

Research Center for the Early Universe
Graduate School of Science
University of Tokyo

Annual Report
2012

平成24年度 年次研究報告



東京大学大学院理学系研究科附属
ビッグバン宇宙国際研究センター

2013年7月5日版

Copyright ©ビッグバン宇宙国際研究センター (RESCEU) 2013

この年次報告書のカラー電子版 (pdf ファイル) は <http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/annual.php> から取得
できます。

ご挨拶

日頃より、ビッグバン宇宙国際研究センター（英語名 Research Center for the Early Universe, 略称 RESCEU）の運営にお力添えいただき、厚くお礼を申し上げます。ここに 2012 年度の年次報告をお届けいたします。

本センターは、科研費 COE 形成基礎研究の実行母体「初期宇宙研究センター」を前身として、1999 年度に設置された理学系研究科の附属施設です。ビッグバン宇宙の創生・進化を解明し、その陰の立役者である暗黒エネルギーの本性に迫り、暗黒物質の正体を追いつめ、また宇宙の進化のいろいろな場面でバリオン物質が演じる多彩な振舞いを明らかにすることを、研究目的として掲げています。センターの固有メンバーはおもに理論的研究を行っていますが、本センターではさらに、理学系研究科の物理学専攻、天文学専攻、天文学教育センターなどから、約 10 名の「研究協力者」に参画をお願いするという先進的な構造により、最先端の観測や実験も活発に推進しており、合計 7 つのプロジェクトを擁しています。それらを通じ、可視光の「すばる」望遠鏡（プロジェクト 3）、サブミリ波のアルマ望遠鏡（プロジェクト 4）、X 線の「すざく」衛星（プロジェクト 7）など、最先端の大型宇宙観測装置/施設に大きく貢献するとともに、建造が始まった大型低温重力波望遠鏡「かぐら」にも、プロジェクト 5 とプロジェクト 1 を通じ、重要な役割を果たしています。

プロジェクト 7 の一環として、宇宙反物質の探査を行ってきた BESS 気球実験は、昨 2011 年度にて完了し、今年度はその最終的な取りまとめを行いました。（故）折戸周治教授の後を継ぎ、この 19 年にわたる壮大なプロジェクトを完結に導いた山本明教授は、2012 年度末をもって高エネルギー加速器研究機構を定年退職されました。またプロジェクト 5 で日本の重力波研究の中核を担って来られた、物理学専攻の坪野公夫教授も、同じく今年度末で定年退職されました。研究協力者としての、お 2 人の本センターに対する多大な貢献に、改めて感謝いたします。

センターは 2012 度も、理学系研究科の他専攻・施設と協力するなどの形で、多彩な研究・広報活動を行いました。7 月には、天文学分野における「全国同時七夕講演会」に参加し、12 月にはセンター独自の試みであるクリスマス講演会（3 回目）を開催しました。8 月 6 日の全学オープンキャンパスの際は、本センターは 3 名（計 5 回）の講演を行い、昨年度と同様、超満員の盛況ぶりでした。さらに 2011 年のノーベル物理学賞が、本センターの研究に緊密な関係をもつテーマ「遠距離の超新星観測を通じた宇宙の膨張加速の発見」により、ブライアン・シュミット博士ら三氏に授与されたことに鑑み、2012 年 11 月 19 日、学内のいくつかの部局と共同で、シュミット博士（オーストラリア国立大学ストロムロ山天文台）を安田講堂にお迎えし、「加速する宇宙」と題して一般むけに同時通訳つきで講演いただいたところ、参加者は 670 名に達しました。より専門的なイベントとしては、7 月下旬には恒例のサマースクールを裏磐梯高原にて実施し、6 月には研究協力者が集まり、未来へのサイエンスを語りあう「研究者交流会」を、また年明けの 1 月には外部評価への準備を兼ねた新年会を開催しました。

2012 年度には、重力波に関して、2 つの特筆すべきイベントがありました。その一つは、11 月 12-16 日に小柴ホールにて、第 8 回 RESCEU 国際シンポジウムを“Symposium on General Relativity and Gravitation”と題して JGRG22 と共催したことで、外国人 20 名を含め、165 名の参加者がありました。本研究会ではとくに、世界で建設中の 3 大重力波検出器を代表して、「かぐら」Principal Investigator の梶田隆章教授（東大宇宙線研究所）、LIGO Laboratory Executive Director の David Reitze 教授、VIRGO Fomer Sposkesperson の Francesco Fidecaro 教授に、招待講演を行っていただきました。この研究会ではまた、本センターと関係の深い、佐々木節・京都大学基礎物理学研究所教授、小玉英雄・KEK 教授、二間瀬敏史・東北大学教授の還

暦記念講演も実施しました。もう一つは、「かぐら」の建設が立ち上がったことを受け、そのデータ解析の人材育成を目指し、「KAGRA データ解析スクール」を2回にわたり開催したことです。初回は本郷キャンパスにて9月3～5日に行われ、70名の参加者を得ました。2回目は2月20日～22日、「かぐら」プロジェクト、新学術領域研究「重力波天体の多様な観測による重力波物理学の新展開」、および国立天文台重力波プロジェクト推進室との共催で、国立天文台にて行われ、60名が参加しました。

2012年度のもう一つの特記事項は、1月8～10日にかけて物理学教室と合同で、2005年に1月に続き、外部評価を実施したことです。小林誠・高エネルギー加速器研究機構特別荣誉教授を委員長とし、Gordon Baym教授を含む合計9名の委員に、様々な観点から本センターの活動をご覧いただきました。その結果、「物理学教室と RESCEU の協力は研究と教育の両面において大きな成果をあげている。本委員会はこの協力関係が今後も継続しさらに発展する事を期待する」という評価をいただきました。委員の皆様、とくにご専門に近い、吉村太彦先生（科学技術・学術審議会専門委員）および観山正見先生（広島大学特任教授）に、この場を拝借して厚くお礼を申し上げます。

センター固有のメンバーとしては、8月1日づけで須山輝明さんが、横山研の助教として着任しました。また特任助教として伊藤洋介さんが、特任研究員として筒井亮さんが、ともに昨年に続き在籍しています。本年度はまた横山順一教授が、「インフレーション宇宙論の実証的研究」により、2012年度の井上學術賞を受賞しました。受賞理由は、インフレーションと物質生成を一体的に実現するモデルの構築に初めて成功したこと、既知のすべてのインフレーションモデルを包含する最も一般的な枠組みを構築し、観測と理論の直接比較を可能にしたこと、宇宙マイクロ波背景放射の揺らぎの観測から、インフレーション中に生成した量子的な揺らぎを逆算する方法を開発し、WMAP 衛星の観測結果を初期宇宙に直接に反映させたこと、初期宇宙のプローブとして重力波の重要性に着目した「重力波的宇宙論」の考えを掲げ、重力波検出に向けて理論的な指導性を発揮していることなどで、本センターの大きな慶事となりました。加えて今年度は、坂井南美助教による2012年度の日本天文学会研究奨励賞など、いくつもの受賞がありました。

引き続き、本センターにご支援のほどを、よろしく願いいたします。

2013年6月

センター長 牧島一夫

目次

I	2012年度 ビッグバン宇宙国際研究センター 全般に関する報告	5
1	受賞	7
2	教員, 職員, および研究員	9
3	シンポジウム・研究会	10
3.1	研究交流会	10
3.2	2012年第4回全国同時七夕講演会	10
3.3	第12回「宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会	10
3.4	「高校生のためのオープンキャンパス2012」	12
3.5	KAGRA データ解析スクール @ RESCEU 2012	12
3.6	2011年度ノーベル物理学賞受賞 Brian P. Schmidt 博士講演会	13
3.7	RESCEU Symposium on General Relativity and Gravitation (JGRG 22)	13
3.8	RESCEU 観測的宇宙論ワークショップ	19
3.9	ビッグバンセンタークリスマス講演会 & Party 2012	21
3.10	KAGRA データ解析スクール @ NAOJ 2013	21
4	プレプリント・リスト	23
II	2012年度 プロジェクト別 研究活動報告	33
1	初期宇宙進化論	35
1.1	初期宇宙・相対論	35
1.2	観測的宇宙論	39
1.3	星形成	44
1.4	系外惑星	45
1.5	参考文献	46
2	銀河と星の共進化	56
2.1	新星	56
2.2	超新星	56
2.2.1	ガンマ線バースト	57
3	光赤外線による観測的宇宙論	60
3.1	宇宙及び系外銀河	60
4	地上サブミリ波観測	65
4.1	星・惑星系形成の観測的研究	65
4.1.1	はじめに	65
4.1.2	星形成の観測研究	65
4.1.3	テラヘルツ帯観測技術の開拓	68
4.2	大質量銀河と巨大ブラックホールの形成・進化過程の研究	71
4.2.1	高赤方偏移銀河の観測研究	71
4.2.2	ガンマ線バースト母銀河におけるダストに隠された星形成と星間物質の観測的研究	74
4.2.3	ミリ波サブミリ波帯分光観測に基づく銀河の活動性の研究	74
4.2.4	ミリ波サブミリ波観測装置の開発	76

5	重力波探査	81
5.1	大型低温重力波望遠鏡 KAGRA	81
5.2	宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO	82
5.3	ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA	83
5.4	低温光共振器を用いた超高安定化レーザー光源の開発	83
5.5	極小距離領域における重力法則検証	84
5.6	空間等方性の研究	84
5.7	巨視的振動子の量子測定	85
6	宇宙素粒子物理学	88
6.1	PANDA – 原子炉ニュートリノモニター	88
6.2	Sumico, アクシオンヘリオスコープ実験と Hidden photon 探索実験	89
7	飛翔体を用いた宇宙観測	92
7.1	衛星を用いた X線・ γ 線観測	92
7.1.1	宇宙 X線の発見 50 年	92
7.1.2	科学衛星の運用と稼働状況	92
7.1.3	質量降着するブラックホール	92
7.1.4	中性子星の研究	93
7.1.5	超新星残骸および中心天体	95
7.1.6	銀河面 X線放射の研究	96
7.1.7	銀河団の研究	96
7.1.8	ASTRO-H 衛星計画	96
7.2	BESS 気球実験	99
7.2.1	超伝導スペクトロメータによる宇宙線観測	99
7.2.2	BES-Polar 観測結果	100
7.2.3	まとめ	101
III	参考資料: RESCEU 第 3 回外部評価資料	109
A	参考資料: RESCEU 第 3 回外部評価資料説明	111
B	RESCEU OVERVIEW	112
B.1	History	112
B.2	Research Objectives	112
B.3	Organization	113
B.3.1	Organization structure	113
B.3.2	RESCEU members (staff)	113
B.3.3	International visiting professors	114
B.3.4	Expanded RESCEU (研究協力者集団)	115
B.3.5	Steering committee (運営委員会)	116
B.4	RESCEU projects	117
B.5	RESCEU Activity	118
B.5.1	Annual activities	118
B.5.2	International symposia	118
B.5.3	RESCEU summer schools	119
B.5.4	Outreach activities	119
B.6	Budget	121
B.6.1	Budget evolution	121
B.6.2	External funds	121
B.6.3	DENET: International Research Network for Dark Energy	122
B.7	Future Plans	123
B.7.1	What is unique with RESCEU?	123
B.7.2	Study of extra-solar planets	123
B.7.3	Gravitational waves	124
B.7.4	Other ross-project researches	124

I

2012年度
ビッグバン宇宙国際研究センター
全般に関する報告

1 受賞

横山 順一 教授：第 29 回（2012 年度）井上學術賞

以下の文章は、理学部ニュース 2013 年 3 月号から牧島センター長の祝辞を転載しています。

このたびビッグバン宇宙国際研究センターの横山順一教授は、「インフレーション宇宙論の実証的研究」により、2012 年度の井上學術賞を受賞されました。おめでとうございます。

宇宙は 137 億年前、火の玉状態で誕生した（ビッグバン）と考えられ、その誕生の謎を説明する理論が、本研究科の佐藤勝彦名誉教授らが 1980 年前半に提唱した「インフレーション」の考えです。すなわち、宇宙はその創生期に内包した真空のエネルギーにより急速膨張（インフレーション）して巨視的な大きさに達し、そのエネルギーが熱に転化することで、火の玉宇宙ができたとするものです。この考えは最先端の宇宙観測により強固になりつつありますが、理論の核心部にはまだ多くの異なる学説が並立しています。そんな中で横山教授は、実験や観測により検証できる理論の構築を目ざし、国際的にハイレベルな研究を展開されて来ました。インフレーションと物質生成を一体的に実現するモデルの構築に初めて成功したこと、さらに既知のすべてのインフレーションモデルを包含するもっとも一般的な枠組みを構築し、観測と理論の直接比較を可能にしたこと、宇宙マイクロ波背景放射の揺らぎの観測から、インフレーション中に生成した量子的な揺らぎを逆算する方法を開発し、WMAP 衛星の観測結果を初期宇宙に直接に反映させたこと、初期宇宙のプローブとして重力波の重要性に着目した「重力波的宇宙論」の考えを掲げ、建設が進んでいる重力波望遠鏡 KAGRA や次世代の DECIGO への理論的指導性を発揮しておられることなどが特筆されます。今後ますますのご活躍を祈念いたします。

松原 隆彦 准教授（名古屋大学）：第 17 回日本天文学会林忠四郎賞

1996 年から 2000 年まで須藤研の助手であった松原隆彦氏（現在は名古屋大学准教授）が、「統計的摂動解析理論に基づく観測的宇宙論の開拓」の業績に対して、第 17 回 日本天文学会林忠四郎賞を受賞されました。松原氏は、宇宙大規模構造に関する観測可能量に対して、従来の摂動論の枠組みを超えて非線形性をとり込むなど、主として解析的な方法論を開拓して来ました。その先駆的かつ独創的な研究は、ダークエネルギーの性質や原始密度ゆらぎの統計的性質を実際の観測データから探る上で高い重要性を有しています。さらに松原氏の提唱した方法論は、銀河の赤方偏移サーベイや宇宙マイクロ波背景放射の研究に広く用いられているのみならず、将来のすばる望遠鏡による大規模銀河サーベイにも用いられる基礎的な研究成果です。

坂井 南美 助教（山本研）：2012 年度日本天文学会研究奨励賞

坂井氏は、「低質量原始星天体における暖かい炭素鎖化学の提唱とその進展」に関する業績で標記の賞を受賞した。坂井氏は世界中の最先端電波望遠鏡を駆使し、太陽程度の質量を持つ原始星近傍の化学組成を高感度で測定することで、炭素鎖分子 (C_4H , HC_5N などの炭素が直線状につながった分子) が異常に豊富に存在する原始星天体を発見した。これまで、原始星近傍には飽和有機分子 (CH_3OH , $HCOOCH_3$ など) が特徴的に存在すると考えられていたので、この発見は原始星天体の化学的多様性を示すものとして大きな驚きを持って受け止められた。坂井氏は、その原因として、原始星近傍の暖められた領域で星間塵から CH_4 が蒸発することで効率的に炭素鎖分子を生成するメカニズムを提案した。これが「暖かい炭素鎖化学」(Warm Carbon Chain Chemistry: WCCC) である。WCCC は、その後、理論的研究や坂井氏らの観測的研究で確認され、星間化学過程の新しい概念として定着しつつある。坂井氏が発見した原始星天体の化学的多様性が、原始惑星系円盤、ひいては惑星系にどのように伝播されるかが、現在、注目を集めており、坂井氏は ALMA による観測でその解明を目指している。

細川 隆史 助教 (吉田研) : 日本天文学会奨励賞

宇宙初期と現在の銀河系という大きく異なる環境での大質量星形成を理論的に研究し、優れた成果を上げてきた。特に初期宇宙の初代星形成の研究では、初代星の質量はこれまで考えられてきた質量より一桁ほど小さく典型的には数十太陽質量であることを世界で初めて理論的に予言した。また、質量降着を伴う大質量原始星の進化モデルを初めて構築した。

平野 照幸氏 (須藤研、平成 24 年度東京大学大学院理学系研究科大学院博士課程修了) : 研究奨励賞 (博士課程)

平成 25 年 3 月に東京大学大学院理学系研究科博士課程を修了した平野氏は、博士論文「惑星移動機構解明に向けたトランジット惑星系の軌道傾斜角測定」(2013 年 3 月 25 日)によって、東京大学大学院理学系研究科研究奨励賞を受賞した。

本橋 隼人氏 (横山研、平成 24 年度東京大学大学院理学系研究科大学院博士課程修了) : 研究奨励賞 (博士課程)

平成 25 年 3 月に東京大学大学院理学系研究科博士課程を修了した本橋氏は、博士論文「修正重力理論による加速膨張宇宙の記述とその宇宙論的帰結」(2013 年 3 月 25 日)によって、東京大学大学院理学系研究科研究奨励賞を受賞した。

柴田 大輝 氏 (山本研) : Best Poster Award

柴田氏は 2012 年 12 月 7 日、研究会 “New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory” において、Best Poster Award を受賞した。

國光 太郎 氏 (横山研): Outstanding Presentation Award

國光氏は、2012 年 11 月 12 日～16 日に RESCEU において開催された RESCEU Symposium on General Relativity and Gravitation (JGRG22) で、Outstanding Presentation Award を受賞した。

2 教員，職員，および研究員

ビッグバン宇宙国際研究センター

牧島 一夫	(センター長/教授；併任)
横山 順一	(教授)
茂山 俊和	(准教授)
樽家 篤史	(助教)
坂井 南美	(助教)
平賀 純子	(助教)
須山 輝明	(助教)
Ho Shirley	(外国人客員准教授; 2012/6/25 ~ 7/26)
Jerome, Martin	(外国人客員教授; 2012/9/18 ~ 11/30)
Starobinsky, Alexei A.	(外国人客員教授; 2012/11/1 ~ 12/14, 2013/1/8 ~ 2/8)
伊藤 洋介	(特任助教)
筒井 亮	(特任研究員)
渡辺 悠貴	(特任研究員)
黒柳 幸子	(特任研究員)
成川 達也	(学振研究員)
Lake, Matthew	(外国人特別研究員)
永野 早百合	(事務補佐員)
南澤 三恵子	(事務補佐員)

研究プロジェクトおよび担当者

(無印はセンター固有の教員、上添字付は研究協力者)

初期宇宙進化論	横山 順一、 樽家 篤史、 須藤 靖 ¹ 、 吉田 直紀 ¹
銀河進化理論	茂山 俊和
銀河と宇宙構造の進化	土居 守 ² 、 嶋作 一大 ³
サブミリ波観測	坂井 南美、 山本 智 ¹ 、 河野 孝太郎 ²
重力波探査	坪野 公夫 ¹
暗黒物質・太陽アクシオン直接検出	蓑輪 眞 ¹ 、 井上 慶純 ⁴
飛翔体による宇宙観測	牧島 一夫 ¹ 、 平賀 純子、 山本 明 ⁵

¹ 物理学専攻、² 天文学教育研究センター、³ 天文学専攻、⁴ 素粒子物理国際研究センター、⁵ KEK

3 シンポジウム・研究会

3.1 研究交流会

日時：2012年6月14日(木) 14:45～19:00

場所：東京大学理学部4号館1320号室

プログラム

14:45-15:10	山本 明	「BESS 実験のまとめ」
15:10-15:35	坪野公夫	「KAGRA の現状」
15:35-16:00	伊藤洋介	「重力波データ解析の現状と展望」
16:00-16:25	養輪 眞	「Axion と光」
16:25-16:55		Coffee/Tea break
16:55-17:20	横山順一	「宇宙磁場のなぞ」
17:20-17:45	河野孝太郎	「分子ガスと X 線のホットな関係」
17:45-18:10	牧島一夫	「ASTRO-H で解く 7 つの謎」
18:10-18:35	筒井 亮	「HiZ-GUNDAM 計画」
18:35-19:00	嶋作一大	「もっと光を」

3.2 2012年第4回全国同時七夕講演会

日時：2011年7月5日(木) 18:00～19:00

場所：東京大学理学部1号館小柴ホール

講師：牧島 一夫

講演タイトル：天の川にひそむ多くの謎

3.3 第12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

場所：休暇村裏磐梯（福島県耶麻郡北塩原村桧原）

日時：2012年7月24日（火）～27日（金）

プログラム

7月24日(火) afternoon (Chair :J. Yokoyama) in English

14:00 – 14:10	Jun'ichi Yokoyama	Opening Adress (10)
14:10 – 15:10	Shirley Ho	What can you learn from Large Scale Structure?
15:10 – 15:25		Break
15:25 – 16:25	Bernard Carr	Black holes and the Generalized Uncertainty Principle (Part 1)
16:25 – 16:40		break
16:40 – 17:40	Bernard Carr	Black holes and the Generalized Uncertainty Principle (Part 2)

7月25日(水) 午前 (Chair :R. Tsutsui) in English

9:30 – 9:50	Teruaki Suyama	Metric perturbation from inflationary magnetic field and generic bound on inflation models (15+5)
9:50 – 10:10	Toshiya Namikawa	Lensing reconstruction from cosmic microwave background (15+5)
10:10 – 10:30	Sachiko Kuroyanagi	Early Universe Tomography with CMB and Gravitational Waves (15+5)
10:30 – 10:50	Yuhei Miyamoto	Evading the pulsar constraints on the cosmic string tension in supergravity inflation (15+5)
10:50 – 11:05		break
11:05 – 11:25	Hayato Motohashi	Sterile neutrino and $f(R)$ gravity (15+5)
11:25 – 11:45	Yousuke Itoh	Propagation of gravitational waves (15+5)
11:45 – 12:05	Lake, Matthew James	Cosmic strings with twisted magnetic flux lines and wound-strings in extra dimensions (15+5)
afternoon		Free Discussion

7月26日(木) 午前 (座長 :伊藤) 日本語セッション

9:30 – 9:50	成川達也	Observational Tests of Modified Gravity Models - Toward Realistic Tests- (15+5)
9:50 – 10:10	中間智弘	Self-consistent initial conditions for primordial black hole formation (15+5)
10:10 – 10:30	國光太郎	Higgs Condensation after Inflation (15+5)
10:30–10:45		break
10:45 – 11:05	筒井亮	ガンマ線バーストによる観測的宇宙論 (15+5)
11:05 – 11:25	樽家篤史	(My) cosmological studies with SuMIRe
11:25 – 11:45	平賀純子	X線 CCD:Astro-H/SXI 開発とその先

7月26日(木) 午後 (座長 :須山) プロジェクト報告 I

13:30 – 13:40	牧島一夫	Opening
13:40 – 14:20	山本智	サブミリ波地上観測プロジェクト (40)
14:20 – 15:00	坪野公夫	KAGRA, DECIGO, DPF (40)
15:00 – 15:30	茂山俊和	マグネターと超新星爆発の関係 (30)
15:30 – 15:45		break
15:45 – 16:25	牧島一夫	「すざく」から ASTRO-H へ (40)
16:25 – 17:05	土居守	超新星による観測的宇宙論 (40)
17:05 – 17:35	吉田直紀	ボルツマン方程式の積分法 (30)

7月27日(金) (座長 :黒柳) プロジェクト報告 II

9:00 – 9:40	嶋作一大	遠方銀河の見つけ方 (40)
9:40 – 10:20	藪輪 眞	Reactor antineutrino measurement at Ohi power plant (40)
10:20 – 10:35		break
10:35 – 11:15	山本明	気球飛翔・超伝導スペクトロメータを用いた宇宙起源反粒子の探索: BESS 実験 (40)
11:15 – 11:45	横山順一	ヒッグス場によるインフレーション (30)
		昼食後解散

3.4 「高校生のためのオープンキャンパス2012」

場所：東京大学

ビッグバンセンター講演開催場所：東京大学理学部1号館2階207号室

日時：2012年8月7日（火）

主催：東京大学

プログラム

10:00-10:40, 13:50-14:30	伊藤洋介	アインシュタインの重力波で宇宙を聴く日
11:00-11:40, 14:50-15:30	茂山俊和	年老いた星が語る銀河の歴史
12:50-13:30	山本明	南極気球で探る宇宙からの反物質

3.5 KAGRA データ解析スクール @ RESCEU 2012

場所：東京大学理学部4号館1220号室

日時：2012年9月3日（月）～5日（水）

主催：ビッグバン宇宙国際研究センター

世話人：KAGRA データ解析サブグループ

世界でも数少ない試みとして、大学院生など若手研究者を主な対象としたKAGRA データ解析スクールを開催した。日本の重力波検出器KAGRAは、2015年末の稼働を目指して、東大宇宙線研究所などが中心となって、現在神岡鉱山の地下に建設中である。数年以内に実データが手に入るが、一方で、重力波データ解析研究者は、日本では6人あまりである。そこで、来るべき重力波天文学を見据え、若手データ解析研究者の発掘・育成を図るため、RESCEUの主催により『KAGRA データ解析スクール @ RESCEU 2012』を開催した。会議には実に70人の研究者・大学院生・学部生が、関西圏を含む国内から参加した。座学その他、C言語による演習授業を用意し、参加者に実際のデータ解析手法を体験してもらった。重力波データ解析スクールは世界でいくつか開催されているが、演習を含むスクールは、ユニークな試みである。スクール後のアンケートからは内容への十分な満足とスクールへの建設的な提言、重力波天文学への興味の表明を得ることができ、極めて実質的で有意義なスクールであった。

プログラム

9月3日（月）

13:20-13:30		挨拶・事務連絡
13:30-14:30	神田 展行	重力波天文学・重力波データ解析への誘い
14:50-16:40	田越 秀行	重力波データ解析講義1
17:00-18:30	田越 秀行	重力波データ解析実習1

9月4日（火）

9:00-12:30	田越 秀行	重力波データ解析講義2
13:30-15:30	田越 秀行	重力波データ解析実習2
16:00-18:00	田越 秀行	重力波データ解析実習3
19:00-21:00	伊藤 洋介	重力波データ解析のための統計学初歩（補講）

9月5日（水）

9:00-12:00	田越 秀行	重力波データ解析実習4
13:00-15:00	田越 秀行	重力波データ解析実習5

3.6 2011 年度ノーベル物理学賞受賞 Brian P. Schmidt 博士講演会

日時：2012 年 11 月 19 日 (月)

場所：東京大学本郷キャンパス安田講堂

主催、後援：東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター、ビッグバン宇宙国際研究センター、東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構、東京大学大学院理学系研究科（後援）

備考：講演は英語ですが同時通訳が付き、スライドに日本語の用語解説を入れました。

プログラム

司会：茂山 俊和 准教授（ビッグバン宇宙国際研究センター）

18:00 – 18:05 相原 博昭 (理学系研究科長) ご挨拶

18:05 – 19:00 Brian P. Schmidt “The Accelerating Universe”

3.7 RESCEU Symposium on General Relativity and Gravitation: The 22nd workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG 22)

Schedule: November 12(Mon.)-16(Fri.), 2012

Venue: Koshiba Hall, The University of Tokyo, Hongo, Tokyo, Japan

Program

November 12, Mon.

9:00		Registration
10:00		Opening
Chair:	Masahiro Kawasaki	
10:15	Abhey Ashtekar	The pre-inflationary dynamics of LQC Confronting quantum gravity with observations
11:00	Shinji Mukohyama	Nonlinear massive gravity and cosmology
11:45	Mihoko Nojiri	The standard model and beyond after LHC at 8 TeV
12:30		Lunch
14:00		Parallel Sessions
18:30		Reception at the Sanjo Conference Hall
20:00		End

November 13, Tue.

Chair:	Shinji Mukohyama	
9:00	Andrei Frolov	Primordial non-Gaussianity from preheating
9:45	Jinn-Ouk Gong	Towards more precise estimates of the primordial bispectrum
10:30		break
Chair:	Yasufumi Kojima	
11:00	Teruaki Suyama	Testing the origin of primordial perturbation: Use of bi- and tri-spectrum
11:45	Matthias Bartelmann	Recent developments in gravitational lensing
12:30		Lunch
Chair:	Teruaki Suyama	
14:00	Ryo Tsutsui	Measuring distance with gamma-ray bursts
14:30	Yousuke Itoh	Stacking of cluster profiles
15:00	Kent Yagi	Black Hole Solution and Binary Gravitational Waves in Dynamical Chern-Simons Gravity
15:30	Yongmin Cho	Restricted Gravity and Abelian Dominance in Einstein's Theory
16:00	Hideki Maeda	Gauss-Bonnet braneworld redux: A novel scenario for the bouncing universe
16:30		Poster and beer
19:00		End

November 14, Wed.

Chair:	Nobuyuki Kanda	
9:00	Hideyuki Tagoshi	Search for gravitational wave events with KAGRA and the world-wide network of laser interferometers in the advanced detector era
9:45	Takaaki Kajita	Status of KAGRA
10:30		break
Chair:	Seiji Kawamura	
11:00	Francesco Fidecaro	Virgo: design, results and perspectives
11:45	David Reitze	LIGO: Recent Results, Plans, and Prospects
12:30		Lunch
12:30		Parallel Sessions
18:10		End

November 15, Thur.

Chair:	Hideki Asada	
9:00	Jerome Martin	The cosmological constant problem
9:45	Masahiro Takada	SuMIRe project: Hyper Suprime-Cam (HSC) and Prime Focus Spectrograph (PFS)
10:30		break
Chair:	Hideyuki Tagoshi	
11:00	Luc Blanchet	The first law of binary black hole dynamics
11:45		Group photo and lunch
Chair:	Naoshi Sugiyama	
13:30	Hideo Kodama	Charmed by spacetime physics – from four to higher dimensions
14:15	Misao Sasaki	A few thoughts on gravity and cosmology
15:00	Toshifumi Futamase	GR in the observational cosmology
		Self-service excursion to Ooedo Onsen Monogatari in Odaiba (A free shuttle bus for participants from abroad leaves at 16:15.)
17:00		Onsen (Hot springs and social hour)
18:30		Banquet at NAKAMURA-ZA

November 16, Fri.

Chair:	Masaru Shibata	
9:00	Yuichiro Sekiguchi	Gravitational-wave and neutrino emission from black hole-neutron star binary merger
9:45	Roman Konoplya	Stability of black holes: summary of some results for the past 10 years
10:30		break
Chair:	Takahiro Tanaka	
11:00	Jaume Garriga	Vacuum transitions and the arrow of time
11:45	Alexei Starobinsky	Duration and decay branching ratios of stochastic inflation
12:30	Ken-ichi Maeda	Conclusion

Parallel Session**Monday Parallel Session A @ Koshiba Hall (Chair: Tsutomu Kobayashi)**

14:00	Sugimura Kazuyuki	Non-gaussian bubbles from tunneling in the inflationary era
14:20	Takamizu Yuichi	Non-linear superhorizon perturbation and nonlinear gauge transformation
14:40	Pi Shi	Curvature perturbation spectrum in two-field inflation with a turning trajectory
15:00	Noumi Toshifumi	Effective field theory approach to quasi-single inflation
15:20	Minamitsuji Masato	Revisiting perturbations of a scalar field in an anisotropic universe
15:40	Nakayama Kazunori	Probing dark radiation with inflationary gravitational waves
16:00		Break
16:30	Mukaida Kyohei	Dynamics of oscillating scalar field in thermal environment
16:50	Kunimitsu Taro	Higgs Condensation in the Inflationary Universe
17:10	Kuroyanagi Sachiko	Forecast constraints on cosmic strings from future CMB, pulsar timing and gravitational wave direct detection experiments
17:30	Panpanich Sirachak	Effects of Chameleon Scalar field on Rotation Curves of the Galaxies
17:50	Nakama Tomohiro	Self-consistent initial conditions for primordial black hole formation
18:10		End

Monday Parallel Session B @ Room 233, Science Bldg 1, 2F (Chair: Yasusada Nambu)

14:00	Nozawa Masato	On the vacua of maximal gauged supergravity
14:20	Watanabe Yuki	Gravity as the origin of spontaneous symmetry breaking in an inflationary universe
14:40	Kobayashi Shinpei	Fuzzy Objects in Noncommutative Geometry and Their Applications
15:00	Zhang Hongsheng	Critical exponents of gravity with quantum perturbations
15:20	Yamada Kei	Triangular solution to the general relativistic three-body problem
15:40	Tsukamoto Naoki	Research of the celestial objects by the gravitational lensing
16:00		Break
16:30	Arraut Ivan	Dark Matter and Dark Energy as a single manifestation of a fundamental length scale.
16:50	Hikichi Takayuki	Wave function in 2+1 dimensional causal dynamical triangulation
17:10	Tanabe Kentaro	Selfgravity effects of Blackfold
17:30	Suzuki Ryotaku	Analysis of Gregory-Laflamme mode in large D limit
17:50	Narita Makoto	Global properties of solutions to the Einstein-matter equation
18:10		End

Wednesday Parallel Session A @ Koshiba Hall (Chair: Ken-ichi Oohara)

14:00	Kyutoku Koutarou	Electromagnetic counterparts to binary neutron star mergers
14:20	Kiuchi Kenta	General relativistic simulations of magnetized binary neutron star merger
14:40	Sotani Hajime	Shear Oscillations in Hadron-Quark Mixed Phase
15:00	Yoshida Shin'ichirou	Non-axisymmetric oscillations of rotating relativistic stars by conformally flat approximation
15:20	Saijo Motoyuki	Nonlinear effect of r-mode instability in uniformly rotating stars
15:40	Harada Tomohiro	Upper limits of particle emission from high-energy collision and reaction near a maximally rotating Kerr black hole
16:00		Break
16:30	Ishihara Hideki	Stable Null Bound Orbits around a Black Ring
16:50	Yoshino Hirotaka	Axion bosonova
17:10	Seto Osamu	Curvaton induced modulated reheating
17:30	Bamba Kazuharu	Finite-time future singularities and Rip cosmology in $f(T)$ gravity
17:50	Isoyama Soichiro	Adiabatic evolution of resonant orbits in Kerr space time
18:10		End

Wednesday Parallel Session B @ Room 233, Science Bldg 1, 2F (Chair: Atsushi Taruya)

14:00	Namikawa Toshiya	An Improved Method for CMB Lensing Reconstruction and Its Cosmological Applications
14:20	Motohashi Hayato	Cosmological constraints on sterile neutrino mass in $f(R)$ gravity
14:40	Narikawa Tatsuya	Testing gravity with galaxy cluster
15:00	Kimura Rampei	Constraints on general second-order scalar-tensor models from gravitational Cherenkov radiation
15:20	Yamauchi Daisuke	Weak lensing generated by vector perturbations and detectability of cosmic strings
15:40	Gorbunov Dmitry	Higgs-inflation and the latest LHC results
16:00		Break
16:30	Zhang Yingli	Tunneling fields in non-linear Massive Gravity
16:50	Nishizawa Atsushi	Probing for massive gravitational-wave background with a ground-based detector network
17:10	Yoshida Daisuke	New Cosmological Solutions in Massive Gravity
17:30	Sakakihara Yuki	inflation in bimetric gravity
17:50	Shiraishi Maresuke	Parity violation in the CMB bispectrum
18:10		End

Posters

- | | | |
|-----|----------------------|--|
| P1 | Yi-Peng Wu | Matter density perturbations in modified teleparallel gravity theories of dark energy |
| P2 | Takashi Hamana | Numerical simulations of gravitatioanl lensing |
| P3 | Tomohiro Takahashi | Instability of Charged Lovelock Black Holes |
| P4 | Chulmoon Yoo | Black Hole Universe |
| P5 | Naomasa Fushimi | Criterion for bound (or unbound) orbits in the Kottler spacetime |
| P6 | Takashi Hiramatsu | Equivalence Principle Violation in Vainshtein Screened Two-Body Systems |
| P7 | Kouji Nakamura | Problems in nth-order extension of the gauge-invariant perturbation theory |
| P8 | Kohkichi Konno | Non-inertial effects on Landau levels |
| P9 | Hiroki Okawara | Quantum interferometer in Chern-Simons modified gravity |
| P10 | Masato Kaneyama | Excess power method with the Hilbert-Huang transform in search for gravitational wave signals |
| P11 | Junko Ohashi | Potential-driven Galileon inflation |
| P12 | Masashi Kimura | High velocity collision of charged shells around a black hole |
| P13 | Ken'ichi Saikawa | Evolution and thermalization of axion dark matter in the condensed regime |
| P14 | Kouichi Nomura | Ghost in Multimetric gravity |
| P15 | Shuichiro Yokoyama | Scale-dependent bias with the higher order primordial non-Gaussianity |
| P16 | Shinya Tomizawa | Local Penrose inequality and non-axisymmetric perturbations |
| P17 | Takao Kitamura | Gravitational lensing by modified lens gravity |
| P18 | Koki Nakajima | Deflection angle of light in an Ellis wormhole geometry |
| P19 | Yasumichi Sano | Gravitational field of a rotating ring around a Schwarzschild black hole |
| P20 | Hideyoshi Arakida | Effect of the cosmological constant on the bending of light and the cosmological lens equation |
| P21 | Takashi Torii | Graphical approach to the Lovelock black holes |
| P22 | Haruna Murakami | Short-range gravity experiment searching for a large extra dimension |
| P23 | Shunichiro Kinoshita | Time evolution of D-brane in holographic QCD |
| P24 | Jonathan White | Curvature perturbation in multi-field inflation with non-minimal coupling |
| P25 | Ryo Saito | Features in the CMB spectrum as a probe of heavy physics during inflation |
| P26 | Keiki Saito | High frequency limit for gravitational perturbations of cosmological models in modified gravity theories |
| P27 | Koji Izumi | Perturbative solutions to the lens equation for multiple lens planes: SIS lens |
| P28 | Hisaaki Shinkai | Wormhole dynamics in Gauss-Bonnet gravity |
| P29 | Yuta Yamada | Numerical Study of 5-dimensional Gravitational Collapses |
| P30 | Takao Fukui | Effect of Metric Perturbations in Vacuum 5D Universe on Material 4D Universe |

P31	Yuuiti Sendouda	Gravitational wave background in Einstein plus Weyl gravity
P32	Saki Tanaka	Search of strong gravitational field around nuclei using electron-nuclear scattering experiment by geodetic precession
P33	Hiroshi Saida	Theory for observational verification of black hole existence
P34	Kotaro Fujisawa	Equilibrium states of magnetized disc-central compact object systems
P35	Seiju Ohashi	Gravitational collapse of the Einstein cluster in the Lovelock gravity
P36	Takuya Maki	Einstein equation of state and its cosmological applications
P37	Yuhei Miyamoto	The effect of gauge fields on oscillating scalar fields at finite temperature
P38	Hiroshi Suzuki	Cosmic wiggly string in black hole spacetime
P39	Kazunari Eda	Effect of dark matter halos around IMBHs on gravitational wave

3.8 RESCEU 観測的宇宙論ワークショップ

日時：2012年11月27日(火)～29日(木)

場所：東京大学本郷キャンパス理学部化学館5階講堂

世話人：市來 淨興、樽家 篤史、浜名 崇、日影 千秋

11月27日から29日にかけて行った観測的宇宙論ワークショップは、当日参加を含めて77名の参加者が集まり、国内研究会として大変盛況なものになった。観測の大型化に伴い、特定の観測プロジェクトに関する研究会は近年頻繁に行われているが、本ワークショップではそうしたプロジェクトにとらわれず、理論・観測双方から研究者の興味・関心に基づく研究について講演してもらい、広く意見交換することができた。参加者の多くが若手で、この分野の関心が高いことが示された。

プログラム

11月27日(火)

10:00 - 10:10		開会の挨拶
10:10 - 11:00	杉山 直	CMBによる観測的宇宙論
11:00 - 11:30	市來 淨興	独立成分分析を用いた PLANCK CMB データからの CO 成分の除去
11:30 - 12:00	茅根 裕司	宇宙マイクロ波背景放射偏光観測実験 POLARBEAR による B-mode 測定の現状と今後
12:00 - 12:30	松村 知岳	宇宙マイクロ波背景放射偏光測定のための小型衛星 LiteBIRD
12:30 - 13:30		Lunch
13:30 - 14:00	松尾 宏	光子統計からわかる宇宙背景放射の物理
14:00 - 14:30	山内 大介	Gauge-invariant formulation for cosmic shear and CMB-lensing
14:30 - 15:00	並河 俊弥	CMB の弱い重力レンズ精密測定に向けた方法論の構築とその宇宙論への応用
15:00 - 15:20	大山 祥彦	宇宙論的な 21cm 線放射と CMB の将来観測によるニュートリノ質量とその階層構造への制限
15:20 - 15:50		Coffee Break
15:50 - 16:40	高橋 慶太郎	銀河間磁場で探る初期宇宙
16:40 - 17:10	山崎 大	宇宙背景放射とビッグバン元素合成による原初磁場の制限
17:10 - 17:40	白石 希典	Non-Gaussian observables due to primordial vector field
17:40 - 18:00	嵯峨 承平	Magnetic field generation in Einstein-Aether gravity

11月28日(水)

9:30 - 10:20	戸谷 友則	FastSound プロジェクトの現状と展望
10:20 - 10:40	舎川 元成	すばる望遠鏡 FMOS による FastSound 計画
10:40 - 11:00	橋本 拓也	静止系 UV-可視分光によって分かった Ly α 輝線銀河の観測的性質
11:00 - 11:20		Coffee Break
11:20 - 11:50	松本 敏雄	近赤外背景放射の観測
11:50 - 12:10	石川 敬視	N 体シミュレーションを用いたハロー分布の RSD 解析による線形成長率 f 測定の系統誤差の検証
12:10 - 12:30	岡 アキラ	N 体シミュレーションを用いた LRG バイアスモデルの構築
12:30 - 13:30		Lunch
13:30 - 14:20	山本 一博	銀河団で探る修正重力
14:20 - 14:50	成川 達也	Vainshtein mechanism in cluster lensing
14:50 - 15:10	岡田 裕行	RSD を用いた修正重力理論の制限
15:10 - 15:30	青山 尚平	2つの有限の質量の粒子に崩壊する暗黒物質が観測量に与える影響について
15:30 - 16:00		Coffee Break
16:00 - 16:50	松原 隆彦	宇宙の大規模構造による観測的宇宙論
16:50 - 17:20	立川 崇之	Lagrange 的摂動論の高次解とその応用
17:20 - 17:50	西道 啓博	原始揺らぎの非ガウス性のハローバイアスに及ぼす影響
17:50 - 18:20	斎藤 俊	銀河クラスタリング分布パワースペクトルの最適測定法
18:40		懇談会

11月29日(木)

10:00 - 10:50	高田 昌広	宇宙論における撮像、分光銀河サーベイの相補性
10:50 - 11:20	日影 千秋	Where are Luminous Red Galaxies? Using correlation and lensing measurements to correct the Finger-of-God
11:20 - 11:50	正木 彰伍	Understanding the nature of LRGs: Connecting LRGs to central and satellite subhalos
11:50 - 12:20	西澤 淳	Baryon Acoustic Oscillation with Cross Correlation of Spectroscopic and Photometric Galaxies
12:20 - 13:30		Lunch
13:30 - 14:00	高橋 龍一	QSO 重力レンズ多重のフラックス異常問題に対する視線方向のダークハローの影響について
14:00 - 14:30	加用 一者	弱い重力レンズ場バイスペクトルの共分散行列
14:30 - 14:50	白崎 正人	重力レンズミンコフスキー汎関数を使った宇宙論的テスト
14:50 - 15:10	島袋 隼士	Probing minihalo abundance with 21cm absorption

3.9 ビッグバンセンタークリスマス講演会 & Party 2012 ～中高生・大学生へのメッセージ～

日時：2012年12月25日(火)

場所：東京大学理学部1号館中央棟小柴ホール

備考：東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター第11回公開講演会を兼ねています。

プログラム

- | | | |
|---------------|-------|--------------------|
| 15:00 - 15:55 | 須山 輝明 | 「どンドン広がる宇宙とその仲間たち」 |
| 16:00 - 16:55 | 筒井 亮 | 「星たちが奏でる物語」 |
| 17:00 - | | 小柴ホール前ホワイエにてパーティー |

3.10 KAGRA データ解析スクール @ NAOJ 2013

場所：国立天文台すばる棟大セミナー室

日時：2013年2月20日(月)～22日(水)

主催：ビッグバン宇宙国際研究センター、KAGRA、新学術領域研究「重力波天体の多様な観測による重力波物理学の新展開」、国立天文台重力波プロジェクト推進室

世話人：KAGRA データ解析サブグループ、中村康二(国立天文台)

『KAGRA データ解析スクール @ RESCEU 2012』の成功とその後のアンケートによる次回開催への要望から、早くも2回目のデータ解析スクールを開催することになった。開催場所はTAMA 検出器の見学というサービスを考慮して国立天文台とした。スクール後のアンケートによると、TAMA 見学はとくに楽しんでもらえたようである。また、外部講師による検出器・スペクトル解析・重力波源(超新星爆発)に関する講義はどれも好評であった。第2回目となる本スクールは、第1回の実績を認められ、RESCEU 以外に、KAGRA、新学術領域研究「重力波天体の多様な観測による重力波物理学の新展開」、国立天文台重力波プロジェクト推進室からの支援を得ることができた。今回のスクールの参加者はリピーターを含め60人であった。その中には福岡から学部3年生も参加していた。スクールの内容は前回同様、座学と演習にわかれ、演習ではoctaveを駆使したバースト解析の実際について学んだ。スクール後、3月1日・2日に大阪市立大学で開催された上記新学術領域のシンポジウムにおいてスクールに関する報告がなされたが、理解と賛同を得ることができた(領域代表からアジア出張スクールのご提言もいただいた)。

プログラム

2月20日(月)

- | | | |
|-------------|-------|-------------------------|
| 13:00-13:10 | | Opening |
| 13:10-14:00 | 端山 和大 | 講義1 バースト重力波とその解析・探索について |
| 14:00-14:45 | 端山 和大 | 演習1 今回の解析環境の確認 |
| 14:45-15:00 | | (休憩) |
| 15:00-16:30 | 麻生 洋一 | 講義2 干渉計基礎講義 |
| 16:30-16:40 | | (休憩) |
| 17:00-18:00 | 端山 和大 | 演習2 バースト波形探索(1) |

2月21日(火)

9:00-10:30	固武 慶	講義3 超新星マルチメッセンジャー関連
10:30-10:40		(休憩)
10:40-12:00	端山 和大	演習3 バースト波形探索(2)
12:00-13:00		(休憩)
13:00-14:30	三尾 典克	講義4 スペクトル解析基礎講義
14:30-17:30	端山 和大、神田 展行、伊藤 洋介 辰巳 大輔	演習4 バースト波形探索(3) TAMA 見学 (20名程度の数班にわかれて逐次)
18:00-20:00		懇談会

2月22日(水)

9:00-12:00	端山 和大	演習5 バースト波形探索(4)
12:00-12:50	端山 和大	演習の答え合わせ、解説
12:50-13:00		Closing

4 プレプリント・リスト

RESCEU-100/12

f(R) Cosmology and Massive Neutrinos, H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 10, 35 (2012).

RESCEU-99/12

Mass and metallicity constraints on supernova progenitors derived from integral field spectroscopy of the environment, Kuncarayakti, H., Doi, M., Aldering, G., Arimoto, N., Maeda, K., Morokuma, T., Pereira, R., Usuda, T., and Hashiba, Y., Death of Massive Stars: Supernovae and Gamma-Ray Bursts, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 279, p. 343–344.

RESCEU-98/12

Supernova Progenitor Mass and Metallicity from Integral Field Spectroscopic Study of the Environment, Kuncarayakti, H., Doi, M., Aldering, G., Arimoto, N., Maeda, K., Morokuma, T., Pereira, R., Usuda, T., and Hashiba, Y., Galactic Archaeology: Near-Field Cosmology and the Formation of the Milky Way. ASP Conference Proceedings, Vol. 458. San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, p.43–44.

RESCEU-97/12

Observational Studies of Type Ia Supernovae at High and Intermediate redshift, Doi, M., Suzuki, N., and Supernova Cosmology Project 2012, Galactic Archaeology: Near-Field Cosmology and the Formation of the Milky Way. ASP Conference Proceedings, Vol. 458. San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, p.21–25.

RESCEU-96/12

Search for a Stochastic Gravitational-wave Background with Torsion-bar Antennas, Ayaka Shoda et al, J. Phys.: Conf. Ser. bf 363 012017 (2012).

RESCEU-95/12

Extragalactic Science and Cosmology with the Subaru Prime Focus Spectrograph (PFS), Richard Ellis, Masahiro Takada, Hiroaki Aihara, Nobuo Arimoto, Kevin Bundy, Masashi Chiba, Judith Cohen, Olivier Dore, Jenny E. Greene, James Gunn, Timothy Heckman, Chris Hirata, Paul Ho, Jean-Paul Kneib, Olivier Le Fevre, Hitoshi Murayama, Tohru Nagao, Masami Ouchi, Michael Seiffert, John Silverman, Laerte Sodre Jr, David Spergel, Michael A. Strauss, Hajime Sugai, Yasushi Suto, Hideki Takami, Rosemary Wyse, the PFS Team [arXiv:1206.0737 (astro-ph)] Publication of Astronomical Society of Japan, (2012) in press.

