波の強度に比べて著しく弱いのに対 し、O₂分子の場合には偶数次と奇数次の高調波の強 度に大きな差がないことが明らかになった。この違 いは HOMO の対称性の違いによって説明すること ができる。現在、観測された高調波スペクトルを用 い、本研究で考察した手順に従って、分子軌道の再 構成を進めている。上述したように、HOMO の対称 性の違いを反映した高調波スペクトルが観測されて いるので、ある程度妥当な結果が得られると期待さ れる。

6.6.3 波長1300 nm 及び800 nm パルス を用いた配列分子中からの高次高調 波発生

本研究室では先に、配列した分子中からの高次高 調波発生実験において、特に CO_2 分子を試料とした 場合、再結合過程における電子のド・プロイ波の量子 干渉効果を世界で初めて観測することに成功した(T. Kanai et al., Nature (London) 435, 470 (2005))。観 測された効果は、詳細な量子力学的計算でも再現され ているが、直感的な描像として、 CO_2 分子のHOMO の対称性(π_g)を決めている両端のO原子近傍からト ンネルイオン化した電子波束が再結合時に破壊的な 干渉を起こす2中心干渉効果で説明できる。本成果 は、一分子中で光の一周期以内で起こる電子のド・ブ

ロイ波の量子干渉効果という基礎物理学的な興味に 加え、この量子干渉効果を用いることにより分子構 造(核間距離)を1フェムト秒オーダーの極限的短時 間精度で決定できることから当該分野で大変注目さ れた。その後 Vozzi らは、本研究とほぼ同様の実験 系を用いた観測を行い、本研究室で観測したよりも より高い光子エネルギー領域で量子干渉効果が観測 されることを報告した (C. Vozzi et al., Phys. Rev. Lett. 95, 153902 (2005))。このため、同じ CO₂ を用 いているのに何故異なる光子エネルギー領域で量子 干渉効果が起こるのかという素朴な疑問が生じ、こ の観点から現在でも多くの研究者の関心を集めるト ピックとなっている。実際、最近 Smirnova らは、(2 中心量子干渉というよりもむしろ) CO2 分子中のチャ ンネル X (HOMO) からトンネルイオン化した電子 波束と一般的にはその寄与は極めて小さいと考えら れるチャンネル B (HOMO-2) からトンネルイオン化 した電子波束との破壊的干渉を観測しているとする 大胆な解釈を提案した (O. Smirnova et al., Nature (London) 460, 972 (2009))

そこで本研究では、上記の CO₂ 分子中での量子干 渉効果の支配的な原因を探る、 N_2 などの他の分子中 での量子干渉効果を調べる、新現象を探索するなどの 複数の目的から、これまで専らフェムト秒 Ti:sapphire レーザー増幅システムからの出力である中心波長800 nm 近傍のパルスが用いられていたのに対し、光パラ メトリック増幅器 (OPA) から得られる 1300 nm パ ルスを用いて実験を行った。特に波長1 µm 以上の パルスを用いることにより、高調波発生の3つのプ ロセス全てに対し、800 nm パルスのときと異なる以 下のような効果が期待できる。(1) 第1ステップで あるイオン化過程は1300 nm パルスを用いることに よってよりトンネルイオン化の状況に近づく。(2) 第 2 ステップのレーザー電場中での電子波束の運動 は、同じ short trajectory でも 1300 nm パルス中の 方が、飛行時間が長くなり、一般的には電子波束は より広がると考えられる。(3)したがって、第3ス テップである再結合時には、1300 nm パルス中での 電子波束の方が平面波近似の妥当性が高まる。さら に、分子軌道イメージングの観点からは、同じピー ク強度の場合、より長波長のパルスを用いれば、カッ トオフ則 $E_{\max} = I_p + 3.17 U_p (I_p$ は媒質のイオン 化ポテンシャルであり、 U_p はポンデラモーティブポ テンシャルである) から、より高い光子エネルギー まで高調波スペクトルが得られ、また、長波長パル スの1光子エネルギーがより小さいことから高調波 スペクトルがより密になり、800 nm パルスで得られ るよりも高調波スペクトルの情報量が増えるという メリットもある (V.-H. Le *et al.*, Phys. Rev. A 76, 013414 (2007)).

非断熱的に配列した分子中からの高調波を観測す るために、ポンプ プローブ実験を行った。回転波 束を励起して分子を配列するためのポンプ光として、 Ti:sapphire レーザー増幅システムの出力の一部を用 いた (パルス幅 $\tau \sim 50$ fs、ピーク強度 $I \sim 3 \times 10^{13}$ W/cm²)。高調波発生用のプローブ光としては、光パ ラメトリック増幅器からの出力 (中心波長 $\lambda \sim 1300$ nm、 $\tau \sim 60$ fs、ピーク強度 $I \sim 7 \times 10^{13}$ W/cm²) を 用いるとともに、比較のため Ti:sapphire レーザー 増幅システムの出力 ($\lambda \sim 800 \text{ nm}, \tau \sim 50 \text{ fs}, ピーク強度 I ~ 2 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$) も用いた。試料として N₂、O₂、CO₂分子を用い、ポンプ光とプローブ光 間の遅延時間 Δt の関数として特に $T_{\text{rot}}/2$ (T_{rot} は 分子の回転周期) 近傍の高調波の時間発展を観測し た。また、高調波発生におけるイオン化過程と再結 合過程の相関を調べるため、800 nm パルスでイオン 化した主として 1 価の分子イオンも観測した。

HOMO が σ_q の対称性をもつ N₂分子の場合、800 nm パルスを用いて 25 次高調波 (光子エネルギー~ 39 eV)を観測すると、高調波強度の時間発展はイオ ン強度の時間発展と同位相で変調することが確認で きた。このことは再結合過程がイオン化過程を打ち 消すような効果をもたないことを意味している。-方、再結合過程は連続状態から基底状態 (HOMO) へ の遷移双極子モーメントで決まり、その遷移双極子 モーメントはプローブ光の波長で決まるのではなく、 再衝突電子の運動量 (ド・ブロイ波長) で決まる。実 際、800 nm パルスの 25 次高調波とほぼ同じ光子エ ネルギーをもつ 1300 nm パルスの 41 次高調波の時 間発展もイオン強度と同位相で変調することが確認 できた。N₂分子については、29 eV から 47 eV まで の光子エネルギーの範囲で 800 nm パルスを用いた ときと1300 nm パルスを用いたときの高調波強度が ほぼ同様の時間発展を示すことが確認できた。

HOMO が π_q の対称性をもつ O₂分子の場合にも 同様の実験を行い、光子エネルギー 24 eV から 47 eVの範囲で800 nm パルスを用いても1300 nm パル スを用いても高調波強度はイオン強度と同位相の時 間発展を示すことが確認できた。ところが、CO2分 子を用いた場合には N_2 や O_2 の場合と大きく異なる 結果が観測された。 CO_2 分子のHOMOの対称性は O_2 分子のそれと同じ π_g であるが、HOMO の対称性 を決めている両端の O 原子間の距離 (R=0.232 nm)が O₂ 分子のそれ (R = 0.121 nm) の約 2 倍である 点に違いがある。CO2 分子の場合には、29 eV から 39 eV の光子エネルギーの範囲で 800 nm パルスを用 いても 1300 nm パルスを用いても高調波強度はイオ ン強度と逆位相の時間発展を示すことが確認できた。 観測された効果は電子のド・ブロイ波の2中心干渉 モデルでよく説明できる。実際、高調波強度とイオ ン強度の時間発展に逆相関が観測された光子エネル ギーの範囲で破壊的干渉条件 $R\cos\theta = \lambda_{dB}$ (θ は分 子軸とプローブ光の偏光方向のなす角であり、 λ_{dB} は電子のド・ブロイ波長である)が満たされている と考えることができる。破壊的干渉条件はプローブ 光の波長で決まるのではなく、再衝突電子の運動量 (ド・ブロイ波長)によって決まる点に注意すべきで あり、今回の観測結果は先に本研究室の Nature 論文 で指摘した2中心干渉効果が支配的な現象であるこ とを強く示唆していると考えられる。実際、プロ-ブ光の波長も強度も異なる今回の実験条件では、第 1ステップのイオン化過程の性質が大きく異なるは ずであるので、同じ光子エネルギー領域で観測され た破壊的干渉効果をチャンネル X とチャンネル B と の破壊的干渉効果で説明するのは原理的に困難であ ると考えられる。

本研究に関連し、CO2 分子中での電子のド・ブロ イ波の量子干渉効果が観測される高調波の領域のポ ンプ光強度依存性、すなわち、分子の配列度依存性 を調べた。この実験のプローブ光には、ピーク強度 2×10^{14} W/cm² の 800 nm パルスを用いた。ポンプ 光強度としては、4.7、3.3、及び 1.5×10^{13} W/cm² の三つの場合について調べた。まず、ポンプ光とプ ローブ光間の遅延時間 $\Delta t \sim T_{rot}/2$ 付近で調べたと ころ、弱い高調波信号の揺らぎに起因すると考えら れる一部の例外はあるものの、上記の三つのポンプ 光強度の全てについて 21 次から 29 次の範囲にわたっ てイオン信号と高調波信号が逆相関を示すことが確 認できた。ちなみに、今回の実験条件の下で評価さ れた上記の三つのポンプ光強度に対する alignment 状態 (anti-alignment 状態) の配列度 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ は、そ れぞれ、0.40 (0.28)、0.38 (0.29)、及び 0.35 (0.31) であった。

ポンプ光を照射後の試料分子は、顕著な alignment や anti-alignment を示す遅延時間以外の領域でもい わゆる permanent alignment と呼ばれる特異な配列 状態にある。先に Nature 論文では、CO₂ 分子がこ のような permanent alignment の状態にある場合に も破壊的量子干渉効果に基づく高調波信号の抑制が 観測されることを指摘しているが、今回、ポンプ光 強度が 4.7 及び 3.3×10¹³ W/cm² の場合には、19次 から 27 次ないし 29 次の範囲で高調波強度が抑制さ れることが再確認できた。ポンプ光強度が 1.5×10¹³ W/cm^2 の時には、高調波強度の明瞭な抑制は観測されなかったが、このときの配列度 $\langle \cos^2 \theta
angle$ の評価値 は 0.333 であり、分子はほぼランダムな配列状態に あることから妥当な結果であるといえる。今回の観 測結果は、分子試料がある程度よく配列していれば、 イオン化の飽和強度よりも低い強度のプローブ光を 用いて観測される量子干渉効果を示す高調波の領域 はほぼ一定しており、量子干渉効果の観測に基づく 瞬間的な核間距離の測定の有効性を改めて示すもの といえる。

6.6.4 量子状態選別された分子の配向状態 を評価するシミュレーションコード の開発

本研究室ではこれまでに、静電場とレーザー電場 を併用して配向を実現する手法、非共鳴2波長レー ザー電場を用いて配向を実現する手法 (T. Kanai and H. Sakai, J. Chem. Phys. **115**, 5492 (2001))、静 電場とピーク強度付近で急峻に遮断されるレーザー 電場を用いてレーザー電場のない条件下で配向を実 現する手法 (Y. Sugawara et al., Phys. Rev. A 77, 031403(R) (2008))、さらには、ピーク強度付近で急 峻に遮断される非共鳴2波長レーザー電場を用いて 完全に電場のない条件下で配向を実現する手法 (M. Muramatsu *et al.*, Phys. Rev. A **79**, 011403(R) (2009)) などで配向状態を評価するシミュレーショ ンコードの開発を進めてきた。これらのシミュレー ションにおける分子試料としては、いわゆる thermal ensemble を考えて来たので、回転状態 $|J, M\rangle$ (M は 角運動量量子数 J の電場方向への射影である)を基 底として展開された波動関数の挙動を調べてきた。

-方、項目1の最後でも述べたように、最近本研 究室では回転量子状態を選別された分子試料を用意 して静電場とレーザー電場を併用する手法や非共鳴 2波長レーザー電場を用いる手法により高い配向度の 実現を目指している。例えば、六極集束器を用いて OCS のような直線多原子分子の量子状態を選別する と、角運動量量子数 J の分子軸方向への射影成分 l も |含む||*J*,*l*,*M*|) で指定される状態が選別される。した がって、特定の回転量子状態 $|J,l,M\rangle$ にある分子試 料の配向状態を調べるためには、回転状態 $|J, l, M\rangle$ を基底として展開された波動関数を考える必要があ る。今年度、従来のシミュレーションコードの拡張 を進め、ほぼ完成させることができた。今後は、計 算時間の短縮を図り、より高い配向度を達成するた めのレーザーパルスのパルス幅や強度の最適化を検 討したり、実験との比較検討に役立てられるように することが課題となる。

6.6.5 その他

本年度は修士課程の大学院生3名が加入する一方、 修士2名を輩出した。ここで報告した研究成果は、研 究室のメンバー全員と学部4年生の特別実験で本研 究室に配属された川口喬吾君、角田佑介君(夏学期) の活躍によるものである。

なお、本年度の研究活動は、科学研究費補助金、基 盤研究(A)「配列または配向した分子中からの高次 高調波発生とその物理」(課題番号 19204041、研究代 表者:酒井広文)、特別推進研究「配向制御技術で拓く 分子の新しい量子相の物理学」(課題番号 21000003、 研究代用者:酒井広文)、及び、文部科学省「光・量 子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発 最先端 の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログ ラム」からも支援を受けた。ここに記して謝意を表 する。

<報文>

(原著論文)

- Keita Oda, Masafumi Hita, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "All-optical molecular orientation," submitted.
- [2] Hiroki Mizutani, Shinichirou Minemoto, Yuichiro Oguchi, and Hirofumi Sakai, "Effect of nuclear motion observed in high-order harmonic generation from D₂/H₂ molecules with intense multicycle 1300-nm and 800-nm pulses," submitted.
- [3] Yuichiro Oguchi, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Dependence of the generation efficiency of high-order sum and difference frequencies in the xuv region on the wavelength of an added tunable laser field," submitted.
- [4] Yuichiro Oguchi, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Generation of high-order sum and difference frequencies by adding an intense paralleland perpendicular-polarized infrared laser field,"

Phys. Rev. A **80**, 021804(R) (4 pages) (2009). Selected for Virtual Journal of Ultrafast Science, Vol. 8, No. 9 (2009).

[5] Masahiro Muramatsu, Masafumi Hita, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Field-free molecular orientation by an intense nonresonant twocolor laser field with a slow turn on and rapid turn off," Phys. Rev. A **79**, 011403(R) (4 pages) (2009). Selected for Virtual Journal of Ultrafast Science, Vol. 8, No. 2 (2009).

(著書)

[6] Yuichi Fujimura and Hirofumi Sakai, "Electronic and Nuclear Dynamics in Molecular Systems," (分 担執筆) Section 1.10 "Alignment and Orientation of Molecules," Chapter 2 "Experimental Setups and Methods," and Chapter 4 "Molecular Manipulation Techniques with Laser Technologies and Their Applications," World Scientific Pub. Co. Inc., in press.

(国内雑誌)

 [7] 酒井広文、「レーザ電場のない条件下での気体分子の 配向制御」、レーザ加工学会誌、16, No. 1, pp. 48-50 (2009).

(学位論文)

- [8] 日田真史、「断熱領域における全光学的分子配向制御」、 修士論文、2010 年 3 月.
- [9] 渡部源太郎、「2 波長レーザー光による配列した分子 中からの高次高調波発生」、修士論文、2010 年 3 月.

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [10] Hirofumi Sakai, "Recent progress in molecular manipulation techniques and their applications," The 3rd Yonsei-Tokyo Joint Symposium on Condensed Matter Physics, Seoul, Korea, February 12, 2010.
- [11] Hirofumi Sakai, "Molecular manipulation techniques and their applications," GCOE Workshop on Condensed Matter and Photo Sciences, Tokyo, Japan, October 7, 2009.
- [12] Hirofumi Sakai, "Laser-Field-Free Molecular Orientation," XXVI International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC 2009), Michigan, U.S.A., July 22–28, 2009.
- [13] Hirofumi Sakai, "Recent progress in the orientational control of gas-phase molecules," Cold Atoms and Molecules Collisions, Field-Effects, and Applications, Kyoto, Japan, June 23–26, 2009.
- [14] Hirofumi Sakai, "Controlling the molecular orientation in the laser-field-free condition," The Second Conference on Ultra-Fast Dynamic Imaging of Matter, Ischia, Italy, April 30–May 3, 2009.

[15] Hirofumi Sakai, "Recent progress in the control of molecular orientation," RIKEN International Symposium on Attosecond Science, Wako, Japan, April 3, 2009.

一般講演

- [16] Shinichirou Minemoto, Kosaku Kato, and Hirofumi Sakai, "High-order harmonic generation from aligned molecules with intense femtosecond 800and 1300-nm pulses," to present in the 17th International Conference on Ultrafast Phenomena (UP), Colorado, U.S.A., July 18–23, 2010.
- [17] Kosaku Kato, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Degree-of-alignment dependence of high-order harmonic generation from CO₂ molecules," to present in the 17th International Conference on Ultrafast Phenomena (UP), Colorado, U.S.A., July 18–23, 2010.
- [18] Masahiro Muramatsu, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Field-free molecular orientation with an intense nonresonant two-color laser field," The 3rd Yonsei-Tokyo Joint Symposium on Condensed Matter Physics, Seoul, Korea, February 12, 2010.

<国内会議>

招待講演

[19] 酒井広文、「レーザー電場を用いた分子配向制御の進展」、JAXA 宇宙科学研究本部 2009 年度宇宙空間原 子分子過程研究会、JAXA 宇宙科学研究本部、2010 年3月1日.

一般講演

- [20] 峰本紳一郎、加藤康作、酒井広文、「配列した分子からの高次高調波発生における量子干渉効果」、日本物理学会第65回年次大会、岡山大学津島キャンパス、2010年3月.
- [21] 加藤康作、峰本紳一郎、酒井広文、「波長 1300 nm お よび 800 nm パルスを用いた配列分子中からの高次 高調波発生」、2010 年 (平成 22 年) 春季第 57 回応 用物理学関係連合講演会、東海大学湘南キャンパス、 2010 年 3 月.
- [22] 村松雅弘、峰本紳一郎、酒井広文、「回転状態選択した分子の超短パルス2波長レーザー電場を用いた配向制御」、レーザー学会学術講演会第30回年次大会、 千里ライフサイエンスセンター、2010年2月.
- [23] 日田真史、小田啓太、峰本紳一郎、酒井広文、「断熱 領域における全光学的分子配向制御」、レーザー学会 学術講演会第 30 回年次大会、千里ライフサイエンス センター、2010 年 2 月.
- [24] 小田啓太、日田真史、峰本紳一郎、酒井広文、「ナノ 秒2波長レーザー電場による分子配向制御」、日本物 理学会2009年秋季大会、熊本大学黒髪キャンパス、 2009年9月.

- [25] 日田真史、小田啓太、峰本紳一郎、角田佑介、酒井 広文、「全光学的分子配向制御」、2009年(平成 21 年)秋季第70回応用物理学会学術講演会、富山大学、 2009年9月.
- [26] 村松雅弘、峰本紳一郎、酒井広文、「量子状態選択した分子の超短パルス2波長レーザー電場を用いた配向制御」、2009年(平成21年)秋季第70回応用物理学会学術講演会、富山大学、2009年9月.

6.7 能瀬研究室

脳・神経系は多数の神経細胞がシナプスという構 造を介して連絡した複雑な回路である。このなかを 神経インパルスが伝わることが、脳機能の基本であ ると考えられているが、その実体はほとんど謎のま まである。一体、どのような回路の中を、どのよう にインパルスが伝わることにより高度な情報処理が 可能になるのか?また、複雑な神経回路が正確に形 成されるための設計図は私達の遺伝子にどのように 記述されているのか?当研究室では、ショウジョウ バエの神経系をモデルとし、これらの問題に迫って いる。

これまでに、バイオイメージングや遺伝子操作を 用いて軸索やシナプスを可視化することにより、神 経の配線が形成される仕組みを明らかにしてきた。 最近、この研究を回路レベルに発展させ、複数の神 経配線からなる機能的な神経回路が、どのようにし て構築され、機能するのかを調べる研究を開始した。 このため、神経細胞の活動を光技術と遺伝子工学と を組み合わせた手法を用いて可視化・操作する実験 を進めている。また、このような実験に理論的考察 を加えることにより、神経回路の動作原理を探る研 究も開始した。配線パターンの分かっているモデル 神経回路において、個々の神経細胞の活動をリアル タイムに追跡することにより、神経回路の情報処理 の仕組みを明らかにすることが私達の夢である。

6.7.1 シナプス形成の生物物理

シナプスは神経細胞が他の神経細胞や筋肉細胞と 接合、連絡する部位で、神経伝達の中心的位置を占 める。にもかかわらず、秩序だった分子装置の集積 であるシナプス構造がどのようにしてできていくの か、についてのわれわれの理解は限られている。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。

シナプス形成過程において神経支配により発現制御 される遺伝子の同定と機能解析(福井愛、濱谷裕樹、 能瀬聡直)

シナプスの形成過程においては、神経細胞(シナ プス前細胞:プレ)とその標的細胞(シナプス後細 胞:ポスト)が互いに互いの分化を誘導し合うことで シナプス構造が形成されることが分かっている。中 でも特に重要なプロセスであると考えられているの が、遺伝子の発現制御を介したプロセスである。そ の理由は、遺伝子の発現変化によってシナプス構造 を長期的に安定化することが可能だからである。し かし、実際にどのような遺伝子が発現制御されてい るのか、さらにそれらの遺伝子がシナプス形成にお いてどのような役割を持っているのかは、ほとんど 明らかになっていない。そこでショウジョウバエの 神経筋結合系をモデルとして、プレ(運動神経細胞) によってポスト(筋肉)内で発現レベルが制御され、 シナプス形成を誘導する働きを持つ遺伝子を同定す ることを試みた。このためマイクロアレイ技術を利 用して、筋肉細胞における遺伝子発現パターンを、 神経支配の前後、神経支配の有無で比較することに より、シナプス形成誘導に関わる遺伝子プログラム を探索した。ショウジョウバエの神経筋システムは、 シナプス形成が時間軸に沿って定型的に進行し、そ の様子がすでに詳細に解析されている。また、筋肉 細胞のみをマイクロピペットを用いて単離すること が可能であるため、このように特定のシナプス形成 開にある筋肉細胞を単離し、シナプス形成に伴う遺

伝子発現変化を観察する事ができる。 遺伝子発現パターンの比較解析の結果、神経支配 により筋肉細胞内で発現制御される遺伝子を82個 同定することに成功した。これらの遺伝子は、シナ プス形成に関与している可能性が高い候補遺伝子で ある。しかしほとんどの遺伝子については、シナブ ス形成に関わる機能は調べられていなかったため、 ショウジョウバエの豊富な遺伝子発現操作技術やト ランスジェニック動物の系統を用いて、シナプス形 成における遺伝子の機能解析を行なった。その結果、 少なくとも2遺伝子(TepIV, pst)が、神経終末の 形態を制御する働きを持つ事を新たに示した。さら に大きな発見として、転写因子 Lola (Longitudinals lacking)が、神経伝達物質受容体であるグルタミン 酸受容体のシナプス部の発現量を制御する働きを持 つ事が判明した。これまでに Lola は、神経細胞の軸 索伸長の誘導に関与することが示されているが、シ ナプス機能分子を制御する機能は解析されていない。 本研究では Lola のシナプス後細胞での機能に焦点を あてるために、筋肉細胞のみで lola をノックダウン してシナプス形態に与える影響を観察した。ショウ ジョウバエの神経筋シナプスには、5種類のグルタ ミン酸受容体サブユニット (GluRIIA, IIB, III(IIC), IID, IIE)が発現しており、その中の4種類が複合体 を形成して 2 タイプの受容体 ((GluRIIA, III, IID, IIE) (GluRIIB, III, IID, IIE))を構成していると 考えられている。解析の結果、Lolaのノックダウン 変異体では、2 タイプのグルタミン酸受容体の各々 に特異的なサブユニットである GluRIIA, GluRIIB、 および共通サブユニットである GluRIII のシナプス 部の発現量が著しく減少することが分かった。また Lolaは、受容体以外にも、シナプス後部に局在する シナプス機能分子 PAK の発現にも必要であること が判明した。さらに解析を行なった結果、Lola はこ れらのグルタミン酸受容体およびシナプス機能分子 PAK について、その転写産物量を正に制御している ことが明らかになった。以上の結果は、ショウジョ ウバエの神経筋結合系において、シナプス部に局在 する機能分子を転写レベルで制御する分子を示した 最初の例である。Lola は同時に複数の分子の転写量 を制御することで、シナプス構造の形成・維持にお いて非常に重要な役割を果たしていると考えられる。 現在、さらに、シナプス可塑性(神経活動によりシ ナプスの性質が変化する現象)における Lola の役 割を調べるために、神経活動の人為的操作によりシ ナプス形態に変化を引き起こすような実験プロトコ ルを開発している。具体的には、光感受性チャネル channelrhodopsin を用いて、様々な発生時期におい て運動神経細胞の活動を活性化したときのシナプス 形態への影響を調べている。本研究は本学先端科学技 術研究センター、油谷浩幸教授との共同研究である。

6.7.2 回路構造と神経機能の発生機構

複数の神経細胞がシナプスを介して順々につながっ ていくと、神経回路ネットワークができあがる。神 経回路が正常に機能するためには、回路構造の適切 な発達が必要であるが、その細胞・分子機構に関し ては不明な点が多い。我々は、ショウジョウバエ胚・ 幼虫のぜん動運動成熟過程をモデルとして、神経回 路構造の発達、及び回路機能の成熟過程の研究を進 めている。

感覚神経シナプスの発生とその発達可塑性(奥沢暁 子、高坂洋史、能瀬聡直)

ショウジョウバエ幼虫は、筋収縮の伝播からなる ぜん動運動により前進する。ショウジョウバエ幼虫 は頭尾方向に並んだ110体節からなり、体節の筋 収縮が順次尾端から頭端に向かって隣接体節を伝播 することでぜん動運動が達成される。この体節間の 協調した筋収縮は中枢神経回路で生成されるが、感 覚神経による中枢へのフィードバックによってより 環境に適合した運動が実現される。

ショウジョウバエの発達過程において、この感覚 神経フィードバック入力の行う運動調節の機構を明 らかにするために、胚期から幼虫にかけてフィード バック感覚神経細胞の中枢投射発達過程を可視化し、 感覚神経終末の発達と運動機能の獲得との相関性を 検討した。また神経終末の発達における活動依存的 な調節の有無について検証した。

先行研究から、ぜん動運動を担う神経回路は胚後 期に完成されることが明らかになっていたが、その 前後で起こるフィードバック感覚神経の神経終末の 発達との関連は明らかになっていなかった。本研究 では感覚神経細胞特異的に発現させた蛍光タンパク 質GFPを用いた蛍光イメージングにより、ぜん動 運動発達期における感覚神経細胞終末部の発達を詳 細に解析した。その結果、胚後期の急激な運動発達 (単一体節の収縮 \rightarrow 部分的収縮伝播 \rightarrow 全体長にわた る収縮伝播)と感覚神経終末の構造変化(直線状神 経末端 \rightarrow 微小突起伸長 \rightarrow U字型神経末端)に顕著 な相関があることを明らかにした。また、孵化後の ぜん動運動速度上昇期にも、感覚神経終末のシナプ ス構造がさらに成熟することを見出した。

感覚細胞は体壁の収縮を検知していると考えられ る。感覚神経細胞の活動が神経末端の構造変化に与 える影響を検討するために、筋収縮ができないmhc (筋タンパク質ミオシン)遺伝子欠失変異体を用いて、 感覚神経末端の形態を解析した。筋収縮を阻害して 感覚神経の活動を抑えると、感覚神経終末部のU字 型への形態変化が遅れた。このことから、感覚神経 終末の正常な発達には筋収縮によるフィードバック 感覚神経細胞の活動が必須であることが示唆された。

感覚神経中枢投射の発達と感覚運動回路の機能発 達との関連性は、現在さらに詳細な可視化や分子的 手法を用いることで解析している。また、感覚神経 が情報を受け渡す先である中枢内の神経はいまだ同 定されていない。複数の神経細胞を含む感覚運動回 路全体の発達を解明するためには、回路の構成細胞 の同定は不可欠であるため、後項に示すシナプス接 続マーカーGRASPを作製し、感覚神経の下流神 経の探索を並行して行っている。

ぜん動運動制御の発達可塑性(高坂洋史、能瀬聡直)

歩行や遊泳などの定型運動は、神経回路が生み出 す適切な時空間活動パターンによって生成される。一 般に、神経回路は神経配線が完了してからただちに 適切な出力を生みだすのではなく、発達過程におい て徐々に機能が成熟していく。回路機能の発達の細 胞・分子機構を明らかするために、本研究ではショウ ジョウバエ胚・幼虫のぜん動運動の発達を解析した。 これまでに胚期において、特に孵化直前に運動様式 が大きく変化することが明らかになっていたが、孵 化直後の発達過程は不明であった。そこでまず、孵 化直後のぜん動運動の発達過程を定量的に解析した。

幼虫のぜん動運動周期を孵化直後(0hAH)から 1時間おきに経時的に測定した(n=15)。すると、 0hAHでのぜん動運動周期は平均2.5sであったのに 対し、孵化後12時間(12hAH)では平均1.0sであっ た。このことは、孵化直後にはまだ運動回路は成熟 しておらず、徐々に完成していくことを示している。 また三齢幼虫(孵化後97時間)においても平均1.0s であることから、孵化後の限られた期間に運動回路 が成熟することが明らかになった。さらに、標準偏 差を比較すると、0hAHでは0.8sであったのに対し、 12hAHでは0.1sであり発生に伴って個体差が減少す る傾向がみられた。この発達に伴う周期の均一化の 原因は明らかになっていないが、一つの可能性とし ては、0hAHにおけるばらつきが胚での運動経験に 由来するものであることが挙げられる。