RESCEU-94/12

Protostellar Feedback and Final Mass of the Second-generation Primordial Stars, Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida, Kazuyuki Omukai, Harold W. Yorke; The Astrophysical Journal, **760** (2012) 37L

RESCEU-93/12

Imaging Simulations of the Sunyaev-Zel'dovich Effect for ALMA, Kenkichi Yamada, Tetsu Kitayama, Shigehisa Takakuwa, Daisuke Iono, Takahiro Tsutsumi, Kotaro Kohno, Motokazu Takizawa, Kohji Yoshikawa, Takuya Akahori, Eiichiro Komatsu, Yasushi Suto, Hiroshi Matsuo, Ryohei Kawabe; Publication of Astronomical Society of Japan, **64** (2012)102

RESCEU-92/12

A Common Proper Motion Stellar Companion to HAT-P-7, Norio Narita, Yasuhiro H. Takahashi, Masayuki Kuzuhara, Teruyuki Hirano, et al.; Publications of the Astronomical Society of Japan, **64** (2012) L7

RESCEU-91/12

Planet-Planet Eclipse and the Rossiter-McLaughlin Effect of a Multiple Transiting System: Joint Analysis of the Subaru Spectroscopy and the Kepler Photometry, Teruyuki Hirano, Norio Narita, Bun'ei Sato, Yasuhiro H. Takahashi, Kento Masuda, Yoichi Takeda, Wako Aoki, Motohide Tamura, Yasushi Suto; *The Astrophysical Journal Letters*, **759** (2012) L36

RESCEU-90/12

Obliquities of Hot Jupiter Host Stars: Evidence for Tidal Interactions and Primordial Misalignments, Simon Albrecht, Joshua N. Winn, John Asher Johnson, Andrew W. Howard, Geoffrey W. Marcy, Paul Butler R., Pamela Arriagada, Jeffrey D. Crane, Stephen A. Shectman, Ian B. Thompson, Teruyuki Hirano, Gaspar Bakos, Joel D. Hartman; *The Astrophysical Journal*, **757** (2012) 18

RESCEU-89/12

Direct and fast calculation of regularized cosmological power spectrum at two-loop order, Atsushi Taruya, Francis Bernardeau, Takahiro Nishimichi, Sandrine Codis; *Physical Review D*, **86** (2012) 103528

RESCEU-88/12

Scatter and bias in weak lensing selected clusters, Takashi Hamana, Masamune Oguri, Masato Shirasaki, and Masanori Sato; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, (2012) **425** (3) 2287-2298

RESCEU-87/12

Can Ground-based Telescopes Detect The Oxygen 1.27 Micron Absorption Feature as a Biomarker in Exoplanets ?, H. Kawahara, T. Matsuo, M. Takami, Y. Fujii, T. Kotani, N. Murakami, M. Tamura, and O. Guyon; *The Astrophysical Journal*, **758** (2012) 13

RESCEU-86/12

Perturbation theory for nonlinear halo power spectrum: the renormalized bias and halo bias, A. Nishizawa, M. Takada and T. Nishimichi; [arXiv:1212.4025 (astro-ph)]*The Astrophysical Journal*, **758** (2012) 13

RESCEU-85/12

Scale Dependence of the Halo Bias in General Local-Type Non-Gaussian Models I: Analytical Predictions and Consistency Relations, T. Nishimichi; *JCAP* (2012) **08** 037

RESCEU-84/12

Resonant Signatures of Heavy Scalar Fields in the Cosmic Microwave Background R. Saito, M. Nakashima, Y. Takamizu, and J. Yokoyama; [arXiv:1206.2164 (astro-ph)]*JCAP* 2012 **1211** 036

RESCEU-83/12

Length sensing and control strategies for the LCGT interferomete, Y. Aso, K. Somiya and O. Miyakawa; *Class. Quantum Grav.* **29** 124008 (2012).

RESCEU-82/12

Two-phase ICM in the Central Region of the Rich Cluster of Galaxies A1795: A Joint Chandra, XMM-Newton, and Suzaku View, Gu, Liyi; Xu, Haiguang; Gu, Junhua; Kawaharada, Madoka; Nakazawa, Kazuhiro; Qin, Zhenzhen; Wang, Jingying; Wang, Yu; Zhang, Zhongli; Makishima, Kazuo; [arXiv:1202.3196 (astro-ph)]*Astrophys. J.*, vol.**749**, Issue 2, article id. 186, 18 pp. (2012).

RESCEU-81/12

Possible Detection of an Emission Cyclotron Resonance Scattering Feature from the Accretion-powered Pulsar 4U 1626-67, Iwakiri, W. B.; Terada, Y.; Mihara, T.; Angelini, L.; Tashiro, M. S.; Enoto, T.; Yamada, S.; Makishima, K.; Nakajima, M.; Yoshida, A.; [arXiv:1205.1804 (astro-ph)]*Astrophys. J.*, vol.**751**, Issue 1, article id. 35, 11 pp. (2012).

RESCEU-80/12

Observation of thundercloud-related gamma rays and neutrons in Tibet, Tsuchiya, H.; Hibino, K.; Kawata, K.; Hotta, N.; Tateyama, N.; Ohnishi, M.; Takita, M.; Chen, D.; Huang, J.; Miyasaka, M.; and 12 coauthors; [arXiv:1204.2578 (astro-ph)]*Phys. Rev. D*, vol. **85**, Issue 9, id. 092006

RESCEU-79/12

Inverse Compton X-Ray Emission from Supernovae with Compact Progenitors: Application to SN2011fe, Margutti, R.; Soderberg, A. M.; Chomiuk, L.; Chevalier, R.; Hurley, K.; Milisavljevic, D.; Foley, R. J.; Hughes, J. P.; Slane, P.; Fransson, C.; and 32 coauthors; [arXiv:1202.0741 (astro-ph)]*Astrophys. J.*, vol.**751**, Issue 2, article id. 134, 10 pp. (2012).

RESCEU-78/12

Data-Oriented Diagnostics of Pileup Effects on the Suzaku XIS, Yamada, Shin'ya; Uchiyama, Hideki; Dotani, Tadayasu; Tsujimoto, Masahiro; Katsuda, Satoru; Makishima, Kazuo; Takahashi, Hiromitsu; Noda, Hirofumi; Torii, Shunsuke; Sakurai, Soki; and 4 coauthors [arXiv:1112.1844 (astro-ph)]*Publ. Astron. Soc. Japan*, Vol.**64**, No.3, Article No.53, 12 pp., (2012).

RESCEU-77/12

Broadband Spectral Analysis of the Galactic Ridge X-Ray Emission, Yuasa, Takayuki; Makishima, Kazuo; Nakazawa, Kazuhiro; [arXiv:1205.1574 (astro-ph)]*Astrophys. J.*, vol.**753**, Issue 2, article id. 129, 16 pp. (2012).

RESCEU-76/12

A New Low Magnetic Field Magnetar: The 2011 Outburst of Swift J1822.3-1606, Rea, N.; Israel, G. L.; Esposito, P.; Pons, J. A.; Camero-Arranz, A.; Mignani, R. P.; Turolla, R.; Zane, S.; Burgay, M.; Possenti, A.; and 13 coauthors; [arXiv:1203.6449 (astro-ph)]*Astrophys. J.*, vol.**754**, Issue 1, article id. 27, 13 pp. (2012).

RESCEU-75/12

Accretion Geometry of the Low-Mass X-Ray Binary Aquila X-1 in the Soft and Hard States, Sakurai, Soki; Yamada, Shin'ya; Torii, Shunsuke; Noda, Hirofumi; Nakazawa, Kazuhiro; Makishima, Kazuo; Takahashi, Hiromitsu; [arXiv:1201.5891 (astro-ph)]*Publ. Astron. Soc. Japan*, Vol.**64**, No.4, Article No.72, 12 pp., (2012).

RESCEU-74/12

Gamma-Ray Observations of the Orion Molecular Clouds with the Fermi Large Area Telescope, Ackermann, M.; Ajello, M.; Allafort, A.; Antolini, E.; Baldini, L.; Ballet, J.; Barbiellini, G.; Bastieri, D.; Bechtol, K.; Bellazzini, R.; and 135 coauthors; [arXiv:1207.0616 (astro-ph)]*Astrophys. J.*, vol.**756**, Issue 1, article id. 4, 16 pp. (2012).

RESCEU-73/12

Spectral comparison of weak short bursts to the persistent X-rays from the magnetar 1E 1547.0-5408 in its 2009 outburst, Enoto, T.; Nakagawa, Y. E.; Sakamoto, T.; Makishima, K.; [arXiv:1209.1714 (astro-ph)]*Mon. Not. R. Astron. Soc.*, vol. **427**, Issue 4, pp. 2824-2840.

RESCEU-72/12

Possible existence of Ep-Lp and Ep-Eiso correlations for Short Gamma-Ray Bursts with a factor 5 to 100 dimmer than those for Long Gamma-Ray Bursts, Ryo Tsutsui, Daisuke Yonetoku Takashi Nakamura, Keitaro Takahashi, Yoshiyuki Morihara; [arXiv:1208.0429 (astro-ph)] *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 431, Issue 2, p.1398-1404.

RESCEU-71/12

Identifying Subclasses of Long Gamma-Ray Bursts with Cumulative Light Curve Morphology of Prompt Emissions, Ryo Tsutsui, Takashi Nakamura, Daisuke Yonetoku, Keitaro Takahashi, Yoshiyuki Morihara; [arXiv:1201.2763 (astro-ph)] *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol.65, No.1, Article No.3, 11 pp (2013).

RESCEU-70/12

Gamma-Ray Bursts are precise distance indicators similar to Type Ia Supernovae?, Ryo Tsutsui, Takashi Nakamura, Daisuke Yonetoku, Keitaro Takahashi, Yoshiyuki Morihara; [arXiv:1205.2954 (astro-ph)].

RESCEU-69/12

Prospects for frequency comparison of Sr and Hg optical lattice clocks toward 1e-18 uncertainties, Frequency Control Symposium (FCS), H. Katori, et al, *IEEE International* pp. 1-6 (2012).

RESCEU-68/12

Optics Design and Optimizations of the Multi-color TES Bolometer Camera for the ASTE Telescope, Takekoshi, T., Minamidani, T., Nakatsubo, S., Oshima, T., Kawamura, M., Matsuo, H., Sato, T., Halverson, N. W., Lee, A. T., Holzapfel, W. L., Tamura, Y., Hirota, A., Suzuki, K., Izumi, T., Sorai, K., Kohno, K., Kawabe, R.; IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. **2** (2012) 584-592.

RESCEU-67/12

NRO M 33 All-Disk Survey of Giant Molecular Clouds (NRO MAGiC). II Dense Gas Formation, Onodera, S., Kuno, N., Tosaki, T., Muraoka, K., Miura, R. E., Kohno, K., Nakanishi, K., Sawada, T., Komugi, S., Kaneko, H., Hirota, A., and Kawabe, R.; Publ. Astron. Soc. Japan, **64** (2012) article no.133 (15 pp).

RESCEU-66/12

A deep ATCA 20 cm radio survey of the AKARI Deep Field South near the South Ecliptic Pole, White, G. J., Hatsukade, B., Pearson, C., Takagi, T., Sedgwick, C., Matsuura, S., Matsuhara, H., Serjeant, S., Nakagawa, T., Lee, H. M., Oyabu, S., Jeong, W.-S., Shirahata, M., Kohno, K., Yamamura, I., Hanami, H., Goto, T., Makiuti, S., Clements, D. L., Malek, K., and Khan, S. A.; Mon. Not. R. Astron. Soc., **427** (2012) 1830-1846.

RESCEU-65/12

Giant Molecular Cloud Evolutions in the Nearby Spiral Galaxy M33, Miura, R. E., Kohno, K., Tosaki, T., Espada, D., Hwang, N., Kuno, N., Okumura, S. K., Hirota, A., Muraoka, K., Onodera, S., Minamidani, T., Komugi, S., Nakanishi, K., Sawada, T., Kaneko, H., and Kawabe, R.; Astrophys. J. , **761** (2012) article id.37 (23 pp).

RESCEU-64/12

Imaging Simulations of the Sunyaev-Zel'dovich Effect for ALMA, Yamada, K., Kitayama, T., Takakuwa, S., Iono, D., Tsutsumi, T., Kohno, K., Takizawa, M., Yoshikawa, K., Akahori, T., Komatsu, E., Suto, Y., Matsuo, H., and Kawabe, R.; Publ. Astron. Soc. Japan, **64** (2012) article no.102 (16 pp.).

RESCEU-63/12

Initial Results from Nobeyama Molecular Gas Observations of Distant Bright Galaxies, Iono, D., Hatsukade, B., Kohno, K., Kawabe, R., Ikarashi, S., Ichikawa, K., Kodama, T., Motohara, K., Nakajima, T., Nakanishi, K., Ohta, K., Ota, K., Saito, T., Suzuki, K., Tadaki, K.-i., Tamura, Y., Ueda, J., Umehata, H., Yabe, K., Yoshida, T., Yuma, S., Kuno, N., Takano, S., Iwashita, H., Handa, K., Higuchi, A., Hirota, A., Ishikawa, S., Kimura, K., Maekawa, J., Mikoshiba, H., Miyazawa, C., Miyazawa, K., Muraoka, K., Ogawa, H., Onodera, S., Saito, Y., Sakai, T., Takahashi, S., and Yun, M. S.; Publ. Astron. Soc. Japan, **64** (2012) L2 (4 pp.).

RESCEU-62/12

Design Evolution of the Spiderweb TES Bolometer for Cosmology Applications, Westbrook, B., Lee, A., Meng, X., Suzuki, A., Arnold, K., Shirokoff, E., George, E., Aubin, F., Dobbs, M., MacDermid, K., Hanany, S., Raach, K., Aboobaker, A., Hubmayr, J., Oshima, T., Kawamura, M., and Kohno, K.; Journal of Low Temperature Physics, **167** (2012) 885-891.

RESCEU-61/12

A Ly alpha Emitter with an Extremely Large Rest-frame Equivalent Width of $\sim 900 \text{ \AA}$ at $z = 6.5$: A Candidate Population III-dominated Galaxy?, N. Kashikawa and 15 coauthors; [arXiv:1210.4933 (astro-ph)] The Astrophysical Journal, Volume 761, Issue 2, article id. 85, 10 pp. (2012).

RESCEU-60/12

The Si/CdTe semiconductor detector for hard X-ray imager (HXI) onboard ASTRO-H, Hagino K., Nakano T., Sato G., Takeda S., Odaka H., Watanabe S., Nakazawa K., Kokubun M., Takahashi T., and the HXI/SGD Team, proc: HIGH ENERGY GAMMA-RAY ASTRONOMY: 5th International Meeting on High Energy Gamma-Ray Astronomy, AIP Conf. Proc. Vol. 1505, pp. 809-812 (2012).

RESCEU-59/12

What are being discovered by the forefront cosmic X-ray observations?, Makishima, K., The 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG11), AIP Conf. Proc. Vol. 1484, pp.161-168 (refereed; 2012).

RESCEU-58/12

Optical, UV and soft x-ray transmission of optical blocking layer for the x-ray CCD, Kawai, K., Kohmura, T., Ikeda, S., Kaneko, K., watanabe, T., Tsunemi, H., Hayashida, K., Anabuki, N., Nakajima, H., Ueda, S., Tsuru, T. G., Dotani, T., Ozaki, M., Matsuta, K., Fujinaga, T., Kitamoto, S., Murakami, H., Hiraga, J., et al., AIP Conf. Proc. Vol. 1427, pp.255-256 (2012).

RESCEU-57/12

Diversity of Type Ia Supernovae Imprinted in Chemical Abundances, T. Tsujimoto and T. Shigeyama; [arXiv:1210.7829 (astro-ph)] The Astrophysical Journal Letters, Volume 760, Issue 2, article id. L38, 5 pp. (2012).

RESCEU-56/12

Probing explosion geometry of core-collapse supernovae with light curves of the shock breakout, A. Suzuki and T. Shigeyama; [astro-ph] Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 279, p. 285-288 (2012).

RESCEU-55/12

Soft X-ray response of the x-ray CCD camera directly coated with optical blocking layer, Ikeda, S., Kohmura, T., Kawai, K., Kaneko, K., Watanabe, T., Tsunemi, H., Hayashida, K., Anabuki, N., Nakajima, H., Ueda, S., Tsuru, T. G., Dotani, T., Ozaki, M., Matsuta, K., Fujinaga, T., Kitamoto, S., Murakami, H., Hiraga, J., et al., AIP Conf. Proc. Vol. 1427, pp.253-254 (2012).

RESCEU-54/12

Initial Results from Nobeyama Molecular Gas Observations of Distant Bright Galaxies Iono, D., Hatsukade, B., Kohno, K., Kawabe, R., Ikarashi, S., Ichikawa, K., Kodama, T., Motohara, K., Nakajima, T., Nakanishi, K., Ohta, K., Ota, K., Saito, T., Suzuki, K., Tadaki, K.-i., Tamura, Y., Ueda, J., Umehata, H., Yabe, K., Yoshida, T., Yuma, S., Kuno, N., Takano, S., Iwashita, H., Handa, K., Higuchi, A., Hirota, A., Ishikawa, S., Kimura, K., Maekawa, J., Mikoshiba, H., Miyazawa, C., Miyazawa, K., Muraoka, K., Ogawa, H., Onodera, S., Saito, Y., Sakai, T., Takahashi, S., Yun, M. S.; 2012, PASJ, **64**, L2, 4 pp.

RESCEU-53/12

A New 100-GHz Band Two-Beam Sideband-Separating SIS Receiver for Z-Machine on the NRO 45-m Radio Telescope, Nakajima, T., Kimura, K., Nishimura, A., Iwashita, H., Miyazawa, C., Sakai, T., Iono, D., Kohno, K., Kawabe, R., Kuno, N., Ogawa, H., Asayama, S., Tamura, T., Noguchi, T., 2012, PASP, **125**, 252-262

RESCEU-52/12

The 3 mm Spectral Line Survey toward the Lynds 1157 B1 Shocked Region. I. Data, T. Yamaguchi, S. Takano, Y. Watanabe, N. Sakai, T. Sakai, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, N. Hirano, S. Takakuwa, Y. Aikawa, H. Nomura, and S. Yamamoto, Publ. Astron. Soc. Japan **64**, 105 (45 pp) (2012).

RESCEU-51/12

Detection of Far Infrared Emission from Galaxies and Quasars in the Galactic Extinction Map by Stacking Analysis, T.Kashiwagi, K.Yahata, Y.Suto; [arXiv:1212.0307 (astro-ph)] Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.65, No.2, Article No.43, 12 pp (2013).

RESCEU-50/12

Theoretical Models of Dark Energy, Jaewon Yoo and Yuki Watanabe, arXiv:1212.4726, Int. J. Mod. Phys. D 21, 1230002 (2012) [53 pages].

RESCEU-49/12

Revising the Halofit Model for the Nonlinear Matter Power Spectrum, R. Takahashi, M. Sato, T. Nishimichi, and A. Taruya, M. Oguri; [arXiv:1208.2701 (astro-ph)] The Astrophysical Journal, Volume 761, Issue 2, article id. 152, 10 pp. (2012).

RESCEU-48/12

Probing primordial non-Gaussianity with weak-lensing Minkowski functionals, M. Shirasaki, N. Yoshida, T. Hamana and T. Nishimichi; [arXiv:1204.4981 (astro-ph)] The Astrophysical Journal, Volume 760, Issue 1, article id. 45, 6 pp. (2012).

RESCEU-47/12

Ultra Slow-Roll Inflation and the non-Gaussianity Consistency Relation, Jerome Martin, Hayato Motohashi, and Teruaki Suyama; [arXiv:1211.0083 (astro-ph)] Phys. Rev. D **87** (2013) 023514.

RESCEU-46/12

Forecast constraints on cosmic strings from future CMB, pulsar timing and gravitational wave direct detection experiments, Sachiko Kuroyanagi, Koichi Miyamoto, Toyokazu Sekiguchi, Keitaro Takahashi, Joseph Silk; [arXiv:1210.2829 (astro-ph)] Physical Review D, vol. 87, Issue 2, id. 023522 (2013).

RESCEU-45/12

Gravitational wave signal from massive gravity, A. Emir Gumrukcuoglu, Sachiko Kuroyanagi, Chunshan Lin, Shinji Mukohyama, Norihiro Tanahashi; [arXiv:1208.5975 (hep-th)] Classical and Quantum Gravity, Volume 29, Issue 23, id. 235026 (2012).

RESCEU-44/12

Primordial Spikes from Wrapped Brane Inflation, Takeshi Kobayashi and Jun'ichi Yokoyama; Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, Issue 02, article id. 005, pp. (2013).

RESCEU-43/12

Consequences of a stochastic approach to the conformal invariance of inflationary correlators, Hayato Motohashi, Teruaki Suyama and Jun'ichi Yokoyama; [arXiv:1210.2497 (hep-th)] Phys. Rev. D **86** (2012) 123514.

RESCEU-42/12

Mapping Earth Analogs from Photometric Variability: Spin-Orbit Tomography for Planets in Inclined Orbits, Yuka Fujii and Hajime Kawahara; [arXiv:1204.3504 (astro-ph)] The Astrophysical Journal, Volume 755, Issue 2, article id. 101, 14 pp. (2012).

RESCEU-41/12

Self-accelerating solutions in massive gravity on an isotropic reference metric, Hayato Motohashi and Teruaki Suyama; [arXiv:1208.3019 (hep-th)] Phys. Rev. D **86**, 081502(R) (2012).

RESCEU-40/12

Higgs condensation as an unwanted curvaton, Taro Kunimitsu, Jun'ichi Yokoyama; [arXiv:1208.2316 (hep-ph)] Physical Review D, vol. 86, Issue 8, id. 083541 (2012).

RESCEU-39/12

Weak lensing generated by vector perturbations and detectability of cosmic strings, D. Yamauchi, T. Namikawa, and A. Taruya; [arXiv:1205.2139 (astro-ph)] Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, Issue 10, article id. 030 (2012).

RESCEU-38/12

RegPT: Direct and fast calculation of regularized cosmological power spectrum at two-loop order, A. Taruya, F. Bernardeau, T. Nishimichi, and S. Codis; [arXiv:1208.1191 (astro-ph)] Physical Review D, vol. 86, Issue 10, id. 103528 (2012).

RESCEU-37/12

Cosmic strings with twisted magnetic flux lines and wound-strings in extra dimensions, Matthew Lake and Jun'ichi Yokoyama; Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, Issue 09, article id. 030 (2012).

RESCEU-36/12

DNC/HNC Ratio of Massive Clumps in Early Evolutionary Stages of High-Mass Star Formation, T. Sakai, N. Sakai, K. Furuya, Y. Aikawa, T. Hirota, and S. Yamamoto; [arXiv:1201.4430 (astro-ph)] Astrophys. J., **747**, 140 (10 p) (2012).

RESCEU-35/12

CH Radio Emission from Heiles Cloud 2 As a Tracer of Molecular Cloud Evolution, N. Sakai, H. Maezawa, T. Sakai, K.M. Menten, and S. Yamamoto, Astron. Astrophys. **546**, A103 (8 pp) (2012).

RESCEU-34/12

3.1 THz Heterodyne Receiver Using an NbTiN Hot-Electron Bolometer Mixer and a Quantum Cascade Laser, S. Shiba, Y. Irimajiri, T. Yamakura, H. Maezawa, N. Sekine, I. Hosako, and S. Yamamoto; IEEE Tran. Terahertz Sci. Tech. **2**, 22-28 (2012).

RESCEU-33/12

Search for Antihelium with the BESS-Polar Spectrometer, Abe, K., Fuke, H., Haino, S., Hams, T., Hasegawa, M., Horikoshi, A., Itazaki, A., Kim, Kumazawa, T., Kusumoto, A., Lee, M.H., Makida, Y., Matsuda, S., Matsukawa, Y., Matsumoto, K., Mitchell, J.W., Myers, Z., Nishimura, J., Nozaki, M., Orito, R., Ormes, J.F., Sakai, K., Sasaki, M., Seo, E.S., Shikaze, Y., Shinoda, R., Streitmatter, R.E., Suzuki, J., Takasugi, Y., Takeuchi, K., Tanaka, K., Thakur, N., Yamagami, T., Yamamoto, A., Yoshida, T., and Yoshimura, K.; [arXiv:1201.2967 (astro-ph)]Phys. Rev. Lett., **108**, 131301 (2012).

RESCEU-32/12

Full bispectra from primordial scalar and tensor perturbations in the most general single-field inflation model, X. Gao, T. Kobayashi, M. Shiraishi, M. Yamaguchi, J. Yokoyama, and S. Yokoyama.; Progress of Theoretical and Experimental Physics, (2013), Issue 5, id.053E03

RESCEU-31/12

The source counts of submillimetre galaxies detected at $\lambda = 1.1$ mm, K. S. Scott, G. W. Wilson, I. Aretxaga, J. E. Austermann, E. L. Chapin, J. S. Dunlop, H. Ezawa, M. Halpern, B. Hatsukade, D. H. Hughes, R. Kawabe, S. Kim, K. Kohno, J. D. Lowenthal, A. Montana, K. Nakanishi, T. Oshima, D. Sanders, D. Scott, N. Scoville, Y. Tamura, D. Welch, M. S. Yun, and M. Zeballos [arXiv:1203.2609 (astro-ph)]MNRAS **423** (2012) 575-589.

RESCEU-30/12

First Detection of a Subkiloparsec Scale Molecular Outflow in the Starburst Galaxy NGC 3628, A.-L. Tsai, S. Matsushita, A. K. H. Kong, H. Matsumoto, and K. Kohno [arXiv:1204.3414 (astro-ph)]Astrophys. J. **752** (2012) article id. 38.

RESCEU-29/12

Constraints on Obscured Star Formation in Host Galaxies of Gamma-Ray Bursts, B. Hatsukade, T. Hashimoto, K. Ohta, K. Nakanishi, Y. Tamura, and K. Kohno [arXiv:1201.4947 (astro-ph)]Astrophys. J. **748** (2012) article id. 108.

RESCEU-28/12

Probing Circumnuclear Environments with the HCN($J = 3-2$) and HCO+($J = 3-2$) Lines: Case of NGC 1097, P.-Y. Hsieh, P. T. P. Ho, K. Kohno, C.-Y. Hwang, and S. Matsushita [arXiv:1201.0336 (astro-ph)]Astrophys. J. **747** (2012) article id. 90.

RESCEU-27/12

A mobile antineutrino detector with plastic scintillators, Yasuhiro Kuroda, Shugo Oguri, Yo Kato, Ryoko Nakata, Yoshizumi Inoue, Chikara Ito, Makoto Minowa [arXiv:1206.6566v1 (hep-ex)] Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Volume 690, p. 41-47 (2012).

RESCEU-26/12

The Tokyo Axion Helioscope, R. Ohta, Y. Akimoto, Y. Inoue, M. Minowa, T. Mizumoto, S. Moriyama, T. Namba, Y. Takasu, A. Yamamoto [arXiv:1201.4622v1 (astro-ph)] Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Volume 670, p. 73-78 (2012).

RESCEU-25/12

Spectroscopic Confirmation of Three z-dropout Galaxies at $z = 6.844-7.213$: Demographics of Ly α Emission in $z \sim 7$ Galaxies, Y. Ono and 12 coauthors [arXiv:1107.3159 (astro-ph)] The Astrophysical Journal, Volume 744, Issue 2, article id. 83, 13 pp. (2012).

RESCEU-24/12

Average Metallicity and Star Formation Rate of Ly α Emitters Probed by a Triple Narrowband Survey, K. Nakajima and 11 coauthors [arXiv:1105.2824 (astro-ph)] The Astrophysical Journal, Volume 745, Issue 1, article id. 12, 19 pp. (2012).

RESCEU-23/12

Dust Attenuation and H α Star Formation Rates of $z \sim 0.5$ Galaxies, C. Ly, M. A. Malkan, N. Kashikawa, K. Ota, K. Shimasaku, M. Iye, T. Currie [arXiv:1202.0278 (astro-ph)] The Astrophysical Journal Letters, Volume 747, Issue 1, article id. L16, 7 pp. (2012).

RESCEU-22/12

Discovery of a Protocluster at $z \sim 6$, J. Toshikawa and 12 coauthors [arXiv:1203.1326 (astro-ph)] The Astrophysical Journal, Volume 750, Issue 2, article id. 137, 12 pp. (2012).

RESCEU-21/12

The First Systematic Survey for Ly α Emitters at $z = 7.3$ with Red-sensitive Subaru/Suprime-Cam, T. Shibuya, N. Kashikawa, K. Ota, M. Iye, M. Ouchi, H. Furusawa, K. Shimasaku, T. Hattori [arXiv:1112.3997 (astro-ph)] *The Astrophysical Journal*, Volume 752, Issue 2, article id. 114, 11 pp. (2012).

RESCEU-20/12

Gas Motion Statistics of Ly α Emitters at $z \sim 2$ Using UV and Optical Emission Lines, T. Hashimoto, M. Ouchi, K. Shimasaku, Y. Ono, K. Nakajima, M. Rauch, J. C. Lee, S. Okamura [arXiv:1206.2316 (astro-ph)] *The Astrophysical Journal*, Volume 765, Issue 1, article id. 70, 15 pp. (2013).

RESCEU-19/12

The Stellar Population and Star Formation Rates of $z \sim 1.5-1.6$ [O II] Emitting Galaxies Selected from Narrow-Band Emission-Line Surveys, C. Ly, M. A. Malkan, N. Kashikawa, M. Hayashi, T. Nagao, K. Shimasaku, K. Ota, N. R. Ross [arXiv:1206.4303 (astro-ph)] *The Astrophysical Journal*, Volume 757, Issue 1, article id. 63, 14 pp. (2012).

RESCEU-18/12

Early evolution of spherical ejecta expanding into the circumstellar matter at ultra-relativistic speeds, Shigeyama, Toshikazu; Suzuki, Akihiro; Nakamura, Ko [arXiv:1202.5833 (astro-ph)].

RESCEU-17/12 *Type-Ia Supernova Remnant Shell At $Z = 3.5$ Seen In The Three Sightlines Toward The Gravitationally Lensed Qso B1422+231*, Hamano, Satoshi; Kobayashi, Naoto; Kondo, Sohei; Tsujimoto, Takuji; Okoshi, Katsuya; Shigeyama, Toshikazu [arXiv:1206.3646 (astro-ph)] *The Astrophysical Journal* Volume 754 Number 2 article id. 88, 15 pp. (2012).

RESCEU-16/12

Effects of Magnetic Fields on the Propagation of Nuclear Flames in Magnetic White Dwarfs, M. Kutsuna and T. Shigeyama [arXiv:1202.1403 (astro-ph)] *The Astrophysical Journal*, Volume 749, Issue 1, article id. 51, 6 pp. (2012).

RESCEU-15/12

Tentative Detection of Deuterated Methane toward the Low-Mass Protostar IRAS 04368+2557 in L1527, N. Sakai, Y. Shirley, T. Sakai, T. Hirota, Y. Watanabe, and S. Yamamoto, *Astrophys. J.* **758**, L4 (4 pp) (2012).

RESCEU-14/12

Distribution of CH₃OH in NGC1333 IRAS4B, N. Sakai, C. Ceccarelli, S. Bottinelli, T. Sakai, and S. Yamamoto, *Astrophys. J.* **754**, 70 (8 pp)(2012).

RESCEU-13/12

Feedback effects of aspherical supernova explosions on galaxies, Bekki, Kenji, Shigeyama, Toshikazu, Tsujimoto, Takuji, 2012 MNRAS **428**, Issue 1, p.L31-L35

RESCEU-12/12

Submillimetre Galaxies in Cosmological Hydrodynamic Simulations, Ikko Shimizu, Naoki Yoshida, Takashi Okamoto, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **427** (2012) 2866

RESCEU-11/12

Rapidly Accreting Supergiant Protostars: Embryos of Supermassive Black Holes?, Takashi Hosokawa, Kazuyuki Omukai, Harold W. Yorke, *The Astrophysical Journal*, **756** (2012) 93.

RESCEU-10/12

Self-consistent initial conditions for primordial black formation, A. G. Polnarev, Tomohiro Nakama and Jun'ichi Yokoyama; *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, Issue 09, article id. 027 (2012).

RESCEU-9/12

Metric perturbation from inflationary magnetic field and generic bound on inflation models, Teruaki Suyama and Jun'ichi Yokoyama *Physical Review D*, vol. 86, Issue 2, id. 023512 (2012).

RESCEU-8/12

Reheating after $f(R)$ inflation, Hayato Motohashi and Atsushi Nishizawa; [arXiv:1204.1472 (astro-ph)] *Phys. Rev. D* **86**, 083514 (2012).

RESCEU-7/12

Evading the pulsar constraints on the cosmic string tension in supergravity inflation, Kohei Kamada, Yuhei Miyamoto, Jun'ichi Yokoyama; [arXiv:1204.3237 (astro-ph)] Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, Issue 10, article id. 023 (2012).

RESCEU-6/12

Measurements of Stellar Inclinations for Kepler Planet Candidates, Teruyuki Hirano, Roberto Sanchis-Ojeda, Yoichi Takeda, Norio Narita, Joshua N. Winn, Atsushi Taruya, and Yasushi Suto [arXiv:1205.3233 (astro-ph)]Astrophys. J. **756** (2012) 66-76.

RESCEU-5/12

Cosmology based on $f(R)$ Gravity admits 1 eV Sterile Neutrinos, Hayato Motohashi, Alexei A. Starobinsky, and Jun'ichi Yokoyama [arXiv:1203.6828 (astro-ph)]Phys. Rev. Lett. **110**, 121302 (2013).

RESCEU-4/12

Generalized Higgs inflation, Kohei Kamada, Tsutomu Kobayashi, Tomo Takahashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama [arXiv:1203.4059 (hep-ph)] Physical Review D, vol. 86, Issue 2, id. 023504 (2012).

RESCEU-3/12

Black hole perturbation in the most general scalar-tensor theory with second-order field equations I: the odd-parity sector, Tsutomu Kobayashi, Hayato Motohashi, Teruaki Suyama [arXiv:1202.4893 (gr-qc)]Phys. Rev. D **85**, 084025 (2012).

RESCEU-2/12

Fully non-linear equivalence of δN and covariant formalisms, Teruaki Suyama, Yuki Watanabe and Masahide Yamaguchi Physical Review D, vol. 85, Issue 8, id. 083504 (2012).

RESCEU-1/12

Runnings in the Curvaton, Takeshi Kobayashi and Tomo Takahashi [arXiv:1203.3011 (astro-ph)] Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, Issue 06, article id. 004, pp. (2012).

II

2012年度 プロジェクト別 研究活動報告

1 初期宇宙進化論

——基本法則に基づいた宇宙の創生進化の理論的研究—— (横山・須藤・吉田・樽家・須山・伊藤)

宇宙物理学はその対象が極めて多岐に亘っているのみならず、方法論も多様であり、非常に学際的な体系をなしている。本プロジェクトでは、素粒子物理学、原子核物理学、プラズマ物理学、流体力学、一般相対性理論、などの基礎物理学を駆使して宇宙の諸階層の現象の本質的な理解にせまる研究を、観測と密接な関わりのもとで遂行している。

初期宇宙 相対論

われわれの住むこの宇宙は、今から 137 億年の昔、インフレーションという急速な膨張期を経験したことによって古典的な時空構造として生まれ、そのエネルギーが解放されることによって灼熱の状態となり、フリードマン的な膨張を開始した。膨張にともなう温度の降下によってハドロン、原子核、原子が形成され、さらにガスがかたまり銀河や星などの天体が形成され、豊かな構造を持つ現在の宇宙が創られた。これが物理学に基づいて描きだされてきた現在の宇宙進化像である。しかし宇宙の進化には多くの謎が残されている。またさらに近年の技術革新の粋を用いた宇宙論的観測の爆発的進歩によって新たな謎も生じている。宇宙論のもっとも根源的謎はこの 3 次元の空間と 1 次元の時間を持った宇宙がいかにかに始まったかという問題である。「初期宇宙・相対論」は、インフレーション宇宙論に代表される、素粒子的宇宙論の進歩を基礎とし、さらにより根源的な問題として残されている宇宙の創生・進化の研究を目的としている。具体的には、現実的な素粒子理論に基づいたインフレーションモデルの構築、密度揺らぎの生成機構の解明、揺らぎの進化や非線形性の理解、バリオン・ダークマター・ダークエネルギーという宇宙のエネルギー組成の起源、などを中心に研究を進めている。

以上の理論的研究とは別に、来るべき重力波天文学の確立に向けて、我々は重力波データ解析方法の研究をスタートした。日本の重力波検出器 KAGRA は 2015 年末にはその初期観測を開始する。一方、日本ではデータ解析専門家は 6 人しかおらず、データを得ても解析がなされないという非常に危惧がある。このような状況を打破すべく、本プロジェクト 1 では、重力波データ解析方法の研究および人材育成に乗り出している。

観測的宇宙論

宇宙の誕生の瞬間を出発として宇宙の進化を説明しようとするのが素粒子的宇宙論の立場であるとすれば、「観測的宇宙論」は、逆に現在の宇宙の観測データを出発点として過去の宇宙を探ろうとする研

究分野である。現在そして近い将来において大量に提供される宇宙論的観測データを理論を用いて正しく解釈する、さらにコンピュータシミュレーションを通じて、ダークマター、宇宙初期の密度揺らぎのスペクトル、宇宙の質量密度、膨張率、宇宙定数など宇宙の基本パラメータを決定することで現在の宇宙像を確立するとともに宇宙の進化の描像を構築することが「観測的宇宙論」の目的である。

なかでも、われわれはダークエネルギーを一大テーマとして研究に取り組んでいる。とくに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、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、などを行っている。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。

星形成

最近の大型望遠鏡や宇宙望遠鏡を用いた深宇宙探査により、130 億年以上も前、つまり宇宙が誕生してから数億年という早期に存在した銀河やブラックホールが発見されている。ビッグバンの後文字通り暗黒となった宇宙にいつ、どのように光り輝く天体が生まれたのか。宇宙初期の巨大なブラックホールはどのように成長したのだろうか。第一世代の天体はその後の銀河形成や宇宙の進化に大きな影響を及ぼすと考えられており、現代天文学のホットトピックの一つである。次世代の大型望遠鏡により第一世代天体の形成や宇宙進化の最初の段階が明らかになると期待されている。我々はこのような状況を踏まえつつ、第一世代星やブラックホールの形成進化を研究しつつある。

系外惑星

本プロジェクトの担当者により、数年前から太陽系外惑星の探査の新たな地平を切り開く研究を展開している。今年度も、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、をめざした研究を行った。これらの業績に基づき、また天文学専攻に太陽系外惑星の観測家が得られたことから、2013 年度より太陽系外惑星研究は新たなプロジェクトとして、ビッグバン宇宙国際研究センターの一翼を担うことになった。

1.1 初期宇宙・相対論

Generalized G-inflation モデルにおける三点相関

作用の段階では高階微分を含むが、それを変分して得られる場の方程式は 2 階微分までしか含まない理論を、一般化したガリレオン理論と呼ぶ。同じ性質を持つ理論として 1970 年代にホルンデスキー理論というものが提案されていた。われわれは昨年度、これらが数学的に同等であることを示し、それに基

づいて最も一般的な単一場インフレーションモデルである Generalized G-inflation モデルを提唱した。今年度はこの理論における密度ゆらぎとテンソルゆらぎの3点関数を全て計算し、どの組み合わせからどのような物理的情報が得られるかを明らかにした [6]。

初期ゆらぎにスパイクを生成する機構の研究

WMAP や Planck による宇宙背景放射のパワースペクトルの観測データには、単純なべき乗則のスペクトルを持った初期ゆらぎでは説明できないような、スパイク状のフィーチャーが存在することが知られている。われわれはスーパーstring理論におけるブレーンの運動によりインフレーションが起こるモデルを構築し、インフレーション中に余剰次元のモードが励起され、振動することによって初期ゆらぎのスペクトルにフィーチャーが生成することを示した [7]。

また、微分項を通して振動する場と結合したより一般的なモデルにおいて、同様にスペクトルのフィーチャーが実現することを示した [8]。

場の理論的stringとsuperstringの対応

余剰次元の効果の入ったsuperstring解と場の理論におけるニールセン・オルセン解との対応を解析し、前者がアーベリアンヒッグスモデルにおけるstring解のうち、コア状にゲージチャージを持ち、string方向の波動を持った解と対応づけられることを示した [9]。

プランク衛星の観測結果と非ガウス曲率揺らぎをみ出すモデルの比較検討

プランク衛星の観測結果が2013年3月に公開され、曲率揺らぎの非ガウス性(3点相関関数)が大幅に制限された。本論文では、プランク衛星の結果を使って、これまでに提唱された観測可能なレベルの非ガウス性を作り出す代表的なモデルがどの程度制限されるかの定量的な解析を行なった。また、その制限の範囲でも、モデルパラメータの値によっては、4点相関関数が今後の観測で十分検出できるほど大きくなることを指摘した [10]。

プレヒーティングで作られる曲率揺らぎの相関関数の評価

インフラトン場の振動に起因するパラメトリック共鳴により、超ホライズン長の曲率揺らぎが生成されることが、3次元格子シミュレーションを使った研究 (Richard Bond et al., 2009) で報告されている。本論文では、シミュレーションで得られた曲率揺ら

ぎを解析的な近似式で置き換え、それを使って相関関数(2,3,4点)を評価した [11]。

宇宙初期磁場からのインフレーションモデルに対する制限:I

最近の観測によって、 10^{-17} ガウス程度の銀河外磁場 (Mpc スケール) の存在が示唆されている。このような大きい長さスケールの磁場を宇宙物理的な素過程から作り出すメカニズムは知られていない。この論文では、そのような磁場がインフレーション中の何らかのメカニズムによって生成されたという仮定のもとで、その磁場が誘起する曲率揺らぎを評価した。そして、その曲率揺らぎが観測されている値 10^{-5} を超えないという条件から、インフレーションモデルに対して一般的な条件を課すことができることを示した。特に、単一スカラー場インフレーションモデルでは、この条件はインフレーションのエネルギースケールに下限を与える。もし今後の観測及び宇宙物理の進展により、観測された磁場がインフレーション起源であることが確定すると、この論文の結果はインフレーションモデル構築に強い制限を与える [13]。

宇宙初期磁場からのインフレーションモデルに対する制限:II

論文 [13] で導いた一般形式を宇宙の再加熱モデルも考慮した形式に拡張し、それをいくつかの代表的なインフレーションモデルに具体的に適用した。そしてそれぞれのインフレーションモデルに対して、宇宙背景放射温度揺らぎの観測と矛盾しない再加熱温度と宇宙初期磁場の条件を決定した [12]。

超ホライズン長揺らぎを扱う二つの理論形式の等価性

非線型のレベルで、長波長スケール (スーパーホライズンスケール) における曲率揺らぎの時間発展を理解しておくことは、重要である。例えば様々な初期宇宙モデルに対して、曲率揺らぎの非ガウス性を定量的に評価するような場合に、必要不可欠となる。これまで、非線型長波長曲率揺らぎを扱う有効な手法として、 δN formalism と covariant formalism と呼ばれる二つの手法が提唱されている。これらは一見すると非常に異なっており、両者の関係は自明ではない。この論文では、二つの formalism の間の関係を調べ、実際に両者は任意の摂動の次数で等価であることを示した。これにより、どちらの formalism を使っても、最終的な観測量 (例えば、fml など) は一致することが保証される [14]。

非ミニマル重力結合によるインフレーション後の対称性の破れと素粒子自由度、宇宙の再加熱

ヒッグス・インフレーションモデルは、重力結合を一般相対論から拡張することにより、素粒子標準模型の範囲内で宇宙初期のインフレーションを説明できる有望な理論モデルである。しかしながら、量子補正を取り入れた繰り込み群方程式を解くと、高エネルギー領域において真空が不安定になるという問題が報告されている。そこで本研究では、ヒッグス・インフレーションモデルの拡張として素粒子標準模型と複数のスカラー凝縮場を考える。これらのスカラー場のヒッグス場に対する量子補正により、ヒッグス場の自己相互作用を正に保つことができる。このモデルでは、ヒッグス場が曲率スカラーと非ミニマルに結合しているため、インフレーション後にハッブルパラメータ程度の非自明な真空期待値を取ることを示した。その結果、再加熱機構は非効率的になり、重力的粒子生成により再加熱が起こることを示した [214, 116, 117]。

超重力 R^2 乗インフレーションモデルにおける重力的変調再加熱と非ガウス統計性曲率揺らぎ

R^2 乗インフレーション後の宇宙再加熱は、共形不変性を破る場の重力的な粒子生成により引き起される。超対称性理論において、一般的に存在する平坦方向の非自明な真空期待値が、平坦方向と結合した場の共形不変性を、量子揺らぎによって位置に依存した形で破ることを示した。その帰結として、変調再加熱 (modulated reheating) が超重力 R^2 乗インフレーション後に引き起される。そして最終的な曲率揺らぎは、インフレーション中に生成された揺らぎと変調再加熱期に生成された揺らぎの混じり合ったものとなる。本研究の理論的予言として、スペクトル指標は $n_s = 0.960$ と 0.983 の間に値を取り、ローカルタイプの非ガウス統計性非線形パラメータは $f_{NL} \sim \pm 10$ となり、テンソル・スカラー比は $r < 0.004$ となる。これらの値は最新のプランク天文衛星の観測結果と良く一致している [15]。

暗黒エネルギーの理論模型

暗黒エネルギーは宇宙のエネルギー密度の 70% を占めるものの、その物理的実体は明らかにされていない。本研究では、これまで提案されてきた様々な理論模型を総括した。特に宇宙定数項問題、クインテッセンス、k-エッセンス、結合暗黒エネルギー、統一暗黒エネルギー、 $f(R)$ 重力、DGP 高次元重力、LTB 非一様宇宙などを取り挙げた。現在と将来の暗黒エネルギー観測プロジェクトの展望も解説している [16]。

Massive gravity 理論の下でのインフレーション起源重力波

massive gravity 理論の下では、重力波の方程式が質量項を持つため、重力波の膨張宇宙での振る舞いが通常の場合と異なる。本研究ではこの理論の下でのインフレーション起源重力波の振る舞いを調べ、質量項の影響が重力波スペクトル中にピークとして特定の周波数に現れることを明らかにした [17]。また、異なる周波数の重力波を測る様々な将来の直接検出実験とパルサータイミング実験を考え、このピークを検出することで massive gravity 理論の検証が可能であるかを議論した。

多種の観測による宇宙ひも起源の重力波の検証

初期宇宙に生成される可能性がある宇宙ひもは生成後、衝突を繰り返すにつれかわっていくことで、ループ状になるとともにカスプやキックと呼ばれる特異な形状をひも上に持つようになる。これらの構造から放出される重力波は振幅が大きく幅広い周波数に渡るため、地上、衛星型の直接検出実験の他、宇宙背景放射の温度揺らぎや偏光、またパルサータイミング実験などの多種の将来実験で検証できる可能性がある。本研究ではこれらの実験がそれぞれ異なる周波数の重力波を見ることで異なる時代の宇宙ひもの情報を探ることができるため、各種実験から得られる情報が相補的である点を明らかにした [18]。

インフレーション起源重力波で探る宇宙の熱史

インフレーション起源重力波には宇宙の膨張則の痕跡が刻まれるため、検出できれば宇宙再加熱やエントロピー生成といった初期宇宙に宇宙の膨張則を変えるような現象の情報を引き出せる可能性がある。本研究では DECIGO のような将来の高感度の直接検出実験で再加熱温度やエントロピー生成に関してどのような情報を得られるか詳細な理論予言を行い、さらに CMB 観測との情報の相補性も議論した [19]。

$f(R)$ 重力理論による加速膨張宇宙モデル

初期および現在の宇宙において、宇宙の膨張速度が時間とともに増加していることが近年明らかとなった。加速膨張を引き起こす物理的起源は解明されておらず、さまざまな理論模型が提唱されており、その中でも、重力理論の修正によって宇宙の加速膨張を説明する、修正重力理論の研究が近年活発化している。

本研究では一般相対論の自然な拡張である $f(R)$ 修正重力理論において、銀河団の大規模構造のタネである物質密度揺らぎの成長に着目した。その結果、 $f(R)$ 重力理論は物質密度揺らぎの成長を促進させる効果を持つことが判明した。この効果は質量を持ったニュートリノが物質密度揺らぎに及ぼす抑制効果と相

殺する。そこで、近年のニュートリノ振動実験により示唆されている、1電子ボルトの質量を持った新たなニュートリノを仮定したもとで密度揺らぎの進化を数値計算により追跡した。その結果、アインシュタインの一般相対論においては密度揺らぎが銀河団存在量の観測から得られている値まで成長しない一方で、 $f(R)$ 重力理論においては密度揺らぎが観測値まで成長することを突き止めた。同時に、 $f(R)$ 重力理論は宇宙マイクロ波背景放射と銀河のパワースペクトルの観測データをよりよく再現できることを明らかにした。これにより、将来の素粒子実験により1電子ボルトのステライル・ニュートリノの存在が確立すれば、修正重力理論が優位になる [5, 21, 80, 144, 127, 177, 128, 259]。