上記の運動発達のデータにおいて、孵化後6時間 でほぼ成熟したぜん動運動がみられた。このことか ら、胚期から孵化後6時間までに回路が成熟してい くと考えられる。回路の成熟には遺伝プログラムに よる効果と神経活動依存的な効果があるが、上記の 成熟時期に個体が盛んに運動することから、神経活 動依存的な効果によって回路が変化する可能性が示 唆される。そこで次に、この成熟時期において、ぜん 動運動を制御する神経回路の構成要素である、上記 のフィードバック感覚神経細胞の活動を一過的に阻 害して、その後の運動発達への影響を調べた。様々な 発生時期において神経活動阻害の効果を検討したと ころ、ぜん動運動の成熟後(孵化後 7-10 時間)にお いて、感覚神経細胞の活動を阻害した個体では、 齢幼虫(孵化後49時間)におけるぜん動運動周期が 平均 1.39s であったのに対し、成熟期(孵化前 7-4 時 間)に感覚神経の活動を阻害した個体は、同じ時期 においてぜん動運動周期が平均1.55s と遅くなって いた。このことは、胚期における感覚神経の活動が 正常なぜん動運動回路の発達に必要であることを示 唆する。この系は、神経回路の発達に伴う可塑性の 細胞・分子機構研究のよいモデル系になると考えら れる。

シナプス接続マーカー GRASP を用いた回路内シ ナプス接続の可視化(奥沢暁子、高坂洋史、高須悦 子、能瀬聡直)

中枢神経系では、複雑に配線された神経同士がシ ナプス結合を介して情報をやり取りすることで、様々 な機能が生み出されている。そのため中枢神経回路 の構造を明らかにするためには、その回路を構成す る神経細胞と、それぞれが互いにどのように接続し ているかを明らかにすることが必要である。しかし、 中枢神経系の神経接続はほとんど明らかになってい ない。その理由として、中枢神経内は神経細胞が密 集しておりシナプス接続が微小で高密度であるため、 個々のシナプスを同定することが困難であることが 挙げられる。

感覚運動回路は中枢神経系を含む神経回路である が、上記の理由によりこれまで中枢内での接続パター ンが明らかになっていない。上記の困難を克服する ために、我々は配置が明らかになっている運動神経 と感覚神経をそれぞれ用いて、トランスシナプティッ クマーカー GRASP システムによる中枢神経内の神 経細胞とのシナプス接続の探索を試みた。

GRASPは、蛍光タンパク質GFPの再構成を用いたシナプス接続探索法である。原理は以下のようになっている。GFPを二つに分割し(spGFP1-10 およびspGFP11)、それぞれを異なる細胞群に発現させる。これらはそれぞれ単独では蛍光性を失っているが、互いに近接することにより再構成され蛍光性を獲得する。つまり、GFPが再構成され可視化できれば、この二つの神経は非常に近傍に位置しているということになるため、このシステムを用いることでシナプス形成部位を類推することが可能となる。

本研究では、まず運動神経に特異的に発現するGAL4 系統でspGFP1-10を発現させ、同時にプロモータを 用いて一部の運動神経細胞にspGFP11を発現させる ことでGFPが再構成されるか検証したが、GRASP の実現には至らなかった。これは、このプロモータ によるタンパク質の発現量が十分ではなかったから であると考えられる。そこで現在はGAL4-UASシ ステムとLexA-LexAopシステムの併用による方法 を行っている。この方法では、LexA-LexAopシステ ムは外来の転写因子を用いた発現系であるため、よ り高発現を誘導することが期待できる上、GAL4と LexA それぞれで系統をかえることが容易であるた め、実験の自由度が広がる利点もある。

現在、運動神経または感覚神経特異的に LexA を 発現する系統を作成し、この系統と種々の GAL4 系 統との交配による下位ニューロンのスクリーニング を計画している。このシステムを用いることで、運 動神経または感覚神経と、それに接続する中枢神経 細胞が同定できるだけでなく、回路内の神経活動を 操作した際の二次神経の神経構造変化も調べること が可能になると考えている。

ぜん動運動の発達過程における、光生理学を用いた 感覚受容への摂動の効果の解析 (伏木彬、高坂洋史、 能瀬聡直)

動物の歩行や呼吸といった周期的な運動は、中枢 パターン生成器(Central Pattern Generator: CPG) と呼ばれる神経回路によって制御されている。CPG によって規定される運動パターンは、感覚入力によっ て調整されることで、外界の状況に適した行動が実 現されると考えられている。しかし、CPGと感覚入 力の詳細な関係およびその可塑性(神経活動の状況 に応じて回路が再構成されること)について、細胞・ 分子機構はほとんど明らかにされていない。そこで 我々は、CPGによって制御されているショウジョウ バエ胚・幼虫のぜん動運動の発達過程における感覚 受容の役割を、光生理学を用いて解析した。

胚期のショウジョウバエは、産卵後17時間からぜ ん動運動が徐々に活発になっていき、産卵後22時間 で孵化する。運動初期の段階では、各体節は協調せ ずに個々の筋肉がランダムに収縮する動きが見られ るが、孵化直前にはこのような散発的な収縮はほと んど起こらず、隣接した体節が協調的に収縮と弛緩 を繰り返す成熟した運動パターンが主に観察される。 つまり、この胚発生後期にぜん動運動に関わる CPG が形成されることが示唆される。

ぜん動運動の発達過程における感覚受容の効果を 解析するため、Channelrhodopsin2 (ChR2) タンパ ク質を用いて、胚発生後期に感覚神経細胞の活動を 人工的に亢進させることを試みた。ChR2 は光感受 性陽イオンチャネルで、波長 480nm 付近 (青色) の 光を照射すると一価または二価の陽イオンを選択的 に透過し脱分極を促すので、これを神経細胞に発現 させると光照射によって神経細胞を興奮させること ができる。ChR2 は補因子として、all-trans-retinal (ATR) を必要とする。ショウジョウバエ胚には十分 な ATR が存在しないため、親バエに ATR を摂取 させその個体が産んだ胚を用いた。長時間(約2時 間)の光刺激を行うため、光分解を考慮して高濃度 の ATR を親バエに摂取させた。すると感覚神経細 胞に ChR2 を発現させた胚において、ATR 投与依存 的に胚全体の収縮が観察された。これより胚期での ChR2 による神経細胞の人工的活動亢進の実験系を 確立できたといえる。

ショウジョウバエ胚は孵化前から盛んに運動して いることから、胚期においても感覚神経細胞が運動 を検知して興奮していると考えられる。この胚期に おける感覚神経細胞の活動がぜん動運動の発達に与 える影響を明らかにするために、ChR2を用いて胚 の感覚神経細胞を人工的に活動亢進させ、その個体 の発生をしばらく進めた後、ぜん動運動を定量的に 解析した。産卵後17、18、19時間から感覚神経全体 をそれぞれ、2時間光刺激し2齢幼虫でのぜん動運 動を観察した。すると、産卵後19時間に光刺激を開 始した個体のぜん動運動が若干ではあるが野生型と 比べて早くなった。このことは、胚期における感覚 神経の亢進が CPG 出力に可塑的な変化を及ぼした ことを示唆する。今後は、感覚神経細胞のうちさら に少数の細胞に対象を狭めて、運動特性に長期的な 変化が見られるかどうかを追求していく予定である。

6.7.3 神経回路の活動ダイナミクス

神経回路は時空間的な活動パターンを生成するこ とで機能を生みだす。近年の光計測技術の発達によ り、多数の神経細胞の活動のようすを同時にとらえ ることができるようになった。また、光生理学の発展 により、神経細胞の活動を光照射によって高速に制 御できるようになった。我々はこれらの技術をショウ ジョウバエ幼虫の中枢神経系に適用することによっ て、神経回路の動的特性の解明を目指している。

カルシウムイメージングを用いた中枢内活動伝播機 構の解析(仁井理恵、高坂洋史、能瀬聡直)

神経系は時空間的に活動を変動させることによっ て、様々な機能を生じる。機能を生みだす回路基盤 がどのようにして活性パターンを生成・制御している のかを明らかにすることは、神経科学において重要 である。われわれは、時空間パターンを生む回路基 盤を解明するため、ショウジョウバエ幼虫のぜん動 運動をモデルとして用い、ぜん動運動を生成する腹 部神経節内の神経活動をカルシウムイメージング法 により測定、解析した。蛍光タンパク質 G-CaMP は カルシウムとの結合により蛍光強度が上昇する。こ のタンパク質を遺伝学的手法により、特定のニュー ロン群に発現させ、蛍光を経時的に測定することに よって、一部のニューロン群の活動を特異的に解析 することができる。

ショウジョウバエ幼虫は体節構造をなす。ぜん動 運動は尾端の体節の筋収縮から始まり、頭端に向かっ て順次隣接体節の筋収縮が伝播することで実現され る。この運動を作り出すのは、この運動パターンに 対応した中枢回路内の神経活動の伝播であると考え られる。そこで、カルシウムイメージングを用いて 腹部中枢神経系内の一部のニューロン群の活動の時 空間パターンを解析した。その結果、1. アセチルコ リン作動性ニューロン (cha ニューロン)、2. 運動 ニューロン (vGat 陽性ニューロンのうち、GABA 作 動性ニューロンを除いたもの)において、尾端から 頭端に向かう神経活動上昇の伝播を検出した。この 二種類の波の速さは、解剖した幼虫のぜん動運動の 速さと一致していた。これは、ぜん動運動を生成す る活性パターンの波の検出に成功したことを意味し ている。この伝播波を生成する回路基盤を解明する ため、薬理学的なスクリーニング(探索)を行った。 その結果、一部の薬剤によって、運動ニューロンの 波が発生しなくなる一方、chaニューロンにおける波 には全く影響がなかった。このことは、chaニューロ ンと運動ニューロンの二つの波は、一つの波を構成 する各部分ではなく、分離可能な二つの波であるこ とが示唆される。cha ニューロンは運動ニューロンを 神経支配していることが知られているが、今回、特 定の薬剤が cha ニューロンには影響なく運動ニュー ロンの波のみを阻害したことから、運動ニューロン 制御には cha ニューロンを介さない経路があること が示唆される。並走する二つの波はぜん動運動を生 成する回路の基本的な構造であると考えられ、本研 究結果は、この回路の制御に関する基盤となる知見 を与えるものである。

ショウジョウバエ幼虫の定型運動生成における腹部 神経節内の回路の機能局在(中川義章、高坂洋史、能 瀬聡直)

中枢神経系は神経細胞が多数集まって構成され、 個々の神経細胞の時空間的活動パターンが神経回路 全体の機能を生み出すと考えられている。我々はショ ウジョウバエ幼虫をモデルとして、ぜん動運動を制 御する神経回路内の機能分布解明に着手した。ショ ウジョウバエ幼虫の神経系は、主に脳と腹部神経節 と感覚神経細胞から構成される。一方、ぜん動運動 は、次の3つのステップに分けられる。即ち、1.尾 端の体節の筋収縮2.尾端筋肉の弛緩と同時に尾端か ら頭端へ向かって各体節の筋収縮の伝播3.頭端まで 筋収縮伝播の後、頭部の前方伸長。本研究ではぜん 動運動生成における、神経回路内の機能分布を明ら かにするために、1.尾端筋収縮と、2.筋収縮伝播の 生成をになう神経群の同定を試みた。

まず、尾端筋収縮を担う神経回路領域を同定する ために、中枢神経の部分的切除、または局所的な損 傷といった外科的処理によって、個体の示す運動を 解析した。手順として、幼虫を解剖し生体内と同じ 組成の溶液で浸し、ぜん動運動するのを確認後、外 科的処理を行なった。解剖によってぜん動運動の頻 度が低下するため、ぜん動運動の可否を確実に判定 することが必要であれば 45 度に温めた溶液を途中で 注いだ。この操作により正常な幼虫は必ずぜん動運 動を起こす。

その結果、脳の切除や神経節頭端の損傷の処理を 行なっても尾端筋収縮が見られたのに対し、神経節 尾端に損傷を与えたところ尾端筋収縮が見られなく なった。この結果から、尾端筋収縮を生み出す神経 細胞は神経節尾端にあることが分かった。神経の活 動を可視化できる手法が整っているので、今後は具 体的に神経節尾端のどの神経細胞が尾端筋収縮を作 り出すかを特定する予定である。

次に筋収縮伝播について調べた。伝播を制御する 回路要素として、脳、および感覚神経を候補として 考えその役割を調べた。脳の必要性は、脳の切除に よって検討した。一方、感覚神経の必要性は、Ca²⁺ を含まない溶液を用いて筋収縮ができない状態にし、 感覚神経が運動を検知しないようにすることで検討 した。筋収縮ができないときの伝播の様子はCa²⁺ イ メージング法によって神経活動の伝搬を観察するこ とで解析した。脳がある場合、筋収縮を阻害して感覚 神経からの入力を抑制しても筋収縮伝播が見られた。

このことから、脳がある場合は、感覚神経の入力が なくても筋収縮伝播が起こることが明らかになった。 脳がない場合、Ca²⁺を十分含む溶液(2mM)中で は筋収縮伝播があったが、0mM Ca²⁺ では、活動伝 播が見られなかった。この状態では45度の高温にし て強制的に蠕動運動を誘起しても筋収縮伝播は起こ らなかった。また、 0.5mM Ca^{2+} では、6個体の観 察中、1個体においてのみ筋収縮伝播が見出された。 このことから、脳がない場合は、活動伝播は Ca²⁺ 濃 度に依存することが明らかになった。Ca²⁺ 濃度は、 筋収縮に影響を与えるため、この結果は、脳がない 状態では、感覚神経は、ぜん動運動速度を調整する 補助的な役割だけでなく、筋収縮伝搬が起こるかど うかを決める重要な役割を担っていることが示唆さ れる。脳がある状態と脳がない状態とでの感覚神経 の役割の違いは、筋収縮伝播の回路構造を明らかに する上で有用な知見であると考えられる。

ショウジョウバエ幼虫は解剖し除脳した状態でも ぜん動運動を起こす。その状態で薬理学的手法を用 いると、(複雑な脳の機能の関与を除いた状態で)神 経節においてどのような神経伝達物質がぜん動運動 に関与しているか知ることができる。我々は除脳状 態でぜん動運動をしている幼虫に阻害剤を投与し筋 収縮伝搬ができなくなる薬剤はないか調べた。その 結果、抑制性神経の1つ、GABA-A 受容体を阻害す る薬剤(ピクロトキシン)により筋収縮伝播ができな くなった。これは、GABA-A 受容体を用いた抑制性 神経支配がぜん動運動に必要であることを示唆する。

光生理学を用いた神経活動伝播の高時間分解摂動と その応答解析(稲田健吾、高坂洋史、能瀬聡直)

神経回路は多数のニューロンから構成される。こ れらのニューロンが活動を時空間的に変化させることによって、思考や感情、それに動作といった様々 な機能が生み出されていると考えられている。これ までに個々のニューロンがどのような活動パターン を示すかについては多くの知見が得られているもの の、複数のニューロンが集団としてどのように時空 間パターンを生成するのかは明らかになっていない。 そこで我々は神経系が比較的単純で蠕動運動という 定型的な動きを生成するショウジョウバエ幼虫をモ デルとして、回路が時空間パターンを生み出す仕組 みの解明を目指している。

神経回路の活動パターンがどのように生成されて いるのかを調べる上で簡単かつ有効な方法は、特定 のニューロンの活動を特定の時間だけ阻害し、阻害 している時間としていない時間の機能面における差 異を調べるというものである。仮にあるニューロン を阻害している間に何か機能的な異常が確認されれ ば、そのニューロンが神経活動パターンの生成に深 く関わっていると考えることができる。従来ニューロ ン活動を阻害する際には、温度感受性のタンパク質 が用いられてきた。このタンパク質を発現した神経 細胞は、ある温度以上で神経伝達物質の放出が阻害 されるため、温度依存的に活動が抑制されるように なる。しかし活性化のトリガーとして温度を用いて

いるため瞬時性に欠け、神経回路内の時空間活動パ ターンを解析するには時間分解能が不十分であった。

本研究では光感受性タンパク質を用いて時間分解能 の向上に取り組んだ。藻類 Natronomonas pharaonis 由来のハロロドプシン (NpHR) は光感受性の膜タ ンパク質である。NpHR は黄色光を受けると細胞外 の塩化物イオンを細胞内へ輸送し、膜電位を下げる ことで神経活動を抑制する。NpHR は光を活性化の トリガーとするため、細かな時間スケールでニュー ロンの活動を操作することができる。NpHR がショ ウジョウバエで有効であるかを調べるために、運動 神経細胞に NpHR を発現させ黄色光を照射した。す ると光照射依存的に蠕動運動が停止したことから、 ショウジョウバエ幼虫の神経でも光に応じてニュー ロンの活動電位を抑制するという NpHR の機能が有 効であることが明らかになった。

NpHR を用いると神経回路内の特定の構成要素の 神経活動を一過的に抑制することができる。蠕動運 動の途中で GABA 作動性の抑制性ニューロンと運動 ニューロンの活動を数百ミリ秒間光照射で阻害した 場合、尾端から伝播してきた筋収縮が一度静止し、光 を消した後体の途中から再開した。これは伝播して きた活動が止まった位置に関する情報が、光で神経 活動を阻害している間、神経回路内に保持され、阻 害が解けた後に保持された情報が読み出された結果 と考えられる。今後、より詳細に分析することで、時 空間パターンを生み出す神経回路機構の解明を進め る方針である。

その他 6.7.4

今年度の研究は以下の科学研究費補助金によって 支援された。ここに記し、謝意を表する。 ・特定領域研究「分子脳科学」、計画研究

「特異的シナプス形成過程に関与する分子の同定と 動態観察」

- (研究代表者:能瀬聡直)
- ・若手研究(B)
- 「局所神経回路形成による運動機能獲得過程の解明」
- (研究代表者:高坂洋史)

<報文>

(原著論文)

- [1] Morimoto T, Nobechi M, Komatsu A, Miyakawa H & Nose A. Subunit-specific and homeostatic regulation of glutamate receptor localization by CaMKII in Drosophila neuromuscular junctions. Neuroscience 165, 1284-1292 (2010).
- [2] Lu,B, Wang, K.H and Nose, A. Molecular mechanisms underlying neural circuit formation. Curr. Opin. Neurobiol. 19, 162-167 (2009).
- (学位論文)
- [3] 福井愛:遺伝子発現制御を介したシナプス形成過程に おける Lola の機能解析(博士論文)

- [4] 奥沢暁子:感覚運動回路の成熟に伴う求心性シナプスの発達過程の解析(修士論文)
- [5] 仁井理恵:ショウジョウバエ中枢神経回路における神 経活動伝搬の生成メカニズムの解析(修士論文、新領 域創成科学研究科)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

[6] Kohsaka, H., Tachi, Y. and Nose, A.: Formation and plasticity of neural circuits regulating peristaltic movements of Drosophila larvae "Constructing Neural Circuits" meeting at Janelia Farm. 2009.5.3~6, (米国)

招待講演

[7] Nose, A.: Generation of synaptic specificity by target repulsion: Roles and transcriptional regulation of local inhibitory cues. "Constructing Neural Circuits" meeting at Janelia Farm. 2009.5.3~6,(米国)

(国内会議)

一般講演

- [8] Fukui, A., Tonoe, G., Inaki, M., Homma, M., Morimoto, T., Aburatani, H. and Nose, A.: Functional analysis of genes whose expression is regulated by nerve innervations during synaptogenesis. Japan Drosophila Research Conference 9(JDRC9)、2009.7.4、静岡
- [9] Okusawa, S., Kohsaka, H., Tachi, Y. and Nose, A.: Formation and plasticity of motor circuits in Drosophila. Japan Drosophila Research Conference 9(JDRC9)、2009.7.4、静岡
- [10] Nii, R., Kohsaka, H. and Nose, A.: Imaging of activity propagation in the nerve cord of Drosophila larvae. Japan Drosophila Research Conference 9(JDRC9)、2009.7.4、静岡
- [11] Okusawa, S., Kohsaka, H., Tachi, Y. and Nose, A.: Formation and plasticity of motor circuits in Drosophila. 特定領域研究「統合脳」神経回路・分子 脳科学領域合同夏班会議、2009.8.13、札幌
- [12] Kohsaka, H., Nii, R. and Nose, A.: Imaging of activity propagation in the nerve cord of Drosophila larvae. 第 32 回日本神経科学大会、2009.9.16-18 名 古屋
- [13] 中川義章、仁井理恵、高坂洋史、能瀬聡直:ショウ ジョウバエ幼虫の中枢神経系におけるカルシウムイ メージング: Imaging of activity propagation in the nerve cord of Drosophila larvae. 第 32 回日本分子 生物学会年会、2009.12.9-12 横浜
- [14] Inada, K., Kohsaka, H., Takasu, E. and Nose, A.: Optical control of *Drosophila* larval locomotion with halorhodopsin. System neurobiology spring school 2010、2010.3.14-16 京都

招待講演

- [15] Nose, A., Kohsaka, H., Tachi, Y., Okusawa, S.: Formation and plasticity of motor circuit in Drosophila. 第 32 回日本神経科学大会シンポジウム、 2009.9.16-18 名古屋
- [16] 能瀬聡直:「運動機能を生む分子・シナプス・回路の ダイナミクス」、特定領域研究「統合脳」平成21年 度公開シンポジウム、2009.12.17、東京

(セミナー)

- [17] 能瀬聡直、Formation and plasticity of motor circuits in Drosophila、2009 年 5 月 8 日、University of Massachusetts、ボストン、米国
- [18] 能瀬聡直、「運動回路の機能発現:配線、シナプスから回路の動作へ」、2009年6月19日、大阪大学・生命機能研究科
- [19] 能瀬聡直、Development and plasticity of motor circuits in Drosophila: from synapses to function、 2009 年 8 月 5 日、沖縄科学技術大学院大学
- [20] 高坂洋史、「ショウジョウバエ幼虫の運動回路の形成 と可塑性」、2009 年 8 月 28 日、東北大学
- [21] 能瀬聡直、「運動回路の機能発現:配線、シナプスから回路の動作へ」、2009年9月9日、学習院大学・理 学部
- [22] 能瀬聡直、「運動回路の機能発現:配線、シナプスから回路の動作へ」、2009 年 11 月 20 日、東京都神経 科学総合研究所

(集中講義)

- [23] 能瀬聡直、2009 年 6 月 18 日~19 日 大阪大学基礎 工学部集中講義
- [24] 能瀬聡直、2009年9月8日~9日 学習院大学理学 部生命科学科集中講義

6.8 樋口研究室

当研究室では生体モータータンパク質を分子・細胞・個体の3つの階層からアプローチし、各階層の機能メカニズムを解明すると同時に全体を俯瞰した生体運動の物理モデルを構築する。主な研究テーマは、1)精製モーター1分子の3次元的な運動を 精度で測定できる装置を開発して実験・解析し、 レベルの運動メカニズムの解明を行う。2)細胞内 モーター分子の変位と力を3次元的に測定できる装置を開発し測定できる装置を開発して実験・解析して、 レベルの運動メカニズムの解明を行う。2)細胞内 モーター分子の変位と力を3次元的に測定できる装置を開発し測定・解析して、 1分子レベルでイメージングできる装置を開発し測 定・解析を行うことで、個体内細胞の運動を明らか にする。4)細胞の運動機能に普遍的な物理モデル を構築する。

6.8.1 マウス側脳室繊毛のナノメートル運 動解析

哺乳類の脳では、脳室下層にある繊毛の運動が脳 脊髄液の循環など重要な機能を果たしている。これま で繊毛運動は微分干渉法観察が行われてきたが、スラ イス画像が得にくいという問題点があった。今回我々 は共焦点顕微鏡を用いて厚さ2µm程度の光学スラ イス像を得た。さらに非常に高い時間分解能で繊毛運 動解析を行えるよう装置の改良を行った。実験では、 マウス脳の組織切片(厚さ200 µ m)を作製し、細胞 膜に結合する有機蛍光分子 (PKH: Sigma)、および直 径 100nm のポリスチレン蛍光ナノ粒子 (Fluosphere: Invitrogen)の吸着を用いて標識した。この試料を独 自の光学系と高速共焦点ユニット(CSU22:横河電機)、 高速 EMCCD カメラ (DU860: Andor) を組み合わせ た装置を用いて、25 の条件下で 1.1ms のフレーム レートで蛍光観察を行った。細胞膜を標識した試料 では繊毛全体の形状観察を行い、蛍光ナノ粒子を標 識した試料では各フレームの蛍光スポットをガウス 関数でフィッティングすることで、繊毛運動の軌跡 を解析した。繊毛運動のビート周波数は生後6日~ 成体マウスで11~14Hz であった。また、繊毛の運 動様式には生後日数により特徴的な波形が観察され た。今回の結果で蛍光共焦点観察が繊毛運動の解析 に応用可能であることが示された。微分干渉法とは 異なり透過光照明が不要なためマニピュレータやピ ペットによる上部からの操作が容易になることから も、有用性が高いと考えられる。

6.8.2 マウス内がん分子のイメージング装 置の開発

マウス内分子の運動を観察するためには、nm 精度 の装置を必要とする。そこでマウスの固定法改良に より観察時の生体振動(呼吸や拍動)を大幅に軽減す るとともに、蛍光標識された蛋白質の位置解析法の 開発を行い、マウスの生体蛋白質の動きを 9nmの世 界最高精度で解析可能な装置を開発した (図 6.8.32)。



図 6.8.32: 解析装置の概略図

6.8.3 マウス内がん細胞結合分子のイメー ジング

これまでの研究により、がん転移にはがん細胞の 「運動能力」や「細胞膜蛋白質の移動速度の増加」が 重要であることが示唆されている。細胞運動では、 移動先端部の細胞膜が伸張した足のように動く構造 (仮足)を形成し、これが運動の駆動力となる。また 膜蛋白質の移動速度の増加は、がん転移の活性化シ グナルと反応する頻度 (反応速度)を増加させると考 えられている。しかし、これらの知見は、生体から 分離した細胞実験での研究成果であり、血管が存在 し複雑な組織構造を成す人やマウス体内のがん組織 での実体解明が期待されていた。本研究では、がん 転移を活性化する膜蛋白質 PAR1(protease-activated receptor 1) に注目し、PAR1 を認識する特異的な抗 PAR1 抗体を調製した (図 6.8.33A)。抗 PAR1 抗体と 量子ドット (蛍光性ナノ粒子) が結合したトレーサー を作製し (図 6.8.33A)、トレーサーを尾静脈注入す ることで、マウスのがん細胞の PAR1 を蛍光標識し た (図 6.8.33B)。その後、独自の装置で量子ドットの 蛍光重心位置を解析し (図 6.8.32)、PAR1 の動きの 変化を調べた。がん細胞観察は、がんの転移過程を 踏まえ、がん組織内で血管の遠方に位置するがん細 胞 (図 6.8.33C)、血管近傍のがん細胞 (図 6.8.33D)、 血流中のがん細胞 (図 6.8.33E)、血管壁に接着して いるがん細胞 (図 6.8.33F、G) の順に行った。その 結果、血管遠方のがん細胞では、PAR1は非常に遅 い移動速度を示したが、血管内浸潤に向かって移動 速度は増加し、血流中のがん細胞では血管遠方の細 胞に比べ移動速度が約1000倍以上に増加していた (図 6.8.33C-E)。このように膜蛋白質の移動速度が増 加することによって、転移が活性化されると考えら れる。血流中のがん細胞は、その後血管壁に接着し、 PAR1 の移動速度が血流中に比べ約 1/20 にまで減少 した (図 6.8.33E-G)。血管近傍細胞 (図 6.8.33D) や 血管壁接着細胞 (図 6.8.33G) では、細胞運動の進行 方向へ向かって特異的に仮足を形成している様子が 観察された (図 6.8.33 写真)。また、これらの仮足上 では他の膜領域と比較し、PAR1 の移動速度が数倍 以上に増加していることが分かった (図 6.8.33D,G)。



図 6.8.33: 実験方法と結果の概略図

以上の結果から、がん細胞は細胞内や組織内の場 所に応じて巧みに膜蛋白質の移動速度を変化させる ことで、増殖・転移を活性して、がん転移を効果的 に引き起こしているのであろうと考えられる。本研 究成果の応用分野として、がん転移の活性化メカニ ズム解明、膜蛋白質の移動速度変化を指標としたが ん悪性度診断、そして抗がん剤改良による新たな治 療法開発などが期待される。

<報文>

(原著論文)

 Kawai M., H. Higuchi, M. Takeda, Y. Kobayashi and N. Ohuchi. Dynamics of different-sized solidstate nanocrystals as tracers for a drug-delivery system in the interstitium of a human tumor xenograf. Breast Cancer Research, 11:R43 (2009)(Open access publication)

- [2] Jinha A., Ait-Haddou R., Kaya M. and Herzog W. A task-specific validation of homogeneous nonlinear optimisation approaches. Journal of Theoretical Biology 259, 695-700. (2009)
- [3] Hiyama, S., Gojo, R., Shima, T., Takeuchi, S., and Sutoh, K. Biomolecular-motor-based nano- or microscale particle translocations on DNA microarrays, Nano Lett, 9, pp. 2407-2413. (2009)
- [4] Kobayashi T. and Murayama T. Cell cycledependent microtubule-based dynamic transport of cytoplasmic dynein in mammalian cells, PLoS One, 4, pp. e7827. (2009)
- [5] T. Sato*, T. Shimozawa*, T Fukasawa, M Ohtaki, K. Aramaki, K. Wakabayashi and S. Ishiwata. Actin oligomers at the initial stage of polymerization induced by increasing temperature at low ionic strength: Study with small-angle X-ray scattering. BIOPHYSICS 6, 1-11 (2010) *:Equally contribution
- [6] K Gonda, T M. Watanabe N.Ohuchi, and H. Higuchi. In Vivo Nano-imaging of Membrane Dynamics in Metastatic Tumor Cells Using Quantum Dots. J. Biol. chem. 285,2750-2757 (2010)

(著書)

- [7] Takahide Kon, Tomohiro Shima, Kazuo Sutoh, : Protein Engineering Approaches to Study the Dynein Mechanism using a Dictyostelium Expression System. Methods in Cell Biology, Elsevier, 92, 65-82 (2009)
- <学術講演>
- (国際会議)

一般講演

- [8] Motoshi Kaya, Non-Linear Elasticity of Single Skeletal Myosins is an Essential Mechanical Property of Muscle Contraction., T he XXII Congress of the International Society of Biomechanics, Cape Town, South Africa, 2009.7.6
- [9] Tomohiro Shima, Processive Movement by Mutant Cytoplasmic Dynein Heterodimers with an Inactive Head. American Society for Cell Biology's 49th Annual Meeting. San Diego, USA, 2009.12.6

(国内会議)

一般講演

- [10] 下澤東吾、廣田ゆき、澤本和延、樋口秀男「マウス側 脳室繊毛のナノメートル運動解析」ナノ学会第7回 大会、東京、2009.5.10
- [11] 権田幸祐、渡邉朋信、武田元博、樋口秀男、大内憲明 「生体ナノ計測で解き明かすがん転移メカニズム」ナ ノ学会第7回大会、東京、2009.5.10

- [12] 茅元司、樋口秀男「量子ドットを用いた1分子ナノ計
- 測によりわかってきた骨格筋ミオシンの非線形弾性 と力発生へのその役割」ナノ学会第7回大会、東京、 2009.5.10
- [13] 権田幸祐、武田元博、樋口秀男、大内憲明 「転移 性がん細胞の膜ダイナミックスの in vivo イメージン グ」第68回日本癌学会学術総会、横浜、2009.10.3
- [14] Takuya Kobayashi, Yoshitaka Kimori, Nobuhiro Morone, Takashi Murayama. 細胞質ダイニンは細 胞周期依存的に微小管系により輸送される. 日本生物 物理学会第47回年会, 徳島, 2009.10.30
- [15] Tomohiro Shima, Reiko Okura, Motoshi Kaya, Takahide Kon, Hideo Higuchi. 細胞質ダイニンの ステップ機構,日本生物物理学会第47回年会,徳島, 2009.10.31
- [16] 下澤東吾,廣田ゆき,澤本和延,樋口秀男.共焦点観察 によるマウス側脳室繊毛の nm 精度運動,日本生物物 理学会第47回年会, 徳島, 2009.11.1
- [17] Hideo Higuchi. Working and Fluctuation Distances Contributing to the Step Size of Single Molecules of Cytoplasmic Dynein. Dynein International Workshop 2009, Kobe, 2009.11.2.
- [18] Tomohiro Shima. Walking Mechanism of Cytoplasmic Dynein. Dynein International Workshop 2009, Kobe, 2009.11.2.
- [19] Chandra Nath Roy, Yasuhiro Suzuki, Junji Imamura, Kosuke Gonda, Promjunyakul Warunya, Ohuchi Noriaki, Hideo Higuchi, and Toshio Hattori. Single molecular imaging of CXCR4 and CD4 in living cells. 23rd Annual Meeting of the Japanese Society for AIDS Research. Nagoya, 2009.11.26-28.
- [20] 小比類巻生、小林琢也、下澤東吾、権田幸祐、樋口秀 男、微小管プラス端結合因子 EBI のイメージング、 生体運動研究合同班会議 2010、東京. 2010.1.11.