また、 $f(R)$ 重力理論は現在の加速膨張を引き起こすダークエネルギーだけでなく、宇宙初期に起こった加速膨張であるインフレーションも記述することができる。そこで、ダークエネルギーとインフレーションの両方を同時に記述する $f(R)$ 重力理論模型において、インフレーション後の再加熱に関する研究を行った。この模型のインフレーション期および再加熱の時間発展が、アインシュタインフレームを利用することで取り扱いが簡便になる点に着目し、膨張則およびスカラ場場の解析解を導出した。さらに再加熱期における重力的粒子生成を考慮した数値計算を行い、曲率揺らぎとテンソル揺らぎを定量的に評価するとともに、現在の観測データからモデルパラメータに制限を与えた [22, 129, 217, 218, 219]。

有質量重力理論における加速膨張解の導出

重力相互作用を媒介する重力子が質量を持たない場合は遠距離力として無限遠まで伝播するが、有質量重力子を考えることで重力の到達距離を変更し、宇宙の加速膨張を記述することができる。この有質量重力子の理論構築の試みは古くからなされてきたが、近年、ゴーストという非物理的自由度を除去したラグランジアンが構築された。この理論において、宇宙定数と同じ指数関数的な加速膨張を与える解を導出した。先行研究では理論模型を限定したもとで同種の解が発見されていたが、今回の解はより広いクラスの模型に適用できる一般的な形で導出されたものである [23]。

ウルトラ・スローロール・インフレーション模型の提唱

従来のインフレーション模型は、インフラトンがゆっくり転がるスローロール近似が成立するものが数多く考案されてきた。このもとで生成される曲率揺らぎは、ホライズンの外で減衰解と定数解の線形結合から成るため、定数解が優勢となる。この時間発展しない解によって、現在観測されているスケール不変に近いスペクトルが説明されると考えられてきた。本研究では定数でないもう一つの解が減衰せずに成長するような特別なポテンシャルの形を導出し、そのインフレーション模型において現在観測さ

れているスケール不変に近いスペクトルを生成できることを示した。また、このクラスの模型においては従来とは異なる非ガウス性整合関係を持つことを導出した。これは標準的なスローロール・インフレーションを超えたウルトラ・スローロール・インフレーションの例として重要な意義を持つ [25]。

ストキャスティック法による相関関数の計算

インフレーションは指数関数的膨張とともに原始曲率揺らぎを生成する機構であり、これは物質密度揺らぎのもととなる。曲率揺らぎの相関関数は宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の精密観測により測定することが可能であり、特に近年、3点以上の相関関数に現れる非ガウス性がインフレーション模型を区別する上で大きな注目を集めている。本研究は指数関数的膨張のもとでインフラトン以外のスカラ場を複数考えたときに生成される揺らぎの2点、3点、4点相関関数を、ストキャスティック法と呼ばれる量子的ノイズを考慮して非摂動効果を取り入れる手法で計算した。その結果、全ての2点、3点相関関数と、一部の4点相関関数の表式を得ることに成功した [24]。

一般化ガリレオン理論におけるブラックホール安定性解析

太陽系スケールにおける一般相対論の検証は古くから行われているが、ブラックホール近傍のような強重力場における検証はまだ実現されていない。重力理論を修正したときにブラックホール近傍の時空構造に現れる影響は、ブラックホール摂動論を用いることで解析でき、ブラックホール近傍の揺らぎの安定性から重力理論に制限を課することができる。本研究では、近年注目されている一般化ガリレオン理論において、ブラックホール摂動論を用いて奇パリティの摂動変数の安定性解析を行った。一般化ガリレオン理論の解析において問題となるのはその自由度の高さである。この理論は1つのスカラ自由度を含み運動方程式に2階微分までしか含まないという条件のもとで最も一般的な模型として構築された。作用には4つの任意関数が含まれ非常に複雑な形となるため、この理論におけるブラックホール安定性解析はなされていなかった。本研究では作用の簡約化により、奇パリティの摂動変数の安定性解析を行うことに成功した。これにより理論が持つ任意関数に対して安定となるための制限を与えた [20, 126]。

初期宇宙のスカラ場場の相転移におけるゲージ場の役割の研究

近い将来に観測されるであろう重力波の起源を決定し、初期宇宙の正確な描像を得るためには、重力波を生成しうる相転移現象の正確な記述が必要であ

る。相転移など動的な現象は、スカラー場の有効作用を用いることで記述できる。これまでは自己相互作用、他のスカラー場やフェルミオン場との相互作用については先行研究がなされてきたが、ゲージ場との相互作用による寄与について考察した [130, 178]。

原始ブラックホール形成の精細数値解析

大振幅の密度ゆらぎが初期宇宙に存在していたとして、それが自己重力によって崩壊すると、原始ブラックホール (Primordial black hole, PBH) が形成され得る。ある種のインフレーションモデルでは、大振幅の曲率ゆらぎが生成され PBH が形成される。PBH の存在量を理論的に計算すれば、観測的な制限と比較することで、インフレーションモデルに対する知見が得られる。そこで、PBH の存在量を予言するために PBH 形成過程を考察した。インフレーション中に生成された曲率ゆらぎは超ホライズンスケールに引き伸ばされ、その後の放射優勢期などに再びホライズンの中に入る。ゆらぎが超ホライズンスケールにある間は、アインシュタイン方程式を解析的に解くことでゆらぎの時間発展を調べられる。まずこの解析解を漸近展開を用いて構成し、得られた解析解を初期条件として、ホライズン再突入後のゆらぎの時間発展を数値計算した。そして、PBH 形成条件とゆらぎの形状の関係を調べ、また PBH 質量を計算した [26, 82, 179, 180, 131]。

インフレーション宇宙におけるヒッグス場の凝縮とその帰結

2012年7月にLHCで素粒子標準模型唯一のスカラー粒子であるヒッグス粒子が発見された。この新しく発見されたヒッグス場は、インフレーション中に大きな真空期待値を持っているため、その後の宇宙の歴史に大きな影響を与えた可能性がある。そこでヒッグス場がインフレーション後に宇宙の再加熱を支配するシナリオについて検討した。

具体的には、ストキャスティック・インフレーションと呼ばれる手法でインフレーション直後にヒッグス場がどのような状態にあったかを計算し、インフレーションのモデルとしてk-インフレーションモデルを用いることでヒッグス場がインフレーション後に宇宙のエネルギー密度を支配するような状況を実現した。しかし、この時生成される曲率ゆらぎが実際に観測されるゆらぎよりもはるかに大きいこと、つまり素粒子標準模型と同様のヒッグス場が存在する限りk-インフレーションモデルが棄却されてしまうということを示した [28, 172, 132, 182, 183]。

中間質量ブラックホールからの重力波を用いた新しいダークマター探査法の提唱

近年、中間質量ブラックホールはその周囲にダークマターハローを持つと指摘されている。コンパクト

ト天体が中間質量ブラックホールの重力場に捕まり、周回しながらその中心へ落ちるとき、その軌道はダークマターハローの重力場により修正を受ける。本研究では、こうした状況の下で発生するインスパイラル重力波がダークマターの情報を含むことに着目し、その情報を実際の重力波観測により取り出せるか否かを定量的に評価した。この結果、宇宙重力波レーザー干渉計 eLISA を用いた重力波観測で、S/N 比がダークマターの動径分布の傾きに強く依存することを発見し、中間質量ブラックホールからの重力波がダークマターを探索する新しいプローブとなりうることを示した [29]。

重力波データ解析

日本には重力波データ解析専門家が6人しかいない現状を鑑み、若手研究者を重力波天文学へ誘うために、RESCEUは2回にわたってデータ解析スクールを主催した(3章3.5, 3.10参照)。このスクールは座学と演習を組み合わせたものであるため、入念な準備が必要であった。両回ともに大学院生を中心に国内から60人以上の参加者を得ることができ、またアンケート結果からも参加者の重力波天文学への理解度が深まったことがうかがえた。アンケート結果から、第2回の開催が希望されていることがわかり、早くも半年後には第2回スクールを開催した。第2回ではTAMA検出器への見学や外部講師の充実などによって、かなり楽しめるものになったと自負している。演習は実際データ解析の現場で利用されているC言語とoctaveを利用している点で実戦的であり、参加者からは次回の開催も促された。また本スクール後には、東京近郊の修士課程学生参加者を募って、2012年秋からデータ解析ゼミをおこなっており、現在参加者はのべ10人を越えている。

上記の人材育成に加えて、現在伊藤を中心にKAGRAデータ解析ライブラリの仕様を策定しており、データ解析パイプライン作成の準備を進めている。ハードウェアの面では、伊藤は、RESCEUにデータ解析ソフトウェア管理サーバを設置・運用している。そのほか、検出器のviolin modeが連続重力波検出へ与える影響についての調査や、アナログデジタル変換器の信号検出への影響を調べるなど、KAGRAの人的資源の少なさを反映して、detector characterizationやdata management systemに関わる仕事もおこなっている。

1.2 観測的宇宙論

CMBの弱い重力レンズ再構築法の導出および宇宙論への応用

観測される宇宙マイクロ波背景輻射(CMB)の揺らぎには大規模構造による弱重力レンズ効果の情報が含まれており、光子の軌跡の曲がり角を情報として取り出すことで、密度揺らぎなどの重力場を生じるソー

スに関して情報を得ることができる。CMB の弱い重力レンズ効果は、Okamoto & Hu (2003) (OH03) などで示されたアルゴリズムをもとに、CMB の観測データのみから曲がり角の情報を取り出せる。将来的には、PolarBear や ACTPol といった角度分解能が高い地上の CMB 観測において高精度で曲がり角を再構築できると考えられている。

本研究では、CMB の弱い重力レンズ効果を利用した宇宙論・物理理論における課題（宇宙加速膨張・初期揺らぎの生成機構・ニュートリノ質量など）の検証を念頭に、得られた CMB マップから重力レンズ効果を測定する手法を改良してきた。特に、今後 CMB の弱い重力レンズ効果の測定が期待される実験を想定し、非一様検出器ノイズ、ビームの非等方性、有限観測領域の影響を取り入れた、より現実的な場合に応用可能な推定法の開発を行った [37, 189]。また、公開されている温度揺らぎの観測データを用いて開発した手法を適用し、宇宙論への応用例として、特定の宇宙紐のモデルパラメータへの制限を行った [137, 138, 190, 191, 192]。

高精度理論テンプレートを用いた SDSS LRG 非等方クラスタリングの解析

視野 10,000 平方度、赤方偏移 0.5 に渡る大規模測光・分光サーベイである Sloan Digital Sky Survey (SDSS) により提供されている Luminous Red Galaxy (LRG) は、その広大なサーベイ体積ゆえに大規模構造を探る上で非常に有意なサンプルである。

分光サーベイにより得られた銀河分布は赤方偏移歪みを受けており、そのクラスタリングは非等方性を帯びる。この非等方性の強さは構造成長と密接に関係している。また、クラスタリングの非等方性は、銀河の距離を測定された見込み角・赤方偏移から共同距離に変換する際に、仮定した宇宙論パラメータと真の宇宙論パラメータが異なることによっても引き起こされる。したがって、分光サーベイにより得られた銀河のクラスタリングに刻まれた非等方性を精密に解析することで構造成長と宇宙膨張を同時に測定すること、すなわち、重力理論の検証が可能となる。

我々は、BAO スケールに渡り N 体シミュレーションと 1% 以下の精度で一致する、高精度理論テンプレートを用いて SDSS LRG 非等方クラスタリングの解析を行った。この解析により、構造成長と宇宙膨張を同時に測定し、宇宙の標準模型である Λ CDM モデルとの整合を示した [84, 194]。

N 体シミュレーションを用いた Sloan Digital Sky Survey Luminous Red Galaxy 非等方クラスタリングの再現

SDSS LRG は比較的古くに形成された楕円銀河であると考えられており、重力束縛系（ハロー）の重心と 1 対 1 に対応するとされてきた。しかし、近年

の弱重力レンズを用いた研究などによりハローの重心よりもむしろハロー中のさらに局所的な重力束縛系（サブハロー）との対応が良いことが指摘されている。両者の違いは特に赤方偏移歪みの効果に大きく現れる。したがって、LRG の 3 次元分布を解析するにあたり、ハロー・サブハローと銀河の対応を調べることは非常に重要である。

我々のグループでは、N 体シミュレーションのハロー・サブハローカタログを用いて、BAO スケールでの SDSS LRG クラスタリングに刻まれた非等方性を定量的に再現することに成功した。

また、このサブハローカタログから SDSS LRG が速度構造および局所スケールでのクラスタリングの性質が異なる 2 種類のサブハローと対応していることを示し、さらに、そのうち大きな速度分散を持つサテライトサブハローが 20-30% 含まれることを指摘した [84, 193, 194]。

弱重力レンズモルフォロジー統計

近年、大規模銀河観測計画が国内外で推進されている。日本では、すばる望遠鏡の広視野撮像カメラ Hyper Suprime-Cam を用いた 1400 平方度の超広視野銀河撮像観測が来年度より開始される見込みであり、同様の広視野観測計画は世界中で複数予定されている。これらの計画の主要科学目的は重力レンズ解析である。重力レンズ現象とは、遠方ソース天体の像が、観測者とソース天体の間に位置する重力源によってゆがめられる一般相対論的な効果である。一般に重力レンズによる像のゆがみはわずかであるが、ゆがみの統計的な性質を精査することで、視線方向に位置する暗黒物質の質量密度分布を再構築することができる。暗黒物質の空間的な質量分布は、それ自身の性質を反映していることはもちろんであるが、現在の加速膨張の原因と考えられている暗黒エネルギーの性質や、極初期宇宙におけるインフレーション現象のダイナミクスとも関係していることが知られている。つまり、重力レンズ現象の精密解析は、これまでの観測結果では明らかにされなかった事項について非常に重要な示唆を与えることができる。これこそが、将来観測において重力レンズ解析が主要科学目的に位置づけられている理由である。

我々は、重力レンズ解析によって再構築される二次元質量密度場 (convergence field) に関する統計解析と、その結果得られると期待される宇宙論的な制限についての研究を行った。Convergence field のもつ統計的な性質は、重力による非線形成長により強い非ガウス性を示すため、従来よく用いられてきた 2 点角度相関関数だけでは、convergence field のもつ宇宙論的な情報を完全に引き出すことはできない。そこで我々は、convergence field のもつ宇宙論的な情報をより効率的に捉えるために、ミンコフスキー汎関数という形態学に関する統計量に注目した。ミンコフスキー汎関数は、2 次元場に対しては、一点分布 (V_0)、等高線の長さ (V_1)、等高線の曲率 (V_2) の 3 つで定義され、非ガウス性を引き出す有用な統計量である。この研究では、高解像度の宇宙論的 N 体

シミュレーションを利用することで、非線形な重力進化を考慮した convergence マップを作成した。作成した convergence マップに対してミンコフスキー汎関数を計測し、convergence field のもつ宇宙論的な情報がミンコフスキー汎関数を通じてどのように明らかにできるかを示した。結果的に、すばる Hyper Suprime-Cam による将来広視野観測では、ミンコフスキー汎関数を通じて、暗黒エネルギーの性質だけでなく、初期宇宙のダイナミクス起源の原始非ガウス性にも制限をつけられることがわかった。この結果は、従来よく用いられてきた重力レンズによる2点角度相関関数による制限より強い宇宙論的な制限であり、他の宇宙論的な将来観測による予言と相補的である [38, 139, 195, 196, 197]。

弱重力レンズによる暗黒物質ハローの検出

Convergence field と視線方向に位置する孤立した銀河団クラスの大質量天体の関係についての研究を行った。重力レンズ解析によって得られた convergence field から大質量天体を同定する際には、通常 convergence field のピークを指標にする。ノイズレベルより十分に大きいピークは、 $10^{14} - 10^{15}$ 太陽質量程度の大質量天体と関係していることが先行研究により知られていた。この研究では、多数の高解像度シミュレーションを利用することで、convergence のピークが、大質量天体のどのような性質を反映しているかを調査した。この研究により、convergence ピークはこれまで考えられていたより比較的内部の質量構造に感度をもっており、大質量天体の楕円率とその向きにより、convergence ピークでの大質量天体同定には系統誤差が生じることが明らかになった。この系統誤差は三軸不等質量密度モデルによる理論モデルによって予言でき、理論モデルとシミュレーション結果が整合的であることを示した [39]。

弱非線形領域における質量パワースペクトルの高速摂動計算法

摂動論にもとづく宇宙大規模構造の非線形重力進化の理論計算は、バリオン音響振動などの将来観測に対して高精度の理論テンプレートを提供しうる重要な手法であり、近年、適用範囲を広げるため、くりこみの手法などを用いて摂動の高次補正を計算する手法が開発されている。前年度に我々は、 Γ -展開と呼ばれる摂動展開にもとづき、劇的な時間短縮を可能とする高速計算手法を開発した。本年度は、この手法にもとづき、汎用性の高い摂動計算ツールを開発、RegPT という名前でコードを一般公開した。質量パワースペクトルの非線形重力進化を従来より広い適用範囲で高速に計算できるため (2 ~ 3 秒)、今後は宇宙論データ解析への応用が期待される [42, 95, 96, 97, 98, 169, 211]。

弱非線形領域における赤方偏移パワースペクトル・相関関数の高次摂動計算

分光サーベイから得られる銀河分布のクラスタリングパターンは、“赤方偏移ゆがみ”と呼ばれる効果で非等方性を帯びることが知られている。この非等方性の強さは密度ゆらぎの成長率に比例しており、パワースペクトル・二点相関関数からその強さを測定することで宇宙論的スケールでの重力理論の検証が可能になる。ただし、赤方偏移ゆがみそのものもつ非線形性により、高い精度で密度ゆらぎの成長率を測定するためには、パワースペクトル・二点相関関数の理論テンプレートに非線形効果を適切に考慮する必要がある。本研究では、以前に我々が開発した赤方偏移ゆがみの理論モデルに、 Γ -展開にもとづく摂動計算を適用、高次の摂動補正まで取り入れてパワースペクトルと相関関数を計算した。N 体シミュレーションとの比較も行い、精度のよい理論計算ができることを示した [40, 113, 97, 98, 170, 211]。

非線形質量パワースペクトルに対するフィッティング公式の改良

宇宙大規模構造の重力非線形性は小スケールに行くにつれ強くなり、摂動論的取り扱いが難しくなる。そのため、質量パワースペクトルを小スケールまで精度よく求めるためには、高解像度の N 体シミュレーションに頼る必要がある。近年では、多数のシミュレーションを試行することで、宇宙論パラメーターの依存性まで考慮したパワースペクトルのフィッティング公式なるものが作られ、広く宇宙論研究で用いられている。ただし、フィッティング公式の精度と適用範囲はシミュレーションの解像度で決まるため、得られた公式の信頼性は最新のシミュレーションで常にチェックする必要がある。本研究では、最新の高解像度シミュレーションをもとに、これまで広く使われてきた Smith et al.(2003) のフィッティング公式の精度を検証、その公式を改良することで、従来より高い精度でかつ、より広いダイナミックレンジでパワースペクトル計算ができることを示した [41]。

ベクトルゆらぎの作る弱重力レンズ効果と宇宙ひもの検出可能性

銀河撮像サーベイや宇宙マイクロ波背景放射の観測にもとづく弱重力レンズ効果の精密測定は、精密宇宙論の重要な観測的手法として注目されており、日本のすばる望遠鏡を用いた SuMIRe プロジェクトをはじめ、世界各国でさまざまな観測プロジェクトが推進中である。本来、弱重力レンズ効果は、宇宙大規模構造の密度ゆらぎが作るスカラー型の計量ゆらぎに起因すると考えられているが、本研究では、ベクトル型の計量ゆらぎが存在した場合に作られる弱重力レンズ効果の理論的な定式化を進め、重力レンズ場の空間相関にスカラー型ゆらぎでは作られない新しいモード (B-モード、カールモード) が現れる

ことを示した。宇宙初期の相転移で作られる宇宙ひもがあると、ベクトル型の計量ゆらぎが作られるため、弱重力レンズ効果の新しいモードを精密測定することで宇宙ひもの検出が可能となる。将来の観測プロジェクトにおける検出可能性を考察した結果、組み替え確率の小さな宇宙ひもに対して弱重力レンズ効果の観測は高い感度を有していることがわかった [43, 169]。

重力系のボルツマンシミュレーション

従来の構造形成シミュレーションは物質分布を N 個の質点で離散的に表現し、質点間の重力相互作用を追うという N 体計算の手法をとるものがほとんどである。本来は、膨大な数の微視的な素粒子から成るダークマターの密度進化を追う場合などには、無衝突ボルツマン方程式と重力のポアソン方程式を結合させて解けばよいはずである。これは 6 次元位相空間上での積分を伴うために困難であったが、最近のコンピューターの能力の向上により、現実的な設定で空間 3 次元のボルツマンシミュレーションが可能となった。我々はプラズマ物理学で使われる PFC 法に基づく計算スキームを開発し、移流問題、ランダウ減衰、キング球衝突の計算などを行い、計算精度を確かめた。また、運動量空間での連続的な分布関数の進化を明らかにした [61]。

遠方サブミリ波銀河の形成シミュレーション

宇宙論的流体シミュレーションを用いて高赤方偏移でのサブミリ波銀河の分布を明らかにした。個々の銀河の星形成史、金属量、星質量から SED を計算し、サブミリ波帯で模擬観測を行い、ソースカウントや 2 点相関関数を計算した。これまでに、同モデルで水素輝線銀河については赤方偏移 3 での光度関数や空間分布などを再現することは確認済みである。本研究では、ASTE 望遠鏡などによりこれまでに得られた観測結果と比べ、1.1 ミリ帯で非常によい一致を得た。また、光円錐上の銀河カタログを作成し、サブミリ波帯で 0.1 mJy 以上の銀河は赤方偏移 6 以上にも多数存在し、ALMA で 40 分角視野のサーベイを行えば 10 個以上検出可能であると結論した。そのような銀河は典型的に 1 兆太陽質量程度のダークハローの中心部に存在する [62]。

始原ガス雲形成過程での輻射と流体速度の影響

高赤方偏移ではガスとダークマターは空間分布も速度も異なるため、相対速度や輻射輸送効果を陽に取り入れないと分子ガス雲形成時期やガス雲の形態を正しく求めることができない。我々は 3 次元のシミュレーションを用い、輻射冷却の方向依存性や化学反応率の不定性、さらに流体速度の影響を詳細に調べた [63]。等方性を仮定した近似では、水素分子輝線に対しては実効的な光学的厚みを 5 倍程度誤っ

て見積もる場合があり、一般にガス雲の重力崩壊を速めてしまうことが分かった。次に、宇宙初期のバリオン振動に起因する、ダークマターに対する超音速流がある場合には、小さなハローのガス分率が大幅に低下し、分子ガス雲形成が阻害される、あるいは数千万年程度遅れることを明らかにした [64]。

非熱的なウィーノ暗黒物質が構造形成に与える影響

LHC (Large Hadron Collider) 実験において ATLAS 及び CMS の両解析チームがヒッグス粒子と思われる質量 ~ 125 GeV の新粒子の発見を報告した。これを受けて、超対称模型としてゲージノの質量はアノマリー伝達型、ゲージノ以外の超対称粒子の質量は重力伝達型で与えられるシナリオが考えられている。この模型では多くの場合ウィーノが暗黒物質になるが、LHC 実験及び将来の間接探査で検出可能なウィーノについては熱的な残存量は無視できる程度でしかない。よって、ウィーノ暗黒物質のほとんどはグラヴィティノのような長寿命粒子の崩壊によって作られる。崩壊の際にウィーノ暗黒物質は大きな運動量をもつが、その後の背景プラズマとの相互作用によって運動量を失っていく。我々 [46] はボルツマン方程式を数値的に解き、現在においてもウィーノ暗黒物質のかなりの量が非熱的な速度を持っている事を示した。

重力伝達型超対称模型における暗黒物質及びバリオン数共生

従来のアフレック・ダイク機構による暗黒物質及びバリオン数共生においては、Q-ボール崩壊に寄与する過程としてスクォークの崩壊のみを考慮していたため、暗黒物質の質量は $O(1)$ GeV だと考えられていた。我々 [47] は Q-ボール崩壊に対してスクォークの対消滅が支配的な寄与をすることを指摘し、暗黒物質の質量が $O(100)$ GeV になりうる事を示した。

温かい暗黒物質モデル及び崩壊する荷電重粒子モデルにおける銀河ハロー形成

近年の高解像度 N 体計算により、冷たい暗黒物質を仮定した標準的な宇宙論では我々の局所銀河群中に観測されている衛星銀河の数を説明できない事 (衛星銀河問題) が報告されている。これを受けて、その解決策となる温かい暗黒物質のモデルが素粒子論から提案されている。我々 [48, 100, 201] は温かい暗黒物質の構造形成に対する影響が、温かい暗黒物質が全暗黒物質中に占める割合と物質輻射等密度時のジーンズスケールで特徴づけられる事を示した。我々はさらに崩壊する荷電重粒子モデルも取り上げ、実際に大規模 N 体計算を実行することで、寿命が 1 年程度の荷電重粒子モデルは温かい暗黒物質と同様に衛星銀河問題の解決となることを示した。

シミュレーション銀河団の質量推定における静水圧平衡の正当性

銀河団の X 線観測における質量推定において、通常、銀河団ガスが静水圧平衡の状態にあると仮定するが、この正当性はよくわかっていない。今回は、高精度の宇宙論的シミュレーションから取り出した銀河団を解析することで、静水圧平衡の正当性を検証した。まず、銀河団ガスが従うオイラー方程式の各項を質量に換算し、それらの全質量に対する割合を評価した。その結果、圧力勾配項、すなわち静水圧平衡の仮定の下で得られる質量は全質量よりも平均的に 15%程度小さいことがわかった。最大で 30%程度のずれが起こる場合もある。さらに重要な点として、このずれは主に銀河団ガスの加速度に起因することを示した。過去の研究において、手法の差異のため、静水圧平衡の破れの原因については様々な主張があったが、今回の研究はシミュレーション中のガスが従う方程式に忠実な解析手法をとっており、また、ガスの加速度は過去の研究において無視されていたため、その重要性を定量的に示した点で重要である [33, 90]。

シミュレーションによる 2 次元観測量から得た銀河団質量へのバイアス

シミュレーションの 3 次元データの解析によって研究静水圧平衡によって得られた銀河団の質量は真の質量から平均的 15%、最大 30%程度ずれることがわかったが、実際の観測においては 2 次元の観測量からガスの密度と温度を推定し、それから質量を構築しなければならない。この過程において質量にさらなるバイアスが生じる可能性がある。今回は、シミュレーションデータから擬似的な観測量を作り、球対称のガス密度および温度プロファイルを仮定した上で、疑似観測量を再現するようなガス密度および温度をフィッティングによって得た。この結果、銀河団の外側のサブストラクチャーによって密度が過大評価され、それに伴って温度が過小評価されることがわかった。これによって、質量は外側で本質的な静水圧平衡の破れによるものよりもさらに 10%程度過小評価される。結果的に銀河団の質量は外側で最大 40%過小評価される可能性がある。近年すざくや Chandra などの衛星によって銀河団の外側の観測が始まっているため、その際のガスに関する物理量や質量の推定における注意を促すものである [90]。

原始揺らぎの非ガウス性の存在下での暗黒物質ハローのクラスタリング

宇宙の原始揺らぎの非ガウス性は、揺らぎを創った機構を峻別する上で重要な指標である。通常、原始揺らぎはインフレーション期に創成されたと考えるので、この指標はインフレーションの物理を探る上で役立つと期待できる。これまで、非ガウス初期揺らぎに基づく構造形成論は、最も単純な単一の場

の 2 次の局所結合型で表される場について主に議論されてきた。我々は、宇宙論的 N 体シミュレーション及び簡単な解析的模型を用いて、複数の自由度と、任意の次数の結合を持った原始揺らぎの場合へ拡張を行った。従来の模型では、物質が重力的に束縛してできるハローの空間分布に「距離依存バイアス」と呼ばれる非自明な効果が現れることが分かっていたが、我々はこの特徴が非線形結合の次数に依らないこと、また、多自由度を持つ場の場合にはバイアス関数の形状が影響されることを示した。このことを用いれば、将来観測から模型に依らずに宇宙の初期条件の自由度の数を探れる可能性が拓ける。また、異なる時刻、異なる種族の銀河の観測を組み合わせることで、原理的に非線形結合の形に制限が付くことを示した [30]。

N 体シミュレーションを用いた繰り込みバイアスモデルの検証

宇宙の大規模構造を記述する上で、物質の質量密度分布と観測された銀河の数密度分布の関係をバイアスと呼び、目下最大の不定性はここにある。我々は過去数年間、宇宙の密度揺らぎの進化を精密に解析し、宇宙論的 N 体シミュレーションから測定された物質の 2 点相関関数をパーセントレベルで再現できる精密な解析模型の開発に取り組んできた。我々は、この結果と最近提案された「繰り込み」バイアス模型を組み合わせた定式化を行い、N 体シミュレーションから同定された暗黒物質ハローの自己相関関数を現在の観測の統計誤差以内の精度で再現することに成功した。また、将来の銀河サーベイと弱重力レンズサーベイの組み合わせからバイアスの不定性を低減することを念頭に、ハロー - 物質の相互相関関数も同時に考慮した場合、我々の模型は、先の自己相関関数と併せて整合的に説明することが可能であることを示した [31]。

弱重力レンズサーベイにおける共分散行列の非ガウス性の重要性と、その宇宙論パラメタへの伝播

弱重力レンズサーベイのデータを解析する際、測定されたスペクトルの精密な模型が必要なのはもちろんだが、その統計誤差についても正しく理解している必要がある。一般に、 n 点統計量の共分散行列を計算するためには $2n$ 点までの統計量が必要となるため、これを解析的に導出するのは解析に用いる統計量より困難となる。我々は N 体シミュレーションから作成した 1,000 個もの独立な模擬重力レンズマップを用いることでパワースペクトル及びバイスペクトルの共分散行列を数値的に導出し、その非ガウス成分の取扱いを誤った場合、如何に宇宙論パラメタの制限を誤ってしまうかを調査した。我々は、非ガウス誤差を無視した場合、これら 2 つのスペクトルから得られるトータルの signal-to-noise ratio は典型的な将来観測の場合に 2 から 3 倍に過大評価してしまうこと、及び、標準的な 6 パラメタ宇宙模型の

場合、1パラメタあたりの不定性を15%程度見誤ってしまうことを示した。この数値は、全天に迫る広域をサーベイする、将来の衛星観測の計画の場合に非常に重要になり得る [32]。

銀河団を用いた重力理論の検証

太陽系、銀河、銀河団等の局所領域における重力理論の検証に向けて、修正重力理論におけるスカラー場のプロファイルを調べ、銀河団重力レンズを用いた検証可能性を指摘した。宇宙の加速膨張に動機づけられ、ダークエネルギーの代替としての修正重力理論が活発に研究されている。太陽系実験をはじめとする局所重力実験と整合性のある理論は、局所スケールで一般相対性理論へ帰着するために遮蔽機構を備える必要がある。

このような背景で、Horndeski 理論 (最も一般的なスカラー・テンソル重力理論) において、局所領域におけるスカラー場のプロファイルを研究し、局所領域において、すべてのスカラー・テンソル型重力理論に対して有効な定式化をおこなった。静的球対称な場合、スカラー場は一般に5次方程式に従うことを明らかにした。さらに、スカラー場のプロファイルを調べ、遮蔽機構が実現される条件を導出した。

また、この定式化を銀河団重力レンズに適用した。例として massive gravity 理論では、重力の修正が重力レンズシアーにどのような影響を与えるかを調べた。遮蔽機構を実現するパラメータの境界領域では、重力の遷移が滑らかではなくなり、重力レンズシアーに特徴的な「谷」シグナルが現れることを明らかにし、銀河団を用いた重力理論の検証可能性を指摘した [27, 173, 124, 125, 110, 175, 176, 216]。

銀河系ダスト減光地図のスタック解析による銀河遠赤外放射の検出

あらゆる銀河系外天文観測は、我々の銀河系前景成分を通してなされるため、正確な銀河系ダスト地図による減光補正が重要となる。現在最も広く用いられている減光地図は、Schlegel et al. (1998:SFD) による SFD 地図である。しかし、この減光地図には特に減光量の小さい領域において系統誤差が含まれていることが、Yahata et al. (2007) による SDSS 銀河カタログの個数面密度測定によって示されていた。さらに Yahata et al. (2007) では、系統誤差の原因は SDSS 銀河自身の遠赤外放射がその原因であると提案されている。

我々は本研究において、SDSS 銀河を中心として SFD 地図をスタックすることにより、SFD 地図中に含まれた SDSS 銀河の遠赤外放射を直接検出した。この結果は、Yahata et al. (2007) によって提案された上記の仮説の正当性を観測的に示すものである。さらにこのスタック解析によって、SFD 地図を統計的に補正する手法や、個々では検出限界以下の微弱な銀河遠赤外放射、およびその可視光度との相

関などの統計量を探る手法が得られると期待される [53, 143, 205, 206]。

重力レンズを用いた暗黒物質モデルの制限

未だその正体がわからないダークマターの性質を宇宙論的観測から明らかにすることは非常に重要な課題である。宇宙論の標準モデルではダークマターは速度分散の小さいコールドダークマターだとされ、大スケールにおいて観測を非常に良く説明する。一方で小スケールにおいては、観測される密度ゆらぎが標準モデルの予言に比べ小さいという問題がある。速度分散の大きいウォームダークマターはある特徴的スケール以下の密度ゆらぎを減衰させるため、この性質により理論と観測の不一致が説明される可能性がある。このようにダークマターが本当にコールドなのかは未だ決着していない問題である。

ダークマターの速度分散 (とそれに対応する質量) に対する新たな制限を得るために、我々はダークマターサブハロー質量関数という従来とは異なる統計量に着目した。この統計量はすばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いた重力レンズ観測によって正確な測定が可能である。重力レンズを用いることで直接的に系の力学的質量を推定でき、従来手法に比べ理論的不定性が少ないことにサブハロー質量関数を用いる強みがある。我々は観測と比較しダークマターの質量に対する制限を得るために、コールドダークマターと3つのウォームダークマターモデルそれぞれに対して N 体シミュレーションによるサブハロー質量関数の理論予言を行った。さらに、HSC による観測を想定した統計的誤差の評価を行い、実際の観測によってダークマターの質量に対する新たな制限が期待できることを示した [88]。

1.3 星形成

第一世代星の超新星爆発に起因する低金属量星形成

第一世代星は典型的に大質量 (太陽質量の数十から数百倍) であったと考えられている。ガス雲中に金属 (ヘリウムより重い元素、ガスの放射冷却率に大きく寄与する) が存在しなかったため、ガスが十分冷却されないためである。一方、現在の星は典型的に太陽質量以下である。星の典型的な質量の遷移がいつどのようにして起きたか。この問題は宇宙の構造形成を知る上で重要である。大質量星は、紫外線放射により銀河間物質の電離、星形成の抑制を引き起こすことで構造形成に影響を与える一方、低質量 (太陽質量以下) 星はその効果が小さいためである。

本研究では、金属量が星の質量に与える影響について調べた。特に、低金属量の星間ガス中で大質量星が超新星爆発を起こすことによって星が形成される過程を数値的に追った。まず、超新星爆発による衝撃波で星周ガスが球殻状に圧縮される。その領域が重力的に不安定になるとガスがジーンズ質量程度に分裂し、それぞれの分裂片が重力収縮を始める。さ

らに分裂片は、ダスト（金属原子が凝縮した固体微粒子で、より冷却に寄与する）による急激な冷却により不安定になり、さらに分裂が進むことがわかった。分裂片の最終的な質量は太陽質量の百分の一から十分の一であり、この後のガス降着により、低質量星が形成されることが示唆された [44, 85, 140]。

低金属量星形成ガス雲中のダスト成長と、ガス雲の熱的進化に与える影響

低金属量（太陽の金属量の十万分の一程度）の星間ガス中において低質量の星が形成されるためには、ダスト冷却が重要な役割を担うと考えられる。したがって、初期宇宙における星形成を考える際は、ダスト量を正しく見積もる必要がある。初期宇宙において、ダストは主に超新星によって供給されるが、超新星ではダストを破壊する作用も働く。ダスト破壊の大きい超新星によって金属・ダスト汚染を受けたガス雲中では、ガスの冷却が不十分であり、大質量の星が形成される可能性がある。

しかし、ガスの重力収縮に伴って密度が上昇すると、ダストがガス相の金属原子を取り込むこと（ダスト成長）が示唆されている。本研究では、ダストの成長を考慮し、星形成ガス雲の進化に与える影響を求めた。その結果、ダスト破壊の大きいモデルでも、最終的にダストは十分成長し、冷却に寄与することが分かった [45, 140, 99, 198, 199, 200, 161]。

初期宇宙での超急速ガス降着による超大質量星形成

最近の観測によると $z > 6$ の宇宙で $10^9 M_{\odot}$ 以上の超巨大ブラックホール (SMBH) がすでに形成されている。これはビッグバンから 1Gyr 以下しか経過しておらず、これほど短時間に SMBH がどうやって形成されたのか問題になっている。これを説明するのに、初代星形成のある特殊な状況下でかなり大質量の BH が直接形成されるシナリオが最近活発に議論されている。例えば、非常に強い紫外光にさらされたダークハロー中では水素分子が形成されず、Ly α 放射冷却により温度約 8 千度を維持したままガス雲が収縮する。その結果、 $\sim 10^5 M_{\odot}$ の超大質量星が形成され、一般相対論的不安定により BH に重力崩壊するというシナリオである。

このとき $0.1 M_{\odot}/\text{yr}$ もの超大降着率で原始星が成長すると考えられているが、こうした極端に大きな降着率下で星がどのように進化するか知られていなかった。そこで、初めて星の構造を数値的に解いて調べたところ、星は質量の増加とともに膨張を続け、超巨星（半径 $10^3 R_{\odot}$ 以上）として成長するという新しい描像が見えてきた [58]。この間、星半径は星質量の $1/2$ 乗に比例して増加し、降着率が $0.01 M_{\odot}/\text{yr}$ 以上であれば降着率の依存性は殆どない。この“super-giant protostar”の進化段階は星の有効温度がおおよそ 5000K と低く星の UV 光度は非常に小さい。このためガス降着流に対するフィードバックは弱く、実際に超大質量星が形成され得ることを初めて示した。

また、計算結果をもちいた脈動不安定解析も行い、こうした星は脈動による質量放出を経験するものの、ガス降着率が非常に急速なため星の質量増加は妨げられないことを示した [59]。

1.4 系外惑星

惑星光の自転・公転による時間変動を利用した惑星表面 2 次元マッピング

将来直接撮像によって系外地球型惑星の詳細を知ろうとする上で、点源としての地球の測光・分光学的特徴からどこまで情報を得られるかは重要な試金石である。私たちは、惑星表面が非一様な場合に反射光が自転・公転によって時間変動することに注目し、これを逆に解くことで表面を再構築する方法論をまとめた。また、その方法論を地球の反射光のシミュレーションに適用して現実的な実現可能性を調べた。前年度までの研究で、軌道傾斜角が 0 で惑星のフェーズが一定の場合についてはうまく逆解きができることが分かった。本年度は、軌道傾斜角が 0 でない場合でも、雲の散乱による非等方性の影響が強いデータを使わないことで妥当なマッピングができることを示した。また、軌道傾斜角や自転軸方向を様々に変えて地球のライトカーブをシミュレーションし、自転軸方向の推定可能性を系統的に調べた。地球の場合かそれ以上に大きな場合は、比較的良く推定できることが分かった [34]。

地球の近赤外線スペクトルに見られる分子吸収線の時間変動とその解釈

EPOXI によって宇宙空間から観測された地球の近赤外分光データを用いて、点源としての地球のスペクトルに見られる酸素・二酸化炭素・水の吸収線等価幅の時間変化を調べた。これらは連続成分とは異なるふるまいを示すことが分かったが、このふるまいは雲が不透明として単純化したモデルで再現することが確かめられた。逆に、分子吸収線の時間変化から雲被覆の非一様性の情報が得られることになる。また、酸素や二酸化炭素と水蒸気の吸収線変動パターンが異なることに注目し、水蒸気分布の非一様性の検証可能性、またそれが水循環について与える示唆について議論した [36]。

複数惑星系に対する初のロシター効果の検出と惑星同士の食の見え

昨年度に引き続きトランジット惑星系のロシター効果の観測を行ったが、今回新たな試みとして、惑星が複数トランジットする系に対して初めてロシター効果の測定を実施した。複数トランジット惑星系において星の自転軸と惑星の公転軸を推定する事は、複

惑星系の角運動量がどのように進化してきたかを議論する貴重な機会を与える。今年度の研究では、ケプラー宇宙望遠鏡が発見した惑星系候補天体 KOI-94 に対してロシター効果の観測を実施し、結果として木星型惑星 KOI-94.01 の公転軸と中心星の自転軸が約 10° の範囲内でよく揃っている事を示した。これは複数惑星系に対する初のロシター効果の検出である。さらに我々はロシター効果の観測を計画しているうちに、ケプラー宇宙望遠鏡の公開しているアーカイブ測光データの中で、「惑星同士の食」という極めて珍しい天体現象を発見した。これは2つの惑星が同士のトランジットをし、その最中に惑星同士が光球面上で重なり合うという現象である。この現象自体非常に珍しいものであるが、この「惑星同士の食」の測光データのパターンからの解析から2つの惑星の公転軸が非常によく揃っている事も突き止めた。この結果と上記ロシター効果の観測結果と合わせて、KOI-94 という複数惑星系では星の自転角運動量と惑星の公転角運動量の方向がよく揃っている事が明らかとなった [50, 51, 52]。

ケプラー測光を用いたトランジット惑星を持つ星の自転傾斜角測定

ケプラー宇宙望遠鏡が発見した惑星系候補天体に対しすばる望遠鏡を用いて分光観測を行い、星の基本的なパラメータ（星の有効温度・表面重力・半径など）を決定した。一方ケプラー望遠鏡で得られた測光観測データを詳細に解析し、惑星候補を持つ星の自転周期を見積もった。これらの情報（すばる望遠鏡での分光観測とケプラー望遠鏡による測光観測）を組み合わせて、星の自転軸傾斜角という量を推定した。惑星の軌道公転軸が我々の視線方向に対してほぼ垂直であるトランジット惑星系では、星の自転軸傾斜角は星の自転軸と惑星の公転軸の関係について示唆を与える。昨年度は試験的な試みとして約15天体を観測・解析したが、今年度はこれを拡張しさらに追加で約15天体を観測・解析した。解析では射影自転速度の推定等においてより詳細なモデルを用いるなど、解析面でも改良を加えた。全部で約30天体を解析したが、その結果として約5天体については星の自転軸と惑星の公転軸が優位にずれていない可能性があるという示唆が得られた [49]。

KOI-94 系における惑星食の研究

KOI-94 系は、NASA のケプラー宇宙望遠鏡によって発見された複数トランジット系であり、周期3.7日、10.4日、22.3日、54.3日をもつ4つの惑星候補天体を有する。この系は、複数惑星系の形成を理解するうえで極めて重要な役割を果たすことが期待されているが、同時に“planet-planet eclipse”とよばれる非常にまれな現象（2つの天体が同時に恒星面上を横切り、かつその途中で視線方向から見て重なりあう）がはじめて観測された系としても知られている。このような現象が、惑星の軌道進化の過程について重

要な示唆を与える量である惑星の軌道傾斜角の決定において有用であることは既に指摘されていたものの、実際の観測例を欠いていたこともあり、その物理的なモデル化や重力多体問題としての効果にまで踏み込んだ解析はこれまでなされていなかった。そこで我々は、まず planet-planet eclipse の解析的なモデルを構築し、食によって生じる増光の形状から2惑星の軌道傾斜角が一意に復元できることを示した。さらに惑星どうしが及ぼし合う摂動によるトランジット時刻の一定周期からのずれ (transit timing variation) を N 体計算を用いて解析することで、系の力学的なパラメータについての制限を与えた。最後にこれらの結果をふまえ、次回の planet-planet eclipse の発生時刻について多体問題の効果まで含めた予測を行った [204]。

1.5 参考文献

<受賞>

- [1] 横山順一 井上學術賞 「インフレーション宇宙論の実証的研究」。2013年2月4日
- [2] 細川隆史、日本天文学会研究奨励賞、日本天文学会、2013年3月21日
- [3] 松原隆彦、第17回林忠四郎賞 「統計的摂動解析理論に基づく観測的宇宙論の開拓」、日本天文学会、2013年3月21日
- [4] 平野照幸、平成24年度東京大学大学院理学系研究科研究奨励賞(博士課程)「惑星移動機構解明に向けたトランジット惑星系の軌道傾斜角測定」、2013年3月25日
- [5] 本橋隼人、平成24年度東京大学大学院理学系研究科研究奨励賞(博士課程)「修正重力理論による加速膨張宇宙の記述とその宇宙論的帰結」、2013年3月25日

<報文>

(原著論文)

- [6] X. Gao, T. Kobayashi, M. Shiraishi, M. Yamaguchi, J. Yokoyama and S. Yokoyama, arXiv:1207.0588 [astro-ph.CO], PTEP (2013) 053E03.
- [7] T. Kobayashi and J. Yokoyama, J. Cosmo. & Astroparticle Phys. **1302** (2013) 005 [arXiv:1210.4427 [astro-ph.CO]].
- [8] R. Saito, M. Nakashima, Y. Takamizu and J. Yokoyama, J. Cosmo. & Astroparticle Phys. **1211** (2012) 036 [arXiv:1206.2164 [astro-ph.CO]].
- [9] M. Lake and J. Yokoyama, J. Cosmo. & Astroparticle Phys. **1209** (2012) 030 [arXiv:1207.4891 [gr-qc]].
- [10] T. Suyama, T. Takahashi, M. Yamaguchi and S. Yokoyama, arXiv:1303.5374 [astro-ph.CO].
- [11] T. Suyama and S. Yokoyama, arXiv:1303.1254 [astro-ph.CO].

- [12] C. Ringeval, T. Suyama and J. Yokoyama, arXiv:1302.6013 [astro-ph.CO].
- [13] T. Suyama and J. Yokoyama, Phys. Rev. D **86**, 023512 (2012) [arXiv:1204.3976 [astro-ph.CO]].
- [14] T. Suyama, Y. Watanabe and M. Yamaguchi, Phys. Rev. D **85**, 083504 (2012) [arXiv:1201.3163 [astro-ph.CO]].
- [15] Y. Watanabe and J. Yokoyama, “Gravitational modulated reheating and non-Gaussianity in Supergravity R^2 inflation,” arXiv:1303.5191 [hep-th].
- [16] J. Yoo and Y. Watanabe, “Theoretical Models of Dark Energy,” Int. J. Mod. Phys. D **21**, 1230002 (2012) [arXiv:1212.4726 [astro-ph.CO]].
- [17] A. E. Gumrukcuoglu, S. Kuroyanagi, C. Lin, S. Mukohyama and N. Tanahashi, Class. Quant. Grav. **29**, 235026 (2012) [arXiv:1208.5975 [hep-th]].
- [18] S. Kuroyanagi, K. Miyamoto, T. Sekiguchi, K. Takahashi and J. Silk, Phys. Rev. D **87**, 023522 (2013) [arXiv:1210.2829 [astro-ph.CO]].
- [19] S. Kuroyanagi, C. Ringeval and T. Takahashi, arXiv:1301.1778 [astro-ph.CO], Phys. Rev. D **87**, 083502 (2012).
- [20] T. Kobayashi, H. Motohashi and T. Suyama, “Black hole perturbation in the most general scalar-tensor theory with second-order field equations I: the odd-parity sector”, Phys. Rev. D **85**, 084025 (2012) [arXiv:1202.4893].
- [21] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “Cosmology based on $f(R)$ Gravity admits 1 eV Sterile Neutrinos”, Phys. Rev. Lett. **110**, 121302 (2013) [arXiv:1203.6828].
- [22] H. Motohashi and A. Nishizawa, “Reheating after $f(R)$ inflation”, Phys. Rev. D **86**, 083514 (2012) [arXiv:1204.1472].
- [23] H. Motohashi and T. Suyama, “Self-accelerating Solutions in Massive Gravity on Isotropic Reference Metric”, Phys. Rev. D **86**, 081502(R) (2012) [arXiv:1208.3019].
- [24] H. Motohashi, T. Suyama and J. Yokoyama, “Consequences of a stochastic approach to the conformal invariance of inflationary correlators”, Phys. Rev. D **86** (2012) 123514, [arXiv:1210.2497].
- [25] J. Martin, H. Motohashi and T. Suyama, “Ultra Slow-Roll Inflation and the non-Gaussianity Consistency Relation”, J. Martin, H. Motohashi and T. Suyama, Phys.Rev. D **87** (2013) 023514, [arXiv:1211.0083].
- [26] A. G. Polnarev, T. Nakama and J. Yokoyama, “Self-consistent initial conditions for primordial black hole formation,” J. Cosmo. & Astroparticle Phys. **1209**, 027 (2012) [arXiv:1204.6601 [gr-qc]].
- [27] T. Narikawa, T. Kobayashi, D. Yamauchi and R. Saito: “Testing general scalar-tensor gravity and massive gravity with cluster lensing”, arXiv:1302.2311 [astro-ph.CO] (accepted for publication in Phys. Rev. D (2013)).
- [28] T. Kunimitsu and J. Yokoyama, “Higgs condensation as an unwanted curvaton,” Phys. Rev. D **86**, 083541 (2012) [arXiv:1208.2316 [hep-ph]].
- [29] K. Eda, Y. Itoh, S. Kuroyanagi and J. Silk, “New probe of dark matter properties: gravitational waves from an intermediate-mass black hole embedded in a dark-matter minispikes,” Phys. Rev. Lett. **110**, 221101 (2013) arXiv:1301.5971[gr-qc]
- [30] Takahiro Nishimichi: “Scale Dependence of the Halo Bias in General Local-Type Non-Gaussian Models I: Analytical Predictions and Consistency Relations”, J. Cosmo. & Astroparticle Phys. **08** (2012) 037
- [31] Atsushi Nishizawa, Masahiro Takada & Takahiro Nishimichi: “Perturbation theory for nonlinear halo power spectrum: the renormalized bias and halo bias”, arXiv:1212.4025
- [32] Masanori Sato & Takahiro Nishimichi: “Impact of the non-Gaussian covariance of the weak lensing power spectrum and bispectrum on cosmological parameter estimation”, arXiv:1301.3588
- [33] Daichi Suto, Hajime Kawahara, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, Yasushi Suto & Renyue Cen: “Validity of Hydrostatic Equilibrium in Galaxy Clusters from Cosmological Hydrodynamical Simulations” Astrophys. J. **767** (2013) 79
- [34] Y. Fujii & H. Kawahara: “Mapping Earth-analogs from Photometric Variability: Spin-Orbit Tomography for Planets in Inclined Orbits”, Astrophys. J. **755** (2012) 101
- [35] H. Kawahara, T. Matsuo, M. Takami, Y. Fujii, T. Kotani, N. Murakami, M. Tamura, & O. Guyon: “Can Ground-based Telescopes Detect The Oxygen 1.27 Micron Absorption Feature as a Biomarker in Exoplanets?”, Astrophys. J. **758** (2012) 13
- [36] Y. Fujii, E. L. Turner, & Y. Suto: “Variability of Water and Oxygen Absorption Bands in the Disk-Integrated Spectra of the Earth”, Astrophys. J. **765** (2013) 76
- [37] Toshiya Namikawa, Duncan Hanson & Ryuichi Takahashi “Bias-hardened CMB lensing” Mon. Not. R. Astron. Soc.(2013)
- [38] Masato Shirasaki, Naoki Yoshida, Takashi Hamana & Takahiro Nishimichi: “Probing Primordial Non-Gaussianity with Weak-lensing Minkowski Functionals”, Astrophys. J. **760** (2012) 45
- [39] Takashi Hamana, Masamune Oguri, Masato Shirasaki & Masanori Sato: “Scatter and bias in weak lensing selected clusters”, Mon. Not. R. Astron. Soc.(2012) **425** (3) 2287-2298
- [40] Atsushi Taruya, Takahiro Nishimichi & Francis Bernardeau: “Precision modeling of redshift-space

- distortions from a multipoint propagator expansion”, *Physical Review D*, **87**, (2013) 083509
- [41] Ryuichi Takahashi, Masanori Sato, Takahiro Nishimichi, Atsushi Taruya & Masamune Oguri: “Revising the Halofit Model for the Nonlinear Matter Power Spectrum”, *Astrophys. J.* **761**, (2012) 152
- [42] Atsushi Taruya, Francis Bernardeau, Takahiro Nishimichi & Sandrine Codis: “Direct and fast calculation of regularized cosmological power spectrum at two-loop order”, *Physical Review D*, **86** (2012) 103528
- [43] Daisuke Yamauchi, Toshiya Namikawa & Atsushi Taruya: “Weak lensing generated by vector perturbations and detectability of cosmic strings”, *J. Cosmo. & Astroparticle Phys.* **10** (2012) 030
- [44] Gen Chiaki, Naoki Yoshida, & Tetsu Kitayama: “Low-mass Star Formation Triggered by Early Supernova Explosions”, *Astrophys. J.* **762** (2013) 50
- [45] Gen Chiaki, Takaya Nozawa, & Naoki Yoshida: “Growth of Dust Grains in a Low-metallicity Gas and Its Effect on the Cloud Fragmentation”, *Astrophys. J.* **765** (2013) L3
- [46] Ibe Masahiro, Kamada Ayuki, & Matsumoto Shigeki.: “Imprints of non thermal Wino dark matter on small-scale structure”, *Physical Review D*, **87** (2013) 063511
- [47] Kamada Ayuki, Kawasaki Masahiro, & Yamada Masaki: “Opening the window to the cogenesis with Affleck-Dine mechanism in gravity mediation” *Physics Letters B*, **719** (2013)
- [48] Kamada, Ayuki, Yoshida, Naoki, Kohri, Kazunori, & Takahashi, Tomo ”Structure of dark matter halos in warm dark matter models and in models with long-lived charged massive particles” *J. Cosmo. & Astroparticle Phys.* (2013)
- [49] Teruyuki Hirano, Roberto Sanchis-Ojeda, Yoichi Takeda, Norio Narita, Joshua N. Winn, Atsushi Taruya, & Yasushi Suto, “Measurements of Stellar Inclinations for Kepler Planet Candidates”, *Astrophys. J.* **756** (2012) 66
- [50] Simon Albrecht, Joshua N. Winn, John Asher Johnson, Andrew W. Howard, Geoffrey W. Marcy, Paul Butler R., Pamela Arriagada, Jeffrey D. Crane, Stephen A. Shtetman, Ian B. Thompson, Teruyuki Hirano, Gaspar Bakos, & Joel D. Hartman, “Obliquities of Hot Jupiter Host Stars: Evidence for Tidal Interactions and Primordial Misalignments”, *Astrophys. J.* **757** (2012) 18
- [51] Teruyuki Hirano, Norio Narita, Bun’ei Sato, Yasuhiro H. Takahashi, Kento Masuda, Yoichi Takeda, Wako Aoki, Motohide Tamura, & Yasushi Suto, “Planet-Planet Eclipse and the Rossiter-McLaughlin Effect of a Multiple Transiting System: Joint Analysis of the Subaru Spectroscopy and the Kepler Photometry”, *Astrophys. J. Letters*, **759** (2012) L36
- [52] Norio Narita, Yasuhiro H. Takahashi, Masayuki Kuzuhara, Teruyuki Hirano, et al., “A Common Proper Motion Stellar Companion to HAT-P-7”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **64** (2012) L7
- [53] Toshiya Kashiwagi, Kazuhiro Yahata & Yasushi Suto: “Detection of Far Infrared Emission from Galaxies and Quasars in the Galactic Extinction Map by Stacking Analysis”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **65** (2013) in press (arXiv:1212.0307)
- [54] Kenkichi Yamada, Tetsu Kitayama, Shigehisa Takakuwa, Daisuke Iono, Takahiro Tsutsumi, Kotaro Kohno, Motokazu Takizawa, Kohji Yoshikawa, Takuya Akahori, Eiichiro Komatsu, Yasushi Suto, Hiroshi Matsuo, & Ryohei Kawabe; “Imaging Simulations of the Sunyaev-Zel’dovich Effect for ALMA”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **64**(2012)102
- [55] den Herder et al.“ORIGIN: Metal Creation and Evolution from the Cosmic Dawn”, *Experimental Astronomy* **34** (2012) 519–549
- [56] Masahiro Takada, Richard Ellis, Hiroaki Aihara, Nobuo Arimoto, Kevin Bundy, Masashi Chiba, Judith Cohen, Olivier Dore, Jenny E. Greene, James Gunn, Timothy Heckman, Chris Hirata, Paul Ho, Jean-Paul Kneib, Olivier Le Fevre, Hitoshi Murayama, Tohru Nagao, Masami Ouchi, Michael Seiffert, John Silverman, Laerte Sodre Jr, David Spergel, Michael A. Strauss, Hajime Sugai, Yasushi Suto, Hideki Takami, Rosemary Wyse, the PFS Team; “Extragalactic Science and Cosmology with the Subaru Prime Focus Spectrograph (PFS)”, *Publ. Astron. Soc. Japan* (2012) in press (arXiv:1206.0737)
- [57] Takashi Hosokawa, Naoki Yoshida, Kazuyuki Omukai & Harold W. Yorke: “Protostellar Feedback and Final Mass of the Second-generation Primordial Stars” *Astrophys. J.* **760** (2012) 37L
- [58] Takashi Hosokawa, Kazuyuki Omukai & Harold W. Yorke: “Rapidly Accreting Supergiant Protostars: Embryos of Supermassive Black Holes?” *Astrophys. J.* **756** (2012) 93
- [59] Kohei Inayoshi, Takashi Hosokawa & Kazuyuki Omukai: “Pulsational instability of supergiant protostars: do they grow supermassive by accretion?” *Mon. Not. R. Astron. Soc.* (2013), in press
- [60] Masahiro N. Machida & Takashi Hosokawa: “Evolution of protostellar outflow around low-mass protostar” *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **431** (2013) 1719
- [61] Kohji Yoshikawa, Naoki Yoshida, & Masayuki Umemura: “Direct Integration of the Collisionless Boltzmann Equation in Six-Dimensional Phase-Space”, *Astrophys. J.* **762** (2013) 116
- [62] Ikko Shimizu, Naoki Yoshida, & Takashi Okamoto: “Submillimetre Galaxies in Cosmological Hydrodynamic Simulations” *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **427** (2012) 2866

- [63] Shingo Hirano & Naoki Yoshida: “Radiative Cooling Implementations in Simulations of Primordial Star Formation”, *Astrophys. J.* **763** (2013) 52
- [64] Smadar Naoz, Naoki Yoshida, & Nickolay Y. Gnedin: “Simulations of Early Baryonic Structure Formation with Stream Velocity II”, *Astrophys. J.* **763** (2013) 27
- [65] Marco Valdes, Carmelo Evoli, Andrej Mesinger, Andrea Ferrara & Naoki Yoshida: “The Nature of Dark Matter from High-Redshift HI 21cm Signal”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **429** (2013) 1705
- (国内雑誌)
- [66] 須藤 靖 “主役はダーク” 毎日新聞社 本の時間 2012年4月号～2013年3月号
- [67] 須藤 靖 “右下がりの時代をいきのびる”、*パリティ* **27**(2012) 5月号, pp.52–55.
- [68] 須藤 靖 “ハッブルカルメートルか: 宇宙膨張発見史をめぐる謎”、*日本物理学会誌* **67** (2012) 5月号 pp.311–316.
- [69] 須藤 靖 理学エッセイ第1回 “朝永振一郎の博士号はどこから?”、*東京大学理学系研究科・理学部ニュース* 2012年5月号 44巻1号, p.9.
- [70] 須藤 靖 “注目の多い雑文 その十九: 宇宙人の見る地球”、*東京大学出版会 UP* **476**(2012)6月号, pp.28–37.
- [71] 須藤 靖 “注目の多い雑文 その二十: 対称性の自発的破れ”、*東京大学出版会 UP* **479**(2012)9月号, pp.47–53.
- [72] 須藤 靖 “東大受験生へのメッセージ:物理”、*東京大学新聞* 2012年9月13日
- [73] 須藤 靖 “注目の多い雑文 その二十一: 不ケータイという不見識”、*東京大学出版会 UP* **482**(2012)12月号, pp.27–36.
- [74] 須藤 靖 “注目の多い雑文 その二十二: $0 \times \infty$ 無限大 $\neq 0$ ”、*東京大学出版会 UP* **485**(2013)3月号, pp.29–36.
- [75] 須藤 靖 “坪野公夫教授を送る”、*東京大学理学系研究科・理学部ニュース* 2013年3月号 44巻6号, p.7.
- [76] 平野照幸・須藤 靖 “太陽系外複数惑星系における惑星同士の食の発見”、*東京大学理学系研究科・理学部ニュース* 2013年3月号 44巻6号, p.12.
- [77] 須藤 靖 朝日新聞 asahi.com webronza 科学・環境論説 2012年4月6日、4月18日、5月5日、5月26日、6月23日、7月11日、7月16日、7月27日、9月1日、9月13日、10月17日、10月30日、11月27日、12月13日、12月25日、2013年1月23日、3月27日
- [78] 須藤 靖 読売新聞 書評 2013年1月6日、1月20日、2月3日、2月10日、2月24日、3月3日、3月17日
- [79] 吉田直紀: “宇宙の構造形成”, *パリティ*, Vol. 27, 10 (学位論文)
- [80] Hayato Motohashi, “Cosmological consequences of modified gravity for the primordial and late-time cosmic acceleration”(博士論文)
- [81] Toshiya Namikawa: “Toward a precise measurement of weak lensing signals through CMB experiments and galaxy imaging surveys: A theoretical development and its cosmological implications”(博士論文)
- [82] 中間智弘: “原始ブラックホール形成の精細数値解析”(修士論文)
- [83] 國光太郎: “初期宇宙におけるヒッグス場の凝縮とその宇宙論的帰結”(修士論文)
- [84] Akira Oka: “Modeling Redshift-Space Clustering of the SDSS Luminous Red Galaxies with Cosmological N-body Simulations: Implications for a Test of Gravity”(修士論文)
- [85] Gen Chiaki: “Supernova Explosions in the Early Universe”(修士論文)
- [86] Teruyuki Hirano: “Measurements of Spin-Orbit Angles for Transiting Systems: Toward an Understanding of the Migration History of Exoplanets”(博士論文)
- [87] Yuka Fujii: “Exploring the landscape of habitable exoplanets via their disk-integrated colors and spectra: Indications for future direct imaging observations”(博士論文)
- [88] Takuma Kurokawa: “Probing the nature of dark matter by gravitational lensing observations”(修士論文)
- [89] Yuxin Xue: “The Formation and Evolution of Hot-Jupiter: Planet-Planet Scattering Followed by Tidal Dissipation”(修士論文)
- [90] Daichi Suto: “Validity of Hydrostatic Equilibrium in Mass Estimates of Simulated Galaxy Clusters”(修士論文)
- (著書)
- [91] 須藤 靖: “主役はダーク”、毎日新聞社 (2013年3月刊行、293ページ)
- [92] 谷口義明監修: “新天文学事典”, ブルーボックス (2013年3月刊行) (第7章 吉田直紀担当)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [93] Takahiro Nishimichi: “Scale Dependence of the Halo Bias in General Local-Type Non-Gaussian Models”; WKYC 2012 Conference, (Daejeon, June 2012)
- [94] Toshiya Namikawa: “Recent progress and future prospects of CMB lensing”, 3rd Int. Workshop on Dark Matter, Dark Energy and Matter-antimatter Asymmetry, NCTS & LeCosPA, (Taiwan, Dec 29, 2012)

- [95] Atsushi Taruya: “Precision Power Spectrum Calculations for Large Scale Observations”; 17th Rencontres Itzykson - Heart of Darkness: Dark Energy and Modified Gravity @ IPhT (Saclay, 6/18-6/20, 2012)
- [96] Atsushi Taruya: “Fast power spectrum calculation from regularized perturbation theory in weakly nonlinear regime”; WKYC2012 @ KASI (Daejeon, 6/25-6/27, 2012)
- [97] Atsushi Taruya: “Precision calculations for cosmological power spectrum in real and redshift spaces”; The 5th KIAS Workshop on Cosmology and Structure Formation @ KIAS (Soul, 10/29-11/4, 2012)
- [98] Atsushi Taruya: “Precision power spectrum calculation for large-scale structure in real and redshift spaces”; KEK-CPGS-AIU2012 (Accelerators In the Universe 2012) Axion Cosmophysics @ KEK (Tsukuba, 11/6-11/9, 2012)
- [99] Gen Chiaki, Takaya Nozawa, Naoki Yoshida: “Growth of dust grains in a low-metallicity gas and its effect on the cloud fragmentation”; invited talk at INAF, (Rome, May 7, 2012)
- [100] Ayuki Kamada: “Structure Formation in Warm Dark Matter Models”; Workshop Meudon CIAS 2012 WARM DARK MATTER AND GALAXY FORMATION IN AGREEMENT WITH OBSERVATIONS (CIAS Observatoire de Paris, Chateau de Meudon, Meudon campus, Jun. 6, 2012)
- [101] Teruyuki Hirano, “Measurements of Spin-orbit Angles for Multiple Systems: Sky-projected and Line-of-sight”; Exoplanets in Multi-body Systems in the Kepler Era, (Aspen, USA, 2/9-15, 2013)
- [102] Yasushi Suto: “Detection of Far Infrared Emission from SDSS Galaxies in the SFD Galactic Extinction Map”, and “Summary Talk” at 5th KIAS workshop on cosmology and structure formation, (KIAS, Seoul, Korea, October 29-November 2, 2012)
- [103] Naoki Yoshida: “Physics of primordial star formation”; The physics of star formation (Trieste, Italy, October 2012)
- [104] Naoki Yoshida: “Star formation in a low-metallicity gas”; The low-metallicity ISM (Goettingen, Germany, October 2012)
- [105] Naoki Yoshida: “Three-body chemistry in the early universe”; The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (Fukuoka, Japan, August 2013)
- [106] Naoki Yoshida: “Primordial star formation”; 39th COSPAR General Assembly (Mysore, India, July 2012)
- [107] Naoki Yoshida: “Hunting for the first stars”; GRB in the era of rapid follow-up (Liverpool, UK, June 2012)
- [108] Naoki Yoshida: “Physics of primordial star formation”; The First Stars IV (Kyoto, Japan, May 2012)
- [109] Teruaki Suyama: “Testing the origin of primordial perturbations - use of bi and tri-spectrum”; RESCEU Symposium on general relativity and gravitation (JGRG22) (東京大学, 11/12-11/16, 2012)
- [110] T. Narikawa: “Testing modified gravity with cluster lensing”; 3rd International Workshop on Dark Matter, Dark Energy and Matter-Antimatter Asymmetry (National Tsing Hua University, Taiwan, December 29, 2012)
- 一般講演
- [111] J. Yokoyama, “Higgs condensation as an unwanted curvaton,” String cosmology workshop, Makubetsu, 2012/8/7
- [112] J. Yokoyama, “Higgs condensation as an unwanted curvaton,” COSMO 2012, KITP, Beijing, 2012/9/13
- [113] Atsushi Taruya: “Baryon acoustic oscillations in 2D: Effect of higher-order corrections”; Perturbative approaches to redshift space distortions @ University of Zurich (Zurich, 7/11-7/13, 2012)
- [114] Teruaki Suyama: “Metric perturbation from inflationary magnetic field and generic bound on inflation models”; COSMO12 (中国科学アカデミー, 9/16-9/14, 2012)
- [115] Y. Watanabe, “Practical Guide to Compute f_{NL} outside the Horizon”, Critical Test of Inflation Using Non-Gaussianity, Max-Planck-Institut für Astrophysik, Garching, Germany, Nov. 2012
- [116] Y. Watanabe & F. Bezrukov, “Gravity as the Origin of the Spontaneous Symmetry Breaking in the Inflationary Universe”, JGRG22, Resceu Symposium on General Relativity and Gravitation, Tokyo, Japan, Nov. 2012
- [117] Y. Watanabe & F. Bezrukov, “Consequences of spontaneous symmetry breaking in an inflationary universe”, Nishinomiya Yukawa Symposium: New Waves in Gravity and Cosmology, Kyoto, Japan, Dec. 2012
- [118] Y. Watanabe, T. Suyama & M. Yamaguchi, “Second order entropic transfer and non-Gaussianity in multi-field inflation”, Nishinomiya Yukawa Symposium: New Waves in Gravity and Cosmology, Kyoto, Japan, Dec. 2012
- [119] S. Kuroyanagi “Forecast constraints on cosmic string parameters from gravitational wave direct detection experiments” APCTP-IEU Focus Program, Cosmology and Fundamental Physics III (Asia Pacific Center for Theoretical Physics, Korea, 6/11-6/22, 2012)
- [120] S. Kuroyanagi “Gravitational waves from cosmic strings” The Marcel Grossman Meeting 2012 (Stockholm University, Sweden, 7/1-7/7, 2012)

- [121] S. Kuroyanagi “Forecast constraints on cosmic string parameters from gravitational wave direct detection experiments” SKKU Symposium on Astrophysics and Cosmology: from Particle to Universe (Sungkyunkwan University, Korea, 8/30-9/1, 2012)
- [122] S. Kuroyanagi “Forecast constraints on cosmic strings from future CMB, pulsar timing, and gravitational wave direct detection experiments” JGRG22 (University of Tokyo, Japan, 11/12-11/16, 2012)
- [123] S. Kuroyanagi “Probing thermal history of the Universe with CMB experiments and DECIGO” The 11th DECIGO workshop (Kyoto University, Japan, 11/27, 2012)
- [124] T. Narikawa: “Testing gravity with galaxy cluster”; RESCEU Symposium on 22th General Relativity and Gravitation (JGRG22) (RESCEU, The University of Tokyo, November 14, 2012)
- [125] T. Narikawa: “Test of modified gravity with cluster lensing”; Nishinomiya Yukawa Symposium - New waves in Gravity and and Cosmology (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, December 4-6, 2012, poster)
- [126] H. Motohashi and T. Suyama, “Black hole perturbation in modified gravity theories”, Thirteenth Marcell Grossmann Meeting, Stockholm University, Sweden, Jul. 1- 7, 2012.
- [127] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “ $f(R)$ gravity and eV-mass sterile neutrinos”, COSMO 2012, Beijing, China, Sep. 10 - 14, 2012.
- [128] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “Cosmological constraints on sterile neutrino mass in $f(R)$ gravity”, The 22nd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, Tokyo University, Tokyo, Japan, Nov. 12 - 16, 2012.
- [129] H. Motohashi and A. Nishizawa, “Reheating after $f(R)$ inflation and gravitational wave production” (Poster), 1st symposium on “New development in astrophysics through multimessenger observations of gravitational wave sources”, Osaka city University, Osaka, Japan, Mar. 1 - 2, 2013.
- [130] Y. Miyamoto, H. Motohashi, T. Suyama and J. Yokoyama, “The effect of gauge fields on oscillating scalar fields at finite temperature”, The 22nd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, Nov. 12 - 16, 2012.
- [131] T. Nakama, “Self-consistent initial conditions for primordial black hole formation,” RESCEU SYMPOSIUM ON GENERAL RELATIVITY AND GRAVITATION (JGRG22), The University of Tokyo, Tokyo, Japan, Nov. 12 - 16
- [132] Taro Kunimitsu, Jun’ichi Yokoyama, “Higgs Condensation in the Inflationary Universe”, RESCEU symposium on General Relativity and Gravitation (JGRG 22), RESCEU, University of Tokyo, Japan, November 12-16, 2012
- [133] K. Eda, Y.Itoh, S.Kuroyanagi and J.Silk “Effect of Dark Matter Mini-spike around Intermediate-mass Black Hole on the Gravitational Waves” The 4th APCosPA Winter School/Workshop, National Taiwan University, Taipei, 1/21-2/1, 2013
- [134] K. Eda, Y.Itoh, S.Kuroyanagi and J.Silk “Effect of dark matter halos around IMBHs on gravitational waves”, The 22nd workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, University of Tokyo, Tokyo, 11/12-16, 2012
- [135] Takahiro Nishimichi: “Clustering of Biased Tracers in Redshift Space”; Perturbative approaches to redshift space distortions , (Zurich, July 2012)
- [136] Yuka Fujii: “Probing the Humidity of Earth-like Exoplanets”; IAU General Assembly (Beijing, 8/27-8/31, 2012)
- [137] Toshiya Namikawa: “Lensing reconstruction from current CMB data and constraining non-scalar metric perturbations with lensing curl”, KEK-CPWS-AIU2012 (KEK, Nov 9, 2012)
- [138] Toshiya Namikawa: “An Improved Method for CMB Lensing Reconstruction and Its Cosmological Applications”, RESCEU symposium on general relativity and gravitation: JGRG 22, (Tokyo, Nov 14, 2012)
- [139] Masato Shirasaki: “Cosmological test with WL Minkowski Functionals”; TIFR Winter School and Symposium on Astronomical Surveys (Mumbai, India, 12/21, 2012)
- [140] Gen Chiaki, Naoki Yoshida, Tetsu Kitayama, Takaya Nozawa: “The low-mass star formation triggered by the early supernova explosions”; the Low-Metallicity ISM (Göttingen, Oct 8–12, 2012)
- [141] Teruyuki Hirano: “Measurements of spin-orbit angles and implications of planetary migration scenarios”; Transiting Planets in the House of the Sun: A Workshop on M Dwarf Stars and Their Planets (Maui, USA, 6/3-6, 2012)
- [142] Teruyuki Hirano, “Detection and Characterization of Transiting Systems with Smaller Exoplanets”; IAU Symposium 293: Formation, Detection, and Characterization of Extrasolar Habitable Planets, (北京, 中国, 8/27-31, 2012)
- [143] Toshiya Kashiwagi, Kazuhiro Yahata & Yasushi Suto: “Detection of Far Infrared Emission from Galaxies and Quasars in the Galactic Extinction Map by Stacking Analysis”; GCOE International Symposium on Physical Sciences Frontier (Tokyo, 12/8-9, 2012)

- [144] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “ $f(R)$ Cosmology and Massive Neutrinos”, Proceedings of CosPA 2011, Peking University, Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 10, 35 (2012).
- [145] J. Yokoyama, “Opening address”, JGRG22(2012)111200.
- [146] T. Kunimitsu, “Higgs condensation in the inflationary universe”, JGRG22(2012)111211.
- [147] S. Kuroyanagi, “Forecast constraints on cosmic strings from future CMB, pulsar timing and gravitational wave direct detection experiments”, JGRG22(2012)111212.
- [148] T. Nakama, “Self-consistent initial conditions for primordial black hole”, JGRG22(2012)111214.
- [149] Y. Watanabe, “Gravity as the origin of spontaneous symmetry breaking in an inflationary universe”, JGRG22(2012)111216.
- [150] T. Suyama, “Testing the origin of primordial perturbation: Use of bi- and tri-spectrum”, JGRG22(2012)111303.
- [151] Y. Itoh, “Stacking of cluster profiles”, JGRG22(2012)111306.
- [152] K. Eda, “Effect of dark matter halos around IMBHs on gravitational waves”, JGRG22(2012)111347.
- [153] H. Motohashi, “Cosmological constraints on sterile neutrino mass in $f(R)$ gravity”, JGRG22(2012)111417.
- [154] T. Narikawa, “Testing gravity with galaxy cluster”, JGRG22(2012)111418.
- [155] J. Martin, “The cosmological constant problem”, JGRG22(2012)111501.
- [156] A. Starobinsky, “Duration and decay branching ratios of stochastic inflation”, JGRG22(2012)111604.
- (国内会議)
- 招待講演
- [157] 横山順一 “インフレーション宇宙論” 第37回天文・天体物理若手夏の学校 三国温泉ホテル 2012年8月4日
- [158] 横山順一 “宇宙論における理論的未解決問題” HSC研究会 国立天文台 2012年9月26日
- [159] 横山順一 “インフレーション宇宙論” RA研究会 熱海 2013年2月22日
- [160] 樽家 篤史: “宇宙大規模構造と非ガウス性”; 物理学会年次大会 (広島大学, 3/27, 2013)
- [161] 千秋 元、野沢 貴也、吉田直紀: “Low-mass star formation triggered by early supernova explosions and growth of dust grains”; (ISAS/JAXA, Dec 25, 2012)
- [162] 平野 照幸: “Measurements of Stellar Inclinations for Transiting Exoplanets: New Data and New Approach”; 第8回「太陽系外惑星大研究会」, (熱海, 4/18, 2012)
- [163] 平野 照幸: “高分散分光を用いた惑星探査の現状と将来計画”; トランジット観測によるスーパーアースの大気組成と起源の解明, (岡山, 9/26, 2012)
- [164] 平野 照幸: “太陽系外惑星の観測による惑星系進化の解明”; 複合的アプローチで探る宇宙の化学進化, (伊豆高原, 10/27, 2012)
- [165] 細川 隆史: “初期宇宙での大質量星形成”; 第25回理論懇シンポジウム (つくばエポカル, 12/22, 2012)
- [166] 吉田 直紀: “天体宇宙物理分野”; 第25回 理論懇シンポジウム (茨城県エポカルつくば, 12/22, 2012)
- [167] 伊藤 洋介: “Reach of KAGRA in continuous wave search” (ポスター); 第25回理論懇シンポジウム (つくばエポカル, 12/22, 2012)
- 一般講演
- [168] 横山順一 “ヒッグス場によるインフレーション” RESCEU summer school, Fukushima, Japan, July 24 - 27, 2012
- [169] 樽家 篤史: “Cosmological studies with SuMIRE”; 「第12回宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会/RESCEU サマースクール (裏磐梯, 7/24-7/27, 2012)
- [170] 樽家 篤史: “パワースペクトルおよび相関関数における赤方偏移ゆがみの高次効果”; 天文学会秋の年会 (大分大学, 9/20, 2012)
- [171] 須山輝明 “Metric perturbation from inflationary magnetic field and generic bound on inflation models” RESCEU summer school, Fukushima, Japan, July 24 - 27, 2012
- [172] Taro Kunimitsu, Jun'ichi Yokoyama, “Higgs Condensation after Inflation”, RESCEU summer school, Fukushima, Japan, July 24 - 27, 2012
- [173] T. Narikawa: “Observational Tests of Modified Gravity Models - Toward Realistic Tests”; 2012 RESCEU Summer School (Fukushima, July 26, 2012)
- [174] Y. Itoh: “Gravitational lensing of gravitational waves”; 2012 RESCEU Summer School (Fukushima, July 25, 2012)
- [175] 成川達也: “銀河団における重力理論の検証”; 物理学会 (京産大、9/12, 2012)
- [176] 成川達也: “Vainshtein mechanism in cluster lensing”; 観測的宇宙論ワークショップ (RESCEU、東大、11/28, 2012)
- [177] H. Motohashi, A. A. Starobinsky and J. Yokoyama, “Sterile neutrino and $f(R)$ gravity”, RESCEU summer school, Fukushima, Japan, Jul. 24 - 27, 2012.

- [178] Y. Miyamoto, H. Motohashi, T. Suyama and J. Yokoyama, “The effect of gauge fields on oscillating scalar fields at finite temperature”, グローバル COE 「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」第9回 RA 自主研究会, 熱海, Feb. 20 - 22, 2013.
- [179] A. G. Polnarev, 中間 智弘, 横山 順一: “漸近展開による原始ブラックホール形成初期条件の設定”; 日本物理学会 2012 年秋季大会, 京都産業大学, 京都, 日本, 2012 年 9 月 11 日 - 14 日
- [180] 中間 智弘, 原田 知広, A. G. Polnarev, 横山 順一: “原始ブラックホール形成の精細数値解析”; 日本物理学会 2013 年春季大会, 広島大学, 広島, 日本, 2013 年 3 月 26 日 - 29 日
- [181] T. Nakama, “Self-consistent initial conditions for primordial black hole formation,” RESCEU サマースクール, 裏磐梯, 福島, 日本, 2012 年 7 月 24 日 - 27 日
- [182] 國光太郎, 横山順一, 「インフレーション宇宙におけるヒッグス場の凝縮とその帰結」, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 京都産業大学, 2012 年 9 月 11 日-14 日
- [183] 國光太郎, 横山順一, 「インフレーション宇宙におけるヒッグス場の凝縮とその帰結」, 第 42 回天文・天体物理若手夏の学校, 福井県東尋坊温泉三国観光ホテル, 2012 年 8 月 1 日-4 日
- [184] 枝和成, 「中間質量ブラックホール周囲に存在するダークマターハローの重力波への影響」, 日本物理学会 2013 年春季大会, 広島大学, 2013 年 3 月 26 日-29 日
- [185] 西道 啓博, 樽家 篤史: “N 体シミュレーションによるサブハローの赤方偏移歪みの精密測定”; 天文学会, (大分大学, 9/20, 2012)
- [186] 西道 啓博: “原始揺らぎの非ガウス性がハローバイアスに及ぼす影響”; RESCEU 観測的宇宙論ワークショップ, (東京大学, 11/28, 2012)
- [187] 細川 隆史, 大向 一行, Harold W. Yorke: “超大降着率下での原始星形成: supergiant protostar”; 天文学会 (大分大学, 9/20, 2012)
- [188] 藤井 友香: “吸収線の変動で探る地球型惑星の表層環境”; 天文学会春季年会 (埼玉大学, 3/20-3/24, 2013)
- [189] 並河 俊弥, Duncan Hanson, 高橋 龍一: “不完全マップからの CMB の弱い重力レンズの再構築法の開発”, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (京都産業大学, 9/14, 2012)
- [190] 並河 俊弥: “CMB の弱い重力レンズ再構築法の開発と宇宙論への応用”, すばる HSC サーベイによるサイエンス (国立天文台三鷹キャンパス, 9/27, 2012)
- [191] 並河 俊弥: “CMB の弱い重力レンズ精密測定に向けた測定手法の開発と宇宙論への応用”, RESCEU 観測的宇宙論ワークショップ (東京大学本郷キャンパス, 11/27, 2012)
- [192] 並河 俊弥: “CMB の弱い重力レンズ精密測定に向けた測定手法の開発と宇宙論への応用”, 第 25 回理論懇シンポジウム (つくば国際会議場, 12/23, 2012)
- [193] 岡アキラ: “N 体シミュレーションを用いた SDSS LRG バイアスモデルの構築”; RESCEU 観測的宇宙論ワークショップ (東京大学, 11/28/2012)
- [194] 岡アキラ: “N 体シミュレーションを用いた SDSS LRG 非等方クラスタリングの再現とロバストな重力理論の検証”; 天文学会 (埼玉大学, 3/22/2013)
- [195] 白崎正人, 吉田直紀, 浜名崇: “cosmic shear データ解析におけるマスク領域の影響” 日本天文学会 (大分大学, 9/20, 2012)
- [196] 白崎正人: “Cosmological Constraints from Weak Lensing Minkowski Functionals” すばる HSC サーベイによるサイエンス (国立天文台, 9/28, 2012)
- [197] 白崎正人: “重力レンズミンコフスキー汎関数を使った宇宙論的テスト” RESCEU 観測的宇宙論ワークショップ (東京大学, 11/29, 2012)
- [198] 千秋 元, 野沢貴也, 吉田直紀: “ダスト成長を考慮した低金属量ガス雲の進化”; Grain Formation Workshop (CPS, Nov 28-30, 2012)
- [199] 千秋 元, 野沢貴也, 吉田直紀: “Evolution of low-metallicity collapsing gas clouds considering the growth of dust grains”; 星形成ワークショップ (国立天文台, Dec 10-12, 2012)
- [200] 千秋 元, 野沢貴也, 吉田直紀: “Growth of dust grains in low-metallicity collapsing clouds”; ALMA 時代の宇宙構造形成理論研究会 (北海道大学, Jan 26-28, 2013)
- [201] 鎌田 歩樹: “温かい暗黒物質及び崩壊する荷電重粒子における銀河ハロー形成”; 日本天文学会秋季大会 (大分大学, 9/20, 2012)
- [202] 平野 照幸, Guillaume Hébrard, 佐藤 文衛, 成田 憲保, 樽家 篤史, 須藤 靖: “トランジット惑星系のロジター効果: HARPS 型分光器の場合のモデル化”; 日本天文学会 2012 年秋季年会, (大分大学, 9/20, 2012)
- [203] 平野 照幸, 成田 憲保, 佐藤 文衛, 高橋 安大, 増田 賢人, 竹田 洋一, 青木 和光, 田村 元秀, 須藤 靖: “トランジット惑星系のロジター効果: HARPS 型分光器の場合のモデル化”; 日本天文学会 2013 年春季年会, (埼玉大学, 3/23, 2013)
- [204] 増田 賢人, 平野 照幸, 樽家 篤史, 長沢 真樹子, 須藤 靖: “KOI-94 系における惑星食の解析”; 日本天文学会 2013 年春季年会 (埼玉大学, 3/20-3/23, 2013)
- [205] 柏木俊哉, 須藤靖: “スタック解析による銀河系減光地図中の系外銀河起源遠赤外放射の検出”; 日本天文学会 2012 年秋季年会 (大分大学, 9/19-9/21, 2012)
- [206] 柏木俊哉, 須藤靖: “SDSS 銀河のスタック解析による遠赤外放射の統計的定量化”; 日本天文学会 2013 年春季年会 (大分大学, 9/19-9/21, 2013)
- [207] 吉田 直紀: “ボルツマン方程式の積分”; RESCEU/DENET サマースクール (福島県裏磐梯, 7/24, 2012)
- [208] Yuxin Xue: “Numerical study of spin-orbit misalignment and realignment”; 日本天文学会 2013 年春季年会 (埼玉大学, 3/20-3/23, 2013)
- (セミナー)
- [209] 横山順一 “Cosmology of the Higgs field” 名古屋大学 KMI コロキウム 2013 年 1 月 23 日

- [210] Atsushi Taruya: “Gravitational-wave backgrounds from ground- and space-based interferometers”; ACP セミナー (カブリ数物連携宇宙研究機構, 5/15, 2012)
- [211] 樽家 篤史: “宇宙大規模構造の精密理論計算: 現状と課題”; 宇宙物理学研究室アストロセミナー (広島大学, 12/21, 2012)
- [212] 須山輝明 “On non-Gaussianity of the primordial perturbation” LeCosPA Cosmology Seminar 2013年3月7日
- [213] 須山輝明 “Origin of the inhomogeneous structure of the Universe” 国立台湾大学ジョイントコロキウム 2013年3月19日
- [214] 渡辺悠貴 “非ミナル結合重力におけるインフレーション宇宙と素粒子” 立教大学理論物理学コロキウム 2012年9月25日
- [215] 渡辺悠貴 “Inflationary Cosmology with Gravitationally Enhanced Friction” 東京理科大学ハドロン物理セミナー 2012年11月16日
- [216] T. Narikawa: “Test of Horndeski’s theory and massive gravity with cluster lensing”; Seminar on Exchange Visits between JSPS and DFG (Heidelberg University, December 29, 2012)
- [217] H. Motohashi, “Inflation and reheating in $f(R)$ gravity”, Nagoya University, Gravity and Particle Cosmology Group, Nagoya, Japan, Nov. 2, 2012.
- [218] H. Motohashi, “ $f(R)$ gravity and cosmology”, University of Tokyo, High Energy Physics Theory Group, Tokyo, Japan, Oct. 15, 2012.
- [219] H. Motohashi, “Cosmic evolution in $f(R)$ gravity”, Helsinki University, Helsinki, Finland, Jun. 28, 2012.
- [220] 伊藤 洋介, “A dipole anisotropy of galaxy distribution: Does the CMB rest frame exist in the local universe?”, 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻, 2012年5月1日
- [221] 伊藤 洋介, “Gravitational wave astronomy from ground based detectors”, 立教大学, 2012年6月19日
- [222] 伊藤 洋介, “重力波データ解析の現状と展望”, 東京大学坪野研究室, 2012年6月20日
- [223] 伊藤 洋介, “Gravitational lensing of gravitational waves”, 宇宙線研究所, 2012年6月26日
- [224] 伊藤 洋介, 『重力波データ解析のための統計学初歩(補講)』, KAGRA データ解析スクール @ RESCEU 2013, 2012年11月3日～5日
- [225] 伊藤 洋介, 『スペクトル解析ミニ講義』, KAGRA データ解析スクール @ NAOJ 2013, 2013年2月20日～22日
- [226] 西道 啓博: “一般的な局所型非ガウス性を持つ原始揺らぎの宇宙の大規模構造への影響”; 宇宙物理学理論グループセミナー, (東京工業大学, 5/15, 2012)
- [227] 西道 啓博: “宇宙の大規模構造を巡る最近の理論的進展”; 宇宙物理学教室理論雑誌会, (京都大学, 12/11, 2012)
- [228] Yuka Fujii: “Exploring the Landscape of Habitable Exoplanets via Their Disk-integrated Colors and Spectra: Indications for Future Direct Imaging Observations”; American Museum of Natural History (New York City, USA, Nov 7, 2012)
- [229] Yuka Fujii: “Exploring the Landscape of Habitable Exoplanets via Their Disk-integrated Colors and Spectra: Indications for Future Direct Imaging Observations”; Center for Astrophysics (Cambridge, USA, Nov 19, 2012)
- [230] Yuka Fujii: “Exploring the Landscape of Habitable Exoplanets via Their Disk-integrated Colors and Spectra: Indications for Future Direct Imaging Observations”; Penn State University (State College, USA, Nov 30, 2012)
- [231] Toshiya Namikawa: “Weak lensing of CMB and cosmic shear as a probe of non-scalar perturbations” Canadian Institute for Theoretical Astrophysics, (Toronto, Canada, Dec 14, 2012)
- [232] Toshiya Namikawa: “Toward a precise measurement of weak lensing signals with CMB and galaxy observations: A theoretical development and its cosmological implications” McGill University, (Montreal, Canada, Dec 6, 2012)
- [233] 並河 俊弥: “CMB の弱い重力レンズを用いた観測的宇宙論” KEK (筑波, 4/27, 2012)
- [234] 須藤靖: “ペイル・ブルー・ドットの色を解説する”, 愛媛大学理学部物理学教室セミナー (2012年8月8日)
- [235] 須藤靖: “Deciphering colors of a pale blue dot”, 宇宙線研究所コロキウム (2012年11月8日)
- [236] 細川 隆史: “初代星の質量降着進化と最終質量”; (青山学院大学, 11/9, 2012)
- [237] Naoki Yoshida: “Observational Cosmology” Kavli IPMU Colloquium (Kashiwa, Japan, July 25, 2012)
- [238] Naoki Yoshida: “Numerical cosmology for wide-field surveys” IoA Colloquium, University of Tokyo (Mitaka, October 4, 2012)
- [239] Naoki Yoshida: “Direct integration of the collisionless Boltzmann equation” Harvard ITC colloquium (Cambridge, USA, February 28, 2013)
- (集中講義)
- [240] 横山順一 “Introduction to inflationary cosmology” National Taiwan University 2012年1月21-22日
- (一般講演)
- [241] 横山順一 “宇宙のはじまる前” 大阪市立大学市民講演会 グランキューブ大阪 2012年4月7日
- [242] 横山順一 “加速する宇宙” 東京大学理学部公開講演会 2012年4月22日
- [243] 横山順一 “宇宙のはじまり” 成蹊高校見学会 2012年7月10日

- [244] 横山順一 “たくさんの宇宙” ダライラマ法王と科学者との対話 ホテル・オークラ 2012年11月6日
- [245] 横山順一 “重力波で宇宙を見る” 日比谷高校 SSH 講演会 2013年2月15日
- [246] 須山輝明 “どんどん広がる宇宙とその仲間たち” ビッグバンセンタークリスマス講演会 2012年12月25日
- [247] 平野 照幸: “トランジット惑星の分光観測と成果”; アジア総研大冬の学校 (国立天文台三鷹, 12/4, 2012)
- [248] 須藤靖: “天文学という文学”、第3回東京大学総合図書館ブックトーク (2012年5月24日)
- [249] 須藤靖: “ダークエネルギーの謎にどう挑むか”、講演会「次世代望遠鏡で見る宇宙」(学術情報センター一橋講堂、2012年10月8日)
- [250] 須藤靖: “天文学者という選択: invaluable & valuable” 水戸啓明高校講演 (2012年10月26日)
- [251] 須藤靖: “ペイル・ブルー・ドットの本当の色”、講演会「現代科学の最先端」第八回高知工科大学環境理工学群 (2012年11月26日)
- [252] 須藤靖: “暗黒宇宙を見て、世界の摂理を知る”、タイムドーム明石 講演会、中央区立郷土天文館 (2013年3月10日)
- [253] 吉田 直紀: “きんかんにつしょく”; 幼稚園児向け講演会 (柏市松葉幼稚園, 5/19, 2012)
- [254] 吉田 直紀: “宇宙が光で満たされるまで”; 七夕講演会 (多摩六都プラネタリウム, 7/7, 2012)
- [255] 吉田 直紀: “宇宙はどこまで分かったのか”; 数理の翼 夏季セミナー (川崎市青少年の家, 8/7, 2012)
- [256] 吉田 直紀: “宇宙は謎で満たされている”; ナガセ 大学学部研究会 (東京国際フォーラム, 8/21, 2012)
- [257] 吉田 直紀: “宇宙はどこまで分かったのか”; 柏市幼稚園協会研修会 (さわやかちば県民プラザ, 8/24, 2012)
- [258] 西道 啓博: “加速宇宙の謎に挑む”; 知の講座 第4回, (流山市生涯学習センター, 10/21, 2012)

(プレスリリース)

- [259] 本橋 隼人, アレクセイ A. スタロビンスキー, 横山順一. “アインシュタインは修正されるか? – 新種のニュートリノの質量でさぐる宇宙の進化 –”, 2013年3月4日

2 銀河と星の共進化

——観測データ解析に基づいた宇宙の創生進化の理論的研究—— (茂山)

「初期宇宙で形成された天体がどのような化学的力学的進化を遂げてきたのか？」をシミュレーションによって追跡することにより、「ヘリウム・リチウム・ベリリウム・ホウ素などの軽元素および炭素・酸素・ケイ素・鉄から超ウラン元素に至る重元素が、宇宙進化のどの段階でどのような天体において合成され放出されたのか」という宇宙における物質の創成史を明らかにしていく。

近年の観測技術の進歩により、より遠くの天体、より暗い天体についての詳細な観測データが大量に得られるようになってきた。遠くの天体を観測するという事は宇宙初期の天体を観測していることになる。また暗い天体には宇宙初期に生まれて現在まで生き残っている我々の銀河ハローに属する古い星も含まれる。これらの古い星は形成当時の銀河初期の情報を未だに保持していると考えられる。つまり、宇宙初期に存在した天体の進化は、現在、近傍に存在する天体の進化と同様に観測によって検証可能な科学的な研究対象となってきた。

遠方のクエーサーから発せられる光のスペクトルには重元素によって作られた吸収線が検出されている。スペクトルの解析から得られる元素組成比と赤方偏移の関係を理論的に解釈することによって、宇宙初期における重元素の創成史を探ることができる。最近では、遠方の超新星が数多く見つかった。超新星を標準光源として仮定することによって宇宙の幾何学的な性質を導こうという試みもある。この研究には遠方の超新星と近傍の超新星の性質の差異を知ることが重要である。また、遠方の天体として着目されている γ 線バーストについて、その起源と超新星の関連について研究している。特に、近年注目されている極超新星と呼ばれる非常に爆発エネルギーの大きな超新星の爆発モデルを計算し、観測と比較することでその特徴を明らかにしつつある。極超新星は非常に大量の重元素を放出するので銀河の化学進化における役割も究明する必要がある。

近傍の古い星のスペクトルにも重元素によって作られる吸収線が検出されている。これらの星の中には太陽に比べて400,000分の1以下の量の重元素しか持っていない星も存在している。このような星には我々の銀河で最初に生まれた星が超新星爆発をした時の状況さえ推測できる手がかりが含まれているだろう。

このプロジェクトでは以上のような観測と比較する理論的なモデルの構築を目指している。そのために、宇宙初期に形成されたと考えられるほとんど重元素を含まないガスから形成された星の進化モデルを構築し、現在超新星爆発を起している星との違

いを研究する。さらに、これらの星がどのように形成されるのか、超新星爆発を起した後に、重元素がどのように星間ガスにばらまかれ、次の世代の星に受け継がれて行くのかを3次元数値流体計算によって調べる。軽元素については、超新星爆発時の衝撃波が星表面を通過する直後の加速を詳しく調べ、その星間空間での輸送過程を解析し、軽元素合成への寄与を定量的に調べる。このようにして、宇宙に存在する元素の創成史を明らかにしていく。このような研究によって得られた知見をもとに銀河よりも大きなスケールの銀河団中に存在する高温ガスに含まれる重元素の起源についても研究する。

2.1 新星

MAXIが発見した特異な新星の理論モデル

小マゼラン雲に出現し、MAXIによって発見されたMAXI J0158-744はX線でおおよそ1,000秒間輝いた後、スペクトルを低エネルギー側に移しながら数日かけて暗くなっていく様子をSWIFTによって観測された。X線の強度は 10^{40} erg s⁻¹ほどに達し、白色矮星のEddington limitを数十倍上回っていた。通常の新星では可視光で主に光り、その強度は最大でおおよそEddington limitに達する。また、MAXIが得たスペクトルの中にはNe XIイオンの非常に強いK α 線が観測された。この現象を、限界質量に近い質量を持った白色矮星に通常の新星の1%以下の $10^{-9} M_{\odot}$ 程度の質量の水素が降り積もり熱核反応が暴走した結果として解釈する理論モデルを提案した。東京工業大学研究員の森井幹雄氏(現理化学研究所研究員)との共同研究[17]。

2.2 超新星

衝撃波面でのコンプトン散乱による非熱的放射形成

超新星爆発時に内部で発生した衝撃波が星の表面を通過する直前にコンプトン散乱によって熱的放射の光の一部がエネルギーを与えられることで、スペクトルが黒体放射からずれ、高エネルギー側にテールが形成される。爆発時の流体力学的なモデルに自己相似解を用い、輻射輸送をモンテカルロ法で扱うことで、この現象を数値計算した。衝撃波の伝播速度が光速に非常に近いときにも計算できる様にした[13]。