招待講演

- [21] 樋口秀男「量子ドットを用いた細胞内モーター分子の ナノイメージング」日本蛋白質科学会ワークショップ 熊本 2009.5.20
- [22] 樋口秀男、茅元司「階層を登る1分子計測学 1分子 内、多分子、細胞、そして個体へ」第82回日本生化 学会大会、神戸、2009.10.21

<その他>

(報道)

- [23] 伊豆新聞 コラム 「日本人の死因トップである『が 2010.2.14hا
- [24] 伊豆新聞 「"がんの謎"解明へ前進」 2010.2.13
- [25] NHK テレビニュース (全国版) 朝5時、6時、7 2010.1.19 時台のニュース (計3回)
- [26] NHK テレビニュース(仙台放送局) 朝5時、6時 (2回)、7時台、夜6時、8時台のニュース(計6回) 2010.1.19

- [27] NHK BS テレビニュース 朝9時台のニュース等(1 回以上) 2010.1.19
- [28] NHK 第1放送 ラジオニュース 2010.1.19
- [29] 読売新聞(全国版) 「がん細胞転移、動画の撮影装 置開発」 2010.1.19
- [30] 河北新報 「がん転移『足』くっきり 東北大グルー プ解析装置開発」 2010.1.19
- [31] 日本経済新聞(全国版) 「がん転移の様子マウス使 い観察」 2010.1.19
- [32] 日刊工業新聞 「東北大など、ナノレベルの解析装置 開発 生体内がん転移を可視化」 2010.1.19
- [33] 静岡新聞 「がん細胞の流動化現象発見 転移を効 率的に進行か」 2010.1.19
- [34] YohooJapan web ニュース 「がん細胞転移、動画 の撮影装置開発」(読売新聞) 2010.1.19
- 「がん細胞転移、動画 [35] infoseek 楽天 web ニュース の撮影装置開発」(読売新聞) 2010.1.19
- 「がん細胞の [36] Japan press network 47NEWS (web) 流動化現象発見 転移を効率的に進行か」 2010.1.19
- [37] nifty web ニュース 「がん転移の様子を撮影可能に」 2010.1.19
- 以下は新聞社の web にて確認.新聞紙面では未確認.
- 「がん細胞の流動化現象発見 [38]徳島新聞 転移を効 率的に進行か」 2010.1.19
- [39] 福井新聞 「がん細胞の流動化現象発見 転移を効 率的に進行か」 2010.1.19
- [40] 新潟新聞 「がん細胞の流動化現象発見」 2010.1.19
- 「がん細胞の流動化現象発見 転移を効率 [41] 京都新聞 2010.1.19 的に進行か」
- 「がん細胞の流動化現象発見」 [42] 長崎新聞 2010.1.19
- [43] 大阪日日新聞 「がん細胞の流動化現象発見 転移を 効率的に進行か」 2010.1.19
- [44] 中日新聞 「がん細胞の流動化現象発見 転移を効率 的に進行か」 2010.1.19
- [45]山梨日日新聞 「がん細胞の流動化現象発見」 2010.1.19
- 「がん細胞の流動化現象発見 転移を効率 [46] 東京新聞 的に進行か」 2010.1.19
- 西日本新聞 「がん細胞の流動化現象発見 転移を効 [47]率的に進行か」 2010.1.19
- [48] 四国新聞 「がん細胞の流動化現象発見」 2010.1.19
- 「がん細胞の流動化現象発見 転移を効率 [49] 山形新聞 的に進行か」 2010.1.19
- 「がん細胞の流動化現象発見 転移を効率 [50] 茨城新聞 的に進行か」 2010.1.19
- [51] 神戸新聞 「がん細胞の流動化現象発見」 2010.1.19
- 岐阜新聞 Web 「がん細胞の流動化現象発見 転移 [52]を効率的に進行か」 2010.1.19
- 「がん細胞の流動化現象発見 転移を効率 [53] 福島民報 的に進行か」 2010.1.19

- [54] 北日本新聞 「がん細胞の流動化現象発見 転移を効 率的に進行か」 2010.1.19
- [55] 佐賀新聞 「がん細胞の流動化現象発見」 2010.1.19
- [56] 下野新聞 「がん細胞の流動化現象発見 転移を効率 的に進行か」 2010.1.19
- [57] 中国新聞 「がん細胞の流動化現象発見 転移を効率 的に進行か」 2010.1.19
- [58] 熊本日日新聞 「がん細胞の流動化現象発見 転移を 効率的に進行か」 2010.1.19
- [59] 神奈川新聞 「がん細胞の流動化現象発見 転移を効 率的に進行か」
- [60] 岩手日報 「がん細胞の流動化現象発見 転移を効率 的に進行か」
- [61] 山陽新聞 「がん細胞の流動化現象発見 転移を効率 的に進行か」 2010.1.19
- [62] 山陰中央新報 「がん細胞の流動化現象発見 転移を 効率的に進行か」 2010.1.19

7 技術部門

7.1 技術部門

(大塚、佐伯、藤代、八幡、 * 樫村、 * * 南城、 * * 阿部)

* 再雇用職員、**技術補佐員

技術部門では、実験装置試作室業務、安全衛生・ 薬品管理業務、IT 関連業務、学生実験、学生実習、 研究支援などの業務を行っている。9月から技術室 に八幡を迎えた。技術部門の担当教員(坪野、相原、 早野、岡本、松本(地惑))と技術職員とで月に1度 の物理技術室ミーティングを行っている。

7.1.1 実験装置試作室(大塚、南城、阿部)

利用状況

2009 年 4 月から 2010 年 3 月までの、実験装置試作 室の主な利用状況は以下のとおりである。

- 内部製作件数 (140件)
- 設計及び部品等の問い合わせ(40件)
- 外注発注 (30件)
- 他教室から作業依頼及び問い合わせ(23件)
 主な依頼者(5月祭、生物科学 寺島研、地球 惑星科学 杉浦研、吉川研、船守研、松本研、 素粒子物理国際センター)

工作実習

物理学教室及び地球惑星科学所属の大学院修士1年 生を対象として、6月1日から6月22日まで下記の 内容で工作講習会を行った。

- 参加人員:41 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

- 5. ケガキ、ポンチ、タップ、ダイス、の使 い方
- 4. 材質別による刃物の選定及び使用方法
- 5. 旋盤、フライス盤、ボール盤、シャーリ ング(切断機)の使用方法
- 7.1.2 安全衛生(佐伯)

安全衛生管理(佐伯)

- 物理学専攻の安全衛生管理(物理学専攻安全 委員)
- 理学系研究科における産業医の巡視の同行(衛 生管理者)
- 理学系研究科の安全確認巡視
- 理学系研究科・理学部環境安全管理室メンバー
- 高圧ガス貯蔵量削減対策 WG メンバー
- 高圧ガス貯蔵庫理学部1号館担当者

クレーンと玉掛けの特別教育(大塚、佐伯)

9月18日に下記の内容でクレーンと玉がけの特別教 育を企画した。

参加人員: 29名 講師 株式会社キトー 講習内容:

- 講義
 - クレーンに関する知識
 - クレーンの取扱い
 - 原動機及び電気に関する知識
 - クレーンの玉掛けの方法
 - 関係法令
- 実技
 - クレーンの操作

7.1.3 IT 関連業務(藤代)

- 専攻内各サーバ運用
- 専攻内ネットワークシステムの運用(各研究室 及び理学部ネットワーク室)
- 理学部情報システム室業務(事務室へのシンク ライアント端末導入、東京大学職員メールシス テムへの移行)

- 学務システム運用
- テレビ会議システムの運用と管理
- ソフトウェアのライセンス管理
- 7.1.4 学生実験(佐伯、八幡、藤代、樫村)
 - 物理学実験 II(佐伯)
 3年生冬学期の物理学実験 IIの生物物理学を 指導した。
 - 物理学実験 II(八幡)
 3年生冬学期の物理学実験 IIの相転移を指導した。
 - 物理学実験I(藤代)
 3年生夏学期の物理学実験Iの計算機の技術指導をした。平成22年度「計算機実験」マニュアルの電子化に携わった。
 - 3年生実験(物理学実験I、II)のテーマの振 り分け(樫村)
 - 物理学実験I解説書の電子化(八幡) テキストの電子化用ファイルサーバーを構築した。物理学実験Iのテキストを紙媒体での入稿から電子入稿にした。これに伴い、不足した原稿をLaTeXで作成した。物理学実験Iの計算機実験のマニュアルをTAによるコピーから電子化、印刷製本にした。

7.1.5 CE タンク管理(八幡)

- 理学部の液体窒素タンクの月次管理を引き継いだ。
- ・ 耐震工事に伴う、新管理サーバーの構築を行った。

<報文>

[1] 平成 21 年度技術報告集(東京大学大学院理学系研究 科・理学部技術部、2010 年 3 月).

<学術講演>

(国内会議)

一般講演

[2] 藤代知子: 教育・研究活動支援のためのTV会議シス テム活用について、第24回理学系研究科・理学部 技術シンポジウム(東京大学、2009年9月15日). \mathbf{II}

Summary of activities in 2009

1 Theoretical Nuclear Physics Group

- Subjects: Structure and reactions of unstable nuclei, Monte Carlo Shell Model, Molecular Orbit Method, Mean Field Calculations, Quantum Chaos Quark-Gluon Plasma, Lattice QCD simulations, Structure of Hadrons, Color superconductivity, cold atoms, graphene Relativistic Heavy Ion Collisions, Relativistic Hydrodynamics, Color Glass Condensate
- Member: Takaharu Otsuka, Tetsuo Hatsuda, Tetsufumi Hirano, Noritaka Shimizu and Shoichi Sasaki

In the nuclear theory group, a wide variety of subjects are studied. The subjects are divided into three major categories: Nuclear Structure Physics, Quantum Hadron Physics and High Energy Hadron Physics.

Nuclear Structure Physics

In the Nuclear Structure group (T. Otsuka and N. Shimizu), quantum many-body problems for atomic nuclei, various issues on nuclear forces and their combinations are studied theoretically from many angles. The major subjects are the structure of unstable exotic nuclei, shell model calculations including Monte Carlo Shell Model, reactions between heavy nuclei, Bose-Einstein condensation, symmetries and quantum chaos, etc.

The structure of unstable nuclei is the major focus of our interests, and examples of the current subjects are the disappearance of conventional magic numbers and appearance of new ones. These phenomena are due to the change of the shell structure (shell evolution), and are largely due to nuclear forces such as the tensor force and the three-body force. Many papers with strong impacts have been published by our group in recent years, such as [1]. The structure of such unstable nuclei have been calculated by Monte Carlo Shell Model and conventional shell model [2], and their applications have been made in collaborations with experimentalists [3, 4]. We study also neutrino reactions with nuclei with astrophysical interest [5]. Relativistics Hartree-Fock calculations have been reported with the explicit inclusion of pions [6].

The mean-field based formulation of the Interacting Boson Model is a new original approach being developed by using the Wavelet formalism [7].

A new type of ab initio calculations is being developed by using Monte Carlo Shell Model.

Quantum Hadron Physics

In Quantum Hadron Physics group (T. Hatsuda and S. Sasaki), many-body problems of quarks and gluons are studied theoretically on the basis of the quantum chromodynamics (QCD). Main research interests are the quark-gluon structure of hadrons, lattice gauge theories and simulations, matter under extreme conditions, quark-gluon plasma in relativistic heavy-ion collisions, high density matter, neutron stars and quark stars, chiral symmetry in nuclei, color superconductivity, and many-body problem in cold atoms and in graphene. Highlights in research activities of this year are listed below.

- 1. Lattice QCD studies of hadron structure [8]
- 2. Lattice QCD studies of the nuclear force [9]
- 3. Heavy-quarks in the quark-gluon plasma [10]
- 4. Phase transition in high density quark matter [11]
- 5. Boson-fermion mixture in ultracold atoms [12]
- 6. Non-equilibrium quantum field theory [13]

High Energy Hadron Physics

In High Energy Hadron Physics group (T. Hirano), the physics of the quark-gluon plasma and dynamics of relativistic heavy ion collisions are studied theoretically based on relativistic hydrodynamics and relativistic kinetic theories. Main subjects include (1) hydrodynamic description of the space-time evolution of the quark-gluon plasma, (2) transport description of hadrons and their dissipation, (3) analyses of the quark-gluon plasma through hard probes such as jets and heavy quarks/quarkonia [10, 16, 18], (4) initial states of high energy colliding hadrons/nuclei including color glass condensate [14], (5) electromagnetic probes of the quark-gluon plasma [15], and (6) viscous effects on hadronic observables [17].

References

- Takaharu Otsuka, Toshio Suzuki, Michio Honma, Yutaka Utsuno, Naofumi Tsunoda, Koshiroh Tsukiyama, and Morten Hjorth-Jensen, "Novel Features of Nuclear Force and Shell Evolution in Exotic Nuclei", Phys. Rev. Lett., **104**, 012501 (2010) (Selected for a Viewpoint in *Physics*)
- [2] M. Honma, T. Otsuka, T. Mizusaki, et al., "New effective interaction for f(5)pg(9)-shell nuclei", Phys. Rev., C80, 064323 (2009)
- [3] R. Kanungo, C. Nociforo, A. Prochazka, et al., "One-Neutron Removal Measurement Reveals O-24 as a New Doubly Magic Nucleus", Phys. Rev. Lett., 102, 152501 (2009)
- [4] T. Nakamura, N. Kobayashi, Y. Kondo, et al., "Halo Structure of the Island of Inversion Nucleus Ne-31", Phys. Rev. Lett., 103, 262501 (2009)
- [5] T. Suzuki, M. Honma, K. Higashiyama, et al., "Neutrino-induced reactions on Fe-56 and Ni-56, and production of Mn-55 in population III stars", Phys. Rev., C79, 061603 (2009)
- [6] G.A. Lalazissis, S. Karatzikos, M. Serra, et al., "Covariant density functional theory: The role of the pion", Phys. Rev., C80, 041301 (2009)
- [7] K. Nomura, N. Shimizu, and T. Otsuka: "Formulating the Interacting Boson Model by mean-field methods", Phys. Rev., C81, 044307 (2010)
- [8] S. Sasaki and T. Yamazaki, "Lattice study of flavor SU(3) breaking in hyperon beta decay", Phys. Rev. D79, 074508 (2009).
- [9] S. Aoki, T. Hatsuda, and N. Ishii, "Theoretical Foundation of the Nuclear Force in QCD and its applications to Central and Tensor Forces in Quenched Lattice QCD Simulations", Prog. Theor. Phys. 123, 89-128 (2010).
- [10] Y. Akamatsu, T. Hatsuda and T. Hirano, "Heavy Quark Diffusion with Relativistic Langevin Dynamics in the Quark-Gluon Fluid", Phys.Rev. C79, 054907 (2009).
- [11] N. Yamamoto and T. Kanazawa, "Dense QCD in a Finite Volume", Phys. Rev. Lett. 103, 032001 (2009).
- [12] K. Maeda, G. Baym, and T. Hatsuda, "Simulating Dense QCD Matter with Ultracold Atomic Boson-Fermion Mixtures", Phys. Rev. Lett. 103, 085301 (2009).
- [13] J. Berges, J. Pruschke, and A. Rothkopf, "Instability-induced fermion production in quantum field theory", Phys. Rev. D80, 023522 (2009).
- [14] T. Hirano and Y. Nara: "Eccentricity fluctuation effects on elliptic flow in relativistic heavy ion collisions", Phys. Rev. C 79, 064904 (2009).
- [15] F.M. Liu, T. Hirano, K. Werner and Y. Zhu: "Elliptic flow of thermal photons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ ", Phys. Rev. C 80, 034905 (2009).
- [16] Y. Akamatsu, T. Hatsuda, and T. Hirano: "Electron-muon correlation as a new probe to strongly interacting quark-gluon plasma", Phys. Rev. C 80, 031901(R) (2009).
- [17] A. Monnai and T. Hirano: "Efects of Bulk Viscosity at Freezeout", Phys. Rev. C 80, 054906 (2009).
- [18] N. Armesto, M. Cacciari, T. Hirano, J. L. Nagle, and C. A. Salgado: "Constraint fitting of experimental data with a jet quenching model embedded in a hydrodynamical bulk medium", J. Phys. G **37**, 025104 (2010).

2 Theoretical Particle and High Energy Physics Group

Research Subjects: The Unification of Elementary Particles & Fundamental Interactions

Member: Takeo Moroi, Tsutomu Yanagida, Koichi Hamaguchi, Yutaka Matsuo Motoi Endo, Yosuke Imamura, Teruhiko Kawano

The main research interests at our group are in string theory, quantum field theory and unification theories. String theory, supersymmetric field theories, and conformal field theories are analyzed relating to the fundamental problems of interactions. In the field of high energy phenomenology, supersymmetric unified theories are extensively studied and cosmological problems are also investigated.

We list the main subjects of our researches below.

- 1. High Energy Phenomenology.
 - 1.1 Dark Matter [1] [2] [3] [12] [13] [15] [16] [24]
 - 1.2 LHC [11] [14]
 - 1.3 Supersymmetry [20] [21] [23] [22] [25]
 - 1.4 Hadron Scattering Phenomena by Gauge/Gravity Correspondence
- 2. Superstring Theory.
 - 2.1 M-theory and BLG Model [4] [5]
 - 2.2 M-theory and AdS/CFT Correspondence [18] [17] [9]
 - 2.3 Duality [6]
 - 2.4 BPS State Counting and Crystal Melting [7]
 - 2.5 String Phenomenology [10]
 - 2.6 F-theory [19]

References

- C. R. Chen, K. Hamaguchi, M. M. Nojiri, F. Takahashi and S. Torii, "Dark Matter Model Selection and the ATIC/PPB-BETS anomaly," JCAP 0905 (2009) 015.
- [2] K. Hamaguchi, F. Takahashi and T. T. Yanagida, "Decaying gravitino dark matter and an upper bound on the gluino mass," Phys. Lett. B 677 (2009) 59.
- [3] K. Hamaguchi, R. Kitano and F. Takahashi, "Non-thermal Gravitino Dark Matter in Gauge Mediation," JHEP 0909 (2009) 127.
- [4] P. M. Ho, Y. Matsuo and S. Shiba, "Lorentzian Lie (3-)algebra and toroidal compactification of M/string theory," JHEP 0903, 045 (2009).
- [5] T. Kobo, Y. Matsuo and S. Shiba, "Aspects of U-duality in BLG models with Lorentzian metric 3-algebras," JHEP 0906, 053 (2009).
- [6] S. Kanno, Y. Matsuo, S. Shiba and Y. Tachikawa, "N=2 gauge theories and degenerate fields of Toda theory," Phys. Rev. D 81, 046004 (2010).
- [7] H. Ooguri and M. Yamazaki, "Crystal Melting and Toric Calabi-Yau Manifolds," Comm. Math. Phys. 292, 179 (2009).
- [8] H. Ooguri and M. Yamazaki, "Emergent Calabi-Yau Geometry," Phys. Rev. Lett. 102, 161601 (2009).
- S. Schäfer-Nameki, M. Yamazaki and K. Yoshida, "Coset Construction for Duals of Non-relativistic CFTs," JHEP05 05, 038 (2009).

- [10] H. Hayashi, T. Kawano, R. Tatar and T. Watari, "Codimension-3 Singularities and Yukawa Couplings in F-theory," Nucl. Phys. B 823, 47 (2009)
- [11] S. Asai, K. Hamaguchi and S. Shirai, "Stop and Decay of Long-lived Charged Massive Particles at the LHC detectors," Phys. Rev. Lett. 103, 141803 (2009).
- [12] S. Shirai, F. Takahashi and T. T. Yanagida, "R-violating Decay of Wino Dark Matter and electron/positron Excesses in the PAMELA/Fermi Experiments," Phys. Lett. B 680, 485 (2009).
- [13] S. Shirai, F. Takahashi and T. T. Yanagida, "Cosmic-ray Electron and Positron Excesses from Hidden Gaugino Dark Matter," Prog. Theor. Phys. 122, 1277 (2010).
- [14] S. Shirai and T. T. Yanagida, "A Test for Light Gravitino Scenario at the LHC," Phys. Lett. B 680, 351 (2009).
- [15] M. Ibe, H. Murayama, S. Shirai and T. T. Yanagida, "Cosmic Ray Spectra in Nambu-Goldstone Dark Matter Models," JHEP 0911, 120 (2009).
- [16] M. Endo, S. Shirai and K. Yonekura, "Phenomenological Aspects of Gauge Mediation with Sequestered Supersymmetry Breaking in light of Dark Matter Detection," JHEP 1003, 052 (2010).
- [17] Y. Imamura and S. Yokoyama, "A Monopole Index for N=4 Chern-Simons Theories," Nucl. Phys. B 827, 183 (2010).
- [18] Y. Hatsuda, H. Tanaka, "Scattering of Giant Magnons in CP³," JHEP 02 (2010) 085.
- [19] R. Tatar, Y. Tsuchiya and T. Watari, "Right-handed Neutrinos in F-theory Compactifications," Nucl. Phys. B 823 1-46 (2009).
- [20] K. I. Izawa, F. Takahashi, T. T. Yanagida and K. Yonekura, "Conformal Supersymmetry Breaking in Vectorlike Gauge Theories," Phys. Rev. D 80, 085017 (2009).
- [21] R. Sato, T. T. Yanagida and K. Yonekura, "Relaxing a constraint on the number of messengers in a low-scale gauge mediation," Phys. Rev. D 81, 045003 (2010).
- [22] M. Endo, K. Hamaguchi and S. Iwamoto, "Lepton Flavor Violation and Cosmological Constraints on R-parity Violation," JCAP02(2010)032.
- [23] R. Sato and K. Yonekura, "Low Scale Direct Gauge Mediation with Perturbatively Stable Vacuum," JHEP 1003, 017 (2010)
- [24] K. Hamaguchi, K. Nakaji and E. Nakamura, "Inverse Problem of Cosmic-Ray Electron/Positron from Dark Matter," Phys. Lett. B 680, 172 (2009).
- [25] M. Endo and T. Shindou, "R-parity Violating Right-Handed Neutrino in Gravitino Dark Matter Scenario," JHEP 0909, 037 (2009).

3 Hayano Group

Research Subjects: Precision spectroscopy of exotic atoms and nuclei

Member: Ryugo S. Hayano and Takatoshi Suzuki

1) Antimatter study at CERN's antiproton decelerator

Antiprotonic helium laser spectroscopy Atomic transition frequencies in antiprotonic helium (together with those in hydrogen) yield information on the Rydberg constant and the proton-to-electron mass ratio, thereby contributing to the CODATA 2006 recommended values of the fundamental physical constants.

In order to further improve the antiprotonic helium laser spectroscopy precision, we have developed new Doppler-free spectroscopy methods with which it should be possible to determine the (anti)proton-to-electron mass ratio with a relative standard uncertainty better than 10^{-10} (i.e., better than the current CODATA value) within a few years.

- Antihydrogen Spectroscopic comparison of hydrogen and antihydrogen $(\bar{p} e^+)$ atoms is considered to be one of the most stringent tests of the CPT symmetry. At CERN, we can now routinely form antihydrogen atoms by mixing antiprotons and positrons, and our current goal is to capture antihydrogen atoms by using a superconducting octupole magnet system. At the same time, development of an "antihydrogen beam", with which we plan to measure the antihydrogen ground-state hyperfine splitting, is in progress.
- \bar{p} -nucleus annihilation cross section at ultra-low energies At high energies, it is known that the \bar{p} -nucleus annihilation cross sections scale as $\sigma_{\rm ann} \propto A^{2/3}$, where A is the nuclear mass number. However, at very low energies, this scaling is expected to be violated, but no such measurements have been done due to the lack of ultra-low-energy antiproton beams. Using a radio-frequency quadrupole decelerator ("inverse" linac), we have started the $\sigma_{\rm ann}$ measurements at 100 keV.

2) Precision X-ray spectroscopy of kaonic atoms

The X-ray spectroscopy of kaonic atoms is a complementary tool to study kaon-nucleon/nucleus interaction. The advent of a new type of high-resolution x-ray detector, SDD, its combination with high-intensity beamline provides clean kaon beam and various trackers/counters technique, enables us to study kaonic atoms with unprecedented precision.

- X-ray spectroscopy of kaonic hydrogen In fiscal year 2009, we performed the measurement of kaonic hydrogen X-ray in the SIDDHARTA experiment at the DA Φ NE storage ring in LNF, Italy. During the beam time from March to November, we also collected data with helium-4 target to tune the experimental setup. The expected performance of the silicon drift detectors was verified in the helium-4 target measurement. Moreover, we obtained consistent result on the 2*p*-level shift of kaonic helium-4 atom with the E570 experiment at KEK in 2005, and published it in PLB. Meanwhile, the analysis of the hydrogen target data is now in progress to determine the 1*s*-level shift and width of the kaonic hydrogen atom.
- X-ray spectroscopy of kaonic helium 3 The kaonic helium 3 2*p*-level shift measurement, in addition to that of kaonic helium 4 given by KEK-PS E570 and very recently by SIDDHARTA, will give much more strong constraint to the kaon-nucleas interaction. The J-PARC E17, which is the first experiment to be carried out at J-PARC hadron hall, will be performed at K1.8BR beamline as a precision measurement of the shift. In fiscal year 2009, we have completed the preparation of beamline detectors and CDS (Cylindrical Detector System), and proceeded the kaon beam tuning of the K1.8BR beamline, R&D of the ³He target and a new type of SDD. We will perform the kaonic helium 3 measurement in fiscal year 2010.

3) Study of kaonic nuclei

- Study of kaonic nucleus via the stopped K^- reaction on helium 4 We have performed KEK-PS E549, to measure (semi-)inclusive ${}^{4}\text{He}(K_{stopped}^{-}, N)$ spectra, and obtained strict upper limits for the formation of narrow $\bar{K}NNN$ states with total isospin T = 0/1. Meanwhile, the ${}^{4}\text{He}(K_{stopped}^{-}, YN/Yd)$ semi-exclusive spectra exhibited unresolved wide strengths which are well separable from multi-nucleon processes. They could be the signal of non-mesonic YN/YNN decay of strongly-bound $\bar{K}NN/\bar{K}NNN$ states, and the finalization of spectrum normalization, including the neutron detection efficiency study, is in progress to conclude the interesting problem. In fiscal year 2009, normalized Λp spectrum was provided, and the result of ${}^{4}\text{He}(K_{stopped}^{-}, n)$ semi-inclusive measurement was finalized. As a byproduct, we have studied the branching ratios of non-mesonic two body weak decay modes of ${}^{4}_{\Lambda}\text{He}$ hyper nucleus, ${}^{4}_{\Lambda}\text{He} \rightarrow d + d$ and p + t.
- Search for K^-pp and K^-pn deeply-bound kaonic states at J-PARC The J-PARC E15, to be scheduled after E17 at K1.8BR beamline, will use the ${}^{3}\text{He}(K^-, n)$ reaction to search for K^-pp . E15 is a kinematically complete experiment in which all reaction products are detected exclusively for $K^-pp \rightarrow \Lambda p$ decay mode, and it aims to provide decisive information on the nature of the simplest kaonic nucleus. We have submitted an extension of the program to measure ${}^{3}\text{He}(K^-, p)$ spectrum to study K^-pn as well, and the extended part, P27, was approved and combined as a part of E15.