Ia型超新星の多様性の起源の研究

Ia型超新星は明るい標準光源として宇宙論的な研究にも利用されている。しかし、その明るさの変化には多様性も見られる。他方、Ia型超新星を起こす白色矮星では近年、強い磁場(表面で $\sim 10^9$ G)が見つかった。このような強さの磁場を持つ白色

矮星を多様性の起源のひとつと考えられないか調べることにした。Ia型超新星爆発を起こすより重くコンパクトな白色矮星の中心付近ではより強い磁場をもったものもあることが期待される。そこで、白色矮星の中心付近で燃え始める核燃焼波の伝播に強い磁場がどのような影響を与えるかを研究し始めた。磁場の影響を考慮した電子の熱伝導率を用い、単純化した燃焼反応のもと定常燃焼波の構造を数値計算し伝播速度をその固有値として求めた結果、爆発直前の白色矮星の中心の密度では 10^{12} G 以上の磁場があると磁場に垂直な方向には燃焼波が伝播しにくくなることがわかった [1]。

Ia型超新星での伴星の影響と水素の吸収線

Ia型超新星は連星系中の白色矮星の爆発と考えられている。伴星が赤色巨星や主系列星だった場合、その外層の多くの部分は爆発とともに吹き飛ばされる。そこに含まれる水素が観測されるスペクトルに吸収線を残す可能性と爆発物質が伴星にぶつかって衝撃波を発生し観測される向きによっては明るくなる可能性を2次元輻射流体力学計算コードを用いて計算している [12, 20]。

非常に明るいIa型超新星の起源

ここ数年でIa型超新星にも非常に明るいものが見つかって来た。明るさの元になっている放射性元素 ^{56}Ni の質量が Chandrasekhar limit の $1.4 M_{\odot}$ を超えると言われるものまで発見された。これらの超新星はスペクトル線の幅が狭く、炭素の吸収線が観測されると言う特徴がある。これらの条件を満たす爆発モデルとして2つの白色矮星の合体によって爆轟波を起こして爆発するモデルを考えている。現在は球対称を仮定して、ある質量の白色矮星に与えられた降着率で壊れた白色矮星のガスが振ってくる定常降着流を初期状態として一次元流体計算により進化を追って、どのような降着率で爆轟波が発生するかを調べている。その結果質量降着率が毎秒0.1太陽質量を超えると爆轟派が発生し白色矮星のほとんどが ^{56}Ni になることがわかった [18]。

非球対称超新星での爆発的要素合成と矮小銀河の化学進化

近傍の矮小銀河にある星の分光観測からその組成が銀河系の星とは異なる特徴を持つことが分かってきた。一方、ガンマ線バーストは銀河系より6桁近く暗い銀河でもその出現頻度がそんなに下がらない傾向を示すので、それに付随する超新星での元素合成が矮小銀河の元素組成に大きな影響を与えた可能性がある。ガンマ線バーストは非球対称な超新星爆発を伴い起こると言う仮説に基づき、非球対称爆発した超新星での爆発的要素合成とその後の星間物質との混合過程を数値計算して、次世代の星に受け継

がれる元素組成を観測と比較しつつ、ガンマ線バーストと矮小銀河の関係及び矮小銀河での化学進化モデルの構築を目指す。最近、ジェット方向に飛び出した鉄を多く含んだ物質が銀河の重力圏を突破して次世代の星に受け継がれない効果を取り入れた化学進化モデルを提案し、結果を論文にし投稿した。西オーストラリア大学の戸次氏、国立天文台の辻本氏との共同研究 [4, 5]。

重力崩壊型超新星での衝撃波表面出現時の光度曲線を用いた爆発の非球対称性の研究

超新星爆発の流体力学数値計算により、超新星として光り始めた直後の明るさの時間変化のしかたと爆発の非球対称性や視線方向の関係を経験式により結びつけた研究。水素の外層がある青色超巨星と水素の外層が失われた Wolf-Rayet 星では衝撃波表面出現時の明るさの時間変化のしかたが著しく変わることがわかった [10]。

重力レンズを用いた遠方銀河での超新星残骸観測

天文学教育研究センターの小林尚人氏、濱野哲史氏らとの共同研究。すばる望遠鏡で観測した重力レンズ天体の複数の視線に沿った吸収線系のデータから、赤方偏移が3.5にある超新星爆発によって掃き集められたガス中にある重元素が背景のクエーサーからの放射を吸収したのを見ていると解釈した。この解釈が正しければ、これまでで最遠方にある超新星の残骸を見つけたことになる [24, 3, 11]。

2.2.1 ガンマ線バースト

ガンマ線バーストジェットの長時間進化

大質量星でのジェット状爆発を2次元軸対称を仮定した特殊相対論的流体力学計算コードを用いて計算し、星を突き破ったジェットが Lorentz factor 100 を超えた速度で膨張する際に非常に狭い密度の高い領域を先端部分に持つことを確認した。その先端部分は爆発から数日間は断熱自由膨張し、かつ光学的に厚いことから、その間断熱的に冷却していく。その部分からの黒体放射を時間積分するとスペクトルはベキ乗になることを指摘し、そのベキ指数が観測された GRB の即時放射のスペクトルの低エネルギー側の冪指数と一致することがわかった。爆発から数日間はジェットの黒体放射を受ける観測者にとっては数秒に対応するので、即時放射として観測される [6, 19]。

ガンマ線バーストの新しい分類方法と相似則

ガンマ線バーストの即時放射のスペクトルパラメータ、赤方偏移、光度曲線のすべてのデータがそろっ

ている GRB のデータを用いて、GRB のピークエネルギー (E_p) と明るさの 相関と光度曲線の一定光度からのズレという新しい指標を用いた長いガンマ線バーストの分類手法についての研究をしている。長いガンマ線バーストの細分化した分類の1つである一定光度からのずれが大きい種族ではその残光も含めた光度曲線に相似則があることを発見し、論文として発表した [2, 7, 8, 9, 14, 15, 16, 22, 23]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Kutsuna, M. & Shigeyama, T. “Effects of Magnetic Fields on the Propagation of Nuclear Flames in Magnetic White Dwarfs”, 2012, *Astrophys. J.* **749**, article id. 51, 6 pp.
- [2] Shigeyama, T., Suzuki, A., & Nakamura, K. “Early evolution of spherical ejecta expanding into the circumstellar matter at ultra-relativistic speeds”, 2012, *Publ. Astron. Soc. Japan* **64**, No.4, Article No.87, 5 pp.
- [3] Satoshi Hamano, Naoto Kobayashi, Sohei Kondo, Takuji Tsujimoto, Katsuya Okoshi, and Toshikazu Shigeyama, “Type Ia SUPERNOVA REMNANT SHELL AT $z = 3.5$ SEEN IN THE THREE SIGHTLINES TOWARD THE GRAVITATIONALLY LENSED QSO B1422+231”, 2012 *Astrophys. J.* **754**, Issue 2, article id. 88, 15 pp.
- [4] Takuji Tsujimoto & Toshikazu Shigeyama, “Diversity of Type Ia Supernovae Imprinted in Chemical Abundances”, 2012, *Astrophys. J.* **760**, Issue 2, article id. L 38, 5 pp.
- [5] Bekki, Kenji, Shigeyama, Toshikazu, & Tsujimoto, Takuji, “Feedback effects of aspherical supernova explosions on galaxies”, 2012, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **428**, Issue 1, p.L31-L35
- [6] Akihiro Suzuki & Toshikazu Shigeyama, “Early Thermal X-Ray Emission from Long Gamma-Ray Bursts and Their Circumstellar Environments”, 2013, *Astrophys. J.* **764**, Issue 1, article id. L12, 5 pp.
- [7] Ryo Tsutsui, Takashi Nakamura, Daisuke Yonetoku, Yoshiyuki Morihara, “Identifying Subclasses of Long Gamma-Ray Bursts with Cumulative Light-Curve Morphology of Prompt Emissions”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **65**, 1(1)-1(11), (2013).
- [8] Ryo Tsutsui, Takashi Nakamura, Daisuke Yonetoku, Yoshiyuki Morihara, “Possible existence of the E_p - L_p and E_p -Eiso correlations for short gamma-ray bursts with a factor 5-100 dimmer than those for long gamma-ray bursts”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **431**, 1398-1404, (2013).
- [9] Ryo Tsutsui & Toshikazu Shigeyama, “Universal scaling law in long gamma-ray bursts”, 2013, *Publ. Astron. Soc. Japan* **65**, No. 3, in press.

(会議抄録)

- [10] Suzuki, A. & Shigeyama, T. “Probing explosion geometry of core-collapse supernovae with light curves of the shock breakout”, *IAU Symposium 279 on DEATH of MASSIVE STARS: SUPERNOVAE & GAMMA-RAY BURSTS*, p. 285-288.
- [11] Satoshi Hamano, Naoto Kobayashi, Sohei Kondo, Takuji Tsujimoto, Katsuya Okoshi, and Toshikazu Shigeyama, “Type-Ia SNR-Shell at $z=3.5$ Seen in the Three Sightlines toward the Gravitationally Lensed QSO B1422+231”, *ASP Conference Proceedings*, Vol. 458. San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2012., p.129.

(学位論文)

(博士)

- [12] 朽名正道; Revealing progenitors of type Ia supernovae from their light curves and spectra
(修士)
- [13] 大谷友香理; 超新星における超相対論的な shock breakout による高エネルギー光子の発生

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [14] Ryo Tsutsui, Takashi Nakamura, Daisuke Yonetoku, Keitaro Takahashi, “Are gamma-ray bursts as precise distance indicators as Type Ia Supernovae?”, *The Thirteenth Marcel Grossmann Meeting on Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Gravitation, and Relativistic Field Theory*, Stockholm, Sweden, Jul. 2012.
- [15] Ryo Tsutsui, Takashi Nakamura, Daisuke Yonetoku, Keitaro Takahashi, “Identification of subclasses of long gamma-ray bursts with cumulative light curve Morphology”, *First Stars IV*, Kyoto, Japan, May, 2012 (ポスター).

招待講演

- [16] Ryo Tsutsui, “Measuring distances with gamma-ray bursts”, *RESCEU SYMPOSIUM ON GENERAL RELATIVITY AND GRAVITATION JGRG22*, Tokyo, Japan, Nov. 2012.

(国内会議)

一般講演

- [17] 茂山俊和, “Nova の光度曲線”, 理化学研究所シンポジウム, 埼玉県和光市, 「コンパクト星の多様性と進化」2013年3月13日(口頭).

- [18] 茂山俊和, “Detonation supernova initiated by intense accretion onto white dwarf”, 研究会「新世紀における銀河宇宙観測の方向」、静岡県賀茂郡河津町、今井浜東急リゾートホテル、2012年12月13日(口頭).

日本天文学会 2012 年秋季年会、大分大学 2012/9/19-22

- [19] 鈴木昭宏, 茂山俊和, “濃い星周物質中での long GRB jet のダイナミクスと熱的 X 線放射”, 2012 年日本天文学会秋季年会, 鹿児島大学, 2012 年 9 月 19 日(口頭), J22a.
- [20] 朽名正道, 茂山俊和, “Ia 型超新星の SD シナリオのスペクトルに見える $H\alpha$ 線”, 2012 年 9 月 19 日(口頭), K11a.
- [21] 筒井亮, 中村卓史, 米徳大輔, 高橋慶太郎 “ガンマ線バーストは Ia 型超新星のように精度のよい標準光源になりうるか?”, 2012 年 9 月 20 日(口頭), U22a.

(セミナー)

- [22] 筒井 亮, “ガンマ線バーストは Ia 型超新星のように精度のよい標準光源になりうるか?”, 早稲田大学理論宇宙物理学研究室、2012 年 6 月 8 日.
- [23] 筒井 亮, “ガンマ線バーストは Ia 型超新星のように精度のよい標準光源になりうるか?”, 第 1496 回東京大学大学院理学系研究科天文学教室談話会、2012 年 6 月 19 日.

(新聞記者発表)

- [24] 濱野哲史, 小林尚人, 茂山俊和 “120 億光年のかなたに最遠方の超新星残骸を発見” 2012 年 7 月 17 日.

3 光赤外線による観測的宇宙論

——可視光と赤外線による観測的宇宙論——
—（土居・嶋作）

3.1 宇宙及び系外銀河

$z = 8.8$ Ly α emitters (LAEs) の Ly α 光度関数への制限

大内正己, 小野宜昭, 東谷千比呂 (宇宙線研究所), J. Lee (OCIW), 鍛冶澤賢 (愛媛大学) との共同研究.

宇宙再電離は様々な手法を用いて調べられており, $z = 6$ から 11 の間に起きたと考えられているが, いつどのようにして起きたのかは分かっていない. $z = 5 - 7$ の Ly α および UV 光度関数を比較すると, Ly α 光度関数は時代を遡るにつれ減少していることから, 銀河間空間の中性度が上昇していることが示唆されている. 我々は Subaru/MORICS および Magellan/FourStar で得られたデータを用いて, さらに遠方の $z = 8.8$ における Ly α 光度関数に良い上限を与えることで, 宇宙再電離の完了時期に迫ろうとしている.

$z \simeq 7.3$ LAEs の探査

澁谷隆俊, 柏川伸成 (NAOJ), 太田一陽 (京大) らとの共同研究.

Subaru Deep Field と Subaru/XMM-Newton Deep Field において, Suprime-Cam に狭帯域フィルター NB1006 を取りつけて $z \simeq 7.3$ の LAE 探査を行なった. 4 つの候補を検出し, そのうち 3 つについて分光観測を行なった結果, 1 つから Ly α に特徴的な非対称な輝線を検出した. これが Ly α だとすると, この天体は $z = 7.215$, $L(\text{Ly}\alpha) \sim 1.2 \times 10^{43}$ erg/s の LAE ということになる. $z \simeq 7.3$ での LAE の数密度は $z \simeq 5.7$ のおよそ 5% と求まった. $z \simeq 7.3$ でのこの減少は, $z > 5.7$ において IGM の電離度が次第に低下するという仮説と合う [3].

非常に Ly α 等価幅の大きい銀河を $z = 6.5$ で発見

柏川伸成 (NAOJ), 長尾透 (京大) らとの共同研究.

Subaru Deep Field において, EW(Ly α) = 436_{-149}^{+422} Å という大きな等価幅をもつ LAE ($z = 6.538$) を発見した. 近赤外分光観測を行なった結果, pop III 星の指標である He II ($\lambda 1640$) も, AGN の

指標である CIV ($\lambda 1549$) も検出できなかった. Ly α と He II の等価幅 (上限値) に星の種族合成モデルを適用した結果, この銀河は, 非常に若い年齢 (2–4 Myr 以下) と低い重元素量 ($Z < 10^{-5}$) を持つこと, および, $Z > 10^{-3}$ の pop I/II では説明できないことが分かった [1].

$z \sim 6$ に原始銀河団を発見

利川潤, 柏川伸成 (NAOJ) らとの共同研究.

最低でも 8 つの分光同定されたメンバー銀河を含む $z \sim 6$ の原始銀河団を Subaru Deep Field で発見した. この原始銀河団の天球面上の大きさは $6' \times 6'$ (共動座標で 14 Mpc \times 14 Mpc), 密度超過は 6σ レベルである. メンバー銀河とそれ以外の $z \sim 6$ 銀河の性質には有意な違いは見られなかった. 8 つのメンバー銀河からこの銀河団の速度分散を求めたところ, 647 ± 124 km/s という, CDM モデルの予想に比べて非常に大きい値が得られた. この大きな値を説明するいくつかの仮説を議論した [4].

$z = 5.7$ 原始銀河団および銀河の研究

岡村定矩 (法政大学) らとの共同研究.

Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS) Field で見つかった $z = 5.7$ の 2 つの原始銀河団およびその構成銀河の性質を調べた. これらの原始銀河団は $z = 5.7$ という遠方宇宙ではサンプル数が多く, 計 36 天体の分光データが取得されてそのうち 20 天体が分光同定された. Subaru/Prime-Cam の測光データおよび Subaru/FOCAS と Keck/DEIMOS の可視分光データを主に用いて, 原始銀河団内の Lyman α emitters (LAEs) の空間分布や原始銀河団の物理的性質が得られた. さらに, Lyman α 輝線に非対称プロファイルフィッティングを行う計算コードを作成した結果, 精確な銀河の空間分布や, 原始銀河団のサイズ, 速度分散, 質量の上限を求めることができた. 今後これらの結果と新たなデータを元に銀河団環境での銀河の進化が解明されていくことが期待される.

静止系可視スペクトルで明らかとなったライマンアルファ輝線銀河の高電離・低重元素量

大内正己, 小野宜昭 (東京大学宇宙線研究所), Janice, C. Lee (STScI) らとの共同研究.

ライマンアルファ輝線銀河 (LAE) は非常に暗く, その基本的な物理量の理解がまだ進んでいない. そこで我々は個々の LAE を詳しく調べる目的で, Keck/NIRSPEC と Magellan/MMIRS を用いて $z = 2.2$ LAE の近赤外分光を行った. その結果, 計 7 つの LAE から有意な H α 輝線の検出に成功した. これは LAE の近赤外分光サンプルとしては最大である. 特筆すべきは, 内 2 天体からは [OIII], [OII] 両輝

線の検出に個別で初めて成功したことである。これにより LAE の重元素量と電離度の同時測定が初めて可能となった。その結果、LAE の [OIII]/[OII] 比が高く、連続紫外光で選択された大質量銀河に比べ LAE が高い電離度・低い重元素量を持っていることが示された。この結果は、LAE の少なくとも一部は形成の初期段階に居ること、更には宇宙再電離に必要な電離光子を効率良く銀河間空間へ供給した源である可能性を示唆する [9]。

Subaru/FMOS による $z \sim 2$ 小質量星形成銀河の重元素量と電離度の同時決定

大内正己, 小野宜昭 (東京大学宇宙線研究所), Janice, C. Lee (STScI) らとの共同研究。

我々のこれまでの研究で LAE の高電離・低重元素量が示唆されたが、そのサンプルはまだ小さい。我々はより大きな分光サンプルを構築し、LAE や連続紫外光で選択された大質量銀河の平均的な重元素量や電離度を測定する目的で、すばる望遠鏡の新装置である近赤外ファイバー多天体分光器 FMOS を用いた観測を行っている。FMOS はファイバーを利用することで一度に最大 200 天体の近赤外分光を行うことができるユニークかつ強力な観測装置である。最初の観測は 2012 年 12 月に無事に行われた。現在解析途中ではあるものの、既に 50 個以上の $z \sim 2$ LAE から [OIII] 輝線の有意な検出に成功している。得られた巨大分光サンプルを最大限活用し、銀河の詳しい物理量 (重元素量や電離度など) を信頼度高く求めていく。

VLT/X-shooter を用いたライマンアルファ輝線銀河の静止系紫外から可視までの同時分光観測

大内正己, 小野宜昭 (東京大学宇宙線研究所), Janice, C. Lee (STScI) らとの共同研究。

遠方銀河の重元素量の推定には、強い輝線の強度比が広く用いられている。しかし、異なる観測装置や時期に取得された輝線から正確な輝線比を導く事は困難で、得られた重元素量にも不定性が伴う。そこで我々は、ESO の Very Large Telescope (VLT) の X-shooter という分光装置を用い、 $z = 2.2$ の LAE の分光を行っている。X-shooter は近紫外 (3000Å) から近赤外 (2.5 μ m) までのスペクトルを 3 つの arm で同時に取得できるため、 $z = 2.2$ LAE の Ly α 輝線や静止系可視の重要な輝線まで高い波長分解能 ($R \sim 5000$) で取得でき、正確な輝線比から信頼度高く物理量を求めることができる。2011 年のキュー観測では割り当てられた計 30.5 時間の内、約 8 時間しか行われなかったため、追加の観測提案をし、15 時間の観測が更に割り当てられた。これら Xshooter で得られた正確な輝線比は、我々の FMOS 観測の輝線比の正確さを検証するのに重要な働きをする。

Keck/LRIS を用いたライマンアルファ輝線銀河の静止系紫外深分光観測

大内正己, 小野宜昭 (東京大学宇宙線研究所), Michael Rauch (Carnegie Observatory) らとの共同研究。

静止系紫外域に見られるライマンアルファ輝線の形や吸収線はガスの運動を反映する。LAE の動力学を良質なサンプルで研究するため、我々は Keck/LRIS を用い $z = 2.2$ LAE の静止系紫外深分光観測を行った。COSMOS 領域と GOODS-N 領域で、それぞれ 10 天体、14 天体から有意なライマンアルファ輝線の検出に成功した。内数天体からは個別に吸収線の検出も確認できた。これら良質なスペクトルを用いて LAE のガスの運動を精査する。

静止系 UV-可視スペクトルを用いた $z = 2.2$ Ly α emitters (LAEs) のガス運動研究

大内正己, 小野宜昭 (宇宙線研究所), M. Rauch, J. Lee (OCIW), 岡村定矩 (法政大学) との共同研究。

$z = 2.2$ LAEs のガス運動について研究を行った。Subaru/Prime-Cam によって独自に得られた大規模な $z = 2.2$ LAE サンプルのうち、明るい 4 天体について、静止系 UV の分光データと静止系可視域の分光データを組み合わせることで、なぜ LAEs は Ly α を強く放射出来るのか調べるとともに、宇宙再電離研究へ与える知見を探った。この結果我々は、銀河内ガス (ISM) の中性水素量が少ないことが Ly α 放射において重要であることを発見した。さらに、これまでの宇宙再電離研究は再電離完了時期を遅く見積もっていた可能性があることを示した [8]。

$z = 2.2$ にあるライマン・アルファ輝線銀河のクラスターリング解析

大内正己, 小野宜昭 (宇宙線研究所) らとの共同研究。

Subaru/XMM-Newton Deep Survey(SXDS) Field で見つかった $z = 2.2$ のライマン・アルファ輝線銀河 (LAE) の空間的な群れ具合を二点相関関数で定量化した。赤方偏移と領域の異なる LAE の群れ具合、他銀河種族の群れ具合との比較を行った。その結果、 $z = 2.2$ の LAE の群れ具合は他のサンプルに比べて非常に弱いという結果を得た。これは定性的には LAE が属するダークハローの質量が小さいことを意味するが、先行研究の結果と大きく異なるため、これがコスミックバリエーションによる影響なのか、コンタミネーションによるクラスターリング強度の希薄化なのかを他の領域のサンプルを解析・比較することで慎重に確かめていく。また、LAE の物理量別のサブサンプルを構成し、群れ具合の物理量依存性も確かめ、遠方低質量銀河の銀河進化にとっての役割を解明していく。

重力崩壊型超新星の出現環境の研究

前田啓一 (カブリ IPMU), 有本信雄, 臼田知史 (国立天文台), Greg Aldering (LBNL), Rui Pereira (CNRS/IN2P3) との共同研究.

近傍銀河に出現した重力崩壊型超新星 27 個について, その出現環境を, UH88 望遠鏡 SNIFS と Gemini-North 望遠鏡 GMOS の 2 台の可視面分光観測装置を使って調べた. 面分光によって空間分解の良い可視スペクトルを得, 超新星が出現場所周辺の星団と同時に瞬間的に誕生したと仮定をすることで, 親星の年齢・金属量・初期質量に制限を与えることができた. 超新星の型による差を統計的に調べた結果, Ic 型超新星は親星の質量が最も大きくまた高金属量の環境にあること, Ib/c 型超新星の親星には連星の場合もありえること, また, II 型超新星の親星の一部は, Ib/c 型の親星と同じくらい大質量のものが含まれる可能性があることを示した [17, 11, 12].

可視光ファブリペロー分光撮像装置の開発

渡邊誠 (北海道大学) との共同研究

近傍銀河の年齢や金属量, 減光量などの星生成史に関する物理量を空間構造を分解して調べることを主な目的として, 可視光ファブリペロー分光撮像装置の開発を行った. 安価な冷凍機 (ツインバード工業社: SC-TD08) を用いて比較的小型の真空冷却デューワーを設計し, 一週間以上真空を保持して CCD (浜松ホトニクス社: 完全空乏型 2K×1KCCD) を -110°C に安定冷却可能なカメラを完成させた. また, 光学系には液晶型エタロン (Scientific Solutions 社: LCFP-80-20) と次数選択フィルターを使用し, 液晶型エタロンに電圧を印加することで観測波長を可変するシステムを構築した. 2012 年 10 月に北海道大学ピリカ望遠鏡で試験観測を行い, 狭帯域フィルター ($\text{H}\alpha$, [SII], [SIII]) を用いた観測により, ほぼ seeing リミットの星像の PSF と設計通りの効率が得られることを確認した. また, 液晶型エタロンを用いて明るい輝線天体の $\text{H}\alpha$, [SII], [SIII] 輝線を観測波長を可変して撮像観測を行うことに成功した. さらに 2013 年夏の観測にむけてスリット分光機能の追加を行った [16].

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Kashikawa, N. et al. (16 authors including Shimasaku, K.) 2012, “A Ly α Emitter with an Extremely Large Rest-frame Equivalent Width of $\sim 900\text{\AA}$ at $z = 6.5$: A Candidate Population III-dominated Galaxy?”, *Astrophys. J.*, **761**, 85–94
- [2] Ly, C., Malkan, M. A., Kashikawa, N., Hayashi, M., Nagao, T., Shimasaku, K., Ota, K., Ross, N. R. 2012, “The Stellar Population and Star Formation Rates of $z \approx 1.5 - 1.6$ [OII]-emitting Galaxies Selected from Narrowband Emission-line Surveys”, *Astrophys. J.*, **757**, 63–76
- [3] Shibuya, T., Kashikawa, N., Ota, K., Iye, M., Ouchi, M., Furusawa, H., Shimasaku, K., Hattori, T. 2012, “The First Systematic Survey for Ly α Emitters at $z = 7.3$ with Red-sensitive Subaru/Suprime-Cam”, *Astrophys. J.*, **752**, 114–124
- [4] Toshikawa, J. et al. (13 authors including Shimasaku, K.) 2012, “Discovery of a Protocluster at $z \sim 6$ ”, *Astrophys. J.*, **750**, 137–148
- [5] Ly, C., Malkan, M. A., Kashikawa, N., Ota, K., Shimasaku, K., Iye, M., Currie, T. 2012, “Dust Attenuation and H α Star Formation Rates of $z \sim 0.5$ Galaxies”, *Astrophys. J.*, **747**, L16–L22
- [6] Nakajima, K., Ouchi, M., Shimasaku, K., Ono, Y., Lee, J.C., Foucaud, S., Ly, C., Dale, D.A., Salim, S., Finn, R., Almaini, O., Okamura, S. 2012, “Average Metallicity and Star Formation Rate of Ly α Emitters Probed by a Triple Narrowband Survey”, *Astrophys. J.*, **745**, 12–30
- [7] Ono, Y., Ouchi, M., Mobasher, B., Dickinson, M., Penner, K., Shimasaku, K., Weiner, B. J., Kartaltepe, J. S., Nakajima, K., Nayyeri, H., Stern, D., Kashikawa, N., Spinrad, H. 2012, “Spectroscopic Confirmation of Three z -Dropout Galaxies at $z = 6.844 - 7.213$: Demographics of Lyman-Alpha Emission in $z \sim 7$ Galaxies”, *Astrophys. J.*, **744**, 83–95
- [8] Hashimoto, T., Ouchi, M., Shimasaku, K., Nakajima, K., Ono, Y., Rauch, M., Lee, J. & Okamura, S. 2013, “Gas Motion Study of Ly α Emitters at $z \sim 2$ Using FUV and Optical Spectral Lines”, *Astrophys. J.*, **765**, 70–84
- [9] Nakajima, K., Ouchi, M., Shimasaku, K., Hashimoto, T., Ono, Y., Lee, J. C. 2013, “First Spectroscopic Evidence for High Ionization State and Low Oxygen Abundance in Ly α Emitters”, *Astrophys. J.*, in press.
- [10] Gu, L., Gandhi, P., Inada, N., Kawaharada, M., Kodama, T., Konami, S., Nakazawa, K., Shimasaku, K., Xu, H., Makishima, K. 2013, “Probing of the Interactions between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters from $z = 0.1$ to 0.9 ”, *Astrophys. J.*, in press.
- [11] Kuncarayakti, H., Doi, M., Aldering, G., Arimoto, N., Maeda, K., Morokuma, T., Pereira, R., Usuda, T., and Hashiba, Y. 2013, “Integral field spectroscopy of supernova explosion sites: constraining mass and metallicity of the progenitors - I. Type Ib and Ic supernovae”, *Astron. J.*, in press.
- [12] Kuncarayakti, H., Doi, M., Aldering, G., Arimoto, N., Maeda, K., Morokuma, T., Pereira, R., Usuda, T., and Hashiba, Y. 2013, “Integral field spectroscopy of supernova explosion sites: constraining mass and metallicity of the progenitors? II. Type II-P and II-L supernovae”, submitted to *Astron. J.*

(会議集録)

- [13] Doi, M., Suzuki, N., and Supernova Cosmology Project 2012, “Observational Studies of Type Ia Supernovae at High and Intermediate redshift”, Galactic Archaeology: Near-Field Cosmology and the Formation of the Milky Way. ASP Conference Proceedings, Vol. 458. San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, p.21–25.
- [14] Kuncarayakti, H., Doi, M., Aldering, G., Arimoto, N., Maeda, K., Morokuma, T., Pereira, R., Usuda, T., and Hashiba, Y. 2012, “Supernova Progenitor Mass and Metallicity from Integral Field Spectroscopic Study of the Environment”, Galactic Archaeology: Near-Field Cosmology and the Formation of the Milky Way. ASP Conference Proceedings, Vol. 458. San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, p.43–44.
- [15] Kuncarayakti, H., Doi, M., Aldering, G., Arimoto, N., Maeda, K., Morokuma, T., Pereira, R., Usuda, T., and Hashiba, Y. 2012, “Mass and metallicity constraints on supernova progenitors derived from integral field spectroscopy of the environment”, Death of Massive Stars: Supernovae and Gamma-Ray Bursts, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 279, p. 343–344.

(学位論文)

- [16] 橋場康人 “近傍銀河の輝線観測のための可視光ファブリペロー分光撮像装置の開発” (修士論文)
- [17] Kuncarayakti Hanindyo “An Integral Field Spectroscopic Study of Nearby Supernova Explosion Sites: Constraints on Progenitor mass and Metallicity” (博士論文)

(著書)

- [18] 「新・天文学事典」, 嶋作一大 (分担執筆), 講談社ブルーバックス

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [19] Shimasaku, K. “The Nature of Ly α Emitters”, Korea-Japan Collaboration Workshop, Seoul, Korea, 2012/11/15–16.

(国内会議)

一般講演

- [20] 嶋作一大: “高赤方偏移銀河”, すばる HSC サーベイによるサイエンス, 国立天文台, 2013/9/26.
- [21] 嶋作一大: “遠方銀河サイエンスと HSC-Euclid サーベイ”, HSC-Euclid 研究会, 国立天文台, 2013/1/10.

- [22] Nakajima, K.: “First Spectroscopic Evidence for High Ionization State and Low Oxygen Abundance in Ly-alpha Emitters”, 口頭発表, すばるユーザーズミーティング 2012, 国立天文台, 2013/01/15–17.
- [23] 橋本 拓也: 「静止系 UV-可視分光によって分かった Ly α 輝線銀河の観測的性質」, RESCEU 観測的宇宙論ワークショップ, 東京大学, 東京都文京区, 2012/11/27–29.
- [24] 橋本 拓也: 「Ly α 輝線銀河のガス運動と Ly α が強い理由について」, ALMA 時代の宇宙の構造形成理論: 第 1 世代から第 n 世代へ 兼 2012 年初代星・初代銀河研究会, 北海道大学, 札幌, 2013/1/26–28.
- [25] 橋場 康人: 「可視光ファブリペロー分光撮像装置の開発」, 可視赤外線観測装置技術ワークショップ, 国立天文台, 東京, 2012/12/17–18.
- [26] 橋場 康人: 「Local star formation histories in nearby galaxies」, 第 25 回理論懇シンポジウム「計算宇宙物理学の新展開」, つくば国際会議場, 筑波, 2012/12/22–24.

(学会発表)

日本天文学会 2012 年秋季年会, 大分大学
(2012/09/19–21)

- [27] 中島王彦, 大内正己, 嶋作一大, 橋本拓也, 小野宜昭, J. C. Lee: 静止系可視スペクトルで明らかとなった LAEs の高電離・低重元素量, X08b.
- [28] 篠木 新吾, 大内 正己, 嶋作 一大, 小野 宜昭, 岡村 定矩: SXDF 内の $z = 5.7$ の形成途中の原始銀河団, X23c.
- [29] 橋本 拓也, 大内 正己, 嶋作 一大, 中島 王彦 小野 宜昭 (東京大学), Michael Rauch (OCIW): Gas Motion Statistics of Ly α Emitters at $z \sim 2$ Using UV nad Optical Emission Lines, X09b.
- [30] Hanindyo Kuncarayakti, 土居守, 諸隈智貴, 橋場康人, 前田啓一 (東京大学), Greg Aldering (LBNL), 有本信雄, 臼田知史 (国立天文台), Rui Pereira (IPNL): SN progenitor mass and metallicity constraints from IFUspectroscopy, K14b.
- [31] 橋場康人, 土居守, 酒向重行, 諸隈智貴, Hanindyo Kuncarayakti, 小久保充 (東京大学): 可視光ファブリ・ペロー分光撮像装置の開発: 性能評価, V232b.
- 日本天文学会 2013 年春季年会, 埼玉大学
(2013/09/20–23)
- [32] 橋場康人, 土居守, 酒向重行, 諸隈智貴, Hanindyo Kuncarayakti, 小久保充 (東京大学), 渡辺誠 (北海道大学): 可視光ファブリ・ペロー分光撮像装置の開発: 試験観測, V09b.

(その他)

一般講演

- [33] 土居 守: 「暗黒エネルギーの謎をおいかけて」, d-labo スルガ銀行ミッドタウン支店, 2012/4/12

- [34] 土居 守:「広がる宇宙のすがた」, 文京区子供科学カレッジ, 2012/6/16
- [35] 土居 守:「宇宙の大きな謎にせまる」, 七夕講演会法政大学小金井キャンパス, 2012/7/7
- [36] 土居 守:「広がりゆく宇宙を調べる」, 東大理学部高校生のための夏休み講座 2012, 2012/7/30
- [37] 土居 守:「宇宙の加速膨張の発見」, 駿台天文講座, 2013/2/16

4 地上サブミリ波観測

——サブミリ波で宇宙の構造形成と物質進化を探る——（山本(智)・河野・坂井）

4.1 星・惑星系形成の観測的研究

4.1.1 はじめに

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・理論両面から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、テラヘルツ波観測）によって研究している。

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。これまでの研究で、そ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ことがわかってきた。即ち、微量分子の組成から、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軸に、星・惑星系形成過程を多面的に研究している。

なぜ電波か

星間分子雲の温度はおよそ 10 K 程度である。この「宇宙の中でも最も低温の天体」は、最もエネルギーの低い電磁波である「電波」のみを放射する。しかも、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。そのため、星間分子雲の奥深くで起こる星形成の核心部分を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し、それらの観測で星間分子雲の運動や分子組成がわかる。

動き出した ALMA（アルマ）

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が、感度、分解能ともに十分ではない。それを解決するのが ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) である。ALMA は、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 10 月から部分運用が始まっており、我々のグループでも初期成果が出つつある。ALMA は既存装置よりも 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 , H_2D^+ , 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、星・惑星系形成における物質進化の根幹を捉えることができる。世界的には 2009 年に打ち上げられた Herschel 衛星によりテラヘルツ帯観測が進められた。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おり、2011 年度には、これまでに開発してきたテラヘルツ帯受信機を搭載して試験観測を行った。本研究室は、1998 年から 2005 年まで、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、テラヘルツ分子観測を展開していきたい。

4.1.2 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の理解は、近年急速に進みつつある。その重要な結果の一つは、低質量星近傍の分子組成が天体ごとに顕著に違うことがわかった点である。その一つの典型は、 $HCOOCH_3$ などの大型飽和有機分子が原始星近傍の 100 AU 程度の領域に豊富に見られる天体で、ホットコリノ天体と呼ばれる（へびつかい座の IRAS16293-2422 など）。もう一つの典型は、炭素鎖分子が異常に豊富な天体（おうし座の L1527、おおかみ座の IRAS15398-3359）で、WCCC (Warm Carbon-Chain Chemistry) 天体と呼ばれる。WCCC 天体では、原始星近傍で CH_4 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れている。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。このような分子組成の違いの原因は、母体となる分子雲の収縮時間の違いによると考えられ、星形成研究においても注目され始めている。さらに、分子組成の違いの惑星系への伝播についても大きな興味もたれ始めている。本研究室では、低質量星形領域を中心に、電波観測による幅広い研究を進めている。

L1527 のラインサーベイ

おうし座の L1527 ($d = 137$ pc) は WCCC を示す低質量原始星である。我々はその分子組成の全貌を明らかにするため、野辺山 45 m 望遠鏡を用いてライ

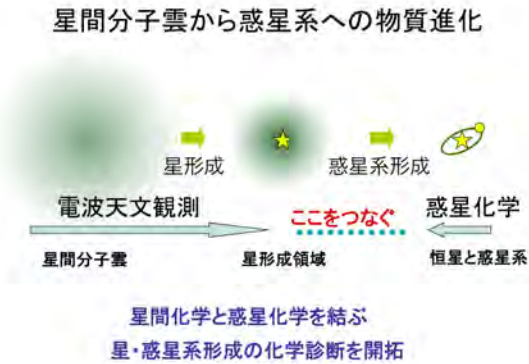


図 4.1: A schematic illustration of our goal

ンサーベイ観測を行ってきた。これまでに 79—116 GHz の周波数範囲の観測を完了し、L1527 の化学組成の全貌を明らかにした。この天体では種々の炭素鎖分子が豊富に存在することが改めて確認された。なかでも $c\text{-C}_3\text{H}_2$ は非常に豊富で、その ^{13}C 同位体種を 2 種類とも検出できた。さらに、重水素置換体 $c\text{-C}_3\text{HD}$ とともに 2 重水素置換体 $c\text{-C}_3\text{D}_2$ の検出にも成功し、 $c\text{-C}_3\text{HD}/c\text{-C}_3\text{H}_2$ 比が 0.07、 $c\text{-C}_3\text{D}_2/c\text{-C}_3\text{H}_2$ 比が 0.002 と求められた。異常な重水素濃縮は起こっておらず、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$ が豊富にあるために検出できたものと見られる。また、関連分子であるシクロプロペン ($c\text{-C}_3\text{H}_2\text{O}$) も検出できた。この分子はこれまで銀河中心方向で検出されていたが、近傍分子雲での検出は初めてである。その検出は、L1527 が新星間分子の探査の新しい対象天体となり得ることを意味している。

ALMA による L1527 の高分解能観測

ALMA の部分運用 (Cycle 0) で L1527 の観測を行った。1.2 mm 帯、0.8 mm 帯の分子スペクトル線の強度分布を 0.7 秒角程度の分解能で調べた。その結果、CCH, $c\text{-C}_3\text{H}_2$ などの炭素鎖分子は、原始星から半径 140 AU 程度のところで最も豊富となり、中心部分で減少している様子が捉えられた。ドップラー効果の解析から、これらの分子が回転しながら原始星円盤に落ち込んでいる様子が明瞭に捉えられた。また、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$ の高励起スペクトル線はそれより内側からも観測された。このことは、炭素鎖分子が原始星円盤にまでもたらされていることを意味している。一方、SO や CH_3OH は原始星円盤のみに存在する。このように、原始星円盤の形成に伴って、化学組成が劇的に変化する様子が捉えられた。 CH_3OH のスペクトル線は非常に微弱であることから、中心部分においてもその存在量は多くないと予想される。WCCC 天体でホットコリノに特有の飽和有機分子が少ないことが、原始星近傍においても確認された。

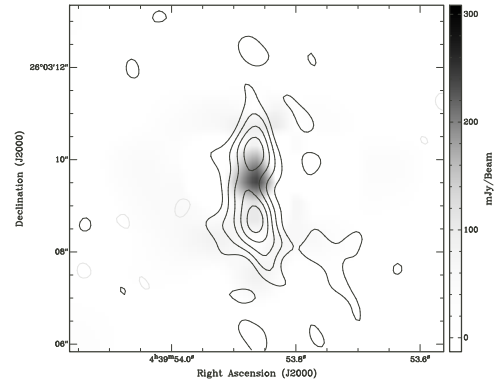


図 4.2: The CCH emission (contours) superposed on the continuum emission (gray scale) observed toward L1527 with ALMA

Serpens SMM4 のラインサーベイ

Hot Corino の化学組成の全貌を明らかにする目的で、我々は Hot Corino 天体である Serpens SMM4 のラインサーベイ観測を推進している。2011 年度の ASTE による 345 GHz の観測に加え、3 mm 帯での補足観測を野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて実施した。ASTE 観測で検出した分子に加え、新たに HC_3N 、 CH_3CCH 、 C_4H 、 HNCO 、 SiO を検出した。重水素化合物や HCO^+ の同位体種のスペクトルの線幅は、 CH_3OH や H_2CO の線幅と比較して狭いなど、分子による線幅の違いが見られた。一般に線幅が狭い分子の方が回転温度が低い傾向が見られる。これは、存在する領域が分子ごとに違うことを示唆している。

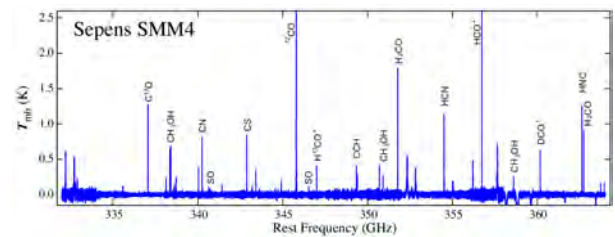


図 4.3: Spectral line survey in the 345 GHz band toward the low-mass protostar, Serpens SMM4, with ASTE

L1157 B1 における衝撃波化学

2008 年から 2011 年にかけて、野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて低質量星形成領域 L1157 mm 周辺の衝撃波領域、L1157 B1 におけるラインサーベイを行った。そこで検出された分子について柱密度を計

算するとともに、他の星形成領域と比較のため、どの星形成領域でも多量に存在する CH_3OH を基準に規格化した存在量比を求めた。その結果、 HCOOH 、 HCOOCH_3 、 CH_3CHO などの複雑な有機分子は、低質量星形成領域である IRAS 16293-2422 では L1157 B1 よりも存在比が高く、大質量星形成領域の Sgr B2 や Orion KL では L1157 B1 と同等程度かより少ない存在比となる傾向が見られた。一方、 SO や SO_2 のような比較的単純な分子では大質量星形成領域でも L1157 B1 より存在比が高いものが見られた。L1157 B1 の衝撃波を引き起こした双極分子流の力学的年齢は 1.8×10^4 yr 程度と見積もられている。 HCOOH や、 HCOOCH_3 などの複雑な有機分子は、L1157 B1 の双極分子流の力学的年齢内では気相反応で生成できないため、以前に星間塵上で生成していたものが衝撃波によって蒸発し、観測されたと考えられる。一方、 SO などの単純な分子は、星間塵から前駆物質が蒸発した後、 10^4 yr 程度の時間で、気相中で十分な量を生成することが可能である。このような生成過程の違いのため、分子ごとの存在比の違いが現れると考えられる。

低質量星形成領域の重水素濃縮

原始星形成に伴う重水素濃縮の変化を確立する目的で、低質量原始星形成領域 L1551, IRAS16293-2422 に対して重水素濃縮度分布を調べた。L1551 では原始星方向で DCO^+ の重水素濃縮度が減少している一方で、 DNC の重水素濃縮度は周辺と変わらないことがわかった。同時に観測した N_2H^+ と比較することで、 DCO^+ の重水素濃縮度に対しては原始星近傍の高温領域では周囲の低温領域（エンベロープ）と比較して重水素濃縮度が有意に減少していること、また、 DNC の重水素濃縮度は変化していないことを定量的に示すことができた。原始星が形成されて温度が上昇すると重水素濃縮が解消されると考えられるが、この解消速度がイオンに比べて中性分子が遅いためと考えられる。中性分子の重水素濃縮度が原始星形成直後の状態を保持していれば、その観測を通して原始星形成直前の物理状態についての知見が得られることになる。一方、IRAS16293-2422 ではこのような明確な差異は見られなかった。それは、周囲の低温のエンベロープの影響によるものと考えられ、その寄与を除くことが星形成に伴う重水素濃縮度の変化を調べる上で不可欠と考えられる。

星なしコアにおける CH_3OH の起源

CH_3OH は星間分子雲における基本的な有機分子であり、一般に星間塵上で生成され星形成活動に伴う温度上昇によって気相中に蒸発してくると考えられている。しかし、TMC-1 (~ 10 K) のような蒸発温度に達していない低温分子雲においても相当量の CH_3OH が検出されており、その生成機構については未だ議論が続いている。我々は、野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて TMC-1(CP) の周辺 $150''$ 四方のマッピング観測を行った。 CH_3OH の詳細な分布を調べ

たところ、高密度ガスをトレースすると考えられている C^{34}S と反相関している部分があることを見出した。その分布は分子雲全体をトレースする C^{18}O の分布とむしろ類似している。低温下での CH_3OH の脱離機構としては、宇宙線によって生じる紫外線による光脱離の効果が考えられる。その場合、星間塵からの脱離量は密度によらず一定となるため、 CH_3OH は空間的に広く分布することが期待され、観測と矛盾しない。本研究により、低温分子雲においても、星間塵の化学組成が気相中の化学組成に影響を与えている可能性が改めて確認された。

重水素化分子の精密観測

宇宙における重水素の存在比が $\text{D}/\text{H} \sim 10^{-5}$ であるのに対し、低温の星間分子雲中では、重水素は分子に数%の割合にまで濃縮される。この濃縮度は、星間分子雲の進化とともに増加していくため、星形成前の星間分子雲の進化段階の指標としてよく用いられる。従って、代表的な星間分子雲について、種々の分子の重水素濃縮度を正確に求めておくことは基本的な重要性を持つ。そのような動機から、野辺山 45 m 電波望遠鏡に搭載した 70GHz 帯の受信機を用いて、おうし座の L1527、TMC-1、おおかみ座の IRAS15398-3359、Lupus-1A、へびつかい座の IRAS16293-2422 に対し、基本的分子 (HCN , HNC , HCO^+ , C_2H , HN_2) の重水素化物のスペクトル線の観測を行った。高い速度分解能で観測をしたことにより、 HN^{13}C , DNC でスペクトル線の超微細構造を明瞭に分離して観測できた。この超微細構造を利用し、分子の励起温度を求めると、両者の励起温度が異なる可能性があることがわかった。その原因はまだ不明だが、重水素濃縮度の正確な評価において解決すべき課題である。

HCL2 領域における CH の分布

おうし座の Heiles Cloud 2 (HCL2) 領域における CH スペクトル線（波長 9 cm）の観測を Effelsberg 100 m 望遠鏡を用いて行った。HCL2 領域は炭素鎖分子が豊富な星なしコア TMC-1 や、WCCC 天体 L1527 を含む分子雲である。そのような特徴的な化学組成を生じる環境効果を特定するため、HCL2 領域全体の形成過程に着目して CH の観測を行った。この領域は、全体としてはリング状の構造をしているが、炭素原子 (C) は南東側に、CO 分子は北西側に偏って分布している。これは炭素原子から CO 分子への化学進化に対応しており、北西側から分子雲形成が進んできていることが指摘されている。本観測で、CH の分布は、炭素原子と CO 分子の分布をつなぐように分布していることが確かめられた。CH は炭素原子から CO を生成する際の間体なので、この分布は上記の化学進化の考え方を支持する。さらに、CH のスペクトルは線幅の細いコア成分と線幅の太いエンベロープ成分からなり、分子雲形成に伴ってエンベロープ成分が消失することもわかった。このように CH のスペクトル線は、分子雲形成の物

理・化学過程を研究する上で有用なプローブであることが示された。

HCL2 領域における OH 吸収線の解析

HCL2 の東にある希薄な星間雲に対して、Effelsberg 100 m 望遠鏡を用いて OH の基底状態遷移の観測を行った。この遷移は 1612 MHz, 1665 MHz, 1667 MHz, 1720 MHz の 4 本の超微細構造線からなり、それらのうち 1612 MHz の遷移が宇宙背景放射に対する吸収線として観測された。吸収線を説明するため、OH 分子の統計平衡計算を行ったところ、吸収を起こしている雲の運動温度は 50 K 程度であることが示された。また、1612 MHz 遷移は 40 K 程度以上で吸収線、40 K 程度以下で輝線となることがわかり、良い温度計となり得ることもわかった。一方、HCL2 本体についても 4 点で観測したところ、1612 MHz 遷移のスペクトルはいずれも輝線と吸収線の 2 つの成分が混在していた。このことは、HCL2 は温かいガスと冷たいガスの 2 層構造になっている可能性を示唆する。

系外銀河の化学組成

巨大分子雲 (GMC) は銀河スケールと個々の星形成を繋ぐ中間階層であり、その形成と進化が近年注目を集めている。個々の GMC の環境・履歴とそこで起こる星形成の規模・形態との関連を確立することは、銀河における星形成史を理解する第一歩である。その手段の 1 つとして、銀河系内の星形成領域で使われてきた化学進化の手法がある。GMC の化学組成は GMC の存在する環境や進化段階に応じて変化すると考えられるため、化学組成から GMC の過去の履歴を推定できる。今後本格的に移動する ALMA では、近傍銀河において CO 以外の様々な分子が容易に検出されることが期待され、個々の GMC の分子組成を調べることができる。化学進化の手法とこれまでの運動学的な視点と組み合わせることで、GMC の形成・進化に迫りたい。

M51 の渦状腕に対するラインサーベイ

近傍の円盤銀河 M51 の渦状腕に対して、3 mm および 2 mm 帯のラインサーベイ観測を IRAM 30 m 電波望遠鏡を用いて実施した。前年度に観測した位置 (P1) の南側に隣接する点 (P2) を新たに観測し、16 輝線、11 種類の分子を検出した。この 2 点の分子組成を比較したところ、ほとんど違いが見られなかった。一方で、P1 は P2 と比較して星形成率と星形成効率はそれぞれ 2 倍と 1.5 倍高く星形成活動が活発である。CS と HNC から求めた回転温度は 10 K 以下と低温であることから、検出した分子は主に星形成活動の影響をあまり受けていない分子雲中に存在していると考えられる。CO に次いで存在量が高い CH₃OH は星間塵上で生成される分子で、気相で

検出されるためには星間塵から蒸発してこなければならぬ。P1 と P2 で CH₃OH の存在量に違いがないことから、星形成活動が蒸発機構である可能性は低く、分子雲同士の衝突による衝撃波などの別の機構が働いていると考えられる。

M83 の棒状構造における化学組成

M83 は銀河系近傍の棒渦巻銀河である。棒状構造の付随する分子ガスの化学組成を調べるために、野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて、10 種類の分子について観測を実施した。観測の結果、HCN、HCO⁺、CS、CH₃OH、C¹⁸O、¹³CO を検出した。非軸対称な重力ポテンシャルを持つ棒状構造では、内部のガスの軌道が円運動から大きく逸脱する。その結果、分子雲同士の衝突頻度が上昇し衝撃波が卓越すると考えられており、衝撃波のプローブとなる分子の組成が高くなると予想される。しかし、M51 の渦状腕と M83 の棒状構造では衝撃波プローブである CH₃OH の組成には違いは見られなかった。一方で、CS の組成は棒状構造で 4 倍高く、M51 の渦状腕との違いもあることを示唆している。この違いが銀河の個性なのか銀河の構造の違いによるものか区別するために、今後は M83 の渦状腕においても同様な観測を計画している。

4.1.3 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 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・ポロメータ (HEB) ミクサ素子の開発を行っている。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) 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。

HEB ミクサのゲインバンド幅測定

我々の製作した HEB ミクサは世界最高の低雑音を達成している。1.5 THz での受信機雑音温度は 490

K であり、これは量子雑音の約 7 倍に相当する。しかし、一方で我々の受信機は中間周波数帯域を 1.0-1.2 GHz と狭い周波数帯に取っており、観測上の制限が大きく、特に線幅の大きい天体の観測が困難である。従って、中間周波数帯域の拡張が 1 つの大きな開発課題である。そのためには、一般に超伝導マイクロブリッジを 3 nm 程度まで薄くする (格子冷却) 方策が取られる。しかし、我々の装置では 8 nm 以上の薄膜化は困難であるため、マイクロブリッジの長さを短くして帯域の拡張を図った (拡散冷却)。すると、予想通り利得帯域はブリッジの長さに依存しており、HEB ミクサ中の電子温度にも依存していることが示された (図 4)。また、この測定から得られた NbTiN 薄膜中での電子の拡散係数を用いて電子の冷却タイムスケールを求めると、拡散冷却が格子冷却の約 2 倍の効率で働いていることがわかった。この結果から、現在 0.15 μm であるブリッジ長を 0.1 μm まで短縮できれば約 3 GHz まで中間周波数帯域を伸ばせることがわかり、それに向けた開発研究が進行中である。

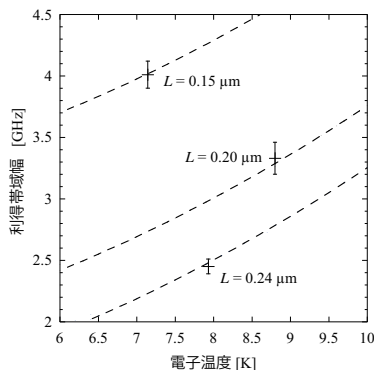


図 4.4: Measured IF bandwidths for different microbridge lengths of the HEB mixer

ワイドバンド導波管ミクサの設計

我々が開発を進めている THz 帯の電波観測を目指した導波管型超伝導 HEB ミクサ受信機は、現在、望遠鏡への搭載・試験観測を行う段階にまで到達している。今後の科学観測における効率化の観点から、受信周波数帯域の広帯域化を目指した受信機の設計を行った。超伝導 HEB ミクサ素子は導波管内部にマウントされている。導波管を用いた電磁波とミクサ素子の結合方式の場合、導波管内の電磁場のモードの制限から観測周波数帯域は比帯域にして 30 % 程度しか取れないということが一般に言われてきた。しかし、電磁界シミュレーションを用いて導波管内のアンテナ・フィルタ回路等の形状を最適化することで、比帯域が 60 % 近い受信機を設計できることがわかった。これはテラヘルツ帯の地上からの電波観測においては、0.9 THz の大気窓と 1.3/1.5 THz の

大気窓を一つの受信機でカバーできるようになることを意味している。このような設計の受信機を作成・運用することにより、効率のよい天体観測が可能になる。また、将来の ALMA の拡張計画においても応用できると考えられる。

2012 年度の ASTE 望遠鏡への搭載実験

2011 年度の初めての THz 受信機 ASTE 望遠鏡搭載実験の成功と課題を踏まえ、次の 2 点で受信機の改良を行った。第 1 は局部発振信号の安定化である。局部発振器は受信機デュワーの側面に光学台を介して取り付けられ、信号は準光学的にデュワー内に導かれているため、デュワー全体の機械的振動の影響が避けられない。そこで、局部発振器を取り付ける光学台をより剛性の高いものに変更し、振動による局部発振信号の強度変化をある程度抑圧した。第 2 は完全リモート観測の実現である。2011 年度の受信機では、光学台やバイアス源の調整が手動であったため、局部発振信号の周波数を変更する度に直接望遠鏡下部の受信機室に入って調整する必要があった。T 今回、光学台とバイアス電源をリモート対応のものに変更し、GPIB 制御で山麓施設からの制御・観測を可能にした。これらの改良を行い、今年度もこの THz 受信機を ASTE 望遠鏡に搭載した。受信機は予定通り動作し、0.9 THz 帯での R-Sky 測定まで順調に進んだが、望遠鏡施設のトラブルにより観測はキャンセルせざるを得なかった。翌年度に科学観測に再挑戦する計画である。

ASTE 用 IF システムの改良

本研究室で開発した THz 帯超伝導 HEB 受信機からの中間周波数信号 (IF 信号) を ASTE 望遠鏡に備わっている伝送システムに入力する際、出力信号を増幅・周波数変換する必要がある。今回、中間周波数を 0.8-1.3 GHz に変えるために、IF システムを改良した。フラットな特性や、高地での運用に耐える発熱対策と操作性の良さに留意し、市販のフィルタ、アンプ、アップコンバータを用いて設計・製作した。実験室で評価した上で ASTE 望遠鏡に取り付け、正しい動作が確認できた。

準光学型 THz 帯 HEB ミクサの開発

ツインスロットアンテナを集積した準光学型の 1.9THz 帯超伝導 NbTiN HEB ミクサ素子の開発を行った。本年は、高周波電磁界シミュレータ HFSS を用いてアンテナ構造の微修正/最適化を行った。また、(1) 素子のヒステリシスなどを有する電流・電圧 (IV) 特性から、製作された細線の構造・状態を予測・理解するための 1~2 次元モデルや、(2) バイアス電圧や局部発振波による励起、インピーダンス整

合、細線サイズ、抵抗-温度特性、臨界温度、といった各種パラメータからゲイン特性を再現するモデルの構築を進めた。これらは HEB 素子の設計や製作プロセスの再現性の改善、動作点の最適化などに利用していく。さらに、今回あらたに TEM 撮像を実施し、HEB 素子の各層の厚みの精度や再現性、超伝導細線部/電極間におけるエッチング領域の断面・表面の構造や再付着の状態なども詳しく調べた。この撮像の結果をもとに、ICP 装置によるエッチングプロセスの条件・環境の見直しを進めた。この研究は大阪府立大学の前澤裕之氏との共同研究である。

<受賞>

- [1] 坂井南美、日本天文学会研究奨励賞、日本天文学会、2013年3月21日。
- [2] 柴田大輝、Best Poster Award, New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory, 2012年12月7日。

<報文>

(原著論文)

- [3] N. Sakai, C. Ceccarelli, S. Bottinelli, T. Sakai, and S. Yamamoto, “Distribution of CH₃OH in NGC1333 IRAS4B”, *Astrophys. J.* 754, 70 (8 pp)(2012).
- [4] N. Sakai, Y. Shirley, T. Sakai, T. Hirota, Y. Watanabe, and S. Yamamoto, “Tentative Detection of Deuterated Methane toward the Low-Mass Protostar IRAS 04368+2557 in L1527”, *Astrophys. J.* 758, L4 (4 pp) (2012).
- [5] N. Sakai, H. Maezawa, T. Sakai, K.M. Menten, and S. Yamamoto, “CH Radio Emission from Heiles Cloud 2 As a Tracer of Molecular Cloud Evolution”, *Astron. Astrophys.* 546, A103 (8 pp) (2012).
- [6] T. Yamaguchi, S. Takano, Y. Watanabe, N. Sakai, T. Sakai, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, N. Hirano, S. Takakuwa, Y. Aikawa, H. Nomura, and S. Yamamoto, “The 3 mm Spectral Line Survey toward the Lynds 1157 B1 Shocked Region. I. Data”, *Publ. Astron. Soc. Japan* 64, 105 (45 pp) (2012).

(学位論文)

- [7] 椎野竜哉、“Development of a Low Noise HEB Mixer Receiver for Spectroscopic Observations in the THz Band” (博士論文)
- [8] 相馬達也、「テラヘルツ帯超伝導 HEB ミクサ受信機の超広帯域化」 (修士論文)
- [9] 徳留智矢、「太陽型原始星 L1527 における「暖かい炭素鎖化学」の探求」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] Y. Watanabe, K. Sorai, N. Sakai, S. Yamamoto, “Spectral Line Survey toward Spiral Arm in Nearby Galaxy M51”, Workshop on Interstellar Matter 2012, Sapporo, Japan, October, 2012.
- [11] Y. Watanabe, K. Sorai, N. Sakai, S. Yamamoto, “Spectral Line Survey toward GMCs in M51”, *Astrochemistry in the ALMA era*, Copenhagen, Denmark, January, 2013.
- [12] T. Shiino, R. Furuya, T. Soma, T. Sakai, Y. Watanabe, N.Sakai, L. Jiang, O. Ohguchi, H. Maezawa, T. Yamakura, Y. Irimajiri, and S. Yamamoto, “The 0.9 and 1.3 THz Superconducting HEB Mixer Receiver for the ASTE 10 m Telescope”, The 23rd International Symposium on Space Terahertz Technology, C-43, Tokyo, Japan, 4 April 2012.
- [13] T. Soma, N. Sakai, Y. Watanabe and S. Yamamoto, “Abundant CH₃OH in the Cold Starless Core TMC-1”, Workshop on Interstellar Matter 2012, Sapporo, Japan, October, 2012.

New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory, Hakone, Japan, December, 2012

- [14] Y. Watanabe, N. Sakai, J. Lindberg, J. Jorgensen, S. Bisschop, and S. Yamamoto, “The 0.8 mm Spectral Line Survey toward Low-Mass Protostellar Cores with ASTE”(P056)
- [15] T. Shiino, R. Furuya, T. Soma, T. Sakai, Y. Watanabe, N.Sakai, L. Jiang, O. Ohguchi, H. Maezawa, T. Yamakura, and S. Yamamoto, “The 0.9 and 1.3 THz Superconducting HEB Mixer Receiver for the ASTE 10 m Telescope” (P101)
- [16] T. Yamaguchi, S. Takano, N. Sakai, Y. Watanabe, S. Yamamoto, and NRO Line Survey Team Members, “The Shock Chemistry in Low-Mass Star-Forming Regions” (P040)
- [17] D. Shibata, N. Sakai, Y. Watanabe, T. Hirota, S. Yamamoto, “Deuterium Fractionation in Low-Mass Star Forming Regions” (P059)
- [18] T. Soma, N. Sakai, Y. Watanabe, S. Yamamoto, “Abundant CH₃OH in the Starless Core TMC-1” (P055)
- [19] T. Tokudome, N. Sakai, T. Sakai, S. Takano, S. Yamamoto and NRO Line Survey Team Members, “Nobeyama 45 m Telescope Legacy Project: Line Survey of L1527” (P058)
- [20] Y. Nishimura, N. Sakai, Y. Watanabe, T. Sakai, T. Hirota, S. Yamamoto, “Observations of Deuterated Species toward Low-Mass Prestellar and Protostellar Cores” (P051)
- [21] H. Inokuma, N. Sakai, H. Maezawa, K.M. Menten, and S. Yamamoto, “Statistical Equilibrium Calculations of OH: Interpretation of the 1612 MHz Absorption Line in HCL2” (P054).

招待講演

- [22] S. Yamamoto, N. Sakai, and Y. Watanabe, “Chemical Diversity in Low-Mass Star Forming Regions”, *Astrochemistry in the ALMA era*, Copenhagen, Denmark, January, 2013.
- [23] S. Yamamoto, N. Sakai, and Y. Watanabe “Chemical Diagnostics of the Early Phase of Star Formation”, *EPOS2012*, Lingberg Castle, Germany, July, 2012.
- [24] N. Sakai, “Chemical Diversity of Low-Mass Star-Forming Cores: Class 0 to Class I”, *New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory*, Hakone, Japan, December, 2012.

(国内会議)

一般講演

- 日本天文学会 2011 年秋季年会、大分大学、2012 年 9 月
- [25] 山口貴弘、高野秀路、坂井南美、山本智、「The Shock Chemistry of the EHV Outflow from L1448C(N)」, P119a
- [26] 柴田大輝、坂井南美、渡邊祥正、廣田朋也、山本智、「低質量原始星形成に伴う重水素濃縮度変化」, P117a
- [27] 徳留智矢、坂井南美、酒井剛、高野秀路、山本智、NRO ラインサーベイプロジェクトメンバー、「L1527 におけるスペクトル線サーベイ (3)」, P118a
- [28] 西村優里、坂井南美、渡邊祥正、酒井剛、廣田朋也、山本智、「星なシコア TMC-1、Lupus-1A における重水素濃縮度」, P301c
- [29] 猪熊宏士、坂井南美、前澤裕之、Karl Menten、山本智、「統計平衡計算による OH 分子の基底状態遷移の解析」, Q45c
日本天文学会 2012 年春季年会、埼玉大学、2013 年 3 月
- [30] 坂井南美、Yancy Shirley、廣田朋也、酒井剛、山本智、「Tentative Detection of Deuterated Methane toward Low-Mass Protostar IRAS 04368*2557 in L1527」, P14a
- [31] 渡邊祥正、坂井南美、徂徠和夫、山本智、「Spectral Line Survey toward GMCs in M51」, R21a
- [32] 椎野竜哉、古屋隆太、相馬達也、酒井剛、渡邊祥正、坂井南美、大口脩、Jiang Ling、前澤裕之、山本智、「1.5 THz 帯拡散冷却型 NbTiN HEB ミクサの開発」
- [33] 相馬達也、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「Abundant CH₃OH in the Cold Starless Core TMC-1」, P15a
- [34] 西村優里、坂井南美、渡邊祥正、酒井剛、廣田朋也、山本智、「Systematic differences of excitation temperatures between DNC and HN¹³C」, P216a

招待講演

- [35] 山本智、椎野竜哉、相馬達也、古屋隆太、渡邊祥正、酒井剛、西村優里、坂井南美、大口脩、Ling Jiang、前澤裕之、「テラヘルツ・ヘテロダイナミクスによる星間化学」、日本応用物理学会春季学術講演会、神奈川工科大学、2013 年 3 月、28p-G10-4

4.2 大質量銀河と巨大ブラックホールの形成・進化過程の研究

初期宇宙においては、すばる望遠鏡等の大型光赤外線望遠鏡の活躍により、多種多様な、形成途上の若い銀河が発見されている。一方で、宇宙における星形成活動のかなりの部分は、ダストに隠されており、現在の宇宙から、過去に遡るについて、その割合は急速に高まって行き、赤方偏移 1 付近では、約 70% 程度の星形成活動が、ダストに隠されているとの見積りがある (Takeuchi et al. 2005, *A&A*, 440, L17)。では、それより過去の宇宙では、どれほどダストに隠された星形成活動が存在するのであろうか？それは、どのように進化しているのであろうか？

こうした、ダストに隠された星形成活動を検出する決定打となるのが、ミリ波・サブミリ波帯の連続波観測である。爆発的星形成で放射される強烈な紫外光を吸収し、数 10K に熱せられたダストの熱放射は、約 100 μ m 付近にピークを持ち、その Rayleigh-Jeans 側にあたるミリ波サブミリ波帯で観測されるダスト熱放射は、 $S_{\nu} \propto \nu^{3\sim 4}$ もの強い傾きを持つ。これが、赤方偏移によって長波長側へシフトしてくるため、結果として、この波長帯では、ダスト放射のみかけのフラックスが、赤方偏移が大きくなってもほとんど変化しないという特徴を示す (Blain et al. 2002, *Physics Reports*, 369, 111)。これは、高赤方偏移になるほど急速に暗くみえる可視光・赤外線や長波長の電波領域には見られない、極めてユニークな性質であり、本プロジェクトでは、この性質を最大限に活用したミリ波サブミリ波帯による深撮像サーベイと、その追及観測に基づく銀河、特に、質量の大きい銀河の形成・進化の研究、また、そのような銀河の中心核における活動現象の観測的研究を進めている。

4.2.1 高赤方偏移銀河の観測研究

巨大ライマン α 輝線銀河に対する AzTEC/ASTE による 1.1 ミリ波サーベイ

Lya blob (LAB) は、高赤方偏移に観測される巨大な (20–300 kpc) 電離水素ガス雲であり、大質量銀河の形成現場と目される一方、水素ガスの電離源は不明である。そこで我々は、ASTE 望遠鏡と AzTEC 連続波カメラを用いて、LAB 内部における星間物質に隠された星形成活動を探索するため、赤方偏移 3.1 の SSA22 原始銀河団内に位置する 35 個の LAB に対する 1.1 ミリ波連続波探索を行った。また、Herschel 宇宙望遠鏡を用いて、遠赤外線 (250–500 μ m) の撮像探索も行った。現存するミリ波サブミリ波・遠赤外線 LAB 探索としては最大である。しかし、1.1 ミリ波対応天体同定とスタッキング解析からは、LAB に有意な検出 ($> 3.5\sigma$) は認められなかった (遠赤外線光度の 3σ 上限値 $L_{\text{FIR}} < 3 \times 10^{12} L_{\odot}$, スタッキング解析では $L_{\text{FIR}} < 4.5 \times 10^{11} L_{\odot}$)。この結果、LAB はサブミ

リ波銀河に匹敵する星形成活動 ($SFR \sim 10^3 M_{\odot}/yr$) を持たず、平均的には穏やかな隠された星形成活動 ($SFR \lesssim 50 M_{\odot}/yr$) を持つことがわかった [8].

AzTEC/ASTE による高赤方偏移原始銀河団 4C23.56 周辺領域における大質量銀河形成に関する研究

銀河の種族はその存在する環境に大きく依存するという統計が知られており (Dressler 1980), 高密度環境であるほど大質量の銀河形成が多い傾向にある. 中でも現在の宇宙において $M \geq 10^{12} M_{\odot}$ にもなるような銀河の多くは銀河団に属する楕円銀河であり, 巨大銀河の形成過程を理解する上で, 初期宇宙における高密度環境下において特異的な銀河形成の特徴 (爆発的星形成, 星形成の促進など) を探ることが重要である.

$z = 2.48$ の電波銀河 4C 23.56 の周囲では, 近赤外の狭帯域フィルタを用いた広域サーベイにより, H α 輝線を放つ銀河 (HAEs) が高密度に集まった ‘原始銀河団’ 領域が見つかっており (HAE clump; Tanaka et al. 2011), 高赤方偏移の高密度環境における銀河形成の現場として重要なターゲットであると考えられている. しかし, 静止系可視域にある H α 輝線であっても, 大量のダストにより可視/近赤外域で強い減光を受けている可能性があるため, 比較的ダスト量の少ない星形成銀河しかトレースされず, バイアスを持つ可能性がある.

我々は, そのようなダストに隠された爆発的星形成銀河を抽出し, 高密度環境における銀河形成の全貌を明らかにすることを目指し, 電波銀河 4C 23.56 周囲の原始銀河団領域において, AzTEC カメラを搭載した ASTE 望遠鏡による 1.1 mm サーベイを行ってきた. 多数の 1.1 mm で輝くダストに覆われたスターバースト銀河が検出されているが, 特に, H α 輝線銀河が密集している領域では, 興味深いことに, H α 輝線銀河と 1.1mm 選択銀河の顕著な空間的なオーバーラップが見出された. 但し, AzTEC/ASTE の 1.1mm 観測の空間分解能が $\sim 30''$ であり, H α 輝線銀河を含めた可視光赤外線対応天体の同定に問題があった.

そこで, H α 輝線銀河が密集する領域の中で検出された, 4 つの 1.1mm 選択銀河の性質を, Plateau de Bure 干渉計 (PdBI) を使って調べた. 観測波長は 1.8mm であり, $z = 2.48$ の CO(5-4) 輝線が検出できるほか, ダスト連続波の分布を高い角度分解能 (4 秒角程度) で調べることが可能である. PdBI で観測を行った 4 つの視野 (合計約 0.7 平方分) の中で, 8 個の連続波源を検出した. このうち, 少なくとも 4 つの 1.8mm 連続波源 (PdBI 5, 6, 7, 8) は, $z = 2.48$ の HAEs に対応していることがわかった. すなわち, これら 4 つの 1.8mm 連続波源は, $z = 2.48$ の原始銀河団に物理的に付随する dusty なスターバースト銀河であることが分かった. これらのうち, PdBI 6, 7, 8 は, 4C23.56 電波銀河から約 2Mpc 離れた位置に, 約 300 kpc スケールで密集している. いずれも sBzK 銀河と同程度に活発な星形成を示す ($SFR \sim 60-150 M_{\odot}$

yr^{-1}). PdBI 7 と 8 は CO(5-4) 輝線も検出された. その相対的な速度差は 1200 km s^{-1} 程度である. このシステムは, 現在の宇宙でコンパクト銀河群に似た性質を示している. 残る PdBI 5 は, 単一の dusty な爆発的星形成銀河である ($SFR \sim 690 M_{\odot} yr^{-1}$).

これら原始銀河団に付随するミリ波選択銀河の進化段階について, CO 分光観測の結果と文献にある星質量を用いて議論を行った. 赤外線光度と CO 輝線光度の比で定義される星形成効率 (SFE) は, CO(5-4) 輝線が検出された 2 つのミリ波選択銀河 PdBI 7 と PdBI 8 いずれにおいても “disk mode” の星形成を行う銀河での値とよく似ていた ($SFE \equiv L_{FIR}/L_{CO} = 15 - 20 L_{\odot} (\text{K km s}^{-1} \text{ pc}^2)^{-1}$). 一方, CO が検出されなかった残り 2 つの銀河については, > 550 および $> 80 L_{\odot} (\text{K km s}^{-1} \text{ pc}^2)^{-1}$ となり, “starburst mode” 的な星形成の活動性を示すことが分かった. 次に, バリオン質量 (星質量とガス質量の和) におけるガス質量の割合 $f_{\text{gas}} \equiv M_{\text{gas}}/(M_{\text{gas}} + M_{\text{star}})$ を調べたところ, PdBI 7 では 4-40% であったが, PdBI 8 では 42-93% という非常に高い値となった. すなわち, 後者は gas rich で大質量銀河の形成途上にあると考えられる一方, 前者は多くのガスが既に星へ変換された後のシステムであることが示唆される.

以上の結果から, 4C 23.56 原始銀河団領域に付随する SMGs は, 一般領域にみられる SMGs と比較して顕著な密度超過を示す一方で, それらの中では SFE から見られる星形成の様相は, disk mode に近いものものと burst mode に近いものがあること, すなわち, 爆発的星形成を起こしているものと静穏的・継続的なものが混在しているということ, また CO 輝線から組成比を求めた PdBI 7 と PdBI 8 に見られたように, 同じ環境下における銀河においてもガスの割合 f_{gas} がかなり異なるということが分かった. 高密度環境下に存在する SMGs においても個々の進化段階や星形成モードには多様性があることが分かった. 高密度環境下において, さまざまな進化段階や星形成モードの銀河が, HAE clump に見られるような合体により集められることで, このような多様性が発現している可能性がある.

以上の結果は鈴木賢太の博士論文としてまとめられた. また, ALMA および JVLA による追及観測提案も採択されており (後者については実施済み), 更なる進展が期待できる [24, 35, 36, 30].

Subaru Deep Field で発見した最遠方サブミリ波銀河候補の観測的研究

我々は南米チリのアタカマ砂漠に設置された ASTE 望遠鏡に搭載した波長 1100- μm の連続波カメラ AzTEC をもちいて Subaru Deep Field (SDF), Subaru/XMM-Newton Deep Field (SXDF), SSA22, ADF-S, GOODS-S などを観測し合計 1000 を超えるサブミリ波銀河を検出した. これらの中から波長 0.4-8- μm の broad band の photometry データを用いて, 報告されている最遠方サブミリ波銀河 ($z = 5.3$) をよりも遠い可能性があるサブミリ波銀河の候補を選定した. 特に K-band (波長 2.2 μm) と Spitzer 宇宙望遠鏡

の $3.6 \mu\text{m}$ の photometry のカラーに注目した。 $z > 5$ の dusty starbursts では 4000 \AA break が波長 $2.2\text{-}3.6 \mu\text{m}$ の間に落ちてくるので非常に赤い色を示すことが期待されるからである。この手法により SDF で発見したサブミリ波銀河 SDF1100.001 が最も有力な候補であることがわかった。SDF1100.001 は $3.6 \mu\text{m}$ では検出されているが、イギリス赤外望遠鏡で得られた深い ($3\sigma \sim 24\text{AB}$ 等級) K_s -band では検出されていない波長 $3.6\text{-}8 \mu\text{m}$ の色が赤い赤外の対応天体候補をもっている。より正確な赤方偏移の推定を行うためにすばる望遠鏡に搭載されている近赤外撮像分光装置 IRCS と AO188 をもちいて深い K' -band の観測を行った。また米国サブミリ波干渉計 (SMA) をもちいて波長 $1300 \mu\text{m}$ の高空間分解能サブミリ波撮像を行い、先の2つの対応天体候補の両方がサブミリ波で明るい銀河 (サブミリ波銀河) であることがわかった。これらの観測、解析から SDF1100.001 は赤方偏移 5.8 付近に存在する同じダークマターハローに存在するサブミリ波銀河である可能性が高いことが判明した。より詳細な観測を行うために ALMA cycle 1 に波長 $450, 880, 1100 \mu\text{m}$ での深い連続波観測を提案し、採択された [37]。

原始銀河団領域 SSA22 におけるサブミリ波銀河と超巨大ブラックホールの成長、および、大規模構造の関係

現在の宇宙に存在する恒星質量の半分が赤方偏移 $2\text{-}3$ までに形成されたと考えられており、この時代における宇宙全体の星形成活動の大きい割合を占めるサブミリ波銀河の形成要因を解明することはきわめて重要である。その重要な成因と目される銀河の衝突現象は、原始銀河団のような銀河の高密度環境で促進されると期待される。このような背景のもと、赤方偏移 3.1 に位置する SSA22 原始銀河団に対し、ASTE 望遠鏡に搭載された AzTEC カメラを用いてサブミリ波銀河探索を行った。この結果、100 個を超えるサブミリ波銀河を検出した。統計的手法を応用した赤外線・センチ波対応天体の同定、および測光的赤方偏移の推定を行った結果、サブミリ波銀河のうち少なくとも 10 個が SSA22 原始銀河団メンバーと同定された。さらに SSA22 原始銀河団を構成するライマン α 輝線天体とサブミリ波銀河の 2 点角度相関関数は両者の強い空間相関を示し、またサブミリ波銀河の体積密度が一般領域に比して数桁高いことがわかった。さらに、最近のすばる望遠鏡の観測から発見されたライマン連続光銀河が原始銀河団の周囲に分布し、サブミリ波銀河の分布と空間的な反相関を持つこともわかった。サブミリ波銀河とライマン連続光銀河は、それぞれ、塵を大量に持った極めて強い星形成を行う大質量銀河と低い金属量をもた極めて若い小質量銀河であり、銀河種族の対局をなす。したがって、本研究で示された結果は、原始銀河団のなかでも特に高密度の環境で選択的に大質量銀河が形成・進化するという、銀河進化の環境依存性を強く示唆する。

宇宙で最も明るい天体種族にサブミリ波銀河とクエーサーがある。前者が爆発的な大質量形成活動を

エネルギー源としているのに対して、後者は大質量ブラックホールへの降着現象に伴う重力エネルギーの解放 (活動銀河核) をその源としている。近傍銀河の遠赤外線観測から、爆発的星形成活動を伴う銀河衝突現象がブラックホール降着率を増加させる可能性が指摘されており、これが、銀河のバルジとブラックホールの質量の強い相関 (共進化) を説明するシナリオとして有力である。このことから、銀河衝突が促進される原始銀河団において高赤方偏移のクエーサーの発現とサブミリ波銀河の爆発的星形成活動に強い物理的関係が期待される一方、この進化段階の活動銀河核は塵やガスに覆われて観測が非常に難しかった。このような背景のもと、梅畑らは SSA22 原始銀河団に対し、ASTE 望遠鏡に搭載された AzTEC ミリ波カメラを用いてサブミリ波銀河探索を行った。この結果と Chandra X 線望遠鏡による深い撮像データを照会したところ、原始銀河団メンバーに同定された 3 つのサブミリ波銀河それぞれに X 線源の存在を特定した。X 線スペクトルから水素柱密度と固有 X 線光度を推定したところ、これらはクエーサーと同等の X 線光度 ($L_X \sim 10^{44} \text{ erg/s}$)、ないしブラックホール質量 ($10^8 L_\odot$) を持ち、うち 2 つはコンプトン厚に迫る大量の水素ガスに埋もれていることがわかった。このことは、これらのサブミリ波銀河の中心で巨大ブラックホールが成長しているまさにその最中であり、クエーサーへ進化する直前の段階にあることを示唆する [34, 30]。

波長 1.1mm で検出されたサブミリ波銀河の銀河計数

ミリ波サブミリ波帯で検出される銀河のソースカウント (銀河計数) は、赤外線で見つかる銀河の進化について重要な情報をもたらす。我々は、AzTEC カメラによって波長 1.1mm で観測した 6 つのブランク・フィールドの深い撮像探索 (広さは合計 1.6 平方度、その深さは $1\sigma = 0.4\text{-}1.7 \text{ mJy}$; 表 1) から得られた全データを用いて、波長 1.1mm でのフラックスが 1 mJy から 12 mJy の範囲における銀河計数の、最も強い制限を得た。AzTEC を用いた銀河団領域での観測データも併せることで、波長 1.1mm でのフラックスが 20 mJy の範囲までの銀河計数についても制限を得た。この結果、フラックスの小さい側で示唆される指数関数的な銀河計数の減少傾向に対して、 13 mJy 付近では顕著な銀河計数の増大が見られることが分かった。これは、South Pole Telescope で報告された、 20 mJy を越えるフラックスを示す「極めて明るい銀河」の銀河計数の値となめらかにつながっていた。この銀河計数の「超過」は、強い重力レンズ効果によるものと考えられる。

得られた銀河計数を、いくつかの準解析的銀河形成モデルや現象論的モデルと比較したところ、約 4 mJy よりも明るい銀河については、観測とモデルがよく一致していることが分かった。一方、それより暗い銀河については、 3σ 以上の有意性でモデルとの差異が認められ、特に約 2 mJy よりも暗いフラックス領域で観測された、「規格化した銀河計数」の折れ曲がり再現するモデルは存在しなかった。これらの結果は、低光度の銀河についての既存の銀河進化モデ

ルへの見直しを迫るものである。あるいは、現在の宇宙における微弱な明るさの銀河のスペクトルエネルギー分布への我々の理解がまだ不十分であることを示している可能性もある [19].

GOODS-S 領域において AzTEC/ASTE 観測により発見されたサブミリ波銀河の赤方偏移分布

AzTEC カメラを ASTE に搭載し、さまざまな波長での深い撮像探査が行われている GOODS-S 領域の 1.1mm 観測を行い、48 個のサブミリ波銀河が検出された。多波長データを駆使して、その他波長対応天体を同定し、測光赤方偏移を調べたところ、同定されたサブミリ波銀河の 80% が赤方偏移 2 より初期の宇宙にあることがわかった。また、30% の同定されたサブミリ波銀河は、赤方偏移 3.3 より彼方にあり、サブミリ波銀河の赤方偏移分布において議論となっている、いわゆる “high redshift tail” の存在を強く示すものとなっている。これらの結果は、860 μm 帯でのサーベイで検出されたサブミリ波銀河の赤方偏移分布よりも、波長 1.1mm 帯で探索された天体の赤方偏移分布は、有意に遠方側にシフトしていることを意味する。波長 1.1mm 帯での深宇宙探査の意義を示すとともに、初期宇宙に、これまで知られていなかったダストに深く埋もれた爆発的星形成銀河がまだ多数存在する可能性を示唆するものである [22].

野辺山 45m 望遠鏡と新受信機システムを用いた、明るい遠方銀河からの分子輝線観測の初期成果

野辺山 45m 望遠鏡に新たに開発・搭載された広帯域分光観測システムを用いて、高赤方偏移銀河の CO 輝線探査観測を行い、その初期成果として、3 つの新検出 ($z=1.6-3.4$ にあるサブミリ波銀河, Orochi/HXMM02, SDP9, SDP17), 一つの tentative detection (SDSS J160705+533558), および 1 個の non-detection (COSMOS-AzTEC1) を得た。32GHz という広い instantaneous bandwidth を持つ新観測システムにより、明るいサブミリ波選択の銀河の赤方偏移を、事前の赤方偏移情報に頼ることなく、決定していくことができると期待される [16].

4.2.2 ガンマ線バースト母銀河におけるダストに隠された星形成と星間物質の観測的研究

long duration のガンマ線バースト (以下、単に GRB と呼ぶ) は、大質量星の終末に関係しており、極めて明るく、初期宇宙にまで存在することが明らかになりつつあるため、GRB をプローブとして宇宙における星形成史を探ることが可能であると期待されている。一方で、ガンマ線バースト発生率からその時代での星形成率へ換算する上で、GRB 母銀河

が、どのような性質の銀河であり、各時代の星形成率においてどのような割合を占めているのか、ほとんどわかっていない。初期の GRB 母銀河の観測では、非常に多量のダストを持ち、超高光度赤外線銀河 (ULIRGs) 的な性質を持つものもあるとの報告がある一方、GRB 母銀河は低金属量の天体に偏っているとの指摘もある。こうした状況を踏まえ、GRB 母銀河に、どの程度のダストや分子ガスが存在し、隠された星形成が存在しているのか、を調べるため、ミリ波サブミリ波およびセンチ波を用いた、多角的な研究を行っている。

ATCA 電波干渉計を用いた GRB 母銀河におけるダストに隠された星形成への制限

4 つのガンマ線バースト (GRB) 母銀河, GRB 990705, 021211, 041006, 051022 において, Australia Telescope Compact Array (ATCA) 干渉計を使い, 波長 16cm の電波強度を調べる観測を行った。いずれの銀河からも電波放射は検出されなかった。星形成銀河における遠赤外線-電波放射の相関を用いて、得られた電波強度の 2σ 上限値から、母銀河における星形成率の上限値を見積もったところ、20-50 $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 以下となった。UV/可視域の輝線等により得られている星形成率と比較したところ、これらの GRB 母銀河では、ダストに隠された星形成が大量に (UV/可視域で見積もられた星形成率の 10 倍以上) 存在する可能性は否定された。観測天体のうち 2 つは dark burst であり、それらにおいてもダストに深く隠された星形成の存在が否定されたことから、dark burst が形成される理由として、optical afterglow が intrinsic に暗い可能性が示唆される [20].

4.2.3 ミリ波サブミリ波帯分光観測に基づく銀河の活動性の研究

野辺山 45m 鏡や ASTE10m サブミリ波望遠鏡に、ALMA のデジタル相関器技術を用いた広帯域デジタル分光システムを搭載し、これによる、さまざまな銀河、特に活動的な銀河における、スペクトル線観測を行っている。

これにより、天の川銀河の中には存在し得ない、極めて活動性の高い領域・異なる活動性の領域において、どのような物理化学過程が発現しているのか、を系統的に調べることができる。さらに、活動銀河核に特徴的で、エネルギー源診断の「マーカー」となり得るスペクトル線やスペクトル線の組み合わせを見出すことも重要な目標の一つである。

いよいよ初期科学運用を開始した ALMA による高感度高分解能観測へとつなげ、スペクトル線によるエネルギー源診断を高赤方偏移銀河、特に、サブミリ波銀河の中心核に適用することを目指す。

サブミリ波銀河は、膨大なダストに覆われており、その中心核は、可視光・赤外線はおろか、しばしば硬 X 線ですら見通すことができない (Compton-thick) .

ダスト減光の影響がほとんどないミリ波サブミリ波帯の分光観測は、ダストに深く埋もれた銀河核のエネルギー源診断を行い、成長中の巨大ブラックホールの存在を紐解くための有望な手段となる筈である。

この他、ミリ波サブミリ波帯の分子輝線の分光観測に基づき、銀河における星形成の進化を探る観測的研究も行っている。これら近傍銀河で得られる知見は、空間的に分解して調べることが容易でない高赤方偏移銀河での星形成とそこでの物理・素過程を解明していく上での重要な手掛かりとなる。

ALMA で探る 1 型セイファート銀河 NGC 1097 の中心 100pc 領域の高密度ガスの物理的・化学的狀態

近傍にある活動銀河核 NGC 1097 の中心領域に存在する高密度分子ガスを、部分運用の始まった ALMA を用いて、約 100pc 分解能で分光撮像観測により調べた (PI: K. Kohno, プロジェクト番号 2011.0.00108.S)。この銀河は、中心に低光度活動銀河核を持ち、その周囲には、活発な starburst ring を伴う。この中心の活動銀河核と、周囲をとりまく爆発的星形成領域とを空間的に分解し、それぞれの活動領域において、特徴的にみえる高密度分子輝線は何か、を明らかにすることが狙いである。特に、シアン化水素 (HCN) やホルミルイオン (HCO^+) の $J=1-0$ 遷移輝線は、過去の我々の観測により、この銀河の中心付近で強く検出されており、活動銀河核からの何らかの影響 (強い硬 X 線の影響、もしくは AGN jet の存在によるショックの注入と、それに伴う力学的エネルギーの散逸加熱) が示唆されているが、励起状態に起因するのか、あるいは実際にある分子の存在量が上昇しているのか、明確に切り分けられていなかった。

最初に観測が実施され、データが到着した 350GHz 帯 (Band7) の観測結果から、NGC 1097 中心の AGN 付近では、HCN ($J=4-3$) の HCO^+ ($J=4-3$) に対する輝線強度比が高いことが明らかになった。代表的な近傍 AGN 銀河の NGC 1068 でも同様の高い強度比が見られる一方、NGC 253 や M 82 といった近傍の SB 銀河ではこのような比は見られなかった。この、AGN 銀河と SB 銀河間で強度比が異なることは、ミリ波帯の $J=1-0$ の低励起輝線でも報告されている。このように、AGN 銀河で HCN/ HCO^+ 輝線強度比が高くなる原因を探るため、我々は ALMA で得た $J=4-3$, $1-0$ 輝線に加えて、Submillimeter Array (SMA) で得た $J=3-2$ 輝線も用いた複数遷移輝線解析を行なった。その結果、HCN の分子存在量が HCO^+ より有意に増加していること、また、その存在量比は AGN 銀河の方が SB 銀河よりも高いことが示唆された。さらに、非局所熱平衡条件下での分子モデル解析より、これらの輝線の放射領域は、確かに高密度 ($10^{4.25} < n_{\text{H}_2} [\text{cm}^{-3}] < 10^6$) で、かつ高温状態 ($70 < T_{\text{kin}} [\text{K}] < 450$) にあることが示唆された。また、こうした結果は、Harada et al. 2010 のような星間物質高温相の化学モデルで説明できることも示した。この研究を発展させることで、AGN

や SB 銀河に特徴的な輝線放射を発見・確立し、それを用いて近傍から遠方宇宙にいたる様々な天体で熱源を診断し、それらが母銀河に与えた影響を調べられると期待できる [1, 26, 27, 30, 38]。

また、HCN(4-3) 輝線でトレースされる高密度ガスの力学的性質を詳しく調べ、モデルとの比較により、高密度ガスが幾何学的に薄い ($h/R \leq 10^{-3}$) 回転円盤を為していること、また、半径 40pc での mass inflow rate が $\sim 0.09 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ の spiral inflow model と整合することを示した [2]。

これらの結果は、ALMA を使ったサブミリ波分子輝線観測により、ダストに隠された銀河のエネルギー源診断に新しい道を開くばかりでなく、巨大ブラックホール形成過程について、高密度分子ガスの観測が理論予測と直接比較が可能な段階によいよ進んだことを示している [56]。

SMA 干渉計を使った活動銀河 NGC 1097 の中心領域における HCN(3-2) および $\text{HCO}^+(3-2)$ 輝線イメージング観測

活動銀河 NGC 1097 の中心領域を、Submillimeter Array (SMA) により HCN(3-2) および $\text{HCO}^+(3-2)$ 輝線によりイメージング観測を行った。どちらの輝線も、circumnuclear starburst ring より中心核のほうがより明るかった。一方、HCN/ HCO^+ 輝線強度比は、starburst ring では約 1 であったが、中心核では約 2 という高い値を示していた。starburst ring では、HCN 輝線も HCO^+ 輝線も MIPS $24\mu\text{m}$ 輝線の放射とよく相関しており、これらの輝線が星形成をトレースしていることを示唆する。一方、中心核では HCN 輝線が顕著に明るくなっており、星形成以外の熱源 (すなわち活動銀河核など) の存在が示唆される。X-ray ionization chemistry による HCN 分子存在量の増加過程で観測を説明できることが分かった [21]。

スターバースト銀河 NGC 3628 における分子アウトフローの発見

近傍のスターバースト銀河 NGC 3628 の、野辺山ミリ波干渉計を使った非常に深い CO 分子輝線イメージングにより、スターバースト領域から噴出する分子アウトフローを発見した。分子アウトフローは、銀河中心から約 400pc ほどの距離に達しており、その分子ガス質量は $3 \times 10^7 M_{\odot}$ 程度、またアウトフローの速度は $90 \pm 10 \text{ km s}^{-1}$ である。観測されたアウトフローの広がりをつくる時間尺度は 3-6 Myr であり、分子ガスの flow rate は $4-9 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ 、必要となる力学エネルギーは $(2-3) \times 10^{54} \text{ erg}$ と見積もられた。分子ガスの消費時間尺度は 20-30 Myr 程度であるため、NGC3628 のスターバースト活動は、まだ若いフェイズにあることが示唆された [17]。

ALMA を使った相互作用銀河 VV114 における活動銀河核と広がった爆発的星形成領域の観測

ALMA を用いて、赤外線で見える相互作用銀河 VV114 の HCN(4-3) および HCO⁺(4-3) 輝線の高解像度観測を行った。空間的に分解できない、コンパクトで、幅広い線幅 (290 km/s) を持ち、かつ、星形成領域では見られない異常に高い HCN(4-3)/HCO⁺(4-3) 輝線強度比を示す成分を VV114 の東側の銀河において発見した。ここには濃い星間物質に埋もれた活動銀河核が存在すると考えられる。また、600pc 程度の長さのフィラメント状に分布する HCO⁺(4-3) 輝線で明るい高密度ガスの分布も明らかになった。これは、miniTAO で観測された Pa α 輝線の分布とよく対応しており、相互作用領域に広がったスターバースト領域をトレースしていることが分かった。このように、ALMA によるサブミリ波帯の分光観測は、ダストに覆われた活動銀河核やスターバースト領域を見出す上で非常に有用であることが示された [3]。

渦状銀河 M33 における巨大分子雲の進化

ASTE10m 望遠鏡を用いて、近傍渦状銀河 M33 の広域かつ高感度な CO(J=3-2) 輝線撮像観測を行い、合計 71 個の巨大分子雲 (GMC) のカタログを得た。空間分解能は約 100pc であり、GMC スケールの構造を解像できるデータである。一方、アーカイブにある可視バンドでの撮像データを解析し、若い星団の分布を新たに定量的に調べた上、既存の HII 領域のカタログとも突き合わせることで、分子雲を、以下のような 4 段階に分類した: type-A = 大質量星形成の兆候を示さない静かな分子雲, type-B = HII 領域のみを伴う若い星形成を示す分子雲, type-C = HII 領域と 10Myr より若い星団を伴う分子雲, type-D = HII 領域と 10-30Myr の年齢を示す星団を伴う分子雲。全 71 個の分子雲のうち、各カテゴリに属するものの数と割合は、A から順に、1(1%), 13(20%), 29(45%), 22(34%) であった。これは巨大分子雲の進化過程をみていると考えられ、巨大分子雲の life time は 20-40 Myr と評価された。巨大分子雲の無バイアスサーベイに基づき、銀河全体における巨大分子雲の分類とその進化を行ったのは、系外銀河としては、LMC に続き 2 例目であり、渦状銀河としては初めてのものである。CO(3-2)/CO(1-0) 輝線強度比でトレースされる「全分子ガス中に占める高密度分子ガスの割合」は、活発な星形成領域の周辺で上昇していることが分かった。本研究は三浦理絵の学位論文としてまとめられ、ApJ 誌に出版された [14, 23]。

活動銀河核 NGC 4261 における分子トラスの探査

国立天文台野辺山の RAINBOW 干渉計 (10m6 素子の野辺山ミリ波干渉計と 45m 鏡とを結合した 7 素子干渉計) および IRAM の PdB 干渉計を用いて、活動銀河核 NGC 4261 中心核方向での強い連続波源を背景として、CO(J=2-1) および CO(J=1-0) の吸収

線探査を行った。いずれの遷移においても吸収線は検出されなかった。吸収線の optical depth の 3σ 上限値は、 $J=2-1$ が 0.098、 $J=1-0$ が 0.042 であった。これらの上限値は、過去の JCMT 望遠鏡で報告された CO(J=2-1) 吸収線での optical depth(0.7) よりも遙かに小さく、過去の結果の見直しを迫る結果となった。活動銀河核周辺の分子ガスは高温に加熱されており、そのために、量子数 J の小さいエネルギー準位に配される粒子数が小さくなり、今回観測した low- J の遷移の optical depth が小さくなっていることが示唆される [7]。

4.2.4 ミリ波サブミリ波観測装置の開発

超伝導遷移端センサーを用いた多色ミリ波サブミリ波撮像カメラの開発

サブミリ波銀河の赤方偏移の推定や、スニヤエフ・ゼルドビッチ効果を用いた銀河団の高温プラズマの内部構造の研究、星形成領域におけるダストの物理量 (温度や β 指数)、また、ガンマ線バーストのサブミリ波初期残光のスペクトル指数に制限をつける上で、ミリ波サブミリ波帯の複数の波長における同時撮像は極めて重要である。単色 (波長 1.1mm) での連続波カメラ AzTEC による大規模な掃天観測の成功を踏まえ、その次のステップとして、波長 1.1mm、0.87mm、および 0.46mm 帯での観測を実現するミリ波サブミリ波カメラの開発を進めている。センサーとしては、近年技術的な成熟度が急速に高まった TES ボロメーター (超伝導遷移端における、フォトン入射に対する急峻な抵抗値の変化を読み出す超伝導熱検出器) のアレイを採用する。複数の波長での同時観測は、ミリ波サブミリ波帯のダイクロイック素子を用いて実現する。読み出しは SQUID を用い、周波数分割方式による多重読み出しを実装した。