The experimental devices, which have many common parts with those used for E17, are now under construction.

4) Precision spectroscopy of pionic atoms

Precision spectroscopy of the 1s level of pionic atoms using the $(d, {}^{3}\text{He})$ reaction is a powerful method to study the $\langle q\bar{q} \rangle$ condensate, and to understand why the proton is so heavy compared to its constituents, the u, d quarks. A new experimental setup based on a dispersion-matched optics is being constructed at the BigRIPS facility of RIBF. In May 2009, we performed a test experiment to establish a method to accomplish the dispersion-matched optics and confirmed the experimental resolution was improved after applying the dispersion matching.

The next pionic atom spectroscopy experiment will be performed in fall 2010, and presently we are preparing detectors, optics and a data acquisition system for this experiment.

5) Study of muonium production targets

Ultra-slow polarized muon beam with the energy of $0.5 \sim 30$ keV is anticipated as a new "microscope for magnetism" for the investigation of the surface magnetism. The ultra slow muon beamline was established in the RIKEN RAL muon facility. In this site, $15 \sim 20$ /s ultra-slow muons can be generated while initial muon beam intensity reaches to 1.3×10^6 /s. In order to increase the intensity of the ultra-slow muons, improvements of the escaping efficiency of the muoniums from the formation target (3%), and laser ionization ($\sim 10^{-5}$) are needed.

In recent days, we can fabricate nano structures with the technique of material science and it is expected to improve escaping efficiency of muoniums. We are going to perform measurements of the efficiency by using new materials in 2010. Moreover, we will proceed understanding of the mechanism of muonium formation and behavior of muoniums near the surface.

4 Ozawa Group

Research Subjects: Experimental study of non-perturbative QCD

Member: Kyoichiro Ozawa

Study of quark-gluon-plasma at RHIC

In 6 years operation of Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at Brookhaven National Laboratory (BNL), many new phenomena related to hot and dense nuclear matter have been discovered. We performed the PHENIX experiment at RHIC and produced many new results on a wide range of physics subjects, including charged and neutral hadron production, single electron production, event isotropy, and many other topics.

In spite of these fruitful results, there are still remaining questions to be answered to further characterize the state of matter formed at RHIC. In particular, chiral properties of the dense matter produced has not been obtained, and should be provided. For the study of the chiral properties, vector mesons, such as ϕ , ω and ρ are interesting mesons because the restoration of approximate chiral symmetry at high temperature may modify their mass and width. These modifications can be shown directly in the line shape of the $e^+e^$ mass spectra. Here, the measurements with lepton decays are essential, since leptons are not interact with the medium and carry direct information about conditions and properties of the medium. However, large background in electron pairs due to π^0 Dalitz decays and γ conversion make the measurement difficult in the past RHIC data. In this year, we have successfully installed and operated a new detector, which is called Hadron Blind Detector, to suppress the background. Data acquisition at RHIC-PHENIX is under way and we have started a preliminary analysis.

Study of mechanism of hadronic mass generation at J-PARC

The chiral property of QCD in dense ($\rho \neq 0$) nuclear matter has also attracted wide interest in the field of hadron physics. In hot and/or dense matter, broken chirtal symmetry is subject to be restored either partially or completely and, hence, the properties of hadrons can be modified. To observe such an effect, measurements of the in-medium decay of vector mesons are highly desirable for the direct determination of the meson properties in matter. We are planning two new experiments at J-PARC to measure vector meson mass at normal nuclear density.

One new experiment aim to collect 100 times larger statistics of ϕ meson than that collected by the KEK experiment. We can discuss the velocity dependence of the mass spectra of vector mesons more precisely and compare with the theoretical predictions. We are also able to use larger and smaller nuclear targets as lead and proton, For this experiment, new detector based on Gas Electron Multiplier (GEM), which is originally developed at CERN, is under developing. Using GEM, we are investigating 2 dimensional tracker for high rate counting. A prototype is reconstructed and reasonable signals are observed. An test experiment is performed at LNS test beam line at Tohoku Univ. Incident angle dependence of position resolution is evaluated using an electron beam. As shown in Fig. 2.1.7, a position resolution of 150 μ m is obtained for 30° of incident angle.

Also, we propose combined measurements of nuclear ω bound state and direct ω mass modification. Nuclear ω bound states are measured in $p(\pi^-, n)\omega$ reaction and decays of generated ω meson are also measured with $\omega \to \pi^0 \gamma$ mode. Such exclusive measurement can supply essential information to establish partial restoration of the chiral symmetry in nucleus. We performed a test experiment to evaluate timing resolution of TOF counter for neutron measurements and the resolution of 60 ps is obtained. Several Monte Carlo simulations are performed based on known characteristics of detectors to evaluate final expected spectra. As results, expected final spectra are shown in Fig. 2.1.8.

Gas Electron Multiplier R&D for future experiments

We have studied Gas Electron Multiplier (GEM) for future experiments. For upgrade of Hadron Blind Detector, several gas mixtures of Ar and CF_4 are tested. In addition, we have tested GEM foils made by Tech-Etch Co. As a read-out electronics of GEM detectors, we have developed an ASIC chip which has pre-amplifier, shaper-amplifier, comparator, and sample-hold circuits. A proto-type chip is manufactured and will be tested soon.

5 Sakai (Hideyuki) Group

Research Subjects: Experimental Nuclear Physics

Member: Hideyuki Sakai, Kentaro Yako

We have been 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. Major activities in the final year are summarized below.

ICHOR project: Isospin-spin responses in CHarge-exchange exOthermic Reactions

Spin-isospin response of nucleus is a unique excitation mode since it is related with mesons in nuclei and consequently it provides valuable information on nuclear forces. So far the research has been performed by using endothermic reactions by a stable beam such as (p, n) or (n, p), which is inevitably accompanied by a finite momentum transfer to nucleus. Such reactions hamper the study of spin-isospin responses in highly excited regions. We will try to overcome this difficulty by using exothermic reactions by an unstable beam such as $(^{12}N, ^{12}C)$ or $(^{12}B, ^{12}C)$. With this new experimental means, we pursue the study of spin-isospin responses in the highly excited region. Aiming to identify new spin excitation modes, we constructed a high energy resolution spectrometer SHARAQ dedicated to the exothermic reactions by unstable beams.

-First experiment at SHARAQ: Measurement of isovector spin-monopole resonance-

The isovector spin-monopole resonance (IVSMR) has been a major topic in the study of spin-isospin responses in nuclei. The IVSMR is the $2\hbar\omega$ transition with $\Delta L = 0$, $\Delta S = 1$, and $\Delta T = 1$. Since the IVSMR is a breathing mode with spin and isospin changes, it can be related to the nuclear matter

compressibility with spin and isospin degrees of freedom. In spite of the importance of the IVSMR, the experimental information is currently scarce. There are some experimental hints on the IVSMR for the β^- (or (p, n)) side, but few for the β^+ (or (n, p)) side. Therefore, we planned two experiments to establish the IVSMR by observing it in the β^+ channel, in which the physical background due to Gamow-Teller excitations are suppressed by excess neutrons. As a first step, we employed a slightly exothermic reaction of $(t, {}^{3}\text{He})$. The first physics measurement at SHARAQ was carried out successfully in November.

The triton beam of $T_t = 900$ MeV was produced by injecting the primary α beam onto a ⁹Be target. The triton beam was acromatically transported to the SHARAQ target position and hits the ²⁰⁸Pb and ⁹⁰Zr target. The ³He particles from the target were momentum analyzed by SHARAQ and detected by the detectors at the focal plane. We have found a significant enhance of strength in the 0-degree spectrum, which indicates that this is the IVSMR (See Fig. 2.1.1). The detailed analysis is in progress. The following experiment will be largely exothermic (¹²N, ¹²C) measurements, which would allow us to observe the IVSMR more clearly.

6 Komamiya group

Research Subjects: (1) Preparation for an accelerator technology and an experiment for the International linear e^+e^- collider ILC; (2) Detector development for studying gravitational quantum effects and searching for new medium range force using ultra-cold neutron beam; (3) Preparation for physics analyses in the ATLAS experiment at the LHC *pp* collider; (4) Data analyses for the BES-II experiment at BEPC-I, and TOF detector construction for BES-III experiment at BEPC-II; (5) Data analyses for the OPAL experiment at the LEP $e^+e^$ collider;

Member: Sachio Komamiya, Yoshio Kamiya

We, particle physicists, are entering an exciting period in which new paradigm of the field will be opened on the TeV energy scale by new discoveries expected in experiments at high-energy frontier colliders, LHC and ILC.

1) Preparation for the International e^+e^- Linear Collider ILC: ILC is the energy frontier machine for e^+e^- collisions in the near future. In 2004 August the main linac technology was internationally agreed to use superconducting accelerator structures. In 2007 March, the Reference Design Report was issued by the Global Design Effort (GDE) and hence the project has been accelerated as an international big-science project. The technical design will be completed in the end of 2012. We are working on ILC accelerator related hardware development, especially on the beam delivery system. We are developing the Shintake beam size monitor for the ATF2, which is a test accelerator system for ILC located at KEK. The Shintake beam size monitor is able to measure O(10)[nm] beam size, by using a high power laser interferometer. The electron beam is emitted to the interference fringe of the split laser beams. The total energy of photons, which are emitted from the inversed Compton scattering of beam electrons with the laser beam interference fringe, is measured by a multilayer CsI(Tl) detector in the down stream. The phase of the fringe is moved step-by-step, the total photon energy is measured in each step, and the beam size is extracted from a fitting of modulation pattern of the total photon energy as a function of the phase. Also we have been studying possible physics scenario and the large detector concept (ILD) for an experiment at ILC.

2) Detector development for studying gravitational quantum bound states and searching for new medium range force using ultra-cold neutron beam: A detector to measure gravitational bound states of ultra-cold neutrons (UCN) is under way. We decided to use CCD's for the position measurement of the UCN's. The CCD is going to be covered by a B layer to convert neutron to charged nuclear fragments. The UCNs are going through a neutron guide of 100 [μ] height and their density is modulated in height as forming bound states within the guide due to the earth gravity. In 2008 we tested our neutron detector at ILL Grenoble. In 2009 we started the first experiment at ILL. We are analyzing the data. We will improve our detector and measure the modulation of the neutron density distribution in the next years.
3) ATLAS experiment at LHC: The epoch of new paradigm for particle physics is going to open with the experiments at LHC. LHC started its operation in the end of 2009. The high energy collision at 7 TeV (CMS) has been started in the end of March 2010. The ATLAS detector is now recording events at high energies. Some of our students work on data analysis at LHC. Search for supersymmetric particles with the missing transverse energy, and detector related and physics background are under study.

4) BES-II/-III experiment at IHEP: The group has considered the BES-III experiment at the Beijing e^+e^- collider BEPC-II as the candidate for the middle term project before ILC. We have made a research and development for TOF detector for the BES-III experiment together with IHEP, USTC. We successfully completed a test of over 500 photomultipliers in 1[T] magnetic field and they are already installed to the BES-II detector. We have studied the data analysis of baryon-pair production in $J\psi$ decay using 5.8M BES-II J/ψ events. Now BEPC-II is operating smoothly and BES-III detector is taking large samples of ψ' and J/ψ data.

5) OPAL experiment at LEP: It is the experiment at the highest energy e^+e^- collider LEP of CERN. The data taking with the OPAL detector was completed in the end of 2000. Important physics subjects at LEP are (a) Higgs boson searches, (b) Supersymmetric particle searches and (c) establishment of gauge interactions. We have extensively searched for the Higgs boson which was driven to a narrow mass range of 114-160 GeV.

7 Minowa-Group

Research Subjects: Experimental Particle Physics without Accelerators

Member: MINOWA, Makoto and INOUE, Yoshizumi

Various kinds of astro-/non-accelerator/low-energy particle physics experiments have been performed and are newly being planned in our research group.

We started a new R and D study of a compact mobile anti-electron neutrino detector with plastic scintillators to be used at a nuclear reactor station, for the purpose of monitoring the power and plutonium content of the nuclear fuel. It can be used to monitor a reactor from outside of the reactor containment with no disruption of day-to-day operations at the reactor site. This unique capability may be of interest for the reactor safeguard program of the International Atomic Energy Agency(IAEA). We have built a prototype detector of a size of $1700 \times 667 \times 551 \text{ mm}^3$ and weight of 270 kg. A detailed Monte Carlo simulation and background measurement have shown that it can sense the on/off status of an ordinary nuclear power reactor station. It is waiting for test deployment at an appropriate reactor.

We are running an experiment to search for axions, light neutral pseudoscalar particles yet to be discovered. Its existence is implied to solve the so-called strong CP problem. The axion would be produced in the solar core through the Primakoff effect. It can be converted back to an x-ray in a strong magnetic field in the laboratory by the inverse process. We search for such x-rays coming from the direction of the sun with the TOKYO AXION HELIOSCOPE, aka Sumico. Sumico consists of a cryogen-free 4 T superconducting magnet with an effective length of 2300 mm and PIN photodiodes as x-ray detectors. By now, we put upper limits of $g_{a\gamma\gamma} < (5.6-13.4) \times 10^{-10} \text{GeV}^{-1}$ to axion - photon coupling constant for the axion mass $m_a < 0.27$ eV and 0.84 eV < m_a < 1.00 eV. The latter is a newly explored mass region which CERN Axion Solar Telescope(CAST) group that started later has not reached yet. We planned to continue the measurement in which we scan the mass region from 1 eV upward.

An experiment is being prepared for a search for hidden photons kinetically mixing with the ordinary photons. The existence of the hidden photons and other hidden sector particles is predicted by extensions of the Standard Model, notably the ones based on string theory. The hidden photon is expected to come from the direction of the sun. It would be produced in the solar core or in the space by oscillation of the ordinary photon, and can transmute into the photon again in a long vacuum chamber in the laboratory. A photon sensor in the chamber would readily detects the ordinary photon. We plan to piggyback such a chamber onto the Sumico helioscope and track the sun to search for the hidden photons coming from the sun. We estimate that this kind of simple hidden photon detector is able to explore a parameter region of mixing angle vs. hidden photon mass beyond the existing limits. All the components required for the detector are now ready and waiting for the assembly.

A possible limit to the parameters of the hidden photon has also been estimated from the existing data of Sumico's solar axion search runs. It is found that it override the existing limits for the hidden photon mass around 1eV.

Another long-running project of our group is the direct experimental search for supersymmetric neutralino dark matter. The search has been suspended for the improvement of the $CaF_2(Eu)$ scintillation detector in order to get still higher sensitivity for the possible feeble neutralino signals. The improvement includes the pulse shape analysis(PSA) for the discrimination between nuclear recoil events and electron recoil events. We found that PSA is possible with the $CaF_2(Eu)$ scintillator although it is contradictory to the old report by UK group. Furthermore, a new attempt is made to develop organic liquid scintillator with fluorine content also aiming at a search for spin dependently interacting neutralino dark matter.

8 Aihara/Yokoyama Group

Research Subjects: Study of CP-Violation and Search for Physics Beyond the Standard Model in the *B* Meson System (Belle), Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment (T2K), Neutrino-nucleus Interaction Measurement (SciBooNE), Dark Energy Survey at Subaru Telescope (Hyper Suprime-cam), and R&D for Hybrid Photodetectors and the ILC Silicon Detector Concept (SiD).

Staff Members: H. Aihara, M. Yokoyama, M. Iwasaki, H. Kakuno and T. Abe

One of the major research activities has been a study of CP-violation and a search for physics beyond the Standard Model in the *B* meson system using the KEK *B*-factory (KEKB). This past year we presented a precise measurement of the branching fraction for a flavor-changing neutral current decay $B \to X_s \ell^+ \ell^-$, where X_s is a hadronic system containing an *s*-quark and ℓ is an electron or a muon, based on a data sample containing 657M $B\bar{B}$ pairs. This decay mode is highly suppressed in the Standard Model and therefore a probe for searching new physics beyond the Standard Model. Combining the electron and muon modes, we find the branching fraction $Br(B \to X_s \ell^+ \ell^-) = [3.22 \pm 0.79(\text{stat.})^{+0.28}_{-0.25}(\text{syst.})] \times 10^{-6}$ for $M_{\ell^+\ell^-} > 0.2 \text{ GeV}/c^2$. This is the most precise measurement of this decay mode. We have also continued to design a silicon vertex detector and the interaction region for the KEKB luminosity upgrade.

The T2K long baseline neutrino oscillation experiment has started in April 2009. We have constructed and operated the position (Eelectrostatic) and profile (Segmented Secondary Emission) monitors for the primary proton beams, the muon monitor in the secondary beamline, and near neutrino detectors. All the instruments have been working as expected. We have successfully observed neutrino interactions in both near neutrino detectors and Super-Kamiokande.

In order to reduce the uncertainty in the neutrino oscillation measurements, we have been analyzing data from SciBooNE, an experiment performed at Fermilab to study neutrino-nucleus interaction. We have measured the cross section of neutral current π^0 production, which is one of main sources of background in ν_e appearance search at T2K, as $\sigma(NC\pi^0)/\sigma(CC) = (7.7 \pm 0.5(\text{stat.})^{+0.5}_{-0.4}(\text{sys.})) \times 10^{-2}$.

We have been developing hybrid photodetector (HPD) combining a large-format phototube technology and avalanche diode as photo-electron multiplier. This year, we have developed 8-inch HPD with all glass design, together with a compact high voltage supply and readout electronics. This device can be deployed for large water Cherenkov detectors, envisioned as the next generation proton-decay/neutrino detectors.

As an observational cosmology project, we are involved in building a 1.2 Giga pixel CCD camera (Hyper Suprime-Cam) to be mounted on the prime focus of the Subaru telescope. With this wide-field camera, we plan to conduct extensive wide-field deep survey to investigate weak lensing. This data will be used to develop 3-D mass mapping of the universe. It, in turn, will be used to study Dark Energy.

SiD is a detector concept based on silicon tracking and a silicon-tungsten sampling calorimeter, complemented by a powerful pixel vertex detector, and outer hadronic calorimeter and muon system. Optimized forward detectors are deployed. In order to meet the ILC physics goals, we have designed the general purpose detector taking full advantage of the silicon technology. The Letter of Intent for SiD was validated as the detector concept at ILC by IDAG and ILC Research Director.

- 1. H. Nakayama, Ph.D thesis, "Precision Measurement of the Electroweak Flavor-Changing Neutral Current Decays of B Mesons," March, 2010.
- 2. Y. Kurimoto *et al.* [SciBooNE Collaboration], "Measurement of inclusive neutral current π^0 production on carbon in a few-GeV neutrino beam," Phys. Rev. D 81, 033004 (2010).
- T. Abe, "Development of Large-Aperture Hybrid Avalanche Photo-Detector," 2009 IEEE Nuclear Science Symposium And Medical Imaging Conference (NSS MIC 2009), Orland, Florida, October 2009.
- S. Mineo, "Distributed parallel processing analysis framework for Belle II and Hyper Suprime-Cam," 13th International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research, Jaipur, India, February 25, 2010.

9 Asai group

Research Subjects: (1) Particle Physics with the energy frontier accelerators (LEP and LHC) (2) Physics analysis in the ATLAS experiment at the LHC: (Higgs, SUSY and Extra-dimension) (3) Particles Physics without accelerator: tabletop size (4) Positronium and QED

Member: S.Asai

- (1) LHC (Large Hadron Collider) has the excellent physics potential. Our group is contributing to the ATLAS group in the Physics analyses: focusing especially on three major topics, the Higgs boson, Supersymmetry and Extra-dimension.
 - Higgs: We are focusing on Higgs boson whose masses is lighter than 140 GeV. $H \rightarrow \gamma \gamma$, $\tau \tau$ and WW are the promising channels. We are contributes on these three modes.
 - SUSY: We contributes SUSY study at the ATLAS experiment as a convener. We have developed methods of the data-driven background estimation for all channels, and we found out that we can estimate background number//distributions from the data itself with accuracy of 10-30% even in the early of the state.
 - Missing Et and jet calibration: We are working on performance of the mET and jet calibration of the ATLAS detector.
 - Extra-dimension If the extra-dimension is compactified at a few TeV scale, Mini-black hole and KK excitation are interesting signals. We are study on these physics at the ATLAS experiments and have shown the ATLAS has good performance.
- (2) Small tabletop experiments have the good physics potential to discover the physics beyond the standard model, if the accuracy of the measurement or the sensitivity of the research is high enough. We perform the following tabletop experiments:
 - Search for extra-dimension with positronium \rightarrow invisible.
 - Search for CP violation of the lepton sector using positronium.
 - Precise measurement Search HFS of the positronium.
 - Developing high power (>500W) stable sub THz RF source
 - Spin-rotation of positronium

10 Aoki Group

Subject: Theoretical condensed-matter physics

Members: Hideo Aoki, Takashi Oka

Our main interests are many-body effects in electron systems, i.e., **superconductivity, magnetism and fractional quantum Hall effect**, for which we envisage a **materials design for correlated electron systems** and novel **non-equilibrium** phenomena should be realised. Studies in the 2009 academic year include:

- Superconductivity in repulsively interacting electron systems
 - Superconductivity in iron-oxypnictides with a disconnected Fermi surface [1,2]
 - Superconductivity in an aromatic crystal [3]
- Quantum Hall effect and physics of graphene
 - Optica Hall effect in graphene[4]
 - Quantum Hall effect in graphene: Topological aspects[5], edge states, Landau-level laser
 - Photovoltaic Hall effect in graphene[6]
 - Quantum dots in magnetic fields [7]
- Non-equilibrium and nonlinear phenomena in correlated electron systems
 - Landau-Zener tunnelling in the breakdown of Mott's insulator [8,9]
 - Nonequilibrium steady states of photoexcited correlated electrons[10]
 - Numerical formalism for nonequilibrium [11]
 - Dynamics of superfluid-Mott insulator transition in cold atoms in optical lattices
- Realization of tight-binding photonic bands[12]

[1] K. Kuroki, H. Usui, S. Onari, R. Arita and H. Aoki: Pnictogen height as a possible switch between high- T_c nodeless and low- T_c nodal pairings in the iron based superconductors, *Phys. Rev. B* **79**, 224511 (2009).

[2] K. Kuroki and H. Aoki: Unconventional pairing originating from disconnected Fermi surfaces in the iron-based superconductor, *Physica C, special edition on superconducting pnictides* **469**, 635 (2009).

[3] T. Kosugi, T. Miyake, S. Ishibashi, R. Arita and H. Aoki: First-Principles Electronic Structure of Solid Picene, J. Phys. Soc. Jpn 78, 113704 (2009).

[4] T. Morimoto, Y. Hatsugai and H. Aoki: Optical Hall conductivity in ordinary and graphene QHE systems, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 116803 (2009).

[5] T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai and H. Aoki: Quantum Hall plateau transition in graphene with correlated random hopping, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 156804 (2009).

[6] Takashi Oka and Hideo Aoki: Photovoltaic Hall effect in graphene, *Phys. Rev. B* **79**, 081406(R) (2009) [*ibid* **79**, 169901(E) (2009)].

[7] P.A. Maksym, Y. Nishi, D.G. Austing, T. Hatano, L.P. Kouwenhoven, H. Aoki and S. Tarucha: Accurate model of a vertical pillar quantum dot, *Phys. Rev. B* **79**, 115314 (2009).

[8] T. Oka and H. Aoki: Nonequilibrium quantum breakdown in a strongly correlated electron system, in *Quantum Percolation and Breakdown* [Lecture Notes in Physics **762**, 251 (Springer Verlag, 2009)].

[9] T. Oka and H. Aoki: Non-Hermitian generalization of the Bethe-ansatz excited states and dielectric breakdown in the Hubbard model out of equilibrium, *Phys. Rev. B*, **81**, 033103 (2010).

[10] N. Tsuji, T. Oka and H. Aoki: Nonequilibrium steady state of photoexcited correlated electrons in the presence of dissipation, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 047403 (2009).

[11] P. Werner, T. Oka, M. Eckstein, A. J. Millis: Weak-coupling quantum Monte Carlo calculations on the Keldysh contour: theory and application to the current-voltage characteristics of the Anderson model, *Phys. Rev. B* **81**, 035108 (2010).

[12] S. Endo, T. Oka and H. Aoki: Realization of tight-binding photonic bands in metallophotonic waveguide networks with application to a flat band in kagome lattice, *Phys. Rev. B* **81**, 113104 (2010).

11 Miyashita Group

Research Subjects: Statistical Mechanics, Phase Transitions, Quantum Spin systems,

Quantum Dynamics, Non-equilibrium Phenomena

Member: Seiji Miyashita and Keiji Saito

1. Cooperative Phenomena in Long-Range Interacting Systems

So far, phase transitions of spin systems have been studied mainly on the fixed lattice. However, we pointed out that difference of sizes of the high-spin (HS) and the low-spin (LS) states causes lattice distortions. This degree of freedom of lattice deformation causes an effective long range order. We found that the critical property of this model belongs to the universality class of the mean-field model. We also found that its dynamical critical properties, such as the spinodal phenomena, are described by the corresponding mean-field theory. We analyzed the critical properties of divergence of the relaxation time near the spinodal point, and obtained asymptotic forms of the divergence and a finite size scaling form. We also pointed out that the threshold phenomena in the switching from LS state to HS state at a low temperature by photo-irradiation belong to this category. We performed Monte Carlo simulation of excitation process in the model with elastic interaction, and found that the scaling relation of the relaxation time describes its critical behavior.

We also pointed out that the boundary condition plays an essential role in long range interacting models. In particular, if we use the infinite-range model (Husimi-Temperley model), the distance between spins has no role, and the boundary condition has no sense. In contrast, in the present model, the open boundary condition causes significant different relaxation processes. We study that in what extent the mean-field description works in various long range models. We found that for a power law interacting model, there exists a parameter region in which the mean-field description does not work. It would be a very interesting problem to study static and dynamical critical properties of systems for which the thermodynamic limit does not exist.

2. Quantum Statistical Mechanics

In quantum systems, they show interesting non-classical behavior. As to the ordered states, the superfluidity and super-conductivity are so-called off-diagonal long range order (ODLRO) which are specific to the quantum system. The coexistence of the ODLRO and the diagonal order such as the solidity of the particles has been one of the topics in the He system as the super-solid problem. We studied existence of the super-solid state by a quantum Monte Carlo simulation (stochastic series expansion method) on the soft-core Bose Hubbard model in a three-dimensional lattice (simple cubic). We observed successive phase transitions of the solid order and of the super-fluidity at finite temperatures, and also that the super-solid phase exists in a less-filled region, which is not the case in one- and two-dimensional systems. We also pointed out that importance of lattice structure for the super-solid state.

Coherent dynamics of quantum systems has also various characteristic features, and attracts interests from the view point of quantum information processing. We have studied such novel quantum phases and quantum responses. Parts of the subject are studied as an activity of the JST CREST project (Quantummechanical cooperative phenomena and their applications).

We study magnetic properties of itinerant electron systems described by the Hubbard model. When the system is in the so-called half-filled case, the system is in the Mott state where the total spin of the system is zero, while when an electron is removed from the half-filled state, the total spin of the system changes to the maximum value if the lattice satisfies a certain condition. This mechanism is called Nagaokaferromagnetism. We demonstrated an adiabatic change of the total spin by a mechanism inspired by the Nagaoka-ferromagnetism. There, we can produce a state with a large total spin but zero magnetization, which is called Dicke state. We studied the characteristics of this state and discussed how we observe the state. Moreover we studied the ground state of itinerant systems with particles of larger spins, e.g. S = 1(Boson) and 3/2 (Fermion), etc., and found that the ground state has a degeneracy for the SU(2S + 1) symmetry due to the symmetry among the particles with different magnetizations. It is expected that these new magnetic phenomena are realized in the optical lattice of the laser cooled atom systems.

The property of energy gap at the quasi-crossing point is important for manipulation of quantum states by an external field. We studied nontrivial degeneracy of eigenenergies uniaxial large spins with terms of the single-ion type anisotropy from the view point of a parity symmetry of magnetization. We also studied the gap opening phenomena for Floquet operator which describes the dynamics of periodically driven system. It has been known that periodic external field induces a kind of Rabi oscillation, and the frequency becomes zero at certain values of the amplitude of the AC field. This phenomenon is called the coherent destruction of tunneling (CDT). The CDT can be regarded as a degeneracy of eigenvalues of the Floquet operator. We found that the degeneracy comes from the time reversal symmetry of the AC field, and demonstrated a gap opening in asymmetric shape of the field. We also demonstrate a Landau-Zener analogue when we sweep the amplitude of AC field.

We studied dynamics of the transverse Ising model, and found a kind of quantum spinodal decomposition phenomena when we sweep the field fast in the ordered phase. We also studied the so-called quantum annealing by making use of the quantum fluctuation.

We also studied a control of the state by measurement procedures. Controls of photon state in microcavity with atom beams have been performed in experiments (Haroche group, France), and the measurement is a type of quantum non-demolition for the number distribution of photons, but when we measure states of atoms, the photon state changes to a number state. We studied time-dependence of the photon state by Jaynes-Cummings model, and investigated the statistical property of the ensemble of measurements.

We also studied properties of generalized Yang-Baxter relation in large spin system.

3. Formulations of Non-equilibrium Statistical Physics

We studied the formulism of time-evolution equation for systems contacting with the thermal bath. When we study the complex admittance in dissipative environments, we need time evolution of the autocorrelation function. We pointed out that the equation of motion of the autocorrelation function is the same as that of the density matrix. But the initial state must be treated properly. We make a formulation in which no assumption was made except for the second order perturbation of the strength of the interaction between the system and the thermal bath. We demonstrated the method and studied parameter dependence of the line width. We also compare formulations of the complex admittance by obtaining explicit forms.

We also studied fundamental mechanisms and statistical properties of the heat conductivity.

12 Ogata Group

Research Subjects: Condensed Matter Theory

Member: Masao Ogata, Youichi Yanase

We are studying condensed matter physics and many body problems, such as strongly correlated electron systems, high- T_c superconductivity, Mott metal-insulator transition, magnetic systems, low-dimensional electron systems, mesoscopic systems, organic conductors, unconventional superconductivity, and Tomonaga-Luttinger liquid theory. The followings are the current topics in our group.