まず 1.1mm および 0.87mm 帯の 2 色同時撮像を実現する、合計 450 画素のカメラ開発を進めており、全コンポーネントを全て組み上げての総合性能評価と調整を行い、チリ現地へ輸送して ASTE 望遠鏡に搭載するための準備を整えてきたが、H24 年の 5 月から 6 月にかけて、ASTE 望遠鏡への搭載が実現し、天体信号を使った 2 バンドでの初画像の取得に成功した (廣田, 大島ほか)。ASTE 受信機室内の電磁ノイズ環境が非常に劣悪であることが判明し、その対応に追われた他、過酷な環境化での冷凍機類の動作にも苦労があった他、光学系での効率設計値と食い違っている可能性があるなど、解決すべき課題も多々見出された。にもかかわらず、カメラとしての制御からデータ取得、解析系まで、全て検証して初画像を得ることが出来たのは非常に大きな前進である。ASTE インフラ系の問題のため、これ以上の試験観測が出来なかったため、実験室での光学系の詳しい調査を進めつつ、H25 年度での観測運用に向けた準備を進めることとなった。本研究の一部は、特別推進研究「超広帯域ミリ波サブミリ波観測による大規模構造の進化の研究」(代表者: 河野孝太郎) により進められている [4, 11, 18]。

ASTE 搭載用ミリ波サブミリ波 TES ボロメータの素子評価

ASTE 望遠鏡に搭載する TES ボロメータカメラ開発の一環として、超伝導素子の性能評価を担当した。その結果、予想よりも素子の歩留まりが悪くことが判明したが、その原因が本当に素子自身にあるのか、はたまた実験室の環境にあるのかを切り分ける作業を進めてきた。具体的には、ボロメータは超伝導素子なので、実験室中に不要な磁場が存在すると、その影響を受けてノイズを発生する。そのため、実験室中での磁場環境を測定し、大きな磁場発生源となっている装置は交換したり、素子を冷却している容器から遠い場所に配置し直す、といった対策をとった。これらの作業はほぼ完了しており、今後は再び性能評価作業に戻り、対策の効果が出ているかを重点的に確し、歩留まりの悪さの原因を切り分ける。また、光学系から素子までを含めた能率の測定を行なうために、サブミリ波帯での校正用の黒体の開発や、フーリエ分光計の準備を行なった。こちらも準備は完了しており、今年度の測定作業に備えている [50]。

野辺山 45m 望遠鏡に搭載する新しい赤方偏移探査用 100GHz 帯両側波帯分離型 2 ビーム SIS 受信機システムの開発

導波管型の、両側波帯を分離する超伝導 SIS ミキサーを使った 100GHz 帯受信機システムを開発した。オルソモードトランスデューサー (OMT) を使って両偏波を同時受信することで感度を向上させることに加え、天球面上の 45'' 離れた 2 点を同時に観測できる 2 ビームを持つ。これを、目的天体と、blank sky とで交互に切り替え観測を行うことにより、目的天体からの信号を常に捉えつつ、効率的に sky subtraction を行うことが可能となる。観測周波数帯域 (80-116GHz) に渡り、SSB 受信機雑音温度は 50K 以下という高い感度を達成した。この周波数範囲の多くで、反対側の側波帯からの漏れこみ除去率は 10 dB 以上あり、実用上問題のないレベルであった。この受信機を野辺山 45m 鏡に搭載し、赤方偏移の情報がない天体であっても無バイアスに CO 輝線を探査してその赤方偏移を分光的に決めることができると期待される [9]。

周波数変調局部発振器を用いた新しいミリ波サブミリ波分光方式の開発

ミリ波サブミリ波分光観測の感度向上を実現するために、電波受信系の周波数標準 (局部発振器) を周波数変調しながら高周波で分光データをサンプルする受信系を構築するための、基礎的な研究を推進している。2012 年度は、局部発振器の周波数変調制御を行うシステムの構築、ASTE 望遠鏡への実装、および試験観測を行った結果、本提案手法の技術実証に成功した。また、本分光方式専用のデータ処理ソフトウェアの開発も同時に推進している。この評価試験

をもとに、専用データ処理ソフトウェアを開発した。本データ処理法に基づけば、既存の分光法と比較して 2.1 倍の感度向上が可能であることをシミュレーションで示したが、今回の実証試験で 2.4 倍の感度向上が可能であることを示した。さらに、本手法の開発本拠地を国立天文台野辺山 45m ミリ波望遠鏡に移し、システムの開発と実装を完了している。2013 年度は、45m 望遠鏡での実用化を行う予定である [47]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Izumi, T., Kohno, K., Martin, S., Espada, D., Harada, N., Matsushita, S., Hsieh, P.-Y., Turner, J. E., Meier, D. S., Schinnerer, E., Imanishi, M., Tamura, Y., Curran, M. T., Doi, A., Fathi, K., Krips, M., Lundgren, A. A., Nakai, N., Nakajima, T., Regan, M. W., Sheth, K., Takano, S., Taniguchi, A., Terashima, Y., Tosaki, T., Wiklind, T., "Submillimeter ALMA Observations of the Dense Gas in the Low-Luminosity Type-1 Active Nucleus of NGC 1097", PASJ, in press. (2013)
- [2] Fathi, K., Lundgren, A. A., Kohno, K., Pinol-Ferrera, N., Martin, S., Espada, D., Hatziminaoglou, E., Imanishi, M., Izumi, T., Krips, M., Matsushita, S., Meier, D. S., Nakai, N., Sheth, K., Turner, J., van den Ven, G., Wiklind, T., "ALMA Follows Streaming of Dense Gas Down to 40 pc from the Supermassive Black Hole in NGC 1097", *The Astrophysical Journal*, in press. (2013)
- [3] Iono, D., Saito, T., Yun, M. S., Kawabe, R., Espada, D., Hagiwara, Y., Imanishi, M., Izumi, T., Kohno, K., Motohara, K., Nakanishi, K., Sugai, H., Tateuchi, K., Tamura, Y., Ueda, J., "Active Galactic Nucleus and Extended Starbursts in a Midstage Merger VV114", 2013, PASJ, **65**, L7, 5 pp.
- [4] Oshima, T., Kawamura, M., Westbrook, B., Sato, T., Suzuki, A., Takekoshi, T., Suzuki, K., Minamidani, T., Hirota, A., Izumi, T., Lee, A. T., Holzapfel, W. L., Kohno, K., and Kawabe, R., "Development of TES bolometer camera for ASTE telescope: I. bolometer design", 2013, *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. **23**, 2101004, 4 pp.
- [5] Johnson, S. P., Wilson, G. W., Wang, Q. D., Williams, C. C., Scott, K. S., Yun, M. S., Pope, A., Lowenthal, J., Aretxaga, I., Hughes, D., Kim, M. J., Kim, S., Tamura, Y., Kohno, K., Ezawa, H., Kawabe, R., Oshima, T., "X-ray detections of submillimetre galaxies: active galactic nuclei versus starburst contribution", 2013, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **431**, 662-682
- [6] Alberts, S., Wilson, G. W., Lu, Y., Johnson, S., Yun, M. S., Scott, K. S., Pope, A., Aretxaga, I., Ezawa, H., Hughes, D. H., Kawabe, R., Kim, S., Kohno, K., and Oshima, T., "Submm/mm Galaxy Counterpart Identification Using a Characteristic Density Distribution", 2013, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **431**, 194-209

- [7] Okuda, T., Iguchi, S., Kohno, K., “A Millimeter-wave Interferometric Search for a Molecular Torus in the Radio Galaxy NGC 4261”, 2013, *The Astrophysical Journal*, **768**, article id. 19, 4 pp.
- [8] Tamura, Y., Matsuda, Y., Ikarashi, S., Scott, K. S., Hatsukade, B., Umehata, H., Saito, T., Nakanishi, K., Yun, M. S., Ezawa, H., Hughes, D. H., Iono, D., Kawabe, R., Kohno, K., and Wilson, G. W., “Obscured star formation in Ly-alpha blobs at $z = 3.1$ ”, 2013, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **430**, 2768-2773
- [9] Nakajima, T., Kimura, K., Nishimura, A., Iwashita, H., Miyazawa, C., Sakai, T., Iono, D., Kohno, K., Kawabe, R., Kuno, N., Ogawa, H., Asayama, S., Tamura, T., Noguchi, T., “A New 100-GHz Band Two-Beam Sideband-Separating SIS Receiver for Z-Machine on the NRO 45-m Radio Telescope”, 2012, *PASP*, **125**, 252-262
- [10] Doi, A., Kohno, K., Nakanishi, K., Kameno, S., Inoue, M., Hada, K., Sorai, K., “Nuclear Radio Jet from a Low-Luminosity Active Galactic Nucleus in NGC 4258”, 2013, *The Astrophysical Journal*, **765**, article id. 63, 11 pp.
- [11] Takekoshi, T., Minamidani, T., Nakatsubo, S., Oshima, T., Kawamura, M., Matsuo, H., Sato, T., Halverson, N. W., Lee, A. T., Holzapfel, W. L., Tamura, Y., Hirota, A., Suzuki, K., Izumi, T., Sorai, K., Kohno, K., Kawabe, R., “Optics Design and Optimizations of the Multi-color TES Bolometer Camera for the ASTE Telescope”, 2012, *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, Vol. **2**, 584-592
- [12] Onodera, S., Kuno, N., Tosaki, T., Muraoka, K., Miura, R. E., Kohno, K., Nakanishi, K., Sawada, T., Komugi, S., Kaneko, H., Hirota, A., and Kawabe, R., “NRO M 33 All-Disk Survey of Giant Molecular Clouds (NRO MAGiC). II Dense Gas Formation”, 2012, *PASJ*, **64**, article no. 133, 15 pp.
- [13] White, G. J., Hatsukade, B., Pearson, C., Takagi, T., Sedgwick, C., Matsuura, S., Matsuhara, H., Serjeant, S., Nakagawa, T., Lee, H. M., Oyabu, S., Jeong, W.-S., Shirahata, M., Kohno, K., Yamamura, I., Hanami, H., Goto, T., Makiuti, S., Clements, D. L., Malek, K., Khan, S. A., “A deep ATCA 20 cm radio survey of the AKARI Deep Field South near the South Ecliptic Pole”, 2012, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **427**, 1830-1846
- [14] Miura, R. E., Kohno, K., Tosaki, T., Espada, D., Hwang, N., Kuno, N., Okumura, S. K., Hirota, A., Muraoka, K., Onodera, S., Minamidani, T., Komugi, S., Nakanishi, K., Sawada, T., Kaneko, H., Kawabe, R., “Giant Molecular Cloud Evolutions in the Nearby Spiral Galaxy M33”, 2012, *The Astrophysical Journal*, **761**, article id. 37, 23 pp.
- [15] Yamada, K., Kitayama, T., Takakuwa, S., Iono, D., Tsutsumi, T., Kohno, K., Takizawa, M., Yoshikawa, K., Akahori, T., Komatsu, E., Suto, Y., Matsuo, H., Kawabe, R., “Imaging Simulations of the Sunyaev-Zel'dovich Effect for ALMA”, 2012, *PASJ*, **64**, article no. 102, 16 pp.
- [16] Iono, D., Hatsukade, B., Kohno, K., Kawabe, R., Ikarashi, S., Ichikawa, K., Kodama, T., Motohara, K., Nakajima, T., Nakanishi, K., Ohta, K., Ota, K., Saito, T., Suzuki, K., Tadaki, K.-i., Tamura, Y., Ueda, J., Umehata, H., Yabe, K., Yoshida, T., Yuma, S., Kuno, N., Takano, S., Iwashita, H., Handa, K., Higuchi, A., Hirota, A., Ishikawa, S., Kimura, K., Maekawa, J., Mikoshiba, H., Miyazawa, C., Miyazawa, K., Muraoka, K., Ogawa, H., Onodera, S., Saito, Y., Sakai, T., Takahashi, S., Yun, M. S., “Initial Results from Nobeyama Molecular Gas Observations of Distant Bright Galaxies”, 2012, *PASJ*, **64**, L2, 4 pp.
- [17] Tsai, A.-L., Matsushita, S., Kong, A. K. H., Matsumoto, H., Kohno, K., “First Detection of a Subkiloparsec Scale Molecular Outflow in the Starburst Galaxy NGC 3628”, 2012, *The Astrophysical Journal*, **752**, article id. 38, 14 pp.
- [18] Westbrook, B., Lee, A., Meng, X., Suzuki, A., Arnold, K., Shirokoff, E., George, E., Aubin, F., Dobbs, M., MacDermid, K., Hanany, S., Raach, K., Aboobaker, A., Hubmayr, J., Oshima, T., Kawamura, M., Kohno, K., “Design Evolution of the Spiderweb TES Bolometer for Cosmology Applications”, *Journal of Low Temperature Physics*, Vol. **167**, pp. 885-891 (2012)
- [19] Scott, K. S., Wilson, G. W., Aretxaga, I., Austermann, J. E., Chapin, E. L., Dunlop, J. S., Ezawa, H., Halpern, M., Hatsukade, B., Hughes, D. H., Kawabe, R., Kim, S., Kohno, K., Lowenthal, J. D., Montaña, A., Nakanishi, K., Oshima, T., Sanders, D., Scott, D., Scoville, N., Tamura, Y., Welch, D., Yun, M. S., and Zeballos, M., “The source counts of submillimetre galaxies detected at $\lambda = 1.1$ mm”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **423**, 575-589 (2012)
- [20] Hatsukade, B., Hashimoto, T., Ohta, K., Nakanishi, K., Tamura, Y., and Kohno, K., “Constraints on Obscured Star Formation in Host Galaxies of Gamma-Ray Bursts”, *The Astrophysical Journal*, **748**, article id. 108 (2012)
- [21] Hsieh, P.-Y., Ho, P. T. P., Kohno, K., Hwang, C.-Y., and Matsushita, S., “Probing Circumnuclear Environments with the HCN($J = 3-2$) and HCO⁺($J = 3-2$) Lines: Case of NGC 1097”, *The Astrophysical Journal*, **747**, article id. 90 (2012)
- [22] Yun, M. S., Scott, K. S., Guo, Y., Aretxaga, I., Gialalisco, M., Austermann, J. E., Capak, P., Chen, Y., Ezawa, H., Hatsukade, B., Hughes, D. H., Iono, D., Johnson, S., Kawabe, R., Kohno, K., Lowenthal, J., Miller, N., Morrison, G., Oshima, T., Perera, T. A., Salvato, M., Silverman, J., Tamura, Y., Williams, C. C., and Wilson, G. W., “Deep

1.1 mm-wavelength imaging of the GOODS-S field by AzTEC/ASTE - II. Redshift distribution and nature of the submillimetre galaxy population”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **420**, 957-985 (2012)

(学位論文)

- [23] 三浦理絵, “Dense Gas and Massive Star Formation within Giant Molecular Clouds in the Nearby Spiral Galaxy M33”, 博士論文, 2012年5月
- [24] 鈴木賢太, “Dusty Starburst Galaxies in the High Redshift Proto-cluster around the Radio Galaxy 4C 23.56”, 博士論文, 2013年3月

(国内雑誌)

- [25] 河野孝太郎: 「超巨大ブラックホールの謎」 「発見! モンスター銀河」, 大人の科学マガジン サイエンス・ライブ 「星と銀河と宇宙の進化」 学研教育出版 2012年10月1日発行

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [26] Kohno, K., “ALMA study of the activities in galaxies” (Invited), 2012/9/12–13, “ALMA-EA Science Workshop”, Daejeon, Korea
- [27] Kohno, K., “ALMA observations of Dense Molecular Gas in active galaxies” (Invited), 2012/10/10–12, “SOCHIAS 2012: Submm astronomy in Chile”, Vina del Mar, Chile
- [28] Kohno, K., “ASTE plans for 2013-2015” (Invited), 2012/10/10–12, “SOCHIAS 2012: Submm astronomy in Chile”, Vina del Mar, Chile
- [29] Kohno, K., “Exploring the formation and evolution of galaxies through Terahertz windows” (Invited), 2012/11/26–30, “International Symposium on Frontiers in THz Technology 2012”, Nara, Japan
- [30] Kohno, K., “Observations of high redshift galaxies: from Nobeyama to ALMA” (Invited), 2012/12/3–8, “New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory”, Hakone, Japan

一般講演

- [31] Kohno, K., “ALMA Band 7 observations of dense molecular medium in the type-1 active nucleus NGC 1097”, 2012/12/12–15, “The First Year of ALMA science”, Puerto Varas, Chile
- [32] Ikarashi, S., Kohno, K., Tamura, Y., Suzuki, K., Umehata, H., Motohara, K., Hatsukade, B., Ohta, K., Yabe, K., Iono, D., Nakanishi, K., Kawabe, R., Wilson, G., Yun, M. S., Hughes, D. H., Aretxaga, I., Scott, K., Ivison, R., Arumugam, V., Dunlop, J., Caputi, K., “AzTEC/ASTE deep and wide

submillimeter galaxy survey in the Subaru/XMM-Newton Deep Field: Identification of VLA, Spitzer and Herschel counterparts to 1100- μ m-selected galaxies and redshifts”, 2012/12/3–8, “New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory”, Hakone, Japan (Poster)

- [33] Ikarashi, S., Kohno, K., Tamura, Y., Suzuki, K., Umehata, H., Motohara, K., Hatsukade, B., Ohta, K., Yabe, K., Iono, D., Nakanishi, K., Kawabe, R., Wilson, G., Yun, M. S., Hughes, D. H., Aretxaga, I., Scott, K., Ivison, R., Arumugam, V., Dunlop, J., Caputi, K., “AzTEC/ASTE confusion-limited 1100 μ m SMG survey in SXDF: VLA, Spitzer and Herschel counterparts for AzTEC sources and their natures”, 2012/09/20–22, “CCAT high-redshift galaxies workshop”, University of Colorado, USA (Oral)
- [34] Umehata, H., Tamura, Y., Kohno, K., et al.: “Submillimeter Galaxies in the SSA22 Protocluster at $z = 3.1$ ”, 2012/09/10–13, “Growing-up at high redshift: from proto-clusters to galaxy clusters”, European Space Astronomy Centre (ESAC), Madrid, Spain (Oral)
- [35] Suzuki, K., Kohno, K., et al., “Title: Large Dust and CO in H α emitting galaxies associated with the proto-cluster around 4C 23.56 at $z=2.48$ ”, 2012/09/10–13, “Growing-up at high redshift: from proto-clusters to galaxy clusters”, European Space Astronomy Centre (ESAC), Madrid, Spain (Poster)
- [36] Suzuki, K., Kohno, K., et al., “Sub-mm Single-dish and Interferometric Observations of the Proto-cluster around 4C 23.56 at $z = 2.5$ ”, 2012/12/3–8, “New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory”, Hakone, Japan (Poster)
- [37] S. Ikarashi, K. Kohno, K. Motohara, M. Ouchi, K. Shimasaku, Y. Tamura, K. Suzuki, H. Umehata (Univ. of Tokyo), K. Nakanishi, D. Iono, R. Kawabe, N. Kashikawa, K. Yabe, M. Hayashi (NAOJ), K. Ohta, B. Hatsukade (Kyoto Univ.), W. Wang (ASIAA), M. Yun, G. Wilson, S. Johnson (UMASS), D. Hughes, I. Aretxaga (INAOE), R. Ivison, J. Dunlop, V. Arumugam (Royal observatory of Edinburgh), K. Caputi (Univ. of Groningen), M. Malkan (UCLA), C. Ly (STSC), K. Scott (NRAO): “A highest redshift SMG candidate discovered in the Subaru Deep Field”, 2013/1/15–17, “Subaru Users Meeting 2012”, Mitaka, Japan (Oral)
- (セミナー)
- [38] 河野孝太郎: 「ALMA cycle 0 observations of the dense molecular gas in the active galaxy NGC 1097」, 2012/5/23, EA-ARC Seminar, 国立天文台 (国内会議)

一般講演

- [39] 河野孝太郎：「ミリ波サブミリ波でみた 銀河形成研究の現状」, 2012/5/26-28, 銀河形成解剖ワークショップ, 国立天文台ハワイ観測所
- [40] 河野孝太郎：「Survey of dense molecular gas in Southern active galaxies using Mopra」, 2012/6/9, ALMA Workshop: Science with Mopra for the ALMA, 国立天文台
- [41] 河野孝太郎：「Dusty starburst galaxies in CANDELS/SXDF」, 2012/6/12, ALMA 銀河 sub-working group: AGN および high-z, 国立天文台
- [42] 河野孝太郎：「ALMA cycle 0 observations of the barred spiral galaxy NGC 1097」, 2012/6/27, ALMA science working group on nearby galaxies, 国立天文台
- [43] 河野孝太郎：「ALMA cycle 0 observations of the type-1 Seyfert galaxy NGC 1097」, 2012/8/14, Kinematics, ISM and Star Formation in Galaxies, 明星大学
- [44] 梅畑豪紀, 河野孝太郎, 田村陽一, 五十嵐創, 鈴木賢太 (東京大学), 大島泰, 田中壱, 川邊良平, 伊王野大介, 中西康一郎 (国立天文台), 江上英一 (アリゾナ大), 廿日出文洋 (京都大学)：「An ultra bright SMG behind a nearby cluster」, 日本天文学会 2012 秋季年会, 大分大学, 2012/9/20
- [45] 泉拓磨, 田村陽一, 河野孝太郎 (東京大学), 高野秀路, Daniel Espada, 中西康一郎, 今西昌俊 (国立天文台), 中井直正 (筑波大), 中島拓 (名古屋大), 他：「ALMA で探る近傍銀河のエネルギー源」, 2012/9/20, 日本天文学会 2012 秋季年会, 大分大学
- [46] 泉拓磨, 田村陽一, 河野孝太郎 (東京大), 中島拓 (名古屋大), 高野秀路, 中西康一郎, Daniel Espada, 今西昌俊 (国立天文台), 中井直正 (筑波大), 他：「高密度ガスのトレーサーで探る銀河のエネルギー源」, 2012/9/20, 日本天文学会 2012 秋季年会, 大分大学
- [47] 田村陽一 (東京大学), 豊谷仁男, 高橋茂, 前川淳 (国立天文台野辺山), 堀込 治 (富士通システムズ・イースト), 阿部 勝己 (富士通株式会社), 河野 孝太郎, 酒井 剛 (東京大学)：「周波数変調局部発振器による新しいミリ波サブミリ波分光法：I. 受信システムの開発」, 2012/9/21, 日本天文学会 2012 秋季年会, 大分大学
- [48] 河野孝太郎：「ALMA/ASTE」, 2012/9/26-28, すばる HSC サーベイによるサイエンス, 国立天文台
- [49] 河野孝太郎：「ASTE-II/III 計画：ALMA 時代における空間方向および波長方向のサーベイ戦略・LMT/CCAT 他との関係」, 2012/9/29, Large Aperture Millimeter/Submillimeter Telescopes in the ALMA Era, 国立天文台
- [50] 泉拓磨, 河野孝太郎, 大島泰ほか：「ASTE 搭載用 TES ボロメータカメラの開発」, 2012/11/5-6, 計測システム研究会, 本郷, 東京大学
- [51] 河野孝太郎：「ALMA cycle 0 observations of active galaxies」, 2013/1/26-28, ALMA 時代の宇宙構造形成理論研究会, 北海道大学
- [52] 河野孝太郎：「分子スペクトル線の観測で得られる銀河の基本物理量」, 2013/2/25-26, ALMA workshop: ALMA ミリ波サブミリ波観測で押さえる銀河の基本観測量とその理解, 国立天文台
- [53] 竹腰達哉, 南谷哲宏, 大木平, 徂徠和夫, 羽部朝男 (北海道大学), 田村陽一, 河野孝太郎 (東京大学), 大島泰, 江澤元, 川辺良平 (国立天文台), I. Aretxaga, D. H. Hughes (INAOE), K. S. Scott (NRAO), G. W. Wilson, M. S. Yun (UMASS)：「Detection of an Ultra-bright Submillimeter Galaxy behind the Small Magellanic Cloud」, 2013/3/20, 日本天文学会 2013 年春季年会, 埼玉大学
- [54] 中島拓 (名古屋大学 STEL), 岩下 浩幸, 宮澤 千栄子, 久野 成夫 (国立天文台 野辺山), 西村 淳, 木村 公洋, 小川 英夫 (大阪府立大学 理), 酒井 剛, 河野孝太郎 (東京大学 理), 伊王野 大介, 浅山 信一郎, 川辺 良平 (国立天文台 チリ), 野口 卓 (国立天文台 ATC)：「野辺山 45 m 鏡用 100 GHz 帯 2 ビーム両偏波・2SB 受信機の实用化」, 2013/3/21, 日本天文学会 2013 年春季年会, 埼玉大学
- [55] 河野孝太郎, 酒井剛, 田村陽一, 五十嵐創, 梅畑豪紀, 泉拓磨 (東京大学), 川辺良平, 大島泰, 廣田晶彦, 佐藤立博, 岩下浩幸, 久野成夫, 江澤元, 伊王野大介, 児玉忠恭 (国立天文台), 松原英雄 (JAXA), 南谷哲宏, 竹腰達哉 (北海道大学), 中島拓 (名古屋大学), 廿日出文洋 (京都大学) 他：「超広帯域ミリ波サブミリ波観測に基づく大規模構造の進化の研究：進捗状況」, 2013/3/21, 日本天文学会 2013 年春季年会, 埼玉大学
- [56] 河野孝太郎 (東京大学)：「ALMA 時代の超巨大ブラックホール形成研究」, 2013/3/22, 日本天文学会 2013 年春季年会, 埼玉大学
- [57] 河野孝太郎：「Water line emission in the LIRGs/ULIRGs near and far」, 2012/3/26-27, ALMA workshop: ALMA で探る遠方・近傍宇宙の赤外線銀河研究の新展開, 宇宙科学研究所

(集中講義)

- [58] 河野孝太郎：「アルマ時代のミリ波サブミリ波天文学」京都産業大学, 2012/7/25-27

(一般講演)

- [59] 河野孝太郎：「混沌の宇宙を読み解く」, 2012 年 4 月 14 日, 第 115 回東京大学公開講座「想像力」, 安田講堂, 東京大学
- [60] 河野孝太郎：「南米アタカマから宇宙を見る」, 2013 年 3 月 24 日, 日本天文学会公開講演会「地上と宇宙をつなぐ天文学の歴史」, 埼玉大学

5 重力波探査

——重力波によるビッグバン宇宙の探索—— ——（坪野）

日本の重力波研究の長年の目標であった大型レーザー干渉計重力波検出器計画 KAGRA(旧 LCGT) プロジェクトが、ついに 2010 年 10 月よりスタートした。メインのターゲットは連星中性子星の合体にともなう重力波であり、KAGRA が完成すれば確実に年に数回の重力波イベントを検出できるはずである。現在は光学設計やインフラ整備が急ピッチで進んでいる。また全長 6km におよぶ巨大な真空パイプや低温冷却系の一部が完成している。一方で、宇宙空間を利用した重力波検出計画も構想されており、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。また、地上で低周波の重力波を検出することが可能な新しいタイプの重力波検出器 TOBA(Torsion Bar Antenna) を開発し、実際に観測をおこなった。

2013 年 3 月をもって坪野研究室は幕を閉じることになった。1987 年に東京大学理学部に坪野研究室が発足して以来、本研究室は 26 年にわたり重力波研究の中核拠点として機能してきた。大学院生として研究室に在籍した学生のうち、修士課程修了者は 38 名、そのうち博士学位取得者は 14 名にのぼる。博士課程修了者の多くは重力波研究分野およびその周辺分野に残り、現在は各分野で主導的な役割を果たしている。今後は安東正樹准教授が研究室を引き継ぐことになった。残ったスタッフ、学生と一緒にさらさら重力波研究を大きく展開していくことが期待される。



図 5.1: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の概念図。

5.1 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA

KAGRA (かぐら) は岐阜県神岡の地下サイトに一辺 3km の L 字型巨大レーザー干渉計を建設し、宇宙からの重力波を検出しようとするプロジェクトである (図 5.1)。2010 年 10 月よりプロジェクトがスタートし、2011 年 1 月 28 日には、それまで LCGT と呼ばれていたプロジェクト名に KAGRA という愛称がつけられた。現在、装置の建設は順調に進んでおり、2015 年には常温での運転が、2017 年からは低温での重力波観測が可能になる予定である。これによって世界初の重力波検出をめざしている。当研究室では、主干渉計光学系の設計などの主要部分の役割を担っており、それに関連した研究開発が進められている [1, 16, 17, 18, 19]。

光学系のレイアウト設計

KAGRA では多数の鏡を km オーダーの長い間隔で分散配置する。その際、光学的なレイアウトには、入射角度やビームスポット位置等に対して、満たさなければならない拘束条件が多数ある。また実際に干渉計を動作させる際に、必要な光を取り出しやすくすると共に、不要な光を適切にダンプし、散乱光雑音が生じないように処理する必要がある。これらのレイアウト最適化作業を効率良く行うため、麻生は、ガウシアンビームの光線追跡ソフトを作成した。これによって、従来は手動で行なっていたレイアウトパラメーターの最適化が自動化され、鏡の仕様変更等に対して柔軟かつ迅速に最適レイアウトのアップデートができるようになった。このソフトを用いて、KAGRA の光学レイアウトが決定された [30, 35]。

アラインメント制御

レーザー干渉計を高感度な重力波検出器として用いるには、干渉計を構成する鏡の位置と姿勢を高精度に制御する必要がある。KAGRA では従来型の干渉計に比べて 5 枚鏡を増やし、RSE と呼ばれる構成を採用することで感度を向上させているが、一方で、制御すべき自由度が大幅に増加する。これにより各自由度の変位信号の分離・対角化が格段に困難になる。また、高出力レーザーを入射光として用いるため、干渉計の片腕の Fabry-Perot 共振器内を往復するレーザーパワーは 400 kW にも及ぶ。そのため、共振器を構成する鏡の傾きに対してレーザー輻射圧トルクがそれを拡大させる方向に働き、角度不安定性が自発的に生じてしまうという問題がある。

我々はアラインメント制御系をシミュレートするためのソフトを開発し、これを用いて KAGRA の干渉計パラメータの最終決定を行った。特に腕共振器を構成する鏡の曲率と、2つのリサイクリング共振器の鏡の曲率はアラインメント制御系を大きく左右するため、KAGRA の目標感度達成に重要である。

腕共振器の鏡の曲率は輻射圧による角度不安定性が小さくなるよう選んだ。また、リサイクリング共振器の鏡の曲率は重力波信号を汚す高次モードと呼ばれる光を抑制しつつ、アライメント信号の分離がしやすいように選択した。こうして決定した鏡の曲率を元に、現在鏡の製作が行われている。

また、鏡の懸架系の3次元剛体シミュレーションの結果と合わせ、角度制御系の設計を行った。これにより鏡を冷やすためのサファイアファイバーの共振が干渉計の感度を悪化させることがわかった。現在は東京大学宇宙線研究所と協力し、鏡の懸架系を見直すとともに、懸架系自体の制御モデルの構築を行なっている [13]。

パラメトリック不安定性

光学系のパラメータ設計の際に考慮すべき問題として「パラメトリック不安定性」という問題がある。当研究室ではこの不安定性の起こる条件の適用範囲を先行研究から拡張し、任意の光学系について適用可能なものとした。また、この結果を実際にKAGRAおよびヨーロッパの第3世代重力波望遠鏡ETに対して適用し、これらの干渉計の光学設計においてパラメトリック不安定性のリスクを評価した (図5.2)。今年度は以上の結果を投稿論文としてまとめ、公表する予定である [10, 44]。

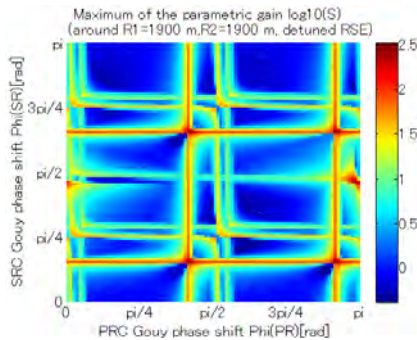


図 5.2: KAGRA においてパラメトリック不安定性を評価した結果。

サファイアの低温物性に関する研究

大型レーザー干渉計型重力波検出器 KAGRA では、干渉計を構成する鏡をサファイアのロッドで懸架する。このサファイアロッドは鏡を引っかけるためにロッドの端が太い特殊な形状をしており、ロッドの表面を研磨することができないことが分かっている。KAGRA の懸架に使用するサファイアロッドは鏡からの入熱を冷凍機に送るために高い熱伝導率を持つ必要があるが、径の細いロッドの熱伝導率は表面状態によって変化することが知られており、現在作成

可能であるサファイアロッドの熱伝導率が KAGRA の要求する熱伝導率を満たしているかどうかは非常に重要な問題である。そこで、坪野研究室ではサファイアロッドの低温での熱伝導率測定を行った。

2012 年度は過去に熱伝導率が測定されたことのあるサファイアロッドのサンプルを用いて、熱伝導率測定の設定アップを構成し熱伝導率の測定ができることの確認を行った。また、そのサンプルに関して暫定的ではあるが熱伝導率の値をおよそ 10 K - 40 K の範囲で測定した [11]。

PD の感度一様性測定装置の開発

Photo Detector (PD) は干渉計の信号を電気信号に変える重要な要素である。一般に、PD に入射するレーザービームには微小ながら位置揺らぎ (ジッタ) が存在する。そのため、PD 表面上でのビーム照射位置が常に変動している。PD 表面に感度の不均一性が存在すると、このビームジッタが PD 出力の変動として現れ、雑音となる。坪野研究室ではこれまで、制御されたビームジッタを持つビームを PD に照射し、その照射位置をスキャンすることで、PD 表面の感度非一様性を測定する装置を開発してきた。これによって、そもそも非一様性の低い PD を選別すると共に、PD 表面で比較的一様性の高い部分にビームを当てることで、ビームジッタ起因の雑音を低減することができる。特に今年度は、二方向に異なる周波数でビームジッタを加えることで、同時測定を行い、高速な一様性測定が可能な装置を開発した。今後、KAGRA で使われる PD をこの装置で選別していく予定である。

5.2 宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO

DECIGO は基線長 1000km のファブリペロー型レーザー干渉計を宇宙空間に建設するという野心的な計画である。これは、主に 10 Hz 以上で感度のある地上レーザー干渉計と、0.1 Hz 以下で感度のある NGO (LISA の後継計画) のような大型宇宙レーザー干渉計の中間にある周波数帯をターゲットとする検出器である。DECIGO は巨大ブラックホールの合体や、初期宇宙からの重力波などの観測を目指している。DECIGO は極めて技術的要求が高い計画であるため、数段階の技術実証実験を経てその実現を目指す。本研究室ではこれまでに世界初の宇宙空間重力波検出器である SWIM_{μν} を打ち上げ、そのデータ解析を行っている。また、DECIGO Pathfinder (DPF) と呼ばれる DECIGO の技術実証衛星の開発にも参加しており、主に干渉計モジュールの構造設計を行っている [2, 5, 14, 20]。

超小型宇宙重力波検出器 SWIM_{μν}

SWIM_{μν} は、JAXA の打ち上げた小型実証衛星 1 型 (SDS-1) に搭載された超小型重力波検出器モジュールである。この内部には、長さ 50 mm 程度のねじれ型重力波アンテナ (TOBA) が格納されている。SDS-1 衛星のスピンのよって「回転 TOBA」という新しいタイプの重力波検出器が実現されるため、回収したデータにより低周波宇宙背景重力波の探査を実施した。SWIM_{μν} は小型の実証機器であり重力波感度が良いわけではなかったが、DPF のための技術の一部を軌道上実証できたといえる [6]。

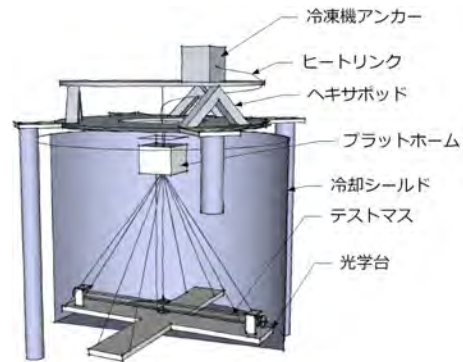


図 5.3: Phase-II TOBA のコンセプトデザイン。

5.3 ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA

ねじれ振り子型重力波検出器 (Torsion-bar Antenna, TOBA) は地上で低周波重力波を観測するための検出器である。現在、神岡で KAGRA という 3 km の腕を持つ干渉計型重力波検出器が建設されているが、こういった地上の干渉計型重力波検出器は共振周波数と地面振動の影響で 10 Hz 以下に感度を持つことができない。また、干渉計を宇宙に打ち上げて低周波重力波を探査するための DECIGO 計画の提案されているが、その実現にはまだしばらく時間がかかる見込みである。そこで地上で低周波重力波探査ができる検出器として TOBA が提案された。これは棒をワイヤーや超伝導ピン止め効果によって浮上させたもので、回転の共振周波数が数 mHz となりこれ以上の重力波に対して感度を持つ。現在、坪野研究室にワイヤー懸架タイプと超伝導磁気浮上タイプのプロトタイプ検出器が開発され、いずれも 0.1 Hz 付近で重力波に対する感度が 10^{-8} から $10^{-9} \text{ Hz}^{-1/2}$ 程度であり、この周波数帯では世界最高感度となっている。今後は雑音を低減させ、より良い感度での観測運転を目指す [15, 21]。

Phase-II TOBA の設計

現在までに、TOBA 第 1 号機によって原理検証・観測が行われてきたが、今後は感度向上の為、技術検証や大型化が必要となる。そこで、Phase-II TOBA として、低温技術・防振技術を盛り込んだ中型 TOBA のコンセプトデザイン決定を行った (図 5.3)。

本研究で検証する技術は、TOBA だけでなく KAGRA などの他の重力波検出器にも応用可能なものであり、コラボレーションが期待できる。また、重力波観測においてもテストマスの水平方向の回転だけでなく、垂直方向の回転もモニターする事で、双方向からやってくる重力波を観測する新たな解析手法も採用する予定である。

今後、このコンセプトに基づいて具体的な設計・システム構築を行う [4, 45]。

5.4 低温光共振器を用いた超高安定化レーザー光源の開発

レーザー周波数の安定化は、重力波検出器のみならず、光格子時計や超高精度分光等の精密計測において重要な役割を果たす。一般に周波数安定化には高安定な光共振器を用意し、レーザーをその共振点にロックすることで達成される。しかし、この共振器の長さ安定度は、構成分子の熱的振動によって生じる熱雑音によって制限される。そこで当研究室では、低温において高い機械的 Q 値を持つ単結晶シリコン製の光共振器を用いて、熱雑音を低減した超高安定化レーザーの開発を行っている。この研究は、工学部香取研究室と共同で進めており、完成した際には、香取研の光格子時計用プローブレザーとして活用する予定である。本研究の目指す 10^{-17} レベルの安定度を持つプローブレザーを使えば、100 秒程度の短期積分で 10^{-18} の安定度に到達可能な超高性能光周波数標準を実現可能である [3]。

光学系開発

本研究に使用する光共振器は、単結晶シリコン製のミラーをやはり単結晶シリコン製のスペーサーにオプティカルコンタクトすることで製作される。この際、様々なテクニカル雑音の影響を避けるため、鏡には極めて低い光学損失が要求される。一方で、熱雑音を低減するためには鏡上でのビームスポットサイズをできるだけ大きくする必要がある。そこで、我々の光共振器では、鏡の曲率半径を 3m と大きな値に設定した。しかし、このような大曲率半径の曲面と、オプティカルコンタクトのための平面研磨部分を同一面内に作成するのは困難である。当初、磁気流体研磨によるミラー製作を試みたが、必要な表面粗さを達成することができなかった。そこで、従来からあるオスカー研磨法を応用した鏡面研磨が可能であるか、光学部品メーカーにテストを依頼し、その結果、我々の要求値を満たす鏡面の製作を行うことができた。現在、この鏡基板に誘電体多層膜コー

ティングを行ったものの評価実験を進めている。また、この共振器に光を導入し、レーザーをロックするための真空対応光学系を構築し、ロックが可能であることを確認した [22, 37, 42]。

光共振器の防振

目的の周波数安定度を獲得する為には、地面や冷凍機による振動によって共振器長が弾性変形するのを防がなければならない。この為に必要となるのが防振台である。そこで我々は、ヘキサポッドと呼ばれる6本脚の台を使用する。6本の脚にはそれぞれピエゾ素子が組み込まれており、小型の seismometer (速度計) でモニターした振動をピエゾ素子にフィードバックして脚の長さを調節する事で、全自由度の振動を抑える。これにより、1 Hz において 10^{-8} [m/ $\sqrt{\text{Hz}}$] (東京の地面振動レベルの約 1/10) の振動レベルまで防振する事を目標とする。

現在までに装置の組み立て及び 1 自由度制御に成功しているが、現状ではまだ防振比が足りない状況にある。今後、フォトセンサーを用いたサブ制御ループを組み込むことで防振比・帯域を向上させる予定である [25, 31]。

光共振器の低温化

低温光共振器ではスペーサーや鏡、コーティングの熱雑音を低減させるために極低温まで共振器を冷却する。また、熱膨張による共振器長変動を小さくするために温度安定化も行う必要がある。

2012 年度は 2011 年度に納品された冷凍機およびクライオスタットの性能評価、光共振器の冷却試験、極低温化での光共振器の温度安定度測定を行った。冷凍機およびクライオスタットの性能評価としては到達真空度、到達温度、熱負荷に対する温度上昇を測定し、当初の要求を満たすことの確認ができた。光共振器の冷却試験では共振器の温度が 5.2 K まで冷却可能であることが確認でき、当初の予定であった 18 K でのオペレーションよりも低い温度でのオペレーションも可能であることがわかった。極低温での光共振器の温度安定度測定では現在の温度安定度が 400 nK/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 以下であることを見積もることができた。

今後は、温度安定度を向上するための温度安定化や、低温化でのレーザーの光共振器へのロックおよびロックした状態でのレーザーの周波数安定度の評価などを行っていく [8, 28, 33]。

5.5 極小距離領域における重力法則検証

4 つの相互作用すべてを統一しようとしている超弦理論において、時空は通常の 4 次元座標以外にも

複数の余剰次元座標も用いて記述されるとしている。この理論によって、重力相互作用はほかの相互作用と異なり余剰次元空間にも伝播するため、古典的な逆二乗則は微小距離において破れている可能性がある」と指摘されている。

当研究室ではかつて重力波検出器として用いられていた共振型振動子を用いてその検証実験を試みている。この検出器は高い Q 値と低い共振周波数をもつため、高い S/N 比で重力信号を検出することができ、先行研究よりも高精度での重力法則の検証が行うことができると期待される。

2012 年度はデータの一部を取得し、8~10mm の領域で先行研究と同程度の精度の検証に成功した。本年度は引き続き残りのデータの取得を行い 0.1~10mm の幅広い領域で先行研究よりも高い精度での検証結果を得たいと考えている [7, 27, 32]。

5.6 空間等方性の研究

量子重力理論の研究や宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測から、わずかに Lorentz 不変性が破れている可能性が示唆されている。特に光子の Lorentz 不変性の破れは特殊相対論の否定する光速の異方性に通じ、我々の宇宙観を左右する極めて重要な問題であるため、世界中で光速の異方性探査が行われている。しかし、これまでの多くの実験は Michelson-Morley の実験と同じように往復光速の異方性探査となっており、片道光速の異方性への上限値は往復光速に比べて 4 桁大きいものとなっていた。そこで、我々は片道光速の異方性に着目し、研究を行なっている。片道光速の異方性とは、一方向に進む光の速さの、行き帰りの差である。

これまで異方性探査実験では、光共振器の鏡像反転対称性のため、往復光速の異方性しか測定することはできなかった。そこで、光リング共振器の光路の一部に媒質を入れて屈折率を変え、非対称性を持たせることで片道光速の異方性を測定可能にした。片道光速の異方性が存在すると、この光リング共振器の時計回りの共振周波数と反時計回りの共振周波数に差が生じる。この差をダブルパスという光学系構成により測定することを考案した。ダブルパス構成では一度光共振器に共振した光を逆回りに再入射する。これにより測定が高精度な null 測定となる。また、両回りの共振周波数は共振器の水平や温度の変動に伴って同相で変化するため、共振周波数の差を測定する本手法は高い同相雑音除去により環境変動に極めて強い。これまでの光共振器を用いた異方性探査実験では高レベル防振装置や高真空環境が必須であったが、本実験ではその必要がなく、優れている。

今年度は昨年度に制作した装置を改良を行い、8 月より長期測定を開始した。本異方性探査では光リング共振器を回転させているが、この回転に伴ってレーザーの偏波面が変化してしまう影響への対策と、回転台の水平度出しが主な改良点である。また、長期測定を可能にするためリモート制御環境を整えた。現在も長期測定を続けており、約 220 日分、約 83 万

回転分の異方性信号データを得ている。このデータを用いて解析を行ったところ、有意な異方性は見つからず、片道光速の異方性へ 10^{-14} のオーダーの上限値をつけた。特に拡張標準理論の枠組みで解析を行い、光子の Lorentz 不変性の破れパラメータのうち、奇パリティ成分に 10^{-14} オーダー、スカラー成分に 10^{-10} オーダーでの上限値をつけた。これらはこれまで他の実験で得られていたものを1桁以上更新するものであり、我々の知る限り世界で最も厳しい上限値である [29, 34, 43, 46]。

5.7 巨視的振動子の量子測定

近年、光の圧力（量子輻射圧揺らぎ）と巨視的機械振動子が結合した光共振器（機械光学系）における巨視的量子現象に関心が集まっており様々な理論予測が発表されている。例えば振動子間の巨視的エンタングル状態の生成など、機械光学系は巨視的量子現象を観測する新たな実験系となる可能性を秘めている。

しかし、巨視的な系における輻射圧揺らぎの観測は未だなされていない。困難さの原因は二つあり、一つは振動子の質量が重いこと、もう一つは光軸変動と輻射圧力が結合し共振器が不安定となる（Siddles-Sigg の不安定性）ために、光共振器に十分な光量を溜められない事にある。そこで我々は、エアロゲルと呼ばれる超低密度な物質を基材として利用した鏡を開発し、輻射圧雑音の影響を観測に特化した装置の開発を目指した。現在のところ誘電体多層膜の残留応力が問題となっているため、金コーティングを施した鏡の開発を行った。また、Siddles-Sigg の不安定性を解消する実験構成として三角共振器を利用した自発的に安定な検出装置を提案し、その原理検証に成功した [9, 12, 26]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Aso, K. Somiya and O. Miyakawa, *Class. Quantum Gravity* 29, 124008 (2012).
- [2] M. Ando, DECIGO Pathfinder, *International Journal of Modern Physics D* 22 1341002 (2013).

(会議抄録)

- [3] H. Katori, et al, Prospects for frequency comparison of Sr and Hg optical lattice clocks toward 10^{-18} uncertainties, *Frequency Control Symposium (FCS), IEEE International* pp. 1-6 (2012).
- [4] Ayaka Shoda et al, Search for a Stochastic Gravitational-wave Background with Torsion-bar Antennas, *J. Phys.: Conf. Ser.* 363 012017 (2012).

(国内雑誌)

- [5] 瀬戸直樹, 八木絢外, 安東正樹, 宇宙レーザー干渉計が切り拓く重力波天文学, *日本物理学会誌* 68 (2013) 38.

(学位論文)

- [6] 穀山渉: Spaceborne Rotating Torsion-Bar Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observations, 博士論文 (2013).
- [7] 柴田和憲: サブミリメートル領域での重力法則の検証による余剰次元探査, 修士論文 (2013).
- [8] 牛場崇文: 低温シリコン光共振器を用いた高安定化光源の開発, 修士論文 (2013).

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [9] Nobuyuki Matsumoto, Yuta Michimura, Kenshi Okada, Yoichi Aso, and Kimio Tsubono: Towards the macroscopic quantum phenomena, GCOE International Symposium on Physical Sciences Frontier, GCOE (Dec. 2012, Japan).
- [10] K. Shibata et al, Parametric Instabilities in KAGRA and ET, the ELiTES 1st meeting (Nov. 2012).
- [11] T. Ushiba, Measurement of the thermal conductivity of sapphire fibers, ELiTES meeting (Oct. 2012).
- [12] Nobuyuki Matsumoto, Yuta Michimura, Yoichi Aso, and Kimio Tsubono: Interferometer as a New Field of a Quantum Physics- the Macroscopic Quantum System - , ELiTES Thermal Noise Workshop (Aug. 2012, Germany).
- [13] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: BS Thermal Lensing in KAGRA, ELiTES Thermal Noise Workshop (Aug. 2012, Germany).

招待講演

- [14] Masaki Ando, DECIGO, Gravitational Waves: New Frontier (Jan. 16-18, 2013, Seoul National University, Korea)
- [15] Masaki Ando, TOBA: Torsion-Bar Antenna, Gravitational Waves: New Frontier (Jan. 16-18, 2013, Seoul National University, Korea)
- [16] Masaki Ando, Gravity and Gravitational-Wave Physics, Global COE Symposium 'Development of Emergent New Fields' (Feb. 13, 2013, Kyoto University, Kyoto).
- [17] Y. Aso, Keeping an Interferometer at the Optimal Operating Point, The 3rd Japan-Korea Workshop on KAGRA (December 2012, Sogang University, Seoul).
- [18] Masaki Ando, Stray-Light Control in Interferometers, The 3rd Japan-Korea Workshop on KAGRA (December 21-22, 2012, Sogang University, Seoul).
- [19] Y. Aso, A new way to see through the universe: Gravitational Wave Astronomy, Japan Germany Frontier of Science (JGFoS) symposium, Hotel Steigenberger Sanssouci (October 2012, Potsdam, Germany) .