• High- T_c superconductivity

High- T_c superconductors as a strongly correlated electron system. Inhomogeneity and two-gap features in high- T_c cuprates. [1] Phase diagram of multilayered cuprate superconductors.

• New superconductor: Iron-pnictide

New mechanism for iron-pnictide superconductivity, "unscreening" effect of Coulomb interaction. Simple description of the nodeless and nodal s-wave gap functions in iron pnictides. [2] Normal-state spin dynamics of five-band model for iron pnictides. [3]

- Organic conductors Renormalization group study on quasi-one-dimensional superconductivity under magnetic field. Novel spin-liquid states in anisotropic triangular spin systems.
 Steady nonequilibrium state with competing charge orders under an electric field. [4]
- Theories of anisotropic superconductivity Antiferromagnetic order in the FFLO superconductivity. [5]

FFLO superconductivity in a random electron system. [6] Angular-FFLO superfluidity in a cold-atom system. [7]

- Dirac Fermion systems Interband effects of magnetic field on Hall effects in Bi as a Dirac Fermion system. [8] Magneto-optical response of the Dirac Fermions in Bi.
- Electronic and spin states in frustrated systems Four-state classical Potts model with a novel type of frustrations as a model for rattling. [9] Ground states of the frustrated quasi-two-dimensional Hubbard model. [10]
- Kondo effect and heavy fermion systems Crossover from local Fermi liquid into heavy Fermi liquid. [11]
- Two-dimensional ³He system on graphite Thermodynamic properties of the triangular Heisenberg model with two exchange couplings. [12] A new quantum liquid realized in the two-dimensional *t-J-K* model with ring-exchange interaction.
- Microscopic theory for the magnetic domain wall driving.
- [1] T. Watanabe, H. Yokoyama, K. Shigeta, and M. Ogata: New J. Phys. 11, 075011-1-12 (2009).
- [2] T. Kariyado and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. 79, 033703 (2010).
- [3] T. Kariyado and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. 78, 043708 (2009).
- [4] E. Yukawa and M. Ogata: J. Phys. Soc. Japan 79, 023705 (2010).
- [5] Y. Yanase and M. Sigrist: J. Phys. Soc. Jpn. 78, 114715 (2009).
- [6] Y. Yanase: New J. Phys. **11**, 055056 (2009).
- [7] Y. Yanase: Phys. Rev. B 80, 220510(R) (2009).
- [8] Y. Fuseya, M. Ogata and H. Fukuyama: Phys. Rev. Lett. 102, 066601 (2009).
- [9] R. Igarashi and M. Ogata: submitted to Phys. Rev. B.
- [10] T. Yoshikawa and M. Ogata: Phys. Rev. B 79, 144429-1-7 (2009).
- [11] H. Watanabe and M. Ogata: Phys. Rev. B 81, 113111 (2010).
- [12] T. Koretsune, M. Udagawa, and M. Ogata: Phys. Rev. B 80, 075408 (2009).

13 Tsuneyuki Group

Research Subjects: Theoretical Condensed-matter physics

Member: Shinji Tsuneyuki and Yoshihiro Gohda

Computer simulations from first principles enable us to investigate properties and behavior of materials beyond the limitation of experiments, or rather to predict them before experiments. Our main subject is to develop and apply such techniques of computational physics to investigate basic problems in condensed matter physics, especially focusing on prediction of material properties under extreme conditions like ultrahigh pressure or at surfaces where experimental data are limited. Our principal tool is molecular dynamics (MD) and first-principles electronic structure calculation based on the density functional theory (DFT), while we are also developing new methods that go beoynd the limitation of classical MD and DFT.

One of the major outcomes in FY2009 is a new method of electronic structure calculation of huge biomolecules based on the fragment molecular orbital (FMO) method, which we named FMO-LCMO method (S. Tsuneyuki et al., Chem. Phys. Lett. 476, 104 (2009)). The method not only makes it possible to calculate electronic energy spectrum and one-electron orbitals of huge biomolecules with little additional computational cost but also brings their physical interpretation.

We also succeeded in drastically improving computational efficiency of the Transcorrelated (TC) method. The TC method is a wave function theory utilizing explicitly correlated many-body wave functions and we have long been developing the method as an alternative to the density functional theory. By revising the algorithm of three-body integrals, we could decrease the order of the cpu cost and opened a pathway for its application.

In summary, our research subjects in FY2009 were as follows:

- New methods of electronic structure calculation
 - FMO-LCMO method: a new method of electronic structure calculation of huge biomolecules based on the fragment molecular orbital (FMO) method
 - Generalized anharmonic lattice model of crystals for investigating thermal conductivity
 - Efficient algorithm of diffusion Monte Carlo method on GPU
 - First-principles wavefunction theory for solids based on the Transcorrelated method
- Applications of first-principles electronic structure calculation
 - Electronic structure of Nitride semiconductors and their interface
 - Schottky contact on SiON/SiC(0001) surface
 - Oxygen vacancy and hydrogen impurities in BaTiO₃

14 Fujimori Group

Research Subjects: Photoemission Spectroscopy of Strongly Correlated Systems

Member: Atsushi Fujimori and Teppei Yoshida

We study the electronic structure of strongly correlated systems using high-energy spectroscopic techniques such as angle-resolved photoemission spectroscopy, soft x-ray absorption spectroscopy, and soft x-ray magnetic circular dichroism using synchrotron radiation. We investigate mechanisms of high-temperature superconductivity [1], metal-insulator transitions, giant magnetoresistance, carrier-induced ferromagentism, spin/charge/orbital ordering in strongly correalted systems such as transition-metal oxides [2], magnetic semiconductors [3], and their interfaces.

[1] T. Yoshida, M. Hashimoto, S. Ideta, A. Fujimori, K. Tanaka, N. Mannella, Z. Hussain, Z.-X. Shen, M. Kubota, K. Ono, S. Komiya, Y. Ando, H. Eisaki, and S. Uchida: Universal *versus* Material-Dependent Two-Gap Behaviors in the High- T_c Cuprates: Angle-Resolved Photoemission Study of La_{2-x}Sr_xCuO₄, Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 037004–1-4.

[2] M. Takizawa, Y. Hotta, T. Susaki, Y. Ishida, H. Wadati, Y. Takata, K. Horiba, M. Matsunami, S. Shin, M. Yabashi, K. Tamasaku, Y. Nishino, T. Ishikawa, A. Fujimori and H.Y. Hwang: Remote Hole-Doping of Mott Insulators on the Nanometer Scale, Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 236401–1-4.

[3] T. Kataoka, M. Kobayashi, Y. Sakamoto, G.S. Song, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D. J. Huang, C. T. Chen, T. Ohkochi, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, A. Tanaka, S. K. Mandal, T. K. Nath, D. Karmakar, and I. Dasgupta: Electronic Structure and Magnetism of the Diluted Magnetic Semiconductor Fe-Doped ZnO Nano-Particles, J. Appl. Phys. **107** (2010) 033718–1-7.

15 Uchida Group

Research Subjects: High- T_c superconductivity

Member:Uchida Shin-ichi (professor), Kakeshita Teruhisa. (research associate)

1. Project and Research Goal

The striking features of low-dimensional electronic systems with strong correlations are the "fractionalization" of an electron and the "self-organization" of electrons to form nanoscale orders. In one dimension (1D), an electron is fractionalized into two separate quantum-mechanical particles, one containing its charge (holon) and the other its spin (spinon). In two dimensions (2D) strongly correlated electrons tend to form spin/charge stripe order.

Our study focuses on 1D and 2D copper oxides with various configurations of the corner-sharing CuO₄ squares. The common characteristics of such configurations are the quenching of the orbital degree of freedom due to degraded crystal symmetry and the extremely large exchange interaction (J) between neighboring Cu spins due to large d - p overlap (arising from 180 °Cu-O-Cu bonds) as well as to the small charge-transfer energy. The quenching of orbitals tends to make the holon and spinon to be well-defined excitations in 1D with quantum-mechanical character, and the extremely large J is one of the factors that give rise to superconductivity with unprecedentedly high Tc as well as the charge/spin stripe order in 2D cuprates. The experimental researches of our laboratory are based upon successful synthesis of high quality single crystals of cuprate materials with well-controlled doping concentrations which surpasses any laboratory/institute in the world. This enables us to make systematic and quantitative study of the charge/spin dynamics by the transport and optical measurements on the strongly anisotropic systems. We also perform quite effective and highly productive collaboration with world-leading research groups in the synchrotron-radiation, μ SR and neutron facilities, and STM/STS to reveal electronic structure/phenomena of cuprates in real- and momentum-space.

2. Accomplishment

(1) Ladder Cuprate

Significant progress has been made in the experimental study of a hole-doped two-leg ladder system $Sr_{14-x}Ca_xCu_{24}O_{41}$ and undoped $La_6Ca_8Cu_{24}O_{41}$:

1) From the high pressure (P) study we constructed and x-P phase diagram (in collaboration with Prof. N. Môri's group). We find that the superconductivity appears as a superconductor-insulator transition only under pressures higher than 3GPa and that the superconducting phase is restricted in the range of x larger than 10. In lower P and smaller x regions the system is insulating.

2) The pairing wave function in the superconducting phase has an s-wave like symmetry which is evidenced by a coherence peak at T_c in the nuclear relaxation rate, revealed by the first successful NMR measurement under high pressure.

3) The origin of the insulating phase dominating the whole x - P phase diagram is most likely the charge order of doped holes or hole pairs as suggested by the presence of a collective charge mode in the x=0, $Sr_{14}Cu_{24}O_{41}$, compound in the inelastic light scattering (with G. Blumberg, Bell Lab.), microwave and nonlinear conductivity (with A. Maeda and H. Kitano, U. of Tokyo), and inelastic X-ray scattering (with P. Abbamonte and G. A. Sawatzky).

4) In the undoped compound $La_6Ca_8Cu_{24}O_{41}$ spin thermal conductivity is remarkably enhanced to the level of silver metal along the ladder-leg direction due to the presence of a spin gap and to a ballistic-like heat transport characteristic of 1D.

(2) Observation of Two Gaps, Pseudogap and Superconducting Gap, in Underdoped High- T_c Cuprates.

The most important and mysterious feature which distinguishes cuprate from conventional superconductors is the existence of "pseudogap" in the normal state which has the same d-wave symmetry as the superconducting gap does. We employed c-axis optical spectrum of $Yba_2Cu_3O_{6.8}$ as a suitable probe for exploring gaps with d-wave symmetry to investigate the inter-relationship between two gaps. We find that the two gaps are distinct in energy scale and they coexist in the superconducting state, suggesting that the pseudogap is not merely a gap associated with pairs without phase coherence, but it might originate from a new state of matter which competed with d-wave superconductivity.

(3) Nanoscale Electronic Phenomena in the High- T_c Superconducting State

The STM/STS collaboration with J. C. Davis' group in Cornell Univ. is discovering numerous unexpected nanoscale phenomena, spatial modulation of the electronic state (local density of states, LDOS), in the superconducting CuO₂ planes using STM with sub-Å resolution and unprecedentedly high stability. These include (a) "+" or "×" shaped quasiparticle (QP) clouds around an individual non-magnetic Zn (magnetic Ni) impurity atom, (b) spatial variation (distribution) of the SC gap magnitude, (c) a "checkerboard" pattern of QP states with four unit cell periodicity around vortex cores, and (d) quantum interference of the QP. This year's highlights are as follows:

1) Granular structure of high-Tc superconductivity

The STM observation of "gap map" has been extended to various doping levels of $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$. The result reveals an apparent segregation of the electronic structure into SC domains of ~3mm size with local energy gap smaller than 60meV, located in an electronically distinct background ("pseudogap" phase) with local gap larger than 60meV but without phase coherence of pairs. With decrease of doped hole density, the (coverage) fraction of the superconducting area decreases or the density of the number of superconducting islands decreases. Apparently, this is related to the doping dependence of superfluid density as well as the doping dependence of the normal-state carrier density.

2) Homogeneous nodal superconductivity and heterogeneous antinodal states

Modulation of LDOS is observed even without vortices, at zero magnetic field. In this case, the modulation is weak and incommensurate with lattice period, showing energy (bias voltage) dependence. The dispersion is explained by quasiparticle interference due to elastic scattering between characteristic regions of momentum-space, consistent with the Fermi surface and the d-wave SC gap determined by ARPES (angle-resolved-photoemission).

These dispersive quasiparticle interference is observed at all dopings, and hence the low-energy states, dominated by the states on the "Fermi arc" formed surrounding the gap nodes, are spatially homogeneous(nodal superconductivity). By contrast, the quasiparticle states near the antinodal region degrade in coherence with decreasing doping, but have dominant contribution to superfluid density. This suggests that the volume fraction of spatial regions all of whose Fermi surface contributes to superfluid decreases with reduced doping. The result indicates the special relationship between real-space and momentum-space electronic structure.

16 Hasegawa Group

Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics

Members: Shuji HASEGAWA and Toru HIRAHARA

Topics in our research group are (1) electronic/mass transports, (2) atomic/electronic structures, (3) phase transitions, (4) electronic excitations, (5) spin states and magnetism, and (6) epitaxial growths of coherent atomic/molecular layers/wires on semiconductor surfaces and nano-scale phases. Peculiar atomic arrangements and surface electronic states, characteristic of the surface superstructures and ultra-thin films, on semiconductor surfaces, are our platforms for studying physics of atomic-scale low-dimensional systems by using ultrahigh vacuum experimental techniques such as electron diffraction, scanning electron microscopy, scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy, *in-situ* 4-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-4-point probes, and surface mageto-optical Kerr effect measurements. Main results in this year are as follows.

(1) Surface electronic transport: Spin Hall effect of strong spin-orbit-interaction materials. Surface electronic states and their conductivity of topological insulators. Transport property of graphene. Metal-insulator transitions, hopping conduction, and a Mott insulator in surface states. Kondo effect in surface-state transport.

(2) Surface phases, ultra-thin films, and phase transitions: Order-disorder phase transition, chargedensity-wave transition, Mott transition on various metal-induced surface superstructures of Si. Quantumwell state in ultra-thin metal films. Rashba effect in surface state and hybridization with quantum-well states in thin films.

(3) Surface magnetism: Monolayer ferromagnetic surfaces. Diluted magnetic surface states.

(4) Construction of new apparatuses: Green's-function STM (low-temperature four-tip STM), Magneto-optical Kerr effect apparatus. Magneto-resistance with micro-four-point probes apparatus.

- Y. Kitaoka, T. Tono, S. Yoshimoto, T. Hirahara, S. Hasegawa, and T. Ohba: Direct detection of grain boundary scattering in damascene Cu wires by nanometer-scale four-point probe resistance measurements, Applied Physics Letters 95, 052110 (Aug, 2009).
- [2] T. Hirahara, T. Komorida, Y. Gu, F. Nakamura, H. Izuchi, H. Morikawa, and S. Hasegawa: Insulating conduction in Sn/Si(111): Possibility of a Mott insulating ground state and metallization/localization induced by carrier doping, Physical Review B 80, 235419 (Dec, 2009) (selected as Editors' Suggestions).

- [3] T. Shibasaki, N. Nagamura, T. Hirahara, .H. Okino, S. Yamazaki, W. Lee, H. Shim, R. Hobara, I. Matsuda, G. . S. Lee, and S. Hasegawa: Phase transition temperatures determined by different experimental methods: Si(111)4 × 1-In surface with defects, Physical Review B 81, 035314 (Jan, 2010).
- [4] A. Nishide, A. A. Taskin, Y. Takeichi, T. Okuda, A. Kakizaki, T. Hirahara, K. Nakatsuji, F. Komori, Y. Ando, and I. Matsuda: *Direct mapping of the spin-filtered surface bands of a three-dimensional quantum spin Hall insulator*, Physical Review B 81, 041309(R) (Jan, 2010) (selected as Editors 'Suggestions).
- [5] T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, and S. Hasegawa: A topological metal at the surface of an ultrathin Bi_{1-x}Sb_x alloy film, Physical Review B, in press (2010).
- [6] Y. Sakamoto, T. Hirahara, H. Miyazaki, S. Kimura, and S. Hasegawa: Spectroscopic evidence of a topological quantum phase transition in ultrathin Bi₂Se₃ films, Physical Review B, in press (2010).
- [7] S. Hasegawa: Quasi-One Dimensional Metals on Semiconductor Surfaces with Defects, J. Physics: Condensed Matter 22, 084026 (Feb, 2010).
- [8] Y. Kitaoka, S. Yoshimoto, T. Hirahara, S. Hasegawa, T. Ohba: Nanometer-scale Four-Point Probe Resistance Measurements of Cu Wires Using Carbon Nanotube Tips, Advanced Metallization Conference 2009, Eds. M. Naik, R. Shaviv, T. Yoda, and K. Ueno, Materials Research Society, pp. 295-299 (2009).

17 Fukuyama Group

Research Subjects: Low Temperature Physics (Experimental):

Quantum fluids and solids with strong correlations and frustration,

Scanning tunneling microscopy and spectroscopy of two dimensional electron systems and superconductors.

Member: Hiroshi Fukuyama, Tomohiro Matsui

Our current interests are (i) quantum phases with strong correlations and frustration in two dimensional (2D) helium three (³He), (ii) novel phenomena in Graphene, monatomic sheet of carbon, and (iii) Kosterlitz-Thouless transition in 2D superconductors. We are investigating these phenomena at ultra-low temperatures down to 50 μ K, using various experimental techniques such as NMR, calorimetry, scanning tunneling microscopy and spectroscopy (STM/STS), low energy electron diffraction (LEED) and transport measurement, *etc*.

1. Dimensional crossover of the critical point in quantum systems:

It is an interesting open question to ask whether the critical point, i.e., the gas-liquid transition, exists in strictly 2D ³He and, if so, when it restores as we decrease the confinement potential to 2D. The previous quantum many-body calculations predict interestingly that ³He has the critical point but ⁴He does not in pure 2D case. We have measured low-temperature heat capacities (*C*) of the second-, third- and fourth-layer ³He adsorbed on a graphite surface preplated with monolayer ⁴He to elucidate if the ground state of each layer is gas or liquid phase. The elucidation is based on the fact that the coefficient (γ) of *T*-linear term in *C*(*T*) in degenerate fermion systems is determined by the surface area over which the fermions spread and the quasi-particle effective mass. Our data show that the second layer does not have the critical point, while the third- and fourth layers do and ³He atoms form 2D paddles there when density is low ($\rho < 1.5 \text{ nm}^{-2}$). Thus we conclude that the dimensional crossover from 2D to 3D for the ³He critical point takes place in between the second and third layer.

2. Other ongoing experiments on 2D ³He:

We are preparing a new sample cell for high-precision heat capacity measurements of the possible order-disorder transition near T = 1 K in the second later ³He on graphite using a ZYX exfoliated graphite substrate which has much larger micro-crystallite size than the previous one. The purpose of this experiment is to confirm the existence of such a commensurate phase, the 4/7 phase, at the

expected density around which many interesting quantum phenomena are proposed to emerge at low temperatures. Designing of a LEED (low energy electron diffraction) experiment below 0.5 K is also undergoing in order to determine the structures of the commensurate phase unambiguously. A cryogen-free dilution refrigerator which will be used for these next generation experiments has been tested successfully with the lowest temperature of 12 mK and the cooling power of 200 μ W at T = 100 mK.

3. Fabrication and transport measurements of superconducting ultra-thin films:

Finite-temperature superconducting or superfluid transitions in 2D systems are explained by pair formation/dissociation of a free vortex and a free anti-vortex, which are topological defects, at T_{KT} below which the systems possess quasi long-rage ordering. Within this theory, called the Kosterlitz-Thouless (KT) theory, there exists a finite temperature range between T_{KT} and T_{c0} , the transition temperature expected from the mean field theory, where the system acquires finite amplitude of the order parameter but no phase coherence. In order to observe directly such an intermediate temperature region, we are conducting transport measurements of ultra-thin films of Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x}, a layered cuprate high- T_c superconductor, fabricated with the micro-exfoliation technique. Gold electrodes are integrated with photolithography after the exfoliation. The ultra-thin films made in this manner are expected to be of higher quality in terms of atomically flat and clean surface and crystalline stress compared to those by other techniques such as molecular beam epitaxy or iron milling.

We found in several samples measurable reduction of T_c by 3-8 K from that of bulk samples or the absence of T_c down to T = 4 K due to higher fluctuation in lower dimensions. The measured electrical resistance changes linearly with the reduced temperature, $\sqrt{(T_{c0} - T)/(T - T_{KT})}$. The exponent *a* in *I-V* characteristic $V \propto I^a$ increases from unity with decreasing temperature below T_{c0} and becomes three at $T = T_{KT}$. These data are consistent with the KT theory where resistance is determined by the density of unbound vortices. We are trying to fabricate samples with appropriate film thickness showing much lower but non-zero T_{KT} to see possible superconducting gap opening in $T_{KT} < T < T_{c0}$ with low temperature STS.

18 Okamoto Group

Research Subjects: Experimental Condensed Matter Physics,

Low temperature electronic properties of two-dimensional systems.

Member: Tohru Okamoto and Ryuichi Masutomi

We study low temperature electronic properties of semiconductor two-dimensional systems. The current topics are following:

1. Strongly correlated two dimensional systems:

We study magnetotransport in a high mobility Si two-dimensional electron system by *in situ* tilting of the sample relative to the magnetic field. A pronounced dip in the longitudinal resistivity is observed during the Landau level crossing process for noninteger filling factors. Together with a Hall resistivity change which exhibits the particle-hole symmetry, this indicates that electrons or holes in the relevant Landau levels become localized at the coincidence where the pseudospin-unpolarized state is expected to be stable. [Okamoto *et al.*, Phys. Rev. B **79**, 241302(R) (2009).]

We have performed the cyclotron resonance (CR) measurements on two-dimensional electrons in a Si quantum well. At the electron density, both the CR scattering time $\tau_{\rm CR}$ and the transport scattering time τ_t exhibit a metallic temperature dependence down to 0.5 K. The ratio $\tau_t/\tau_{\rm CR}$ at 0.4 K shows the positive N_s dependence in the measured N_s region. [Masutomi *et al.*, Physica E **42**, 1184 (2010).]

The valley splitting in Si two-dimensional electron systems is studied using Si/SiGe single quantum wells (QWs) with different well widths. The energy gaps for 4 and 5.3 nm QWs, obtained from the temperature dependence of the longitudinal resistivity at the Landau level filling factor $\nu = 1$, are

much larger than those for 10 and 20 nm QWs. This is consistent with the well-width dependence of the bare valley splitting estimated from the comparison with the Zeeman splitting in the Shubnikov-de Haas oscillations. [Sasaki *et al.*, Appl. Phys. Lett. **95**, 122109 (2009).]

2. Two dimensional electrons at cleaved semiconductor surfaces:

At the surfaces of InAs and InSb, conduction electrons can be induced by submonolayer deposition of other materials. Recently, we have performed in-plane magnetotransport measurements on in-situ cleaved surfaces of p-type substrates and observed the quantum Hall effect which demonstrates the perfect two dimensionality of the inversion layers. Research on the hybrid system of 2D electrons and adsorbed atoms has great future potential because of the variety of the adsorbates as well as the application of scanning probe microscopy techniques.

19 Shimano Group

Research Subjects: Optical and Terahertz Spectroscopy of Condensed Matter

Member: Ryo Shimano and Shinichi Watanabe

We study light-matter interactions and many body quantum correlations in solids. In order to investigate the role of electron and/or spin correlations in the excited states as well as the ground states, we focus on the low energy electromagnetic responses, in particular in the terahertz(THz) (1THz \sim 4meV) frequency range where quasi-particle excitations and various collective excitations exist. A novel experimental technique such as THz magneto-optical spectroscopy is also developed to study the optical responses of quantum Hall systems and also the anomalous Hall effect in ferromagnets. The research summary in this year is as follows.

- 1. High density electron-hole system : We have investigated the exciton Mott-transition in Si by optical-pump and terahertz-probe experiments. Through the observation of 1s-2p transition of excitons, which locates around 3 THz for excitons in Si, we studied the formation dynamics of excitons from the photo-excited unbound electron-hole (e-h) pairs. The observed formation time of excitons is quantitatively explained by taking into account the intra- and inter-band electron-phonon scattering process. The 1s-2p transition energy hardly changes even when the e-h pair density exceeds the Mott transition density. This result makes a contrast with the conventional picture that the exciton binding energy continuously diminishes towards the Mott density.
- 2. Quasi-1D organic conductor : We have studied the photo-excited dynamics of a quasi-1D organic conductor (TMTSF)₂PF₆, which shows a metal-insulator transition below 12K accompanied by the emergence of a spin density wave(SDW) phase. Since the single particle excitation energy in the SDW phase, namely the SDW gap, is located in the THz frequency range, it is possible to investigate the photo-excited dynamics of the SDW order directly by THz time-domain spectroscopy. We have developed a reflection type optical-pump and THz-probe measurement system with a diffraction-limitted spatial resolution, which enables the measurements of organic conductor single crystals with their typical widths less than 1mm. After the ultrafast optical pulse excitation, the closing and recovery of the SDW gap is clearly observed. The recovery time of the SDW order diverges towards the SDW transition temperature, indicating a critical slowing down behavior.
- 3. Optical Hall effect in the quantum Hall system : We performed a terahertz frequency Faraday rotation measurement in the 2 dimensional electron gas system of a GaAs/AlGaAs heterostructure in the integer quantum Hall regime. The Faraday rotation angle is shown to exhibit a value determined by the fine-structure constant as prediced by theory(T. Morimoto et al., Phys. Rev. Lett. 103, 116803,(2009).). Optical Hall conductivity $\sigma_{xy}(\omega)$ is obtained from the observed Faraday rotation angle, which exhibits a plateau-like behavior around the Landau-level filling $\nu = 2$. The result indicate that the carrier localization effect, a crucial ingredient in the integer QHE, affects the optical Hall conductivity regime, namely, close to the cyclotron frequency.

References

- T. Suzuki and R. Shimano: Time-Resolved Formation of Excitons and Electron-Hole Droplets in Si Studied Using Terahertz Spectroscopy, Phys. Rev. Lett. 103, 057401 (2009).
- [2] S. Watanabe, R. Kondo, S. Kagoshima, and R. Shimano: Observation of ultrafast photoinduced closing and recovery of the spin-density-wave gap in (TMTSF)₂PF₆, Phys. Rev. B 80, 220408(R) (2009). (Editor's suggestion)(selected for Virtual Journal of Ultrafast Science, Volume 9, No.1 (2010).)
- [3] Y. Ikebe, T. Morimoto, R. Masutomi, T. Okamoto, H. Aoki, and R. Shimano: Optical Hall effect in the integer Quantum Hall regime, arXiv:1004.0308v1 [cond-mat.mes-hall] (2010).
- [4] Y. Ikebe, R. Shimano, M. Ikeda, T. Fukumura, and M. Kawasaki: Vortex dynamics in a NbN film studied by terahertz spectroscopy, Phys. Rev. B 79, 174525 (2009). (selected for Virtual Journal of Applications of Superconductivity, Volume 16, No.11, (2009).)
- [5] Y. Takahashi, Y. Yamasaki, N. Kida, Y. Kaneko, T. Arima, R. Shimano, and Y. Tokura: Far-infrared optical study of electromagnons and their coupling to optical phonons in Eu_{1-x}Y_xMnO₃ (x=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, and 0.45), Phys. Rev. B **79**, 214431 (2009). (*Editor's suggestion*)

20 Theoretical Astrophysics Group

Research Subjects: Particle Astrophysics, Relativistic Astrophysics, Physics of Supernovae and High Density Matter, Observational Cosmology

Member: Yasushi Suto, & Atsushi Taruya

The Theoretical Astrophysics Group carries out a wide range of research programmes. However, astrophysics is a very broad field of research, and it goes without saying that our group alone cannot cover all the various important astrophysical research topics on hand; we therefore place particular emphasis on the following three areas of research - "Physics of the Early Universe", "Observational Cosmology", and "Paricle and Nuclear Astrophysics". Let us delve into the specifics of these areas below.

The understanding of the very early universe saw a sort of renaissance in 1980 's by applying the ideas of particle physics around the epoch close to the Planck time, of which the prime example is the inflationary universe scenario. On the basis of such recent development, "Physics of the Early Universe" aims at describing the birth of the universe within the language of physics. Our group activities include inflationary universe models, cosmological phase-transition and topological defects, big-bang nucleosynthesis, the cosmic no-hair conjecture and the fundamental problem of general relativity.

"Observational Cosmology" attempts to understand the evolution of the universe on the basis of the observational data in various wavebands. The proper interpretation of the recent and future data provided by COBE, ASCA, the Hubble telescope, SUBARU, and large-scale galaxy survey projects is quite important both in improving our understanding of the present universe and in determining several basic parameters of the universe which are crucial in predicting the evolutionary behavior of the universe in the past and in the future. Our current interests include nonlinear gravitational evolution of cosmological fluctuations, formation and evolution of proto-galaxies and proto-clusters, X-ray luminosity and temperature functions of clusters of galaxies, hydrodynamical simulations of galaxies and the origin of the Hubble sequence, thermal history of the universe and reionization, prediction of anisotropies in the cosmic microwave background radiation, statistical description of the evolution of mass functions of gravitationally bound objects, and statistics of gravitationally lensed quasars.

"Particle and Nuclear Astrophysics" explores the interfaces between particle physics, nuclear physics, and astrophysics. We place particular attention on the physics of supernovae. This includes a rich variety of micro- and macro-physics, for example, neutrino transport, equation of state of high density matter, r-process nucleosynthesis, convective instability, fast rotation of a stellar core, strong magnetic field, gravitational radiation, and so on. In particular, the mechanism of the Type II supernovae itself has not been properly explained for more than 40 years. It is, therefore, important to make clear the physics of supernova phenomena not only for astrophysics but also for other fields of elementary physics. We are currently working on the multi-dimensional aspects of supernovae such as rotating core collapse, asymmetric neutrino emission, convective energy transfer near the neutrino sphere, possibility of r-process nucleosynthesis in the hot bubble region, and gravitational radiation from an asymmetrically bouncing core. Additionally, we have also recently been working on the effects of magnetic fields and those of nuclear structural transitions on the explosion mechanism. Let us summarize this report by presenting recent titles of the doctor and master theses in our group; 2009

- The Central Engine of Gamma-Ray Bursts and Core-Collapse Supernovae Probed with Neutrino and Gravitational Wave Emissions
- Numerical Studies on Galaxy Clustering for Upcoming Wide and Deep Surveys: Baryon Acoustic Oscillations and Primordial Non-Gaussianity
- Toward a precise measurement of neutrino mass through nonlinear galaxy power spectrum based on perturbation theory
- Toward Remote Sensing of Extrasolar Earth-like Planets
- Improved Modeling of the Rossiter-McLaughlin Effect for Transiting Exoplanetary Systems
- Forecasting constraints on cosmological parameters with CMB-galaxy lensing cross-correlations

2008

- Holographic non-local operators
- Neutrino Probes of Core-collapse Supernova Interiors
- Inhomogeneity in Intracluster Medium and Its Cosmological Implications
- Nuclear "pasta " structure in supernovae
- Investigation of the Sources of Ultra-high-energy Cosmic Rays with Numerical Simulations
- Formation of Pulsar Planet Systems Comparison with the Standard Scenario of Planetary Formation-

2007

- The Rossiter effect of extrasolar transiting planetrary systems perturbative approach and application to the detection of planetary rings
- Stability of flux compactifications and de Sitter thermodynamics
- Study of core-collapse supernovae in special relativistic magnetohydrodynamics
- Spectroscopic Studies of Transiting Planetary Systems
- The relation of the Galactic extinction map to the surface number density of galaxies
- Brane Inflation in String Theory

2006

- Numerical studies on cosmological perturbations in braneworld
- Inflationary braneworld probed with primordial black holes
- Galaxy Biasing and Higher-Order Statistics
- Probing circular polarization of Gravitational Wave Background with Cosmic Microwave Background Anisotropy
- Gravitational Collapse of Population III Stars

2005

- Brane gravity and dynamical stability in warped flux compactification
- Neutrino Probes of Galactic and Cosmological Supernovae
- Detectability of cosmic dark baryons through high-resolution spectroscopy in soft X-ray band

- Propagation of Ultra-High Energy Cosmic Rays in Cosmic Magnetic Fields
- The study of nuclear pasta investigated by Quantum Molecular Dynamics

2004

- Strong Gravitational Lenses in a Cold Dark Matter Universe
- Effect of Rotation and Magnetic Field on the Explosion Mechanism and Gravitational Wave in Core-Collapse Supernovae
- "Bulk Fields in Braneworld"
- "Gravitational collapse and gravitational wave in the brane-world"
- Magnetohydrodynamical Simulation of Core-Collapse Supernovae
- A Search for the Atmospheric Absorption in the Transiting Extrasolar Planet HD209458b with Subaru HDS
- Baryogenesis and Inhomogeneous Big Bang Nucleosynthesis
- The large-scale structure of SDSS quasars and its cosmological implication

2003

- Non-Gravitational Heating of Galaxy Clusters in a Hierarchical Universe
- Discoveries of Gravitationally Lensed Quasars from the Sloan Digital Sky Survey
- One, Two, Three measuring evolved large scale structure of the Universe
- Higher-order Statistics as a probe of Non-Gaussianity in Large Scale Structure
- Primordial black holes as an imprint of the brane Universe
- Probing the Extra Dimensions with Gravitational Wave Background of Cosmological Origin

21 Murao Group

Research Subjects: Quantum Information Theory

Member: Mio Murao, Peter Turner

Quantum information processing seeks to perform tasks which are impossible or not effective with the use of conventional classical information, by using quantum information described by quantum mechanical states. Quantum computation, quantum cryptography, and quantum communication have been proposed and this new field of quantum information processing has developed rapidly especially over the last 15 years. Entanglement is nonlocal correlation that appears in certain types of quantum states (non-separable states) and has become considered as a fundamental resource for quantum information processing. In our group, we investigate new properties of multipartite and multi-level entanglement and the use of these properties as resources for quantum information processing. Our current projects are the following:

- Analysis of geometric measure of entanglement for multipartite states [1,2,3]
- Group theoretical study of quantum reference frames [4,5]
- Delocalization power of global unitary operation on quantum information [6]
- Resource overhead in distributed quantum information processing
- Distributed quantum computation using quantum butterfly networks

- Analysis of entanglement criterion: EVM vs, CMC
- Characterization of graphs in measurement based quantum computation
- Hopf fibrations and qubit entanglement
- Operational indistinguishability in quantum tomography
- Continuous variable t-designs
- Analysis of the asymptotic behavior of estimation errors in quantum tomography
- Analysis of Lindbrad master equation

Please refer our webpage: http://www.eve.phys.s.u-tokyo.ac.jp/indexe.htm

References

- 1. M. Hayashi, D. Markham, M. Murao, M. Owari and S. Virmani, The geometric measure of entanglement for a symmetric pure state with positive amplitudes, J. Math. Phys. 50, 122104 (2009)
- Y. Nakata, D. Markham, and M. Murao, Thermal robustness of multipartite entanglement of the 1-D spin 1/2 XY model, Phys. Rev. A 79, 042313 (2009)
- 3. M. Aulbach, D. Markham, and M. Murao, The maximally entangled symmetric state in terms of the geometric measure, arXiv:1003.5643 (2010)
- S. D. Bartlett, T. Rudolph, R. W. Spekkens, P. S. Turner, Quantum communication using a boundedsize quantum reference frame, New J. Phys. 11, 063013 (2009)
- 5. G. Gour, B. C. Sanders, R. W. Spekkens, P. S. Turner, Overcoming time reversal superselection: reference frames and resources, J. Math. Phys. 50, 102105 (2009)
- 6. A. Soeda and M. Murao, Delocalization power of global unitary operation on quantum information, arXiv:1004.2114 (2010)

22 Ueda Group

Research Subjects: Bose-Einstein condensation, Fermionic superfluidity, cold molecules, mesurement theory, quantum information, quantum control

Member: Masahito Ueda and Yuki Kawaguchi

We study theory of ultracold atoms and quantum information. In the former, we study Bose-Einstein condensation and Fermi superfluidity. In the latter, we study quantum information, quantum measurement, and are exploring information thermodynamics which investigates the thermodynamic energy cost on quantum information processing.

22.1 Quantum States of Ultracold Atoms

A possible Efimov trimer state in 3-component lithium 6

Efimov trimers are very special three-body bound states (triatomic molecules) whose existence relies purely on quantum mechanical effects. According to this effect, when 3 quantum particles have strong pair interactions, they can bind together even if the interaction cannot bind particles in a pairwise manner. This effect is purely quantum-mechanical and very general – it can occur for any quantum 3-body system,

such as nucleons. It was prediced by nuclear physicist Vitaly Efimov 40 years ago. However, it has been observed only recently in cold-atom systems. This year was particular fruitful as Efimov trimer signatures were observed in several kinds of cold-atom systems, in particular in the case of a gas of lithium 6 atoms prepared in 3 different spin states. We analysed these experiments using the universal Efimov theory to check whether the observations could be interpreted as evidence of Efimov trimers, and found good qualitative agreement with the universal theory [1] and predicted the trimer energy. We are now working with experimentalists at the University of Tokyo to understand the non-universal features of these systems, as well as observing the trimers directly by measuring their energy.

Independent Control of Scattering Lengths in Multicomponent Quantum Gases

Recently, multicomponent degenerate gases have attracted broad interest. In such types of system, there are more than one interspecies scattering length which is crucial for the physical features of the system. In Ref. [2], we develop a method of simultaneous and independent control of different scattering lengths in ultracold multicomponent atomic gases. In our scheme the atoms are prepared in one bare hyperfine state as well as two dressed states given by the stimulated Ramman processes induced coupling between hyperfine states. We assume that there are two magnetic Feshbach resonance points which are close with each other. When the hyperfine states are dressed with each other, the energy levels of the dressed states can be controlled by the inter-hyperfine-level couplings. Therefore, the occurrence of the Feshbach resonances can be controlled by the stimulated Ramman process under a given magnetic field. We show that with this approach, at least two of the three scattering lengths in such a system can be independently controlled in a resonant way. The possible applications of our scheme in the systems with 40 K and 40 K- 6 Li mixture are discussed. Our method can be used to engineer multi-component quantum phases and Efimov trimer states.

Non-Abelian vortices in a spinor Bose-Einstein condensate

Non-Abelian vortices are defined as quantized vortices with topological invariants classified by non-Abelian algebra, and they are now studied in various research arenas such as cosmology, high-energy physics, solid-state physics, and soft matter physics. The crucial distinction between Abelian and non-Abelian vortices manifests itself in their collision dynamics. We demonstrate the unique collision dynamics of non-Abelian vortices realized in the cyclic phase of a spin-2 spinor BEC, revealing that (i) unlike non-Abelian vortices, they do neither reconnect nor pass through each other but create a rung which bridges the colliding vortices, and (ii) linked Abelian vortices can unravel, while linked non-Abelian vortices cannot [3].

22.2 Quantum Information, Quantum Measurement, and Information Thermodynamics

Optimal Measurement on Noisy Quantum Systems

The most serious obstacle against realizing quantum computers and networks is decoherence that acts as a noise and causes information loss. Decoherence occurs when a quantum system interacts with its environment, and it is unavoidable in almost all quantum systems. Therefore, one of the central problems in quantum information science concerns the optimal measurement to retrieve information about the original quantum state from the decohered one and the maximum information that can be obtained from the measurement.

We identify an optimal quantum measurement that retrieves the maximum information about the expectation value of an observable \hat{X} of $\hat{\rho}$ from the partially decohered state $\mathcal{E}(\hat{\rho})$. Here, $\hat{\rho}$ is an unknown quantum state and modeling of the noise is assumed to be given, and $\mathcal{E}(\hat{\rho}) \equiv \sum_i \hat{M}_i \hat{\rho} \hat{M}_i^{\dagger}$, where $\{\hat{M}_i\}$ are the Kraus operators that satisfy $\sum_i \hat{M}_i^{\dagger} \hat{M}_i = \hat{I}$. The information content that we use is the Fisher information, which has been widely used in estimation theory and is related to the precision of the estimation.

The primary finding of our study is that the optimal measurement for obtaining the Fisher information about $\langle \hat{X} \rangle \equiv tr[\hat{\rho}\hat{X}]$ is the projection measurement $P_{\hat{Y}}$ corresponding to the spectral decomposition of an observable \hat{Y} that is the solution to the operator equation $\mathcal{E}^{\dagger}(\hat{Y}) = \hat{X}$, where $\mathcal{E}^{\dagger}(\hat{Y}) \equiv \sum_{i} \hat{M}_{i}^{\dagger} \hat{Y} \hat{M}_{i}$ is the adjoint map of \mathcal{E} . Although the Fisher information depends on the unknown quantum state $\hat{\rho}$, the observable \hat{Y} is independent of $\hat{\rho}$. Therefore, $P_{\hat{Y}}$ is also independent of $\hat{\rho}$, and the optimal procedure to estimate $\langle \hat{X} \rangle$ is simply performing $P_{\hat{Y}}$ to the noisy system [4].

Information Processing and Feedback Control in Small Nonequilibrium Systems

The fundamental lower bound of the energy cost needed for information processing processes such as the measurement or the information erasure has been an active topic of researches. A prominent result in this topic is the Landauer principle. In this research, we have rigorously determined the fundamental lower bound of the energy cost in terms of quantum statistical mechanics and quantum measurement theory. Our result includes the Landaurs principle as a special case, and serves as the generalized second law of thermodynamics which can be applied to information processing processes. This result was published in Physical Review Letters in 2009 [5], selected for Editor 's Suggestion, and highlighted in Physics.

Nonequilibrium statistical mechanics in small systems has seen a remarkable progress since 1990 's: the technology of manipulating small systems such as macromolecules has been developed, and some crucial theoretical results, such as the fluctuation theorem and the Jarzynski equality, have been found. According to the Jarzynski equality, which was found in 1997, the second law of thermodynamics can be expressed in terms of equality if all orders of the fluctuations (or cumulants) are taken into account. The Jarzynski equality includes the conventional second law of thermodynamics (inequality) as the property of its first cumulant. On the other hand, in a previous research, we have generalized the second-law inequality by including the term of the obtained information in the presence of feedback control.

In this research, we have generalized the Jarzynski equality to the situations in which small nonequilibrium systems are subject to feedback control. The generalized Jarzynski equality includes the term of obtained information, and straightforwardly reproduces the generalized second law which we derived before. Moreover, the generalized equality leads to the generalized fluctuation-dissipation theorem, in which the information and the dissipation (or the entropy production) are treated on an equal footing. Furthermore, we have derived another generalization of the Jarzynski equality, which includes the term of feedback efficacy. The feedback efficacy characterizes how efficiently we use the information to decrease the entropy production, and can be directly measured by experiments. The above results were published in Physical Review Letters [6].

- [1] P. Naidon and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. 103, 073203 (2009).
- [2] P. Zhang, P. Naidon, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. 103, 133202 (2009).
- [3] M. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. 103, 115301 (2009)
- [4] Yu Watanabe, Takahiro Sagawa, and Masahito Ueda, Phys. Rev. Lett. 104, 020401 (2010).
- [5] T. Sagawa and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. 102, 250602 (2009).
- [6] T. Sagawa and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. 104, 090602 (2010).

23 Makishima Group & Nakazawa Group

Research Subjects: High Energy Astrophysics with Energetic Photons using Scientific Satellites, Development of Cosmic X-Ray/ γ -Ray Instruments

Member: Kazuo Makishima, Kazuhiro Nakazawa

We study cosmic and related high-energy phenomena in the X-ray and γ -ray frequencies, mainly using scientific satellites.

Suzaku, Fermi, and MAXI: We utilize the Suzaku X-ray observatory, carrying the Hard X-ray Detector (HXD) which we developed jointly with other groups, and the Fermi gamma-ray space telescope launched in 2008. We also utilize all-sky data from MAXI, put onboard the International Space Station in July 2009.

Physics of Compact Objects: Mass accretion onto compact objects, including black holes, neutron stars, and white dwarfs, provides our favorite research subject. Utilizing wide-band *Suzaku* spectra, we have shown that some stellar-mass black holes [3] and active galactic nuclei have rather low angular momenta. Our *Suzaku* observations of aboutn 10 "magnetars" have revealed unusual hard X-ray components, extending to ~ 100 keV with very flat spectra, of which properties evolve with their age [5]. This emission may reflect interesting physics in the supposed ultra-strong magnetic fields, including electron-position pair production in the magnetosphere, their annihilation on the stellar surface, and "photon splitting" of the produced 511 keV photons.

Plasma Heating and Particle Acceleration: The universe is full of processes of plasma heating and particle acceleration. In fact, the most dominant known form of cosmic baryons exists in the form of X-ray emitting hot (~ 10^8 K) plasmas associated with clusters of galaxies. There, large-scale magnetic structures, and their interactions with moving galaxies, are considered to be of essential importance [1]. Our search for non-thermal emission from merging clusters of galaxies have led to an unexpected discovery of unusually hot thermal emission. *Fermi* observations of molecular clouds revealed gamma-ray emission arising from the decay of π^0 particles, which are produced by cosmic-ray hadrons [2].

Particle Acceleration in Thunderclouds: From thunderclouds along the Japan Sea and at high mountains, we have so far detected more than a dozen events of gamma-ray showers with energies up to 10 MeV. Some of them last only for < 1 second, while others for 1–2 minutes [4]. Intense electric fields in thunderclouds are considered to accelerate electrons to relativistic energies, which then emit gamma-rays.

Future Instrumentation: In collaboration with many domestic and foreign groups, we are developing a successor to *Suzaku*, *ASTRO-H*. Scheduled for launch in 2014, it will conduct hard X-ray imaging observations, high-resolution X-ray spectroscopy, and low-energy gamma-ray observations. We contribute to the development of two onboard instruments, the Hard X-ray Imager and the Soft Gamma-ray Detectors. Our effort includes the development of "SpaceWire" technology, large BGO scintillators, and mechanical/thermal designs of the instruments.

- Takahashi, I., Kawaharada, M., Makishima, K., Matsushita, K., Fukazawa, Y., Ikebe, Y., Kitaguchi, T., Kokubun, M., Nakazawa, K., Okuyama, S., Ota, N. & Tamura, T. "X-ray Diagnostics of Thermal Conditions of the Hot Plasmas in the Centaurus Cluster", Astrophys. J. 701, 377–395 (2009)
- Abdo, A., (abc 順, 全 177 名), Okumura, A.: "Fermi LAT Observation of Diffuse Gamma Rays Produced Through Interactions Between Local Interstellar Matter and High-energy Cosmic Rays", Astrophys. J. 703, 1249–1256 (2009)
- Yamada, S., Makishima, K., Uehara, Y., Nakazawa, K., Takahashi, H., Dotani, T., Ueda, Y., Ebisawa, K., Kubota, A. & Gandhi, P.: "Is the Black Hole in GX 339-4 Really Spinning Rapidly?", Astrophys. J. Let. 707, L109–L103 (2009)
- Tsuchiya, H., Enoto, T., Torii, T., Nakazawa, K., Yuasa, T., Torii, S., Fukuyama, T., Yamaguchi, T., Kato, H., Okano, M., Takita, M. & Makishima, K.: "Observation of an Energetic Radiation Burst from Mountain-Top Thunderclouds", *Phys. Rev. Let.* **102**, id.255003 (2009)
- Enoto, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Nakagawa, Y. E., Sakamoto, T., Ohno, M., Takahashi, T., T., Yamaoka, K., Murakami, T. & Takahashi, H.: "Suzaku Discovery of a Hard X-Ray Tail in the Persistent Spectra from the Magnetar 1E 1547.0-5408 during its 2009 Activity", *Publ. Astron. Soc. Japan* 62, in press (2010)

24 Takase Group

Research Subjects: High Temperature Plasma Physics Experiments, Spherical Tokamak, Wave Heating and Current Drive, Nonlinear Physics, Collective Phenomena, Fluctuations and Transport, Advanced Plasma Diagnostics Development

Member: Yuichi Takase, Akira Ejiri, Yoshihiko Nagashima

Thermonuclear fusion, the process that powers the sun and stars, is a promising candidate for generating abundant, safe, and clean power. In order to produce sufficient fusion reactions, isotopes of hydrogen, in

the form of hot and dense plasma, must be confined for a long enough time. A magnetic configuration called the tokamak has reached the level where the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) is being constructed to study the behavior of burning plasmas. However, improvement of the cost-effectiveness of the fusion reactor is still necessary. The spherical tokamak (ST) offers a promising approach to increasing the efficiency by raising the plasma beta (the ratio of plasma pressure to magnetic pressure). High beta plasma research using ST is a rapidly developing field worldwide, and is being carried out in our group using the TST-2 spherical tokamak. TST-2 is now located in a new experimental building in Kashiwa Campus. Our group is tackling the problem of creating and sustaining a high beta plasma using a variety of approaches.

Experimental research using three kinds of radio-frequency (RF) waves are being carried out in our group: (1) plasma heating using the high harmonic fast wave (HHFW) at 21 MHz, (2) plasma start-up from zero current using the electron cyclotron wave (ECW) at 2.45 GHz, and (3) current drive by the lower hybrid wave at 200 MHz.

A variety of nonlinear wave physics phenomena are observed during RF heating and current drive experiments. Parametric decay instability (PDI), which generates the lower sideband wave and the ion-cyclotron quasi-mode in addition to the incident pump wave, is often observed during HHFW heating experiments on TST-2. PDI is a local nonlinear phenomenon over the scale length of the RF power profile. However, nearly identical PDI spectra are observed at various locations regardless of the local magnetic field strength. By use of a new analysis technique (bispectral power analysis), the background physics of the nearly identical spectra was identified experimentally. The resonant lower sideband wave is produced by PDI and a beat modulation is generated by nonlinear coupling of the pump and lower sideband waves. A spectral broadening of the pump wave is often observed. The possibility of PDI driven spectral broadening was tested in RF power scan experiments. Since no significant dependence of the frequency width on RF power is observed, this possibility is unlikely.

In non-inductive start-up experiments using the ECW wave, it was found that the spontaneous formation of the ST configuration is induced earlier in deuterium plasmas than in hydrogen plasmas. The electron density and temperature were measured or estimated using various diagnostic methods. The temperature and density are high in the outboard peripheral region, and is low near the center of the plasma. The high pressure region has a banana shape. Such a pressure profile can be reproduced by a newly developed equilibrium code which can handle anisotropic pressure.

The Thomson scattering system was improved. The electron temperature profile was measured in inductively formed (Ohmic) discharges. The profile was peaked near the center. New polychromators were designed and fabricated, and a prototype detector system, consisting of an APD and a preamplifier, was tested. The FWHM of the output signal was 10 ns for the YAG laser pulse, and the measured noise agreed with theoretical estimates. These performances are sufficient for the planned multi-pass scattering scheme. A confocal spherical mirror system was investigated as a candidate for multi-pass optics. Analytic expressions to describe the features of the optics were obtained, and their accuracies were confirmed both numerically and experimentally. A reduced-scale test optics and a visible He-Ne laser were used (instead of the infra-red YAG laser) for this test.

Accessibility of the LHW to the core of TST-2 plasmas was studied using the TORIC-LH code, and the efficiency of current drive was estimated. The results demonstrate that the LHW can access the core of low density plasmas, and that the plasma current required to maintain the ST configuration can be driven by the existing RF power supply. In parallel, preparations of the facility of 200 MHz RF generators and transmission lines have progressed, a preliminary RF wave injection experiment was carried out.

25 Tsubono Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Gravitational Wave, Laser Interferometer

Member: Kimio TSUBONO and Yoich ASO

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.

TAMA300 is a 300-m baseline laser interferometric gravitational wave detector constructed in Mitaka. We started the operation of the detector in 1999. The achieved sensitivity, $h \sim 3 \times 10^{-21}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 700Hz to 1.5kHz, is sufficient to catch possible gravitational wave events in our galaxy. We are now expecting to start the next Japanese large-scale laser interferometer, LCGT.

A space laser interferometer, DECIGO, was proposed through the study of the gravitational wave sources with cosmological origin. DECIGO could detect primordial gravitational waves from the early Universe at the inflation era.

We summarize the subjects being studied in our group.

- Ground based laser interferometric gravitational wave detectors
 - Study of the next-generation laser interferometer, LCGT
 - Design of LCGT
- Space laser interferometer
 - Space laser interferometer, DECIGO
 - DECIGO pathfinder, DPF
 - Laser sensor for DPF
 - FP cavity for DPF
 - DPF gradiometer in space
 - Small size GW detector, SWIM
- Development of a gravitational wave detector using magnetic levitation
 - Gravitational wave detector using superconducting magnetic levitation
 - Magnetic field shielding for levitated detector
- High sensitive laser interferometer using non-classical light
 - High sensitive laser interferometer using squeezed light
 - Generation of the squeezed light
- Development of the ultra stable laser source
 - Laser stabilization using a cryogenic sapphire cavity
 - Study of the cavity support

references

- Masaki Ando, Seiji Kawamura, Naoki Seto, Shuichi Sato, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono et al., DECIGO and DECIGO Pathfinder, Class. Quantum Grav. 27 (2010) 084010.
- [2] K Arai, R Takahashi, D Tatsumi, K Izumi, Y Wakabayashi, H Ishizaki, M Fukushima, T Yamazaki, M-K Fujimoto, A Takamori, K Tsubono, R DeSalvo, A Bertolini, S Marka, V Sannibale (for the TAMA Collaboration), T Uchiyama, O Miyakawa, S Miyoki, K Agatsuma, T Saito, M Ohashi, K Kuroda, I Nakatani, S Telada, K Yamamoto, T Tomaru, T Suzuki, T Haruyama, N Sato, A Yamamoto and T Shintomi (for the CLIO Collaboration) and (The LCGT Collaboration), Status of Japanese gravitational wave detectors, Class. Quantum Grav. 26-20 (2009) 204020.

26 Sano Harada Group

Research Subjects: Physics of out-of-equilibrium systems and living matter

Members: Masaki Sano and Takahiro Harada

Main research topics of our group are nonlinear dynamics, pattern formation in dissipative systems, nonequilibrium statistical mechanics, and biophysics. By closely studying oscillations, chaos, and turbulent behavior and fluctuations in fluidic, solidic, and granular materials as well as chemical reactions and biological systems, we wish to discover a diverse of novel phenomena and distils simple and universal laws underlying such phenomena. Our research are grounded on dynamical systems theory, statistical mechanics, soft matter physics, and laboratory experiments. The following are the representative research subjects in our laboratory.

1. Study of turbulence

- (1) Search for the ultimate scaling regime in developed thermal turbulence
- (2) Study of statistical properties and coherent structures in turbulence
- (3) Turbulence turbulence transition in electro hydrodynamic convection of liquid crystals

2. Nonlinear Dynamics and Chaos

- (1) Pattern forming phenomena and their universalities in dissipative systems including granular materials
- (2) Spatio-temporal dynamics in spatially extended dissipative systems

3. Nonequilibrium statistical mechanics and softmatter physics

- (1) Fundamental studies on the nature of fluctuations and responses of system far from equilibrium
- (2) Developing a general theory of measurements on small complex systems
- (3) Manipulation of soft materials via novel optical trap techniques
- (4) Softmatter physics on polymers, thermophoretic flows and other related topics

3. Dynamical aspects of biological systems

- (1) Single molecule level measurement of DNA collapsing, DNA-protein interaction, and gene expression
- (2) Study of slow dynamics in cellular functions
- (3) Mechanical aspects of cell migration
- (4) Pattern formation of bacteria

References

- 1. H. Ebata, S. Tatsumi and M. Sano, Expanding holes driven by convectionlike flow in vertically vibrated dense suspensions, Phys. Rev. E **79**, 066308 (2009).
- 2. Hong-Ren Jiang, Hirofumi Wada, Natsuhiko Yoshinaga, and Masaki Sano: Manipulation of Colloids by Nonequilibrium Depletion Force in Temperature Gradient, Physical Review Letters, **102**, 208301 (2009).
- 3. Takahiro Sakaue and Natsuhiko Yoshinaga: Dynamics of Polymer Decompression: Expansion, Unfolding and Ejection, Physical Review Letters, **102**, 148302 (2009).
- 4. Kazumasa A. Takeuchi, Francesco Ginelli, and Hugues Chaté: Lyapunov Analysis Captures the Collective Dynamics of Large Chaotic Systems, Physical Review Letters, **103**, 154103 (2009).

- Kazumasa A. Takeuchi, Masafumi Kuroda, Hugues Chaté, and Masaki Sano: Experimental realization of directed percolation criticalityin turbulent liquid crystals, Physical Review E, 80, 051116 (2009).
- Soichi Tatsumi, Yoshihiro Murayama, Hisao Hayakawa, and Masaki Sano: Experimental Study on the Kinetics of Granular Gases under Microgravity, J. Fluid Mech. 641, 521-539 (2009).
- Kazumasa A. Takeuchi and Masaki Sano: Growing Interfaces of Liquid Crystal Turbulence: Universal Scaling and Fluctuations, arXiv:1001.5121 (2010).

27 Yamamoto Group

Research Subjects: Submillimeter-wave and Terahertz Astronomy, Star and Planet Formation, Chemical Evolution of Interstellar Molecular Clouds, Development of Terahertz Detectors

Member: Satoshi Yamamoto and Nami Sakai

Molecular clouds are birthplaces of new stars and planetary systems, which are being studied extensively as an important target of astronomy and astrophysics. Although the main constituent of molecular clouds is a hydrogen molecule, various atoms and molecules also exist as minor components. The chemical composition of these minor species reflects formation and evolution of molecular clouds as well as star formation processes. It therefore tells us how each star has been formed. We are studying star formation processes from such a unique viewpoint.

Since the temperature of a molecular cloud is as low as 10 K, an only way to explore its physical structure and chemical composition is to observe the radio wave emitted from atoms and molecules. In particular, there exist a number of atomic and molecular lines in the millimeter to terahertz region, and we are observing them with various large radio telescopes.

We are conducting a line survey of low-mass star forming regions with Nobeyama 45 m telescope and ASTE 10 m telescope, aiming at detailed understanding of chemical evolution from protostellar disks to protoplanetary disks. In the course of this effort, we have recently established a new chemistry occurring in the vicinity of a newly born star, which is called Warm Carbon Chain Chemistry (WCCC). In WCCC, carbon-chain molecules are produced by gas phase reactions of CH_4 which is evaporated from ice mantles. Existence of WCCC clearly indicates a chemical diversity of low-mass star forming regions, which would probably reflect a variety of star formation. We are now studying how such chemical diversity is brought into the protoplanetary disks.

In parallel to such observational studies, we are developing a hot electron bolometer mixer (HEB mixer) for the future terahertz astronomy. We are fabricating the phonon cooling HEB mixer using NbTiN and NbN in our laboratory. Our NbTiN mixer shows the noise temperature of 1700 K at 1.5 THz, which is well comparable to the results reported by other groups. The 0.8/1.5 THz HEB mixer receiver is now being developed, which will be used for astronomical observations with the ASTE 10 m telescope.

[1] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., "Abundant Carbon-Chain Molecules toward the Low-Mass Protostar IRAS04368+2557 in L1527", ApJ, 672, 371 (2008).

[2] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., "Deuterated Molecules in Warm Carbon Chain Chemistry: The L1527 Case", ApJ, 702, 1025 (2009). [3] Shiino, T., Shiba, S., Sakai, N., Yamakura, T., Jiang, L., Uzawa, Y., Maezawa, H., and Yamamoto,
S., "Improvement of the Critical Temperature of Superconducting NbTiN and NbN Thin Films Using the AlN Buffer Layer ", Supercond. Sci. Technol. 23, 045004 (2010).

28 Sakai (Hirofumi) Group

Research Subjects: Experimental studies of quantum optics and atomic/molecular physics

Member: Hirofumi Sakai and Shinichirou Minemoto

Our research interests are as follows: (1) Manipulation of neutral molecules based on the interaction between a strong nonresonant laser field and induced dipole moments of the molecules. (2) High-intensity laser physics typified by high-order nonlinear processes (ex. multiphoton ionization and high-order harmonic generation). (3) Ultrafast phenomena in atoms and molecules in the attosecond time scale. (4) Controlling quantum processes in atoms and molecules using shaped ultrafast laser fields. A part of our recent research activities is as follows:

(1) Generation of high-order sum and difference frequencies by adding an intense paralleland perpendicular-polarized infrared laser field [1]

We demonstrate both efficient control of polarization and high tunability of high-order sum and difference frequencies generated by adding an intense parallel- and perpendicular-polarized infrared laser field. When 805 nm pulses from a Ti:sapphire laser system and 1300 nm pulses from an optical parametric amplifier (OPA) are combined with perpendicular polarizations, the sum frequencies with two or four OPA photons are generated stronger than those with one or three OPA photons. This observation directly reflects the difference in their polarizations of the generated sum frequencies. Sum frequencies absorbing up to eight OPA photons are also observed for the parallel polarizations. Our observations are successfully reproduced by the theoretical calculations with the Lewenstein model including a weighting factor.

(2) All-optical molecular orientation [2]

We report clear evidence of all optical orientation of OCS molecules with an intense nonresonant two-color laser field in the adiabatic regime. The technique relies on the combined effects of anisotropic hyperpolarizability interaction as well as anisotropic polarizability interaction and does not rely on the permanent dipole interaction with an electrostatic field. It is demonstrated that the molecular orientation can be controlled simply by changing the relative phase between the two wavelength fields. The present technique brings researchers a new steering tool of gaseous molecules and will be quite useful in various fields such as electronic stereodynamics in molecules, ultrafast molecular imaging and so on.

(3) Effect of nuclear motion observed in high-order harmonic generation from D_2 / H_2 molecules with intense multi-cycle 1300-nm and 800-nm pulses [3]

We investigate high-order harmonic generation from D_2/H_2 molecules with intense multi-cycle pulses centered both at 1300 nm (60 fs) and at 800 nm (50 fs) together with that from N₂/Ar as reference. The experimental observations with 1300-nm pulses are different from those with 800-nm pulses both in spectral shapes and in intensity ratios I_{D_2}/I_{H_2} . The effect of nuclear motion in D₂ and H₂ are more distinctive for 1300-nm pulses than for 800-nm pulses. With multi-cycle pulses of 50–60 fs, the intensity ratios I_{D_2}/I_{H_2} are found to be more enhanced for both 800-nm and 1300-nm pulses than those with few-cycle pulses of 8 fs, which is attributed partly to the contribution of the coupling between the $1s\sigma_g$ and $2p\sigma_u$ states in D_2^+ and H_2^+ molecular ions during the higher-order returns of the electron wave packets.

(4) Dependence of the generation efficiency of high-order sum and difference frequencies in the xuv region on the wavelength of an added tunable laser field [4]

We investigate the dependence of the generation efficiency of sum and difference frequencies in the xuv region on the wavelength of an added tunable laser field. The wavelength of the added field ranges from 600 nm to 1500 nm. The generation efficiency of sum and difference frequencies is dramatically enhanced when the wavelength of the added field is longer than that of the fundamental field for pure harmonics. The discussions are held to the added field with perturbative intensity first, and they are further extended to that with nonpertubative intensity.

- [1] Yuichiro Oguchi, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, Phys. Rev. A. 80, 021804(R) (2009).
- [2] Keita Oda, Masafumi Hita, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, submitted.
- [3] Hiroki Mizutani, Shinichirou Minemoto, Yuichiro Oguchi, and Hirofumi Sakai, submitted.
- [4] Yuichiro Oguchi, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, submitted.

29 Nose Group

Research Subjects: Molecular Mechanism of Neural Network Formation

Member: Akinao Nose, Hiroshi Kohsaka and Etsuko Takasu

What is the physical basis of formation of the brain? The aim of our laboratory is to elucidate the molecular mechanism of neural development and function by using, as a model, the simple nervous system of the fruitfly, Drosophila. We focus on the synapses between motor neurons and their target muscles, and study the molecular mechanisms of how specific synaptic partners recognize each other and form synaptic connections. The following research plans are in progress.

1. Molecular mechanism of the neuromuscular target recognition

The proper functioning of the nervous system depends on precise interconnections of distinct types of neurons. Therefore, understanding how neurons specifically find and recognize their target cells is a central question in neuroscience. We have identified specific recognition molecules that are expressed in specific target cells and determine synaptic specificity.

1.1. Neural wiring by a negative signal: identification of a repulsive target cue that determines synaptic specificity.

The final matching of pre- and postsynaptic cells is thought to be mediated by specific molecular cues expressed on the target cells. While previous studies demonstrated essential roles of several target-derived attractive cues, less is known about the role of repulsion by non-target cells. In collaboration with Prof. Hiroyuki Aburatani (Research Center of Advanced Science and Technology, University of Tokyo), we conducted single-cell microarray analysis of two neighboring muscles (called M12 and M13) in Drosophila, which are innervated by distinct motor neurons, by directly isolating them from dissected embryos. We identified a number of potential target cues that are differentially expressed between the two muscles, including M13-enriched Wnt4, a secreted protein of the Wnt family. When the function of Wnt4 was inhibited, motor neurons that normally connect with M12 formed smaller synapses on M12 but instead, inappropriately connected with M13. Conversely, forced expression of Wnt4 in M12 inhibited synapse formation by these motor neurons. These results suggest that Wnt4 generates target specificity by preventing synapse formation on a non-target muscle.

2. Live-imaging of synapse formation in vivo

Synapses are specialized junctions through which neurons signal to each other and to other target cells such as muscles and are crucial to the functioning of the nervous system. However, the mechanism of how the synapses form during development remains poorly understood. We applied live imaging of fluorescent fusion proteins expressed in the target cells to visualize the process of synapse formation in developing embryos.

2.1 Bidirectional recognition for neuronal matchmaking

The mechanism of how specific neural connections are formed in living animals is one of the significant topics in neuroscience. A traditional view is one-sided: motile growth cones of the presynaptic neurons actively search for the target cell, whereas the target cells wait still to be selected by adequate partner neurons. We found that not only presynaptic neurons but also postsynaptic target cells actively search for their partners during the formation of neural network. Such bidirectional recognition might be critical for the development of precise neural connections not only in Drosophila but also in other animals including humans.

30 Higuchi Group

Research Subjects: Motor proteins in in vitro, cells and mice

Member: Hideo Higuchi and Motoshi Kaya

Changes in membrane morphology and membrane protein dynamics based on its fluidity are critical for cancer metastasis. However, this subject has remained unclear, because the spatial precision of previous in vivo imaging has been limited to the micrometer level and single molecule imaging is impossible. Here, we have imaged the membrane dynamics of tumor cells in mice with a spatial precision of 7-9 nm under a confocal microscope. A metastasis-promoting factor on the cell membrane, protease-activated receptor 1 (PAR1), was labeled with quantum dots conjugated with an anti-PAR1 antibody. Movements of cancer cells and PAR1 during metastasis were clearly observed in vivo. Images used to assess PAR1 dynamics were taken of representative cells for four stages of metastasis; i.e. cancer cells far from blood vessels in tumor, near the vessel, in the bloodstream, and adherent to the inner vascular surface in the normal tissues near tumor were photographed. The diffusion constant of PAR1 in static cells far from tumor blood vessels was smaller than in moving cells near the vessels and in the bloodstream. The diffusion constant of cells adhering to the inner vascular surface in the normal tissues was also very small. Cells formed membrane protrusion during migration. The PAR1 diffusion constant on these pseudopodia was greater than in other membrane regions in the same cell. Thus, the dynamics of PAR1 movement showed that membrane fluidity increases during intravasation, reaches a peak in the vessel, decreases during extravasation, and is also higher at locally formed pseudopodia.

Motile cilia at lateral ventricle are required for circulation of cerebrospinal fluid. The ciliary movement had so far been observed by the differential interference contrast (DIC) observation, but there was a problem that could not obtain the slice image. To analyze the ciliary motility in detail, we observed the cilia in a mice brain slice under a customized fluorescence microscope system with a high-speed confocal unit. The ependymal tissue section (200micro m in thickness) was prepared from the mice brain (postnatal days of six to 30). The labeling was carried out by adosorption of the organic fluorescence molecules (PKH:Sigma) to visualize the whole cilia form, or attachment of the polystyrene fluorescence nano-particles (Fluosphere: Invitrogen) to analyze detail ciliary movement by using spot tracking method. Motility and beating was analyzed with high temporal resolution (1.1ms) and nm-accuracy. The beat frequency of ciliary movement was 11-14Hz from 6th postnatal days to adult mice, and beating forms were changed with the postnatal days.

- Kawai M., H. Higuchi, M. Takeda, Y. Kobayashi and N. Ohuchi. Dynamics of different-sized solid-state nanocrystals as tracers for a drug-delivery system in the interstitium of a human tumor xenograf. Breast Cancer Research, 11:R43 (2009)(Open access publication)
- [2] Jinha A., Ait-Haddou R., Kaya M. and Herzog W. A task-specific validation of homogeneous non-linear optimisation approaches. Journal of Theoretical Biology 259, 695-700. (2009)
- [3] Hiyama, S., Gojo, R., Shima, T., Takeuchi, S., and Sutoh, K. Biomolecular-motor-based nano- or microscale particle translocations on DNA microarrays, Nano Lett, 9, pp. 2407-2413. (2009)
- [4] Kobayashi T. and Murayama T. Cell cycle-dependent microtubule-based dynamic transport of cytoplasmic dynein in mammalian cells, PLoS One, 4, pp. e7827. (2009)
- [5] T. Sato*, T. Shimozawa*, T Fukasawa, M Ohtaki, K. Aramaki, K. Wakabayashi and S. Ishiwata. Actin oligomers at the initial stage of polymerization induced by increasing temperature at low ionic strength: Study with small-angle X-ray scattering. BIOPHYSICS 6, 1-11 (2010) *:Equally contribution
- [6] K Gonda, T M. Watanabe N.Ohuchi, and H. Higuchi. In Vivo Nano-imaging of Membrane Dynamics in Metastatic Tumor Cells Using Quantum Dots. J. Biol. chem. 285,2750-2757 (2010)

 \mathbf{III}

2009年度物理学教室全般に関する報告

1 学部講義概要

1.1 2年生冬学期

1.1.1 電磁気学 I: 坪野 公夫

- 1. 相対論の背景
- 1.1 相対論はなぜ必要か
- 1.2 ニュートン力学とガリレイ変換
- 1.3 ベクトル演算子
- 1.4 マクスウェルの電磁気学とガリレイ変換
- 1.5 エーテルをめぐる実験
- 2. 特殊相対性理論
- 2.1 特殊相対性理論
- 2.2 ローレンツ変換
- **2.3** 同時性の概念
- 2.4 ミンコフスキー時空
- 2.5 共変性
- 3. 相対論的な時空間
- 3.1 時計の遅れ
- 3.2 ローレンツ収縮
- **3.3** 速度の合成
- 3.4 ドップラー効果
- 4. 相対論的力学
- 4.1 相対論的質量
- 4.2 相対論的運動量、エネルギー
- **4.3**4元ベクトル 4.4 光子(フォトン) **4.5** 粒子の生成、崩壊 4.6 散乱問題 4.7 相対論的運動方程式 4.8 一般ローレンツ変換 4.9 力の変換則 5. 相対論的電磁気学 5.1 クーロンの法則 5.2 磁気的な力 **5.3** 電場、磁場の変換則 5.4 ビオ・サバールの法則 5.5 静電場、静磁場に対する Maxwell eq. 5.6 不変な電磁場中での荷電粒子の運動 5.7 時間的に変化する電場、磁場に対する Maxwell eq. 5.8 4 元ポテンシャルの導入 5.9 物質中の電場、磁場、Maxwell eq. 5.10 電磁場テンソルの導入

1.1.2 解析力学·量子力学I:常行真司、上田正仁

解析力学	1.1 ニュートンの法則
	1.2 ガリレイ変換
1. ニュートンの法則からラグランジュ形式へ	1.3 オイラー-ラグランジュ方程式

1.4 一般化座標と拘束条件	5.7 ハミルトン-ヤコビの方程式
1.5 ダランベールの原理	5.8 リウヴィルの定理
2. 最小作用の原理	6. 量子力学の基礎
2.1 最小作用の原理	6.1 アインシュタインード・ブロイの関係式
2.2 オイラー-ラグランジュ方程式の導出	6.2 シュレーディンガー方程式
2.3 自由粒子のラグランジアン	6.3 重ね合わせの原理
2.4 相互作用する質点からなる孤立系のラグランジ	6.4 オブザーバブル
	6.5 対称性と保存則
3. 対称性と保存則	6.6 ヒルベルト空間と状態ベクトル
3.1 時間の一様性 エネルキー保存則	7. 波動関数の解釈
	7.1 コペンハーゲン解釈
	7.2 多世界解釈
	7.3 観測問題
	8. 時間発展と表示
4. こまごまなフリラノンアノ:回転座标示、電磁场、 摩擦のある系論	8.1 シュレーディンガー表示
4.1 回転座標系とコリオリカ	8.2 ハイゼンベルグ表示
4.2 ローレンツ力	8.3 相互作用表示
4.3 摩擦のある系	9. 不確定性関係
5. ハミルトン形式と正準変換	9.1 ハイゼンベルグの不確定性関係
5.1 ルジャンドル変換	9.2 非可換観測量の同時測定
5.2 ハミルトニアンと位相空間	9.3 一般の非可換観測量の間の不確定性関係
5.3 正準方程式	9.4 時間とエネルギーの不確定性関係
5.4 正準変換と母関数	10. 簡単な例
5.5 正準変換の例	10.1 調和振動子
5.6 ポアソン括弧式	11.2 トンネル効果と量子反射
1.1.3 物理実験学 : 早野 龍五、岡本 徹	
1. 序論	3.1 電気回路
1.1 実験物理学者の心得	3.2 試料作成技術
1.2 歴史的に重要な実験	3.3 実験環境技術
2. 単位系と基本物理定数	4. 各種の計測法
2.1 単位系の定義	4.1 電気伝導測定
2.2 基本定数の測定法に関する概論	4.2 磁気測定

3. 実験の基礎

250

4.3 放射線測定器

4.4 加速器	5.1 誤差の
4.5 回路、コンピューターの利用	5.2 誤差伝
5. 誤差論	5.3 最小二
1.1.4 物理数学I: 青木 秀夫	
1. 複素関数	4. 等角写像
1.1 物理学における複素数	4.1 正則関
1.2 複素関数と Riemann 面	4.2 共形変
1.3 初等関数と収束半径	5. 関数
2. 複素関数の微分と正則性	5.1 関数
2.1 複素微分	5.2 鞍点法
2.2 Cauchy-Riemannの関係式	5.3 関数
2.3 調和関数	5.4 Stirling
3. Cauchy の積分公式とその応用	5.5 関数
3.1 複素積分の定義と Cauchy の積分定理	6. Fourier
3.2 主値積分	6.1 Fourier
3.3 Cauchy の積分公式と Taylor 展開	6.2 固有関
3.4 Laurent 展開	6.3 関数

- 3.5 解析接続
- 1.1.5 物理数学 II : 浜口幸一
- 講義の目標・概要 量子力学や電磁気学など物理学ー 般に広く用いられる数学的道具・手法を解説 する。
- 1. 偏微分方程式と Fourier 変換

1.2 3年生 夏学期

- 1.2.1 電磁気学 II: 酒井広文
- 1. 電磁場の基本法則
- 1.1 電場と磁場
- 1.2 Coulomb の法則

- 分類
- 播の法則
- 乗法
- |数と等角 (共形) 写像
- 換の応用
- の無限乗積表示と Hankel 表示
- g の公式
- 級数と Sturm-Liouville 理論
- r 級数と Fourier 変換
- 数展開
- の Fourier 変換
- 6.4 Fourier 変換の微分方程式への応用
- 波動方程式、熱伝導方程式など
- 2. 特殊関数論 ベッセル関数、ルジャンドル多項式、超幾何関数など
- 3. 角運動量の代数的性質:回転群

- 1.3 Faraday の電磁誘導の法則
- 1.4 Ampère の法則
- 1.5 電荷保存則と変位電流

1.6 Maxwell の方程式	3.8 境界値問題
1.7 電磁ポテンシャルとゲージ変換	4. 定常電流
1.8 エネルギー保存則	4.1 定常電流の基本方程式
1.9 運動量保存則	4.2 定常電流による静磁場の決定
2. 静止物質中の Maxwell 方程式	4.3 ベクトルポテンシャルの多重極展開
2.1 静止物質中の電磁場	4.4 定常電流による磁場のエネルギー
2.2 静止物質中の Maxwell 方程式	4.5 定常電流の分布
2.3 Ohm の法則	4.6 Joule 熱最小の定理
2.4 エネルギー保存則	5. 静磁場
3. 静電場	5.1 静磁場の基本方程式
3.1 静電場の基本方程式	5.2 永久磁化
3.2 電荷分布が与えられたときの静電場	5.3 境界条件
3.3 静電場の多重極展開	6. 電磁波
3.4 静電場のエネルギーと Thomson の定理	6.1 真空中の電磁波の基本法則
3.5 導体系の静電場と Green の相反定理	6.2 真空中の電磁波 (平面波解)
3.6 誘電体中の Gauss の法則	6.3 誘電体中の電磁波
3.7 誘電体の境界条件	6.4 導体中の電磁波

1.2.2 量子力学 II : 宮下精二

1.3次元の量子力学と角運動量	2. 近似法
1.1 中心場中の定常状態の Schrodinger 方程式の解	2.1 縮退のない場合
1.2 軌道角運動量と球面調和関数	2.2 縮退のある場合
1.3 角運動量の諸性質とスピン	
1.4 角運動量の合成、 LS 結合	2.3 時間による摂動
1.5 水素原子	2.4 WKB 近似
1.6 3次元調和振動子	2.5 量子ダイナミックス

1.2.3 現代実験物理学I: 長谷川修司, 溝川貴司

1. X線

X線

1.1 X 線の発見、	2. 電子
1.2 特性X線と連続X線、Moseleyの法則、	2.1 粒子性と波動性
1.3 Thomson 散乱と Compton 散乱、	2.2 電子回折と顕微鏡
1.4 X線回折	2.3 Aharonov-Bohm 効果
1.5 X線研究の拡がり;CT,リソグラフィ、宇宙	2.4 トンネル効果と STM

3. 多様な実験手法	5.1 光源技術
3.1 顕微鏡	5.2 ポンプ・プローブ分光
3.2 分光法	5.3 X線散乱
3.3 伝導	6. 粒子線を利用する実験技術
4. 磁場を利用する実験技術	
4.1 磁場の発生	6.1 電子線散乱
4.2 SQUID ≿ MEG	6.2 光電子分光
4.3 NMR ≿ MRI	6.3 中性子散乱
5. 電磁波を利用する実験技術術	6.4 μ SR

1.2.4 物理数学 II: 松尾 泰

1. Fourier 変換を用いた偏微分方程式の解法	3.1 調和振動子と Hermite 多項式
1.1 Fourier 級数	3.2 角運動量の量子化と Legendre 多項式
1.2 Fourier 変換	3.3 球面調和関数の性質
1.3 偏微分方程式の分類	4. 超幾何関数
1.4 Fourier 変換の偏微分方程式への応用	4.1 確定特異点型微分方程式
1.5 Green 関数	4.2 超幾何関数
2. 直交多項式	4.3 合流型超幾何関数
2.1 直交多項式とは	4.4 積分表示
2.2 Rodrigues の公式	4.5 超幾何関数の間の関係
2.3 直交多項式が満たす微分方程式	5. Bessel 関数
2.4 規格化因子	3.1 Bessel 関数
2.5 母関数	3.2 波動方程式と Bessel 関数
2.6 漸化式	3.3 Bessel 関数の直交性
3. 直交多項式の応用	3.4 積分表示と漸化式

3年生 冬学期 1.3

1.3.1 物理数学 III : 村尾	美緒
1. 郡論の基礎	1.4 剰余類
1.1 群の定義	1.5 剰余類群・準同型定理
1.2 組みかえ定理	1.6 類演算子
1.3 同型と準同型	2. 対称群

2.1 置換

- 2.2 ケーリーの定理
- 2.3 分割と共役類・巡回構造
- 3. 有限群の表現論
- **3.1**表現と既約表現
- 3.2 不変部分空間・シューアの補題・表現の直交性
- 3.3 指標の第一種直交性・正則表現
- 3.4 指標の第二種直交性・既約表現の個数
- **3.5** 直積表現と対称性
- 4. リー群とリー代数
- 4.1 リー群
- 4.2 線形変換群

1.3.2 量子力学 III : 初田哲男

- 1. 散乱の量子論
- 1.1 量子力学的散乱問題の例
- 1.2 Lippmann-Schwinger(LS) 方程式と形式解
- 1.3 LS 方程式の漸近解と散乱振幅
- 1.4 微分断面積と散乱振幅
- 1.5 散乱振幅の部分波展開
- 1.6 S行列と位相差
- 1.7 剛体球での散乱
- 1.8 ボルン近似とその妥当性
- 1.9 形状因子
- 1.10 高エネルギー散乱でのアイコナール近似
- 1.11 低エネルギー散乱での有効距離の理論

1.3.3 流体力学: 高瀬 雄一

- 1. 流体の性質とその記述
- 1.1 流体の定義
- 1.2 流れを表す量
- 1.3 運動の調べ方

- 4.3 リー代数
- 4.4 群の大局的構造・連結コンパクト群・普遍被覆群
- **4.5 リー群の例** O(3), SU(2), SO(3)
- 4.6 リー代数の表現 (SO(3)を例として)
- 5. 群論の応用: 量子力学への応用
- 5.1 量子力学と対称性の群論的考察
- 5.2 角運動量の合成
- 6. ユークリッド空間における微分形式
- 6.1 外積
- 6.2 微分形式
- 6.3 星印作用素
- 1.12 低エネルギー散乱でのS行列の性質
- 2. 多粒子系の量子論
- **2.1** 粒子の統計性
- 2.2 多粒子系の波動関数
- 2.3 Hartree-Fock(HF) 方程式
- 2.4 HF 方程式と原子構造
- 2.5 生成・消滅演算子と第二量子化
- 2.6 場の演算子
- 2.7 場の運動方程式とハミルトニアン
- 2.8 自由フェルミ・ボース系における相関関数
- 2.9 ファインマンの経路積分
- 2. 流体の基礎方程式
- 2.1 Euler の連続方程式と運動方程式
- 2.2 Lagrangeの連続方程式と運動方程式
| 6. 粘性流体 |
|------------------------------------|
| 6.1 Navier-Stokes 方程式 |
| 6.2 境界層 |
| 6.3 平行流 |
| 6.4 回転流 |
| |
| 7. 波動 |
| 7.1 水波 |
| 7.2 音波 |
| 7.3 高速気流 |
| 7.4 衝撃波 |
| |
| 8. 不安定性 |
| 3.1 非圧縮定党法の安定性 |
| |
| 8.2 Keivin-Heimnoitz 小女正任 |
| 8.3 Rayleigh-Taylor 不安定性 |
| 8.4 平行流の安定性 |
| |
| 9. 乱流 |
| 9.1 アンサンブル平均 |
| 9.2 一様乱流 |
| 9.3 Kolmogorov スケーリング |
| 9.4 非一様乱流 |
| |

1.3.4 電磁気学 III : 蓑輪 眞

- 1. 電磁波概説
- 1.1 電磁波のエネルギーと運動量
- 2. 電磁波の伝播
- 2.1 電磁波の反射・屈折・回折
- 2.2 Brewster 角
- 2.3 Evanescent 場
- 2.4 導波管
- 2.5 空洞共振器
- 2.6 光ファイバー
- 2.7 プラズマ中の電磁波

3. 電磁波の放射
 3.1 遅延ポテンシャル
 3.2 双極子放射
 3.3 アンテナ
 4. 荷電粒子の放射する電磁波
 4.1 Lienard-Wiechert のポテンシャル
 4.2 シンクロトロン軌道放射
 4.3 チェレンコフ放射
 4. 電磁気学と特殊相対論

1.4 3年生冬学期

1.4.1 生物物理学 : 樋口秀男 能瀬聡直

- 1. 生物物理学
- 1.1 生物物理学とは
- 1.2 遺伝情報の流れ
- 1.3 蛋白質の構造と機能
- 1.4 細胞内タンパク質のダイナミックス

1.4.2 統計力学 II: 小形正男

- 1. 相転移現象
- 1.0 イントロダクション
- 1.1 気体-液体相転移
- 1.2 相転移:対称性の自発的破れ
- 1.3 スピン系の統計力学
- 1.4 平均場近似
- 1.5 イジングモデル
- 1.6 ランダウの2次相転移理論
- 1.7 スケーリング理論
- 1.8 くりこみ群の基礎

1.5 4年生 夏学期

1.5.1 場の量子論 : 柳田 勉

1. Relativistic Quantum Theory

- 1.1 Relativistic Quantum Mechanics
- 1.2 Dirac Equation
- **1.3** Lorentz Covariance
- **1.4** Solutions to the Dirac Equation
- 1.5 Hole Theory

2. Quantum Field Theory

- 2.1 Canonical Quantization of Fields
- 2.2 Real Spinless Fields

1.5 遺伝子操作技術

1.8 脳・神経系の生物物理

2. 非平衡統計力学

2.2 線形応答理論

2.5 拡散方程式

2.3 種々の輸送係数

2.1 応答関数とゆらぎ

1.6 ゲノム科学とバイオインフォマティックス

2.4 ブラウン運動とアインシュタインの関係式

2.8 マスター方程式とフォッカー・プランク方程式

2.6 境界のある場合の拡散方程式

2.7 ランジュバン方程式

1.7 バイオイメージング、生体分子計測

- 2.3 Meaning of Field Quantization
- $\mathbf{2.4} \ \mathrm{Dirac} \ \mathrm{Fields}$
- 2.5 Electromagnetic Field

1.5.2 素粒子原子核物理学 I : 大塚孝治、浅井祥仁

1. クォークモデル

2. Dirac 方程式とスピン

256

8. 核力

- 3. 連続・不連続対称性と保存量 4. ゲージ対称性 10. 量子多体系としての原子核 5. 電磁相互作用 11. 対称性 (角運動量・アイソスピン) 6. 弱い相互作用 12. 核子の集団運動 7. 標準理論 13. RI ビーム・不安定核 14. クォーク多体系 1.5.3 一般相対論: 須藤 靖 1. 一般相対論の基礎 3. 重力波 1.1 物理量の表現: ベクトル 3.1 アインシュタイン方程式の弱場近似 1.2 物理量の表現: 双対ベクトル **3.2** 重力波の平面波解 1.3 物理量の表現: テンソル **1.4 測地線の方程式** 1.5 重力場の方程式 ンソル 3.5 重力波輻射の四重極公式 2. 球対称時空 2.1 球対称時空に対する計量とアインシュタイン方 4. 重力レンズ天文学 4.1 重力レンズとは 2.2 完全流体に対するエネルギー運動量保存則 4.2 レンズ方程式 2.3 球対称時空における完全流体の運動方程式 4.3 光線の曲がり角 2.4 圧力が無視できる物質の球対称重力収縮 4.4 レンズポテンシャルとレンズ方程式 2.5 球対称定常時空とトールマン・オッペンハイマー・ 4.5 円対称重力レンズの定性的振舞い ボルコフ方程式 2.6 シュワルツシルド解
- 2.7 重力質量と固有質量

程式

- 2.8 球対称真空解とバーコフの定理
- 2.9 一様等方宇宙モデル:フリードマン・ロバート 4.9 重力レンズの増光率 ソン・ウォーカー時空
- 4.8 面輝度定理

 - 4.10 重力マイクロレンズと MACHO
- 1.5.4 プラズマ物理学: 牧島一夫

プラズマ中で長距離相互作用の果す役割、その発現としての様々な宇宙プラズマ現象などに重点を置く。

- プラズマ物理学の意義
- 2. 磁場の無いプラズマ
- 3. 単一荷電粒子の運動

9. 原子核の大きさ

- 3.3 測地線偏差の方程式と重力波検出原理
- 3.4 大局的保存則と重力場のエネルギー運動量擬テ

- 4.6 レンズ変換行列: convergence と shear
- 4.7 円対称レンズの critical curve と像の変形

- 4. プラズマの運動方程式
- 5. 磁気プラズマ中の電流
- 6. 磁気プラズマの平衡と安定性
- 7. プラズマ中の波動:磁場の無い場合
- 8. プラズマ中の波動:磁場のある場合
- 1.5.5 固体物理I: 内田 慎一
- 1. バンド理論と結晶結合
- 1.1 ブロッホ電子、結晶運動量、電子と正孔
- 1.2 バンド理論、金属と絶縁体、同期表
- 1.3 半導体
- 1.4 結晶結合
- 2. 固体の励起状態と物性
- 2.1 固体の励起状態:電子-正孔対励起

1.5.6 量子光学 : 島野 亮

- 1. 光の放出と吸収
- 1.1 電磁波のモード密度
- 1.2 電磁波のエネルギー
- 1.3 黒体輻射、プランクの熱放射式
- 1.4 自然放出と誘導放出
- 2. 輻射場と二準位系の相互作用(半古典論)
- 2.1 双極子近似、回転波近似
- 2.2 ラビ振動
- 2.3 密度行列
- 2.4 光ブロッホ方程式
- **2.5** 縦緩和と横緩和
- 3. 輻射場の量子論
- **3.1** 自由場の量子化
- 3.2 光子数状態
- 3.3 コヒーレント状態

1.6 4年生冬学期

- 2.2 外場に対する電子の応答と物性
- 3. 金属の安定性・不安定性
 - 3.1 フェルミ液体
 - 3.2 金属の不安定性
 - 4. 凝縮系物理学の一般原理
 - 4.1 対称性の破れ
 - 4.2 硬さ、集団励起、トポロジカル欠陥
 - 3.4 スクイーズド状態
 3.5 モード位相演算子
 3.6 量子化した場と二準位系の相互作用
 4. 非線形光学の基礎
 4.1 古典振動子モデル
 4.2 非線形分極と非線形感受率
 4.3 二次の非線形光学効果
 4.4 位相整合
 4.5 光パラメトリック過程
 5. レーザーの基礎
 5.1 光共振器のモード
 5.2 光共振器の安定性
 5.3 発振条件
 5.4 各種レーザー

1.6.1 現代物理学入門 : 江尻 晶、横山 将志

1. 電磁流体不安定性	1.5 磁気再結合と自己組織化
1.1 プラズマの基礎	2. ニュートリノの物理
1.2 電磁流体方程式	2.1 はじめに、単位系、標準理論
1.3 不安定性の例と直観的理解	2.2 ニュートリノの「誕生」
1.4 レイリー・テーラー不安定性	2.3 ニュートリノの性質
1.5 フルート不安定性・ソーセージ不安定性	2.4 ニュートリノ振動
1.6 ティアリング不安定性	2.5 ニュートリノと宇宙

1.6.2 素粒子原子核物理 II: 駒宮 幸男、平野 哲文

- 1 素粒子と物質との反応 I
- 2 素粒子と物資との反応 II
- 3 強い相互作用(摂動論的QCD)
- 4 核子の内部構造
- 5 標準理論 I
- 6 標準理論 II

- 7 標準理論を超えて
- 8 原子核の崩壊
- 9 中間子交換による核力の導出
- 10 ハドロンガスとクォークグルーオンプラズマ
- 11 宇宙初期におけるクォークハドロン相転移
- 12 中性子星

1.6.3 生物物理学特論: 樋口秀男 北尾彰朗 野口博司

1. 蛋白質と膜の生物物理学	1.5 生体膜の構造と機能
1.1 蛋白質及び膜の生物物理学とは	1.6 膜曲面の熱力学
1.2 蛋白質立体構造決定の方法	
1.3 蛋白質のダイナミクスと折れ畳み	1.7 膜の相転移
1.4 蛋白質のシミュレーションとデザイン	1.8 赤血球のダイナミクス

1.6.4 場の量子論 II: 松尾 泰

- 1. 導入
- 1.1 String 理論の概観
- 1.2 Notation, 単位系
- 2. ひもの古典論
- 2.1 相対論的な粒子の作用
- 2.2 弦に対する南部・後藤作用
- **2.3** Reparametrization Invariance
- 2.4 ゲージ固定

- 2.5 Virasoro 条件
-
- 2.6 境界条件とDブレーン
- 2.6 ひもの古典的運動の具体例
- 2.7 ひもの力学的保存量
- 3. ひもの量子論
- 3.1 Lightcone 座標による物理系の記述
- 3.2 Lightcone ゲージ固定
- 3.3 量子化

- 3.4 Virasoro 代数
- 3.5 ひもから得られる粒子のスペクトル
- 3.6 Lightcone ゲージにおけるゲージ理論・重力理論
- 3.7 共形場理論
- 3.8 臨界次元
- 3.9 Superstring 概論

- 4. やや高度な話題
- 4.1 トーラスコンパクト化
- 4.2 T-双対性
- 4.3 D ブレーンと双対性
- 4.4 Dブレーンを用いた標準模型の導出
- 1.6.5 プラズマ物理学: 牧島一夫

プラズマ中で長距離相互作用の果す役割、その発現としての様々な宇宙プラズマ現象などに重点を置く。

- 1. プラズマ物理学の意義
- 2. 磁場の無いプラズマ
- 3. 単一荷電粒子の運動
- 4. プラズマの運動方程式
- 5. 磁気プラズマ中の電流
- 6. 磁気プラズマの平衡と安定性
- 7. プラズマ中の波動:磁場の無い場合
- 8. プラズマ中の波動:磁場のある場合

1.6.6 物性物理学特論 (大学院「表面物理学」共通): 長谷川修司,小森文夫、

- 1. 概論 ナノサイエンス・ナノテクと表面
- 2. 表面構造
- 2.1 表面超構造と相転移
- 2.2 回折法
- 2.3 顕微鏡法
- 2.4 動的過程
- 3. 表面電子状態
- 3.1 表面電子状態
- 3.2 (逆)光電子分光法
- 3.3 トンネル分光法
- 3.4 光電子分光によるバンド分散・原子結合状態測定
- 3.5 時間分解測定
- 2. 走査トンネル顕微鏡

4.1 走査トンネル顕微鏡の原理
4.2 表面原子構造観察
4.3 局所電子状態測定
4.4 表面バンドの観測
4.5 表面電子定在波
5. 表面電子輸送
5.1 表面空間電荷層の2次元電子系
5.2 表面電子バンドの2、1次元電子系
5.3 原子マニピュレーション
6.表面超薄膜磁性
6.1 磁気モーメントと相転移
6.2 強磁性超薄膜
6.3 表面ナノ強磁性体

1.7 学部4年生冬学期

1.7.1 固体物理学 II: 福山 寛

固体物理学Iに引き続き、物質の示す多彩な性質 2.3 量子ホール効果 を量子力学や統計力学の知識をもとにミクロに理解 するための基礎を解説する。

- 1. 格子振動
- 1.1 フォノン
- 1.2 デバイ模型
- 2. 固体中の伝導現象
- 2.1 熱伝導
- 2.2 電気伝導とホール効果

- 3.磁性
- **3.1** 常磁性と反磁性
- 3.2 磁気的相互作用と磁気秩序
- 3.3 スピン波
- 4. 超流動と超伝導
- 4.1 ボース・アインシュタイン凝縮と巨視的量子効果
- 4.2 超伝導の現象論
- 4.3 BCS 理論

- 1.7.2 化学物理学 : 藤森 淳
- 1. 原子の電子状態
- 1.1 一電子状態
- 1.2 多電子原子
- 1.3 周期律

- 2. 分子の電子状態
- 2.1 水素分子・二原子分子
- 2.2 ベンゼン等の分子
- 2.3 金属錯体

2 各賞受賞者紹介

2.1 山崎敏光 名誉教授:文化功労者

山崎敏光名誉教授が平成 21 年度文化功労者に選ばれました。山崎先生は 1957 年に本学理学部物理学科を 卒業なされ、本学原子核研究所助手、カリフォルニア大学およびニールス・ボーア研究所研究員、本学理学部 講師、助教授、教授を経て、1986 年より本学原子核研究所所長を努められました。退官後は日本学術振興会 監事等を歴任され、現在は財団法人仁科記念財団理事長及び日本学士院会員として活躍されるとともに、自 ら科研費を獲得され、研究に励んでおられます。

山崎先生は中間子などの粒子ビームを原子核物理のみならず原子分子・物性科学に至る広い分野の研究に 応用して新しい学問分野を拓かれました。特に原子核の磁気能率の高精度測定による核内での π 中間子交換 流の発見、ミューオンスピン回転緩和共鳴法の開拓、反粒子を含む原子分子の研究、π 中間子原子を用いた核 子の質量獲得メカニズムの研究などは、きわめて独創的なものです。

山崎先生はこれらの研究の多くをカナダ、ドイツ、スイスなどの加速器施設で行い、学術の国際交流に貢献 されました。一方、国内においては、1970年代後半に高エネルギー物理学研究所内に世界初のパルス状ミュー オンビーム施設を建設し、また、東京大学原子核研究所所長として大強度陽子加速器施設(現在の J-PARC) 実現の礎を築くなど、わが国の原子核物理学研究に主導的役割を果たされました。

山崎先生はこれまでにも松永賞 (1972年)、仁科記念賞 (1975年)、日本学士院賞恩賜賞 (1987年) 藤原賞 (1994年)、フンボルト賞 (2000年) を受賞しておられますが、このたび文化功労者に列せられたことは、先生 の業績を顕彰するのにまことに相応しいものです。

2.2 小林孝嘉 名誉教授 (現 電気通信大学 特任教授): 島津賞

「極限的超短パルス光レーザーと超広帯域高感度検出系による極限的時間分解分光法の開発」

小林孝嘉名誉教授は、世界最短可視光パルスレーザーの開発を手がけ、1997年にドイツ、イタリアの研究グ ループとほぼ同時に、非共直線配置の光パラメトリック増幅 (non-collinear optical parametric amplification: NOPA) 方式でパルス幅 20 fs (フェムト秒、1 fs は 1,000 兆分の 1 秒)以下のパルスレーザー光を得ることに 成功した。その後も世界最短パルス幅の可視光パルスの記録を更新し、ついに 4 fs を達成するに至った。さ らに、究極的な光の位相 (絶対位相) の自動安定化法を発明し、量子干渉法を用いた絶対位相測定にも成功し た。この位相自動安定化法は Hall, Haensch 教授 (2005 年ノーベル物理学賞) 等による外部安定化法に比べて 簡便で且つ増幅器にも適用可能となる点が優れている。さらに、多波長同時検出器として開発したマルチチャ ンネルロックイン増幅器と超短パルスレーザーとを組み合わせた超広帯域高感度多波長分光システムを構築 し、極限的時間分解分光法を可能とした。極小な電子遷移エネルギーの変化を1フェムト秒の速さで広帯域 スペクトルとして捉え、多くの新現象 (振動モード間の動的モード結合等)を発見した。すなわち、分子振動 や化学反応に伴う分子の形の変化を1 fs 単位で捉え、Zewail 教授 (1999 年ノーベル化学賞) の提唱した遷移 状態分光法を彼らの簡単な気相分子ではなく、複雑な分子・高分子・生体高分子 (タンパク質) でも測定に成 功し、「遷移状態分光法」を確立した。

2.3 早野龍五 教授:第62回中日文化賞

受賞対象は「反陽子へリウム原子の発見と研究」です。早野氏は 1997 年より、日本人を中心とする研究 チーム ASACUSA (アサクサ)を率いて、CERN 研究所で反物質の研究を行ってきました。特に「反陽子へ リウム原子」という、ヘリウム原子の二個の電子のうち一つを反陽子、すなわち、マイナス物質を持つ陽子 の反粒子で置き換えたものを発見し、これのレーザー分光に成功し、反陽子と電子の質量比を陽子と電子の 質量比に匹敵する精度で求め、基礎物理定数の決定や CPT 対称性の検証に貢献したことが評価されました。

2.4 平野哲文講師:平成21年度文部科学大臣表彰「若手科学者賞」および第24回西宮湯川記念賞

受賞対象は「相対論的流体力学に基づくクォーク・グルーオン・プラズマの研究」です。誕生したばかりの 10¹²Kを上回る高温の初期宇宙では、ハドロンは溶解し、クォークやグルーオンがバラバラになったプラズ マ状態が実現していたと考えられています。このクォーク・グルーオン・プラズマを再生する実験が,米国 のブルックヘブン国立研究所(BNL)のRHIC(相対論的重イオン衝突型加速器)で行われてきました。こ の原子核衝突実験では、楕円型フロ - と呼ばれるハドロンの強い異方的流れや、ジェット抑制と呼ばれる高エ ネルギージェットとプラズマの強い相互作用が発見されています。平野氏は、世界に先駆けて相対論的流体模 型の3次元数値シミュレーションコードを完成し、RHICの実験結果を定量的に分析することにより、衝突で 生成されたプラズマが、粘性の小さい完全流体のように振舞う事を明らかにしました。この成果は、「強結合 クォーク・グルーオン・プラズマ」という新しい概念の創出につながり、当該分野の理論・実験に大きなイ ンパクトを与えています。平野氏の研究は、CERNのLHC(大型ハドロン衝突型加速器)で行われる予定の、 より高エネルギーでの原子核衝突実験とも密接に関連し、今後も益々の発展が期待されています。

2.5 坂井南美助教(山本研究室):第26回井上研究奨励賞

本研究室の坂井南美助教が第26回井上研究奨励賞を受賞しました。これは坂井氏が2008年6月に提出 した学位論文「Discovery of Warm Carbon Chain Chemistry in Low-Mass Star Forming Regions and Its Astrophysical Implication:低質量星形成領域における「暖かい炭素鎖化学」の発見とその宇宙物理学的意義」 に対するものです。

「太陽程度の星が生まれる過程で、星間物質がどのような変遷を経て惑星系にもたらされるか」という問題は、太陽系の起源、生命の起源とも関わる重要な研究課題です。坂井氏は、世界中の大口径電波望遠鏡を駆使した観測研究により、この問題に真正面から取り組みました。これまで、原始星近傍ではどこでも飽和 有機分子が豊富に存在していると考えられてきました。ところが、坂井氏は、その常識を覆し、逆に不飽和 な炭素鎖分子(註1)が特異的に豊富な原始星を発見しました。この結果は、原始星近傍の化学組成はどの 天体でも同じなわけではなく、この段階で化学組成が「分化」していることを明瞭に示したもので、世界的 に大きな注目を集めました。分化の原因は星形成時の収縮時間と関連していると見られ、様々な関連研究を 誘発しつつあります。坂井氏は、原始星から原始惑星系円盤に向かってこの化学的分化がどのように発展し ていくかを、もうすぐ動き出す ALMA 望遠鏡(註2)で解明しようと準備を進めています。

(註1)炭素鎖分子:炭素が直線状に並んだ分子。HCCCCCN や CCCCH などがその例。(註2) ALMA 望遠鏡: Atacama Large Millimeter/submillimeter Array の略。南米チリのアンデス山脈の高地 (標高 5000 m) に 66 台以上の電波望遠鏡を並べて一つの大望遠鏡として動かす。2011 年から部分的に運用が始まる。

2.6 日下暁人博士(相原研:現シカゴ大学):平成21年度文部科学大臣 表彰「若手科学者賞」

受賞対象の研究は、日下博士が、博士論文のテーマとして行い Physical Review 誌に公表した「中性 B 中間子のロー中間子・パイ中間子崩壊現象による CP 非保存の研究」である。日下氏の論文は、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国際共同実験 Belle 実験において行われてきた物質と反物質の非対称性(CP 非対称)の研究の集大成とも言える成果である。B 中間子の時間発展とダリッツプロット解析と呼ばれる粒子の運動学的性質を使った解析方法を組み合わせた新しい解析方法を開発し、Belle 実験の計画当初、およそ不可能と思われていた B 中間子の崩壊モードにおける CP 非対称の測定を世界に先駆けてなしとげた。この業績が高く評価された。

2.7 池田陽一博士 (初田研): 第4回日本物理学会若手奨励賞

受賞対象は、「3体精密計算に基づくストレンジダイバリオン共鳴の研究」です。池田氏は、新しいエキ ゾティック原子核として注目を集めている \bar{K} -原子核の中で最も基本的な「ストレンジ・ダイバリオン共鳴 ($\bar{K} - N - N$ の3体系)」に関する精密理論計算を、 $\pi - \Sigma - N$ および $\pi - \Lambda - N$ との結合を取り入れたチャ ネル結合ファデーフ方程式に基づいて実行しました。池田氏のチャネル結合計算によって、3体系のダイナ ミクスを完全に取り入れた信頼できる理論的予言が初めて可能になりました。この仕事が \bar{K} -原子核の存在可 能性とその定量的な評価に果たした役割は大きく、池田氏の研究は当該分野の発展の基礎となる研究として 世界的にも高い評価を受けています。

2.8 中浜優博士(相原研:現パリ第11大学LALオルセー研究所):第11 回高エネルギー物理学奨励賞、および第4回日本物理学会若手奨励賞

中浜氏は、博士論文「Measurement of *CP*-violating asymmetries in the flavor-changing neutral current decays of the B-boson (B中間子のフレーバー変換中性カレント崩壊における *CP* 非対称性の測定)」において KEK-B ファクトリー実験のデータを使って、 $B^0 \rightarrow \phi K_s^0$ 崩壊の解析では同じ終状態をもつ他の崩壊モードとの干渉効果を正しく取り扱うためにダリツ分布の時間依存性を用いる新たな手法を開発して世界初の測定結果を得、また $B^0 \rightarrow K_s^0 K_s^0$ 崩壊に関しては新たな事象抽出方法を開発して以前行われた解析に比べ事象数を 40%増やすことに成功した。素粒子の標準理論の検証に新たな精密データを提供したことはもちろんのこと、加えて将来の SuperB ファクトリー計画などにおける新しい物理の探索に有効な研究手段を開拓したものとして、その業績と完成度の高い優れた論文が高く評価された。

2.9 小林未知数 氏(上田研):第4回(2010年)日本物理学会若手奨励賞(領域6)

量子流体中では循環が量子化された量子渦が出現し、それらが複雑に絡み合った状態を量子乱流という。量 子乱流中の量子渦は安定な位相欠陥であるため同定が容易であり、量子乱流の研究は渦と乱流との関係を明 らかにするという視点でブレイクスルーを生むかもしれないと期待されている。小林氏は量子乱流において、 粘性流体の最も重要な統計則である Kolmogorov 則が成り立つことを数値的に示し、両者に共通の渦のダイ ナミクスが存在することを明らかにした。

2.10 竹内 一将氏 (佐野研): 平成 2 1 年度 理学系研究科研究奨励賞 (博 士)

竹内-将君は、非平衡における臨界現象の実験的検証に顕著な業績を達成し、理学系研究科研究奨励賞に 賞せられました。非平衡において普遍的なスケール不変性が現れる典型的な例として、吸収状態への相転移 (Directed Percolation, DP 転移)と荒れた界面の成長(kinetic roughening)があります。竹内君は、この2 つの大きな普遍的なクラスの現象に関して、初めて高精度かつ包括的な実験検証を行い、従来は理論モデル でしか存在が知られていなかった非平衡臨界現象が実在することを明らかにしました。過去の様々の試みが 失敗した原因として考えられるクエンチノイズや長距離相関に左右されない理想的な実験系として、液晶電 気対流における2つの乱流状態間の転移が理想的であることを看破し実験と理論の徹底的な比較を行い、長 年の未解決問題を解決したことが高く評価されました。DP 転移に関しては、臨界指数指数を12 個、スケー リング関係式を8 個検証することに成功し、界面成長に関しては、従来の枠組みを越えて、揺らぎ分布と相 関関数の正確な形の普遍性を初めて明らかにし、界面成長の実験に新局面を拓く成果を達成しました。竹内 君は、この他にも理論と数値シミュレーションの研究においても顕著な業績をあげています。

2.11 山崎 雅人氏 (柳田研): 平成 2 1 年度 理学系研究科研究奨励賞 (博 士)

超弦理論では、超対称性理論の力学的性質を調べる一つの方法として、様々な次元のブレーンを重ね合わ せてその幾何学的な性質から力学的な情報を読み取る方法が活発に研究されてきている。山崎雅人君の主要 な研究テーマである「ブレーンタイリング」という手法はクイバー型ゲージ理論と呼ばれる超対称ゲージ理 論に対する幾何学的なアプローチである。山崎君はこの分野で多くの論文を発表してきたが、最近大栗教授 と行った共同研究で、ブレーンタイリングのアイディアを結晶溶解模型と関連づけ、さらに壁越え公式と呼 ばれる結合定数の空間における「壁」を跨ぐ変分で粒子の組成が変わる現象の精密な計算を行った研究で大 変高い評価を得ている。またこの仕事以外にも山崎君は M 理論のプレーンなどで幅広い研究を行い20 編近 い論文を発表している。

2.12 山本直希氏 (初田研): 平成 2 1 年度 理学系研究科研究奨励賞(博 士)

山本博士は、有限バリオン密度における量子色力学 (QCD)の相構造に関する研究を行い、ハドロン相から カラー超伝導相への相変化が、QCDの軸性異常に誘起されたクロスオーバーとなる可能性を発見しました。 さらに、この現象のミクロな基礎付けを、有限バリオン密度における QCD 和則、低エネルギー有効理論、ラ ンダム行列理論などの非摂動的手法を駆使して行いました。なかでも、高バリオン密度におけるディラック 演算子の固有値スペクトルとカラー超伝導ギャップを結びつける新しい一連の和則を発見しました。これらの 研究は、QCD における「ハドロン-クォーク連続性」および「ハドロン-クォーク双対性」という新しい概念 の発展に大きく寄与するものとして高く評価されています。

2.13 市川 豪 君 (駒宮研): Student Paper Award

市川君のポスター発表 "A CCD-based Pixel Detector with Micron Spatial Resolution for Ultra Cold Neutrons" で、超冷中性子を 3 µ m の位置分解能で測定するユニークな測定器を開発したことが評価され、 Nuclear Science Symposium Student Paper Award を受賞しました。

2.14 出田真一郎君 (藤森研): Student Poster Award

出田君は、韓国延世大で開催された The 8th Asia-Pacific Workshop on Novel Quantum Materials における ポスター発表"Universal Relationship between Fermi Arc Length, Energy Gaps, and Critical Temperature of High-*T_c* Cuprate Superconductors "で、高温超伝導体におけるフェルミアーク上の超伝導と超伝導ギャッ プの振る舞いを明らかにしたことが評価され、Student Poster Award を受賞しました。

2.15 森 貴司君 (宮下研): 平成 21 年度理学系研究科研究奨励賞 (修士)

森君は統計力学の静的、動的両面の基礎的性質の研究に意欲的に取り組み、優秀な成果をあげている。非平 衡過程に関しては、射影演算子法による定式化や、マスター方程式を用いた長距離相互作用のもとでの緩和 現象の臨界現象を明らかにし、スピンクロスオーバー物質などでの光誘起相転移の特徴を明らかにした。相 転移現象に関しても、長距離相互作用のもとでの自由エネルギーについて詳しい研究をし、従来予想されて いた平均場近似が厳密になる立つ場合の他に、パラメターメターによっては成り立たない場合が存在するこ とを証明し、それらの間の相転移という新しい問題を提起した。

2.16 鈴木 剛 君 (島野研): 平成 21 年度理学系研究科研究奨励賞 (修士)

鈴木剛君は、修士論文"Si における励起子・電子正孔液滴のテラヘルツ時間領域分光 "を中心とする研究 で、テラヘルツ時間領域分光法を用いて、高密度に光励起された 半導体電子正孔系が示す様々な電子相(励 起子気体、電子正孔プラズマ、電子正孔液滴)形成の初期過程を初めて明らかにしました。この成果は電子 正孔系の金属絶縁体 転移の解明につながるとともに、より低温下で期待される励起子ボースアインシュタイ ン凝縮や電子正孔 BCS 状態の観測に向けても重要な進展をもたらしました。これらの 業績が高く評価され、 平成 21 年度理学系研究科研究奨励賞(修士)を受賞しました。

2.17 角田 直文君 (大塚研): 平成 21 年度理学系研究科研究奨励賞 (修士)

角田直文君は、核力の中でもパイ中間子と直接関係するテンソル力について、ハードコアからの短距離相関 や原子核中で媒質効果を繰り込んだ後でも、テンソル力は元のものからほとんど変わらない特徴を持つことを 示しました。これは不安定核でのシェル構造の変化などに重要な性質であり、論文が PRL に載り Viewpoint に選ばれたばかりでなく、理学系研究奨励賞を受賞しました。

2.18 平野 照幸君(宇宙理論研):平成 21 年度理学系研究科研究奨励賞 (修士)

太陽系外惑星は、1995年の発見以来、天文学・宇宙惑星科学においてもっとも急速に進歩しつつある新し い研究分野である。平野氏は、太陽系外惑星の角運動量という視点から、中心星の前面を通過するトランジッ ト惑星を利用し、トランジット中の吸収線プロファイルのわずかな変形を精密に観測することにより、中心星 の自転軸と惑星の公転軸のなす角度を調べる手法(ロシター効果と呼ばれている)に注目した。観測的研究 として、すばる望遠鏡を用いて中心星の自転軸と惑星公転軸が直交していると思われる系を実際に発見した。 標準的惑星形成モデルは自転軸と公転軸はほぼ平行であることを予言するため、この系の発見は惑星系の角 運動量の起源と進化に対して大きな意義を持つ。また理論的研究として、中心星の自転の効果を取り込むこ とで従来のロシター効果モデルの信頼度を飛躍的に向上させる解析的公式を得た。この公式を用いれば従来 数日かかっていたデータ解析の所要時間を著しく短縮させるのみならず、より広いパラメータ領域での探査 を可能とする。これらの研究業績に対して、平成21年度理学系研究科研究奨励賞(修士)が与えられた。

3 人事異動

[物理学教室に来られた方々]					
谷口	尚子	第2事務分室	2009年4月1日	採用	
上田	美樹	物理事務	2009年4月1日	採用	
佐々オ	生々木 良枝 物理教務 2009 年 4 月 1 日 採用(派遣)		採用(派遣)		
久保田	1 良子	物理図書	2009年5月1日	採用	
今堀	正代	第2事務分室	2009年5月16日	採用	
麻生	洋一	助教	2009年6月1日	採用	
丸屋	久	物理事務	2009年7月1日	配置換(教養学部)	
平原	茂子	物理事務	2009年7月1日	配置換(農学部)	
遠藤	基	助教	2009年7月16日	採用	
八幡	和志	技術職員	2009年9月1日	採用	
和藤	由香子	物理教務	2009年10月16日	採用	
横山	将志	准教授	2009年11月1日	採用(京都大学・助教)	
掛下	照久	特任助教	2009年12月1日	採用	
南文	ζ	物理図書	2010年1月1日	採用	
佐藤	梨沙	物理事務	2010年1月1日	採用(派遣)	
徳永	恭子	第3事務分室	2010年1月1日	採用(派遣)	
諸井	健夫	教授	2010年3月1日	採用(東北大学・准教授)	

[物理学教室から移られた方々]

[初理子教室から移られた力々]					
谷口 尚子	第2事務分室	2009年4月8日	辞職		
石塚 裕美	子 第2事務分室	2009年4月30日	辞職		
岡本 茜	物理事務	2009年6月30日	任期満了(派遣)		
川崎勝	物理事務	2009年7月1日	配置換(日本学術振興会)		
上間 よしさ	みの物理事務	2009年7月1日	配置換(農学部)		
南文	物理図書	2009年7月27日	辞職		
柳瀬 陽一	助教	2009年9月30日	辞職(新潟大学・准教授)		
福富 薫里	第1 事務分室	2009年9月30日	辞職		
小嶋健児	助教	2009年10月31日	辞職(KEK・准教授)		
和藤 由香	子 物理教務	2009年11月30日	辞職		
今村 洋介	助教	2009年12月31日	辞職(東京工業大学・准教授)		
久保田 良	子 物理図書	2009年12月31日	辞職		
小田倉未	央 物理教務	2009年12月31日	任期満了(派遣)		
酒井 英行	教授	2010年3月31日	定年退職		
樫村 圭造	技術職員	2010年3月31日	定年退職		
岩崎 昌子	講師	2010年3月31日	辞職(KEK・准教授)		
佐々木 良林	枝 物理教務	2010年3月31日	任期満了(派遣)		

4 役務分担

役務		担当教員	技術職員・事務職員
専攻長・学科	長	大塚	新井、川崎、田中、
		管波、上間、佐々木	
幹事		相原、福山	新井、川崎、田中、
		管波、上間、佐々木	
専攻主任		宮下	佐々木、小野、小田
専攻副主任		小形	佐々木、小野、小田
常置委員		蓑輪、佐野	佐々木、小野、小田
留学生委員会	委員長	福山	佐々木、小野、小田
教務係		坪野 (理兼任)、小形、藤森、	佐々木、小野、小田
		(福山)、常行 (大学院)	
学生実験		山本、浅井、岡本 (理兼任)	樫村
就職係		牧島、(大学院他部局:久野)	横山
奨学金		青木	佐々木
会計係		浅井	新井、川崎、管波
G-COE		島野	管波、上田
号館関係	1 号 館運営員	駒宮	新井
	旧1号館運営委員	駒宮	新井
部屋割		長谷川	新井
技術部門	(統括)	坪野 (相原)	大塚 (茂)
	試作室	坪野	大 塚 (茂)
	薬品管理	岡本	技術 1
	研究材料・回路	酒井(広)	樫村、蛯原
	IT関連	早野	藤代
	安全衛生	早野	佐伯
	低温	岡本	
	電顕	長谷川	
図書係		上田 (理兼任)、樋口、村尾、小澤	森、南、森村
談話会		初田、藤森、上田、駒宮	田中、蝦原
年次報告		濱口	横山
記録係		平野、中澤、原田	
物品供用官		内田	新井
環境安全		早野	川崎
放射線管理		蓑輪	川崎
物理事務室		福山	新井

*太字は責任者

役務		担当教員	技術職員・事務職員
事務分室	第1	佐野	河野、岩井、福富
	第 2	須藤	原、谷口
	第3	常行	藤原、小野田
理交会		平野	新井
教職員親睦会		中澤	
進学指導		福山	佐々木
進振委員		酒井(広)	佐々木
ホームページ		松尾、中澤	藤代
オープンキャンパス		長谷川	新井
物理オリンピッ	·ク	長谷川	

*太字は責任者

5 教室談話会

2009年11月6日(金) 16:30-18:00

Victor Steinberg ${\mathfrak K}~$ (Department of Physics of Complex Systems, The Weizmann Institute of Science, Israel)

 r Elastic stresses in turbulent flow with polymers: their role in turbulent drag reduction and ways to measure ${}_{J}$

• 平成 22 年 1 月 29 日 (金) 16:30-18:00

江口 徹氏

「超弦理論と現代数学」

• 平成 22 年 2 月 24 日 (水) 15:30~17:00

G. Smoot ${\rm f\!K}$ (Lawrence Berkeley National Lab.) r Cosmology Today ${}_{J}$

平成22年3月5日(金)16:30~18:00
 酒井英行氏 (最終講義)
 「スピンでめぐった原子核物理学」

6 物理学教室コロキウム

- 2009年4月17日(金) 16:30-18:00
 早野 龍五 氏 (東京大学)
 「反陽子へリウム原子:反物質研究で CPT 定理に挑む」
- 2009年5月22日(金) 16:30-18:00
 香取 秀俊 氏(東京大学)
 「光格子時計と光ネットワーク」
- 2009年7月3日(金) 16:30-18:00
 小松 英一郎 氏 (テキサス大学)
 「宇宙論はどこまでわかったか、そしてこれからの宇宙論」
- 2009年10月2日(金) 16:30-18:00
 木下 一彦 氏 (早稲田大学)
 「たんぱく質分子機械が働く仕組み:観れば分かる?」
- 2009年11月27日(金) 16:30-18:00
 福山 秀敏 氏 (東京理科大学)
 「分子系の物性 ひろがる物質科学」
- 2009年12月4日(金) 16:00-17:30
 益川 敏英 氏 (京都産業大学)
 「70年の素粒子、混沌からパラダイムへ」