- [20] M. Ando, Space Gravitational-wave observatory: DECIGO, The Fifth International ASTROD Symposium (July 12, 2012, Raman Research Institute, India).
- [21] M. Ando, TOBA: Torsion-Bar Antenna, GWADW2012 (May 17, 2012, Hawaii, USA).
- ポスター
- [22] N. Ohmae, Y. Aso, A. Shoda, T. Ushiba, M. Takamoto, and H. Katori: Stable lasers toward 10^{-17} stability with cryogenic cavity and 1-m-long cavity, 5th International Conference on Untracold Group II Atoms, (2012 年 10 月, NICT Japan).
- (国内会議)
- 一般講演
- [23] 坪野公夫, 時空のさざ波—重力波を求めて, 物理学教室最終講義 (2013 年 3 月, 東京大学, 本郷).
- [24] 坪野公夫, 波多野智, 池上健, 鈴木敏一, 麻生洋一, 大前宣昭, 平松成範, 正田亜八香, 牛場崇文, 柴田和憲, 三橋秀人, 稲場肇, 渡部謙一, 洪鋒雷, 低温光共振器を用いた超高安定光源の開発 V, 日本物理学会 2013 年年次大会 (2013 年 3 月, 広島大学, 広島).
- [25] 正田亜八香, 麻生洋一, 大塚茂巳, 大前宣昭, 牛場崇文, 平松成範, 坪野公夫, 超高安定化光源のための Hexapod 型能動防振装置の開発 II, 日本物理学会 2013 年春季大会, 27aBE-2 (2013 年 3 月, 広島大学)
- [26] 松本伸之, 道村唯太, 麻生洋一, 坪野公夫: 三角共振器を用いた量子輻射圧揺らぎ観測実験, 日本物理学会第 68 回年次大会 (2013 年 3 月, 広島大学)
- [27] 柴田和憲, 牛場崇文, 大塚茂巳, 八幡和志, 平松成範, 麻生洋一, 坪野公夫, 共振型振動子を用いたサブミリメートル領域における重力法則の検証 (7), 日本物理学会 2013 年年次大会 (2013 年 3 月, 広島大学).
- [28] 牛場崇文, 渡辺篤史, 麻生洋一, 平松成範, 大塚茂巳, 大前宣昭, 正田亜八香, 坪野公夫, 低温光共振器に向けた低温システムの開発 II, 日本物理学会 2013 年春季大会 (2013 年 3 月, 広島大学, 広島).
- [29] 道村唯太, 松本伸之, 大前宣昭, 麻生洋一, 穀山渉, 安東正樹, 坪野公夫: 光リング共振器を用いた片道光速の異方性探査 III, 日本物理学会第 68 回年次大会 (2013 年 3 月, 広島大学)
- [30] 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 山元一広, 道村唯太, 柴田和憲, 辰巳大輔, 阿久津智忠, 我妻一博, 西田恵里奈, 陳タン, 安東正樹, 新井宏二, 和泉究, 山本博章, KAGRA Collaboration, 重力波検出器 KAGRA の主干渉計開発 II, 日本物理学会第 68 回年次大会 (2013 年 3 月, 広島大学)
- [31] 正田亜八香, 麻生洋一, 大塚茂巳, 大前宣昭, 牛場崇文, 平松成範, 坪野公夫, 超高安定化光源のための Hexapod 型能動防振装置の開発, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月, 京都産業大学).
- [32] 柴田和憲, 牛場崇文, 大塚茂巳, 平松成範, 麻生洋一, 坪野公夫, 共振型振動子を用いたサブミリメートル領域における重力法則の検証 (6), 日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月, 京都産業大学).
- [33] 牛場崇文, 正田亜八香, 大前宣昭, 平松成範, 大塚茂巳, 麻生洋一, 鈴木敏一, 坪野公夫, 低温光共振器に向けた低温システムの開発, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月, 京都産業大学).
- [34] 道村唯太, 大前宣昭, 麻生洋一, 穀山渉, 安東正樹, 坪野公夫: 光リング共振器を用いた片道光速の異方性探査 II, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月, 京都産業大学).
- [35] 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 山元一広, 道村唯太, 柴田和憲, 辰巳大輔, 阿久津智忠, 我妻一博, 西田恵里奈, 陳タン, 安東正樹, 新井宏二, 和泉究, 山本博章, LCGT Collaboration, 重力波検出器 KAGRA の主干渉計開発, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月, 京都産業大学).
- [36] 坪野公夫, 波多野智, 池上健, 鈴木敏一, 麻生洋一, 大前宣昭, 平松成範, 正田亜八香, 牛場崇文, 柴田和憲, 三橋秀人, 稲場肇, 渡部謙一, 洪鋒雷, 低温光共振器を用いた超高安定光源の開発 IV, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月, 京都産業大学).
- [37] 大前 宣昭, 麻生 洋一, 坪野 公夫, 正田 亜八香, 牛場崇文, 平松 成範, 波多野 智, 三橋 秀人, 香取 秀俊: 低温光共振器を用いた時計用周波数安定化レーザーの開発 II, 日本物理学会 2012 年秋季大会, (2012 年 9 月, 横浜国立大学).
- [38] 坪野公夫, 重力波プロジェクト報告 KAGRA, DECIGO, DPF, RESCEU 夏の学校 (2012 年 7 月, 裏磐梯休暇村, 福島).
- [39] 坪野公夫, スタートした KAGRA 計画, ビッグバンセンター研究交流会 (2012 年 6 月, 東京大学, 本郷).
- 招待講演
- [40] 安東 正樹, 重力波望遠鏡が拓く新しい天文学, 京都大学基礎物理学研究所 談話会 (2013 年 3 月 8 日, 京都大学)
- [41] 安東 正樹, 重力波望遠鏡 かぐら (KAGRA) が拓く新しい天文学, 国立天文台談話会 (2012 年 7 月 6 日, 国立天文台 三鷹).
- [42] 大前 宣昭, 山中 一宏, P. Thoumany, B. Christensen, 高本 将男, 金田 有史, 正田 亜八香, 牛場 崇文, 麻生 洋一, 香取 秀俊: より高性能は光格子時計の実現に向けて (水銀光格子時計, 低温光共振器の開発), 電気学会第 7 回精密周波数の発生と高精度分配のための次世代回路技術調査専門委員会 (2012 年 6 月, NICT).
- (セミナー)
- [43] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, and Kimio Tsubono: Search for Anisotropy in the One-Way Speed of Light Using an Optical Ring Cavity, Forum for Prof. John L. Hall and young research careers (Oct. 2012, Japan).
- [44] K. Shibata, Parametric Instability, the ELiTES thermal noise workshop, (Aug. 2012).
- [45] Ayaka Shoda, "Torsion-bar antenna for low-frequency gravitational-wave detection, Caltech-JPL Association for Gravitational Wave Research Seminar (2012).

- [46] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, and Kimio Tsubono: Search for Anisotropy in the One-Way Speed of Light Using an Optical Ring Cavity, LIGO Seminar (July 2012, USA).

6 宇宙素粒子物理学

——神岡鉱山における暗黒物質探索——
(蓑輪・井上)

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。

6.1 PANDA – 原子炉ニュートリノモニター

国際原子力機関（IAEA）が世界各地の原子力関連施設で実施している現在の核不拡散保障措置は、原子炉から放出される中性子のモニタリングや使用済み核燃料のモニタリングなどの侵襲的な方法であり、査察機関と査察対象国双方にとって負担が大きいことが課題となっている。そこで反電子ニュートリノの検出技術を応用して非侵襲的なモニタリングを実現しようと、世界の複数のグループにより研究開発が進められている。反電子ニュートリノ検出器を用いるモニタリング方法では、原子炉内で発生する反電子ニュートリノを捉えることで、原子炉の運転状況を外部から把握することができる。ニュートリノは透過性が極めて高く、また代替のニュートリノ源を用意することが困難であることから、保障措置の新技術として期待されている。

さらに、ウランとプルトニウムでは生成エネルギーあたりのニュートリノ放出数が異なることを利用すれば、原子炉内でウランが燃焼してプルトニウムが作られる過程も追跡することができる。これにより、正当な申告なしにプルトニウムを抜き取ることがないかの監視ができるようになる。

我々のグループでは、原子炉モニタリングへの応用を目的として可搬性の反電子ニュートリノ検出器 PANDA (Plastic Anti-Neutrino Detector Array) の開発を行っている。PANDA はターゲット部分に可燃性の液体シンチレータでなく不燃性のプラスチックシンチレータを使用しており、高い安全性が求められる原子力発電所に持ち込む際には大きなメリットとなる。またトラックや貨物輸送用コンテナに積載した状態で移動および測定が可能である点も PANDA の特長である。同一の検出器を用いて複数の原子炉で測定を行うことができるため、燃料組成比の異なる核燃料を使用している複数の原子炉に設置することで、それぞれの原子炉におけるニュートリノスペクトルの違いを観測することが可能であると考えている。

原子炉で発生した反電子ニュートリノがプラスチックシンチレータ中の陽子と反応すると、逆β崩壊により陽電子と中性子が発生する。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で線り返し散乱しエネルギーを十分に失った後、ガドリニウムによって吸収され合計約8MeVのγ線を放出する。陽電子と中性子によるこの2つの信号の時間差（平均60μs程度）を利用することで、バックグラウンドの影響を大幅に減らすことができる。PANDAは10cm×10cm×100cmの棒状プラスチックシンチレータにガドリニウム含有フィルムを巻きつけたものをモジュールとして、そのモジュールを縦横に10本×10本の計100本を積み重ねた構造である。我々のグループは現在までに、モジュールを16本使用した第1次プロトタイプ lesserPANDA、36本使用した第2次プロトタイプ PANDA36、64本使用した第3次プロトタイプ PANDA64（図6.1）の3つのプロトタイプ検出器を開発してきた。



図 6.1: 第3次プロトタイプ検出器 PANDA64

2011年度に第2次プロトタイプである PANDA36 を関西電力大飯発電所の2号機近傍に設置して約2ヶ月間ニュートリノ測定を行った結果、原子炉稼働中（ON）と停止中（OFF）にニュートリノ由来だと思われるイベント数の差を確認したが、2012年度はさらに測定結果についてセレクションの最適化と、得られたニュートリノイベント数の系統誤差の見積りを行った。系統誤差の見積りは陽電子及び中性子線源を用いた測定とモンテカルロシミュレーションの結果を比較することで行い、この見積りによって原子炉 ON/OFF でのニュートリノイベント数の変化から環境要因の中性子イベントの寄与を減算する際の系統誤差を得た。結果として大飯発電所における PANDA36 を用いた測定では、原子炉 ON/OFF に伴う1日当りのニュートリノイベント数の変化の確度は2σであったことが分かった。

PANDA36 で得られた結果の解析後、第3次プロトタイプである PANDA64 の開発を開始した。PANDA36 からモジュール数が倍程度になったことに伴い、検出器からコンピュータへのデータ転送速度の不足が予想されたため、データ取得系の改良を

行った。128本の光電子増倍管のうち有意に発光したもののについてのみデータを転送するよう、各増倍管ごとの適当なデータ転送の閾値を測定開始時に求め、ADCに設定されるようプログラムした。この改良によってPANDA36より高いイベントレート下での測定が可能になった。さらにコインシデンスロジックなどを担当する2台のFPGAモジュールの動作ロジックおよび動作周波数を改善し、データ取得プログラムについても解析時間の短縮などの目的で再設計を行った。



図 6.2: 貨物輸送用コンテナに積載された PANDA64

開発した PANDA64 は現在、理学部 4 号館脇に設置した貨物輸送用コンテナに積載され、温湿度の変化や検出器の状況をモニタリングしながら試験測定を行っている (図 6.2)。PANDA36 はシールドを設置せずバックグラウンドに苦しんだため、PANDA64 では検出器を全面取り囲むように厚さ 24cm の水シールドを設置した。シールドの設置前後でバックグラウンドである高速中性子および環境 γ 線を比較したところ大幅な減少が確認された。

今後は、十分な試験測定を行ったのち商用原子炉の近傍でニュートリノ測定を行うことを予定している。PANDA64 を PANDA36 と同じく熱出力 3.4GWth の原子炉炉心から 35.9m の位置に設置した場合、原子炉 ON/OFF の 1 日当りのニュートリノイベント数の差を 2 日以内に 3σ の確度で確認できる見込みである。

また、近年、近距離での原子炉ニュートリノ検出率のわずかな欠損 (reactor antineutrino anomaly) などによって示唆される、 $\Delta m^2 \sim 1 \text{ eV}^2$ を持つ第 4 番目の sterile neutrino (不活性ニュートリノ) の存在が疑われている。もし小型の炉心を持つ原子炉の近くに PANDA を設置出来れば、このような短い振動長の sterile neutrino の存在を検証できるデータが得られる可能性がある。外国の原子炉も含めて、このような実験のできる原子炉での neutrino 振動実験を行いたいと考えている。

6.2 Sumico, アクシオンヘリオスコープ実験と Hidden photon 探索実験

強い相互作用の理論である量子色力学 (QCD) には実験事実と反して CP 対称性を破ってしまう問題、強い CP 問題があることが知られている。アクシオン (axion) 模型はこの問題を解決するものとして期待されているが、それには模型が予言する擬南部ゴールドストーンボソンであるアクシオンの発見が不可欠である。しかし、今のところこの素粒子はいかなる実験、観測によっても発見されていない。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。

我々は太陽由来の太陽アクシオンを捉えるために、中心磁場 4 T、長さ 2.3 m の超伝導コイルと PIN フォトダイオード X 線検出器を備え、仰角 $\pm 28^\circ$ 、方位角はほぼ全域において天体を追尾することのできる東京アクシオンヘリオスコープ (Tokyo Axion Helioscope、愛称 Sumico) を開発した。この装置は、太陽起源のアクシオンを磁場領域で光子へと変換 (逆プリマコフ変換) し、その光子を PIN フォトダイオードで捉えるものである。また、磁場領域に He ガスを導入することで質量を持ったアクシオンに対して感度を持たせることができる。

Sumico は、CERN で稼働中の同様の装置 CAST (CERN Axion Solar Telescope) より 6 年先行して実験結果を発表しており、アクシオンの質量 $m_a = 1 \text{ eV}$ 近傍で世界で初めて QCD アクシオンのパラメータ領域の探索に成功している。

現在は、その太陽追尾装置を利用して、hidden photon 探索実験を行なっている。

Hidden photon 探索実験

概要

Hidden photon とは、標準理論の $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 対称性の外の「隠れた」 $U(1)$ 対称性に対応するゲージボソンのことである。このような追加の対称性は、標準理論を拡張する多くの模型において出現する。

この hidden photon は通常の光子との間に kinetic mixing を持ち、Stückelberg 機構などにより質量をもつ可能性がある。この場合、hidden photon と通常の光子との間でニュートリノ振動と同様の振動が生じる。

我々の研究室ではこの振動現象を用いた hidden photon 探索を行っている。強力な hidden photon 源である太陽から飛来する hidden photon を実験室内の真空容器で光子へと変換し光検出器で捕らえる。同様の方法で DESY の SHIPS グループも測定を目指しているが、我々はそれに先駆け、世界で初めて太陽 hidden photon 観測を行った [2]。この測定では

hidden photon のシグナルは得られず、このことから光子と hidden photon の混合パラメータ χ に対する制限をつけた (図 6.3)。

バックグラウンド測定手法

上述の測定では、温度変化による光検出器のダークカウントレート変動により、大きな系統誤差が生じていた。測定装置の光検出器 (PMT) は温度制御せずに室温で用いていたが、換気等により室温が変動することでカウントレートが変化してしまう。太陽追尾時とバックグラウンド測定時のカウントレートを引き算することで hidden photon のシグナルを得るため、このダークカウントレート変動が大きな系統誤差の要因となった。

これを改良するため、シャッター、首振りという二つの手法でのバックグラウンド測定について検討を行った。シャッターは光路を遮断することにより、また首振りは検出器の方向を太陽からずらすことによって、それぞれバックグラウンド測定が可能となる。太陽追尾測定/バックグラウンド測定を十分短い時間で繰り返すことによって、温度変化の影響を無視することができる程度まで減らすことができる。

シャッターについては問題が生じ、使うことができないことがわかった。予備実験を行った結果、集光を行うための放物面鏡に用いられているアルミニウムが光を発していることが判明し、それが測定に影響を及ぼすことが見積もりの結果明らかになった。現在ではその原因と、銀などのアルミニウム以外の材質を用いた場合の影響について調査を行っている。

首振りについては予備測定の結果問題がないことが分かった。Hidden photon 探索装置は Sumico にマウントすることで太陽追尾能力を得ている。Sumico ではこれまで首振り測定を行ったことがなかったため、ソフトウェアの開発・動作検証を行った。

測定装置の改良

現在我々は hidden photon 探索装置の感度向上に向け、放物面鏡の巨大化および新しい光検出器の導入を検討している。

放物面鏡は現在使用している直径 50cm のものから直径 100cm のものに拡張する予定であり、これに合わせ真空容器も新たに作る必要がある。しかし真空容器を巨大化した場合、その大きさのため Sumico に搭載することが出来なくなる。このため我々は新たな経緯義の購入などを検討している。

光検出器においては高量子効率、低ダークカウントのものが求められる。例えば ET-Enterprises 社の 9893-350B という PMT は現在用いている浜松ホトニクス社の PMT(R3550P) より量子効率が高く、また冷却を行うことでダークカウントも低くなるのが SHIPS グループが行った試験測定から報告されている。特にダークカウントレートは現在用いている PMT よりも一桁近く低くなるため、大いに感度向上が期待される。

これらの改良により図 6.3 の実線部までの範囲が観測可能となる。

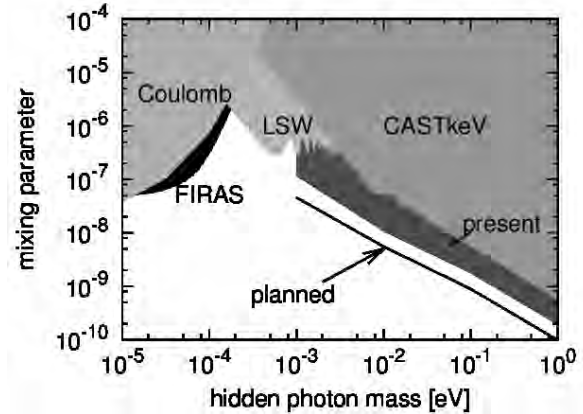


図 6.3: 2010 年度における測定により得られた χ の上限値 (present) および改良した場合に期待される観測可能範囲 (planned)。塗りつぶされた領域は他グループの実験、考察によって否定された領域。

Hidden photon ダークマター探索

現在様々な研究グループにより WIMP ダークマター (暗黒物質) の探索が行われているが、axion や hidden photon のような WISP (Weakly Interacting Slight Particles) もダークマターの候補である。WISP は質量が軽く、WIMP のように原子核反跳を用いた測定手法を使うことができない。代わりに通常の光子との混合を用いて探索を行うことになり、WIMP 探索とは全く違った実験装置が必要となる。混合は極めて弱いため、何かしらの手法を用いて S/N 比を向上させる必要があり、これまでに axion ダークマターの探索を行っている ADMX のように resonant cavity を用いる方法の他、新たに dish antenna を用いる手法が提案されている。

我々の研究室ではこの dish antenna による手法で hidden photon ダークマターの探索を計画している。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Kuroda, S. Oguri, Y. Kato, R. Nakata, Y. Inoue, C. Ito, M. Minowa: A mobile antineutrino detector with plastic scintillators, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 690 (2012), 41-47, arxiv:1206.6566 [hep-ex].
- [2] T. Mizumoto, R. Ohta, T. Horie, J. Suzuki, Y. Inoue, M. Minowa: Experimental search for solar hidden photons in the eV energy range using kinetic mixing with photons, arXiv:1302.1000 [astro-ph.SR].

(学位論文)

- [3] 小栗秀悟: Reactor neutrino monitoring with a plastic scintillator array as a new safeguards method、平成 24 年 7 月博士 (理学)、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.
- [4] 鈴木惇也: Hidden photon 探索手法改善に向けての研究、平成 25 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

- [5] Y. Kuroda: Reactor On/Off Monitoring with a Relatively Small and Mobile Plastic Anti-neutrino Detector Array (PANDA), Neutrino2012, Kyoto TERRSA, Japan, 5 June 2012.

招待講演

- [6] Y. Kuroda: Reactor On/Off Monitoring with a Prototype of Plastic Anti-neutrino Detector Array (PANDA), AAP2012(Applied Antineutrino Physics workshop 2012), the University of Hawaii Manoa Campus, U.S.A., 4 October 2012.
- [7] M. Minowa: Axion Hunting, AIU2012 (Accelerators In the Universe 2012) Axion Cosmophysics, KEK, 6 November 2012.
- [8] M. Minowa: Reactor Monitoring, Neutrino Geoscience 2013, Takayama, 22 March 2013.

(国内会議)

一般講演

- [9] 蓑輪 眞: Axion と光、ビッグバンセンター研究交流会、東京大学 2012 年 06 月 14 日.
- [10] 井上慶純: Sumico experiment —Tokyo axion helioscope—、物理学教室ランチトーク、東京大学 2012 年 6 月 15 日.
- [11] 蓑輪 眞: Reactor antineutrino measurement at Ohi power plant、RESCEU サマースクール、「第 12 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、福島県耶麻郡「休暇村 裏磐梯」、2012 年 7 月 27 日.
- [12] 鈴木惇也: 太陽 hidden photon 探索 (1) hidden photon 探索の現状日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学 2012 年 9 月 11 日.
- [13] 堀江友樹: 太陽 hidden photon (2) 新たな探索装置の開発、日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学 2012 年 9 月 11 日.
- [14] 黒田康浩: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) による原子炉モニタリング [1] 関西電力大飯発電所におけるニュートリノ測定結果、日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学 2012 年 9 月 13 日.

- [15] 加藤陽: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) による原子炉モニタリング [2] 検出器の改良に向けた検討、日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学 2012 年 9 月 13 日.

- [16] 富田望: 小型反電子ニュートリノ検出器 (PANDA) による原子炉モニタリング [3] PANDA64 へ向けての DAQ の改良、日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学 2012 年 9 月 13 日.

- [17] 富田望: 原子炉モニタリングのための小型ニュートリノ検出器 PANDA64[1]、日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学 2013 年 3 月 26 日.

- [18] 加藤陽: 原子炉モニタリングのための小型ニュートリノ検出器 PANDA64[2]、日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学 2013 年 3 月 26 日.

- [19] 堀江友樹: 太陽 hidden photon 探索 (1) シャッターを用いたバックグラウンド測定について、日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学 2013 年 3 月 28 日.

- [20] 鈴木惇也: 太陽 hidden photon 探索 (2) 新しいバックグラウンド測定手法を用いた探索日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学 2013 年 3 月 28 日.

セミナー

- [21] 蓑輪 眞: 安価な食品放射能測定器、東日本大震災復興支援哲学会議 哲学ランチ、東京大学 2012 年 7 月 12 日.

7 飛翔体を用いた宇宙観測

——宇宙からのX線、ガンマ線、反物質粒子を捉える—— (牧島・山本(明)・平賀)

7.1 衛星を用いたX線・ γ 線観測

7.1.1 宇宙X線の発見50年

2012年度は、V. Hessによる宇宙線の発見の100周年 [42] であると同時に、R. Giacconi (2002年に小柴名誉教授と同時にノーベル物理学賞を受賞) らが宇宙X線を発見してから、50周年にも当たる [40, 68]。このため国際的 [49, 53, 54, 55, 56, 62] にも、国内でも [66, 67, 68, 122]、さまざまな記念シンポジウムや講演会が開催された。

7.1.2 科学衛星の運用と稼働状況 [117]

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7年目に入った。放射線損傷により太陽電池の出力が、徐々に低下しつつあるが、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HXDの運用を支援し、搭載装置の較正を続行し [1]、観測データの解析を進めた。

国際宇宙ステーション搭載 MAXI

2009年夏に国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」の曝露部に搭載された全天X線監視装置 MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) は、理研、JAXA、東工大、青学大、日大、京大、中央大、宮崎大などにより、少なくとも2014年度末まで運用が続けられる。牧島は引き続き、理研・基幹研究所に所属する MAXI チームのチームリーダーを非常勤で兼務した。東大理学系研究科は、MAXI に直接に参加してはいるが、「すざく」と MAXI の相補性を活かすべく、両者の連携を支援している [69]。

後継機 ASTRO-H

「すざく」後継機 ASTRO-H は、2015年度に打ち上げが設定され、現在その開発と建造が進んでいる。§7.1.8 に詳しく述べるように、本センター Project 7 はそれに全面的に参加している。

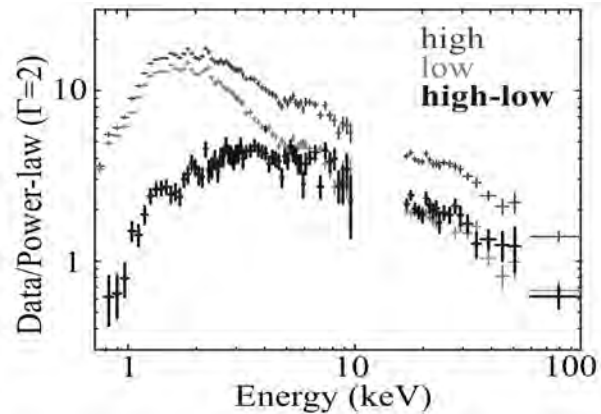


図 7.1: *Suzaku* spectra of Cyg X-1 in the High/Soft state. Dark and light gray indicate the data when the 5–10 keV intensity is higher and lower than the average, respectively. Black shows their difference [54].

7.1.3 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 $\sim 10\%$ が外界に放射される。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。

恒星質量ブラックホール

「はくちょう座 X-1」(Cyg X-1) は、1970年代半ばに小田稔らの観測にもつぎ、ブラックホールとして認定された最初の天体で、質量降着する恒星質量 BH の代表格である。鳥井、牧島らは理研の山田らと協力することで、今年度は3編の論文を出版することができ [5, 6, 7]、結果の一部を、理研主導/東大副主導で、新聞記者発表した [127]。

ソフト状態では Cyg X-1 の放射の大部分は、円盤からの多温度黒体放射で説明できるが、硬 X 線まで伸びるハードテールの起源は不明である。そこで鳥井らは「すざく」で Cyg X-1 のソフト状態を観測したデータを用い、5–10 keV 以上で強度が平均以上の時と、それ以下の時のスペクトルを求めたところ、両者の差分スペクトルは、元のスペクトルと形が5 keV 以上でほぼ一致した (図 7.1)。よって差分成分は、ハードテール自身である可能性が高く、それは円盤放射が非熱的な電子雲によりコンプトン化されたモデルで、再現できた [54, 75, 89]。

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。AGN では円盤放射が、星間吸収の強い真空紫外領域に来るため、複雑なスペクトル成分を切り分けることが難しい。この手詰まり状態を打開すべく野田らは、「すざく」で得た広帯域のスペクトルを、変動を手掛かりに成分分解する、C3PO (Count Count Correlation with Positive Offset) と呼ぶ手法を開発した。その結果、謎だった「軟 X 線超過現象」が、コンプトンコロナの非一様性に起因することを立証した [3, 121]。野田らはこ

の方法を NGC 3516 の 3– 45 keV の広帯域放射に適用し、図 7.2 のように、遠方の中性ガスによる反射成分（鉄の蛍光輝線を伴う）を時間変動のみから抽出することにも成功し [53, 60, 83, 116]、さらにこのバンドで、硬く吸収された形をもち、変動の遅い、新しい成分を発見した [63, 94]。その正体の究明は、*ASTRO-H* (§7.1.8) の重要な研究テーマである。

野田らは、NGC 3516 を 2013 年度に 6 回にわけ、合計 300 ksec にわたり「すざく」で観測する提案を行い、採択された。さらに東大天文センターなどの協力を得て、名寄市「ピリカ」、東大木曾シュミット、東工大 MITSuME、西はりま「なゆた」、広島「かなた」など中口径の可視光望遠鏡を総動員し、「すざく」と同時観測を行う計画も立ち上がった。

2011 年 11-12 月、代表的セイファート銀河である NGC 4515 が大増光し「すざく」で緊急観測された。表らが広島大学や理研と協力し、そのデータを、2006 年の静穏期と比較しつつ解析した結果、連続成分は 4 倍に増光したが、鉄輝線や反射成分の強度は、3 割程度の増加にすぎないことがわかった。よってこれらの 2 次成分は、中心 BH から遠く離れた領域で発生していると考えられる。明るい時のスペクトルには、相対論的に広がった鉄輝線が確認されたが、その等価幅は遠方でのものの半分程度で、発生源となる円盤の内縁半径も、重力半径の > 14 倍であることが判明した [84, 104]。

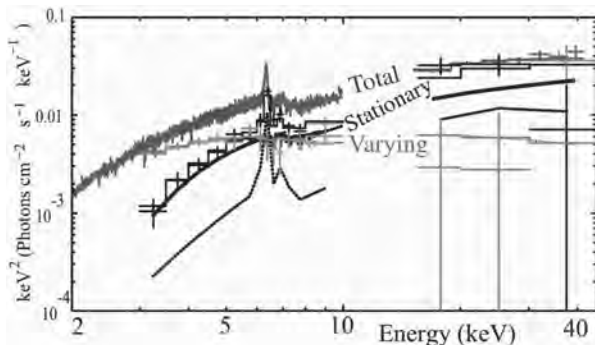


図 7.2: νF_ν spectra of the Seyfert galaxy NGC 3516, obtained with *Suzaku*. The variable (light gray) and invariant (black) components, derived with the novel C3PO method, were described successfully by respective physical models, of which the sum can explain the total spectrum (dark gray) [10].

ULX 天体

近傍銀河に見られる ULX 天体 (Ultra-Luminous 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る (Makishima + 2000)。小林らは宇宙研の機部と協力し、典型的な ULX 天体 Holmberg IX X-1 の「すざく」データを解析した。その結果、柔い円盤放射と、円盤光子が低温 (~ 3 keV) で濃密 (光学的厚み ~ 10) なコロナでコンプトン化された硬い成分との和で、0.5–10 keV のスペクトルを説明できた。また図 7.3 のように、光度が上がるとコンプトン成分の傾きが急にな

ることを発見した [64, 76, 98]。こうした「低温で濃密なコンプトン大気」は、広く見られる概念である可能性があり、*ASTRO-H* の良い観測指針となると期待される [51]。

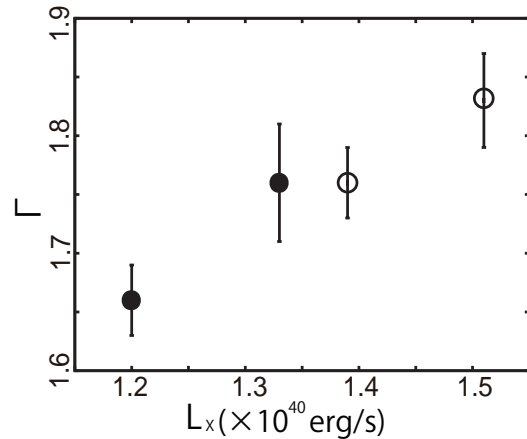


図 7.3: The luminosity dependence of the Comptonized spectral slope of the ULX object Holmberg XI X-1, observed with *Suzaku* on two occasions. Filled circles indicate the data in 2012 April, while open circles those in 2012 October. On both occasions, the source exhibited intra-day variations [64].

7.1.4 中性子星の研究 [49, 50, 65, 67, 91]

中性子星 (NS) は、原子核物理学と密接に関係する。それらの磁場は $B = 10^8 - 10^{15}$ G という広範囲に分布し、核物質の性質を反映する重要な現象である。牧島は NS 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と提唱している (Makishima + 1999) [36, 49, 50, 65, 66, 67, 68, 117, 122]。我々は *ASTRO-H* (§7.1.8) への継承を念頭に、様々な磁場強度をもつ NS を、「すざく」により研究している。

磁場の弱い中性子星

弱磁場 ($B < 10^9$ G) の NS が低質量の恒星と連星系をなすものを、LMXB (Low-Mass X-ray Binary) と呼ぶ。降着流の挙動は BH の場合に似るが、NS の硬い表面が存在することで、BH との違いが生じる。

櫻井らは昨年につき、トランジェント LMXB の代表例 Aql X-1 の「すざく」データを解析し [2]、中性子星表面からの黒体放射の半径が、光度とともに変化することを発見した [56, 70, 72]。光度が高いソフト状態では、光学的に厚く幾何学的に薄い標準降着円盤が接する、NS の赤道面付近から、黒体放射が放射される。光度が下がりハード状態になると、円盤は光学的に薄く幾何学的に厚い高温コロナ流へと遷移し、NS 表面にほぼ等方的に降着するが、光度がより下がると放射領域は小さくなる。このときのスペクトルを図 7.4 に示す。これは弱い磁気圏が頭をもち、降着流が南北の磁極に絞られる結果と解釈され、X線のパルス検出が期待される。

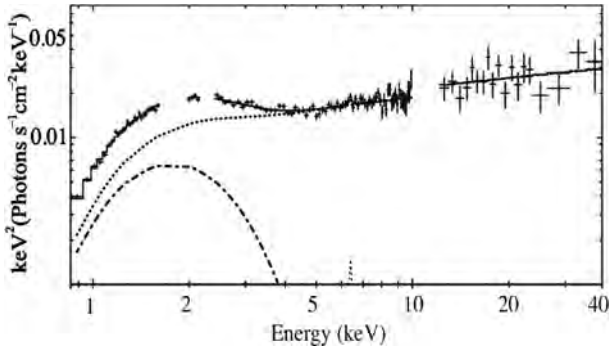


図 7.4: A *Suzaku* spectrum of Aql X-1 in the hard state. The soft X-ray hump can be identified with optically-thick thermal emission from the NS surface, while the hard continuum can be interpreted as its Comptonization [56].

2012年11月に来日した学振外国人特別研究員の Zhang Zhongli (張仲莉) は、LMXB のコロナの形状を測定すべく、周期的ディップ現象を示す LMXB (円盤を横から見ている) を研究している。その典型例である 4U 1916-053 から「すざく」が得た 0.5-50 keV スペクトル (図 7.5) は、LMXB のソフト状態のモデルにおいて、円盤成分と NS 表面成分をともに強くコンプトン化することで再現できた。これはコロナが円盤に沿って扁平に広がることを示唆する。

同様な例として櫻井らは、MAXI が発見した新天体 MAXI J0556-332 の性質を知るべく、理研の杉崎らと協力して、米国 *RXTE* のデータを解析した。その結果、やはり強いコンプトン効果を確認した [96]。この天体も円盤をかなり横から見ていると考えられるので、4U 1916-053 の結果と整合する。

鳥井らは、「すざく」で得られた GS1826-238 のデータを解析した。「ぎんが」衛星により 1988 年に発見されたこの LMXB は、常にハード状態にある。「すざく」の広帯域スペクトルは、2種類の光学的に厚い放射が、同一の電子雲でコンプトン化されたとして説明できた [97]。よってこの天体は 4U 1916-053 と同様な状況にあるか、この天体の光度がエディントン光度の 5-10% であることから、ハード状態とソフト状態の中間的な状態にあるのかもしれない。

X線パルサーとサイクロトロン共鳴吸収構造

$B \sim 10^{12}$ G の強磁場 NS に、連星の相手の星からガスが降着すると、降着型 X 線パルサーとなる。それらの X 線スペクトル中には、しばしば電子サイクロトロン共鳴に基づく構造 (CRSF) が現れ、磁場計測の切り札となる。埼玉大などと協力した 4U 1626-67 の研究では、通常は吸収線となる CRSF が、特定のパルス位相で、輝線に転じる兆候を見出した [11]。

MAXI により 2012 年 11 月、Be 型主星をもつ再帰パルサー GRO J1008-57 の X 線増光が検知され、「すざく」で緊急観測された。笹野らは理研の山本や三原とともにそのデータを解析し、 ~ 80 keV に CRSF を発見した (図 7.5)。得られた磁場 7×10^{12} G は、この方法で測定された値の最高記録である。

浅い 0.6 秒のパルスと周期的ディップを示す X 線源 4U 1822-37 は従来、LMXB と考えられてきた。「すざく」データを解析した笹野らは、そのスペクトル (図 7.5) が弱磁場 NS (4U 1916-053 など) のものとは異なり、X 線パルサー (GRO J1008-57 など) のものと似ることに気づき、さらに ~ 30 keV に CRSF の兆候を発見した。よって 4U 1822-37 は、強磁場 NS と低質量星が連星をなす希少例の可能性が高い。

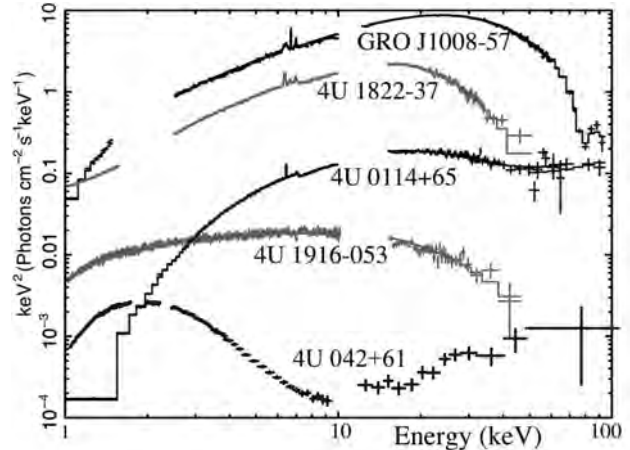


図 7.5: *Suzaku* $\nu F\nu$ spectra of the magnetar 4U 0142+61, and four accreting NS binaries. 4U 1916-053 is a dipping LMXB, GRO J1008-57 is a recurrent transient Be-binary pulsar, 4U 0114+65 is a long-period pulsar, and 4U 1822-37 is a dipping binary consisting of a low-mass star and a possibly strongly magnetized NS [61].

超長周期パルサーと SFXT 天体

一群の X 線パルサーは数百~1 万秒の長いパルス周期をもち、激しく変動する。その例として笹野らが解析中の 4U 0114+65 (自転周期 $\sim 1 \times 10^4$ sec) のスペクトルは、図 7.5 のように、X 線パルサー (GRO J1008-57 や 4U 1822-37) のものに比べ高エネルギーでの折れ曲がり弱く、 > 40 keV で再上昇する兆候を示す [80]。このようなスペクトルは、SFXT (Supergiant Fast X-ray Transient) と呼ばれる硬 X 線天体にも共通に見られ [61]、その解釈は今後の魅力的な課題である。これら NS は通常の X 線パルサーより強い、 $B \sim 10^{13}$ G の磁場をもつ可能性があり、磁気半径が大きいため自転周期が遅く、磁気面に蓄えられた大量の物質が間欠的に NS へと落下することで、激しい変動が生じると想像される。

マグネター天体

銀河系やマゼラン雲にある 20 個ほどの X 線源は、 10^{14-15} G の超強磁場をエネルギー源として X 線を放射する特殊な NS、「マグネター」と考えられる。図 7.5 の 4U 0142+61 のように、マグネターはどれも硬軟 2 成分から成る特異なスペクトルを示すこと、老齢な天体ほど硬成分の強度が下がるが、その傾きは硬くなることなどが、「すざく」の観測で明らかになった [48, 65]。

我々は理研の岩橋、榎戸らと協力し、マグネター 1E 1547-54 の静穏時の「すざく」データを解析した結果、HXD 装置でハード成分が検出され、ハード成分とソフト成分の光度比は、2009 年 1 月の活動期に測定された値と大きく変わらないことが検証された [4, 78]。また早大の中川らと協力し、活動期の 1E 1547-54 の弱いバーストから、定常放射と同様なハードテールを検出し [19]、バーストと定常放射の類似性を強化できた。

今年度は理研の榎戸らと協力し、「すざく」HXD で観測した 4U 0142+61 の 8.7 秒の硬 X 線パルスを観測したところ、1.5 時間の周期でその位相が、 ± 0.7 秒ほど前後に動く効果を発見した [99]。これは NS の自由歳差運動の結果と解釈でき、内部に $B \sim 10^{16}$ G のトロイダル磁場が存在する結果、NS の慣性モーメントが磁気軸回りではそれに直交する軸回りに比べ、 $\sim 1.6 \times 10^{-4}$ だけ小さいと考えると説明できる。

7.1.5 超新星残骸および中心天体 [91]

超新星残骸 (SNR) は、重い星の進化の終点として、重元素の合成とその星間空間への還元現場として、宇宙での衝撃波やそれに伴うプラズマ加熱の例として、また宇宙線など非熱的粒子の加速源として、重要である。SNR に付随する NS の有無も、未解決の部分が多い。平賀、中野、村上らは、理研の勝田らと協力し、「すざく」による SNR の研究を進めた。ASTRO-H 衛星 (§7.1.8) は、優れた軟 X 線のエネルギー分解能や、硬 X 線での撮像能力を活かし、これらの成果を継承し飛躍的に発展させると期待される。

SNR からの非熱的放射

平賀らは、Vela Jr. として知られる、非熱的 X 線の強い SNR を、XMM-Newton 衛星の公開データを用い詳しく研究した [20]。場所による非熱的 X 線スペクトルの変化は、それを相対論的電子のシンクロトロン冷却によるものと解釈でき、磁場強度は数十 μG 以下と推定された。また高エネルギーガンマ線の未同定天体 HESS J1427-608 を「すざく」で観測した結果、その位置に広がった非熱的な X 線源を検出した [9]。これはパルサー風星雲、もしくは非熱的な SNR である可能性がある。

G330.2+1.0 と呼ばれる SNR は不完全なシェルをもち、「あすか」により、非熱的 X 線が強いことが知られていた。「すざく」のデータを解析した村上らは、シェル南西部の X 線で明るい部分は、光子指数 ~ 2.2 の非熱的スペクトル (おそらくシンクロトロン放射) を示すことを確認し、中心より東側の明るいスポットからは図 7.7 のように、熱的 X 線放射を検出した [82]。膨張する SNR シェルの運動エネルギーが、プラズマ加熱と粒子加速にどう分岐するかは、大きな謎であり、ASTRO-H で大きく理解が進むと期待される [52]。

G330.2+1.0 の中心には、X 線の点源が存在する (パルスは未発見)。村上らはそのスペクトルが、マグネター (図 7.5 の 4U 0142+61 など) の軟 X 線成分と似ることを見出した [100]。強いトロイダル磁場と弱い双曲子磁場をもつ、マグネターかもしれない。

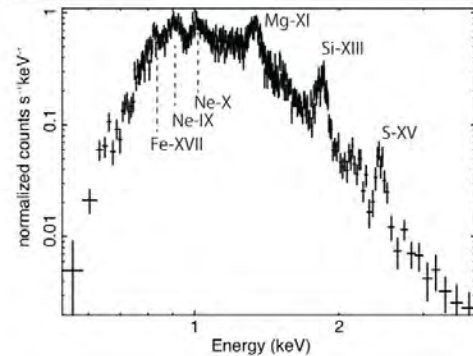
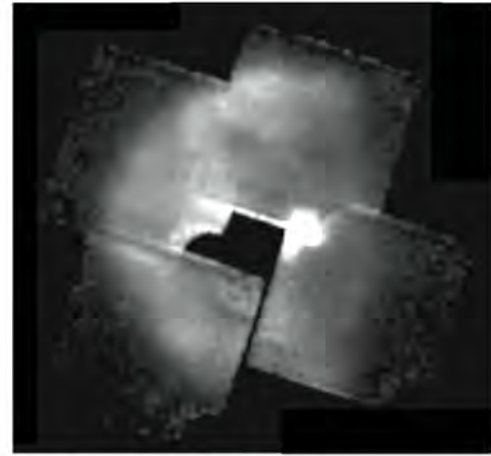


図 7.6: (top) A mosaic X-ray image of the SNR, CTB109, obtained with *Suzaku* in four pointings. The magnetar 1E 2259+586 is seen at the center. (bottom) An X-ray spectrum of CTB109, with rich emission lines from ionized heavy elements. Both from [55].

CTB109 と中心マグネター 1E 2259+586

中野らは 2011 年 12 月に得た、CTB109 の「すざく」XIS データを解析した。この SNR は特異な半月形 (図 7.6 上) をもち、中心にマグネター 1E2259+586 を擁す。スペクトル (図 7.6 下) は熱的で、顕著な輝線を示し、温度 0.28 keV と 0.65 keV の 2 温度プラズマ放射で再現できた。重元素アバUNDANCE はほぼ太陽組成で、電離非平衡の兆候は弱く、爆発エネルギーは $\sim 10^{51}$ erg s^{-1} 、年齢は 2-3 万年と推定された [55]。このように CTB109 は、重力崩壊型 SNR として典型的で、マグネターを生んだ手掛かりとなる特異性は乏しい。ただし半月形の右縁では、吸収の増加を伴わず X 線輝度が急減しており、謎であった。中野らは「すざく」データを調べた結果、輝度がほぼ一様な部分と、その半分の部分の存在に気づき、膨張する SNR シェルが巨大分子雲に衝突し、向こう側のシェルが分子雲の背後に回り込むと、輝度が半分になるとして、謎を解決した [81]。

残る問題は、CTB109 の推定年齢が 1E2259+586 の特性年齢 (23 万年) より、大幅に若いことだった。中野らは、磁場の減衰を考え再計算すると、マグネターの特性年齢はずっと若くなり、この問題が解決できると論じた [55]。これは、マグネターが真の磁気駆動 NS であることを支持し、マグネターが従来の理解

より若いこと、それらの誕生率はきわめて高く、むしろ $\sim 10^{12}$ G の磁場をもつ NS より、マグネターのほうが多く誕生する可能性まで示唆する [55, 65, 67, 48]。我々はこの可能性を検証する一環として、磁気活動を終えつつあるマグネターの末裔を探索すべく、「あすか」銀河面サーバイで検出された暗い未同定 X 線源のうち 4 例を「すざく」で観測した。

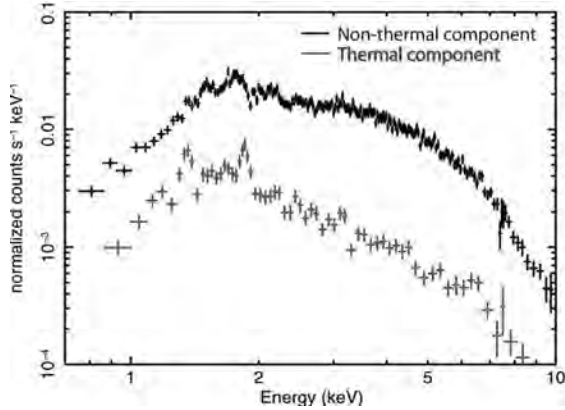


図 7.7: Spectra of the SNR G330.2+1.0, obtained from a south-west rim (upper/thicker data points) and an eastern bright spot (lower/thinner points), with non-thermal and thermal properties, respectively [52].

7.1.6 銀河面 X 線放射の研究

我々の銀河面には、広がった「銀河面 X 線放射」(GRXE) が分布し、そのスペクトルには強い Fe、S、Si などの電離輝線が見られる。熱的プラズマ放射として解釈できるが、その発生源は 1980 年代から謎で、SNR の集まり、暗い点源の集合、ディフューズな高温プラズマの分布などの説が並立していた。湯浅らは「すざく」で観測した GRXE のスペクトルが、質量降着する白色矮星連星と、より柔らかい熱的放射 (おそらく星のコロナやフレア) の和で再現できることを示した [13]。湯浅の博士学位論文は、Springer Theses として単行本として出版された [44]。

7.1.7 銀河団の研究

銀河団は、暗黒物質、X 線を放射する高温プラズマ (ICM=Intra Cluster Medium)、および数十～数百のメンバー銀河から成る、宇宙最大の自己重力系で、その研究は宇宙論に大きな意義を持つ。我々は、中澤、学振外国人特別研究員の Gu Liyi (顧力意)、および西田を中心に、銀河団の研究を進めた。

銀河団の宇宙論的進化の新しい描像

我々は独創的な、銀河団の磁気流体的描像 (Makishima +2001) を追求している。それは、「ICM 中を運動するさい、銀河団のメンバー銀河たちは抵抗を受け、形態を渦巻きから楕円へと変化させつつ中心に落下し、そのさい解放する力学的エネルギーが ICM の放射冷却を止め、粒子加速を駆動する」という状

大な筋書きで、銀河団に関する多くの謎を一挙に解決する可能性を秘めている。それを証明すべく Gu を中心に、当センター PD 経験者である奈良高専の稲田らと協力し、近傍 ($z \sim 0.1$) から遠方 ($z \sim 0.9$) までの 34 個の銀河団に対して、可視光でのメンバー銀河の空間分布を、X 線で求めた高温プラズマの空間分布と比較する作業を続けた。その結果、図 7.8 に示すように、遠方の (若い) 銀河団ではプラズマの周辺部まで銀河が分布するのに対し、近い (老齢の) 系では、プラズマの中心部に銀河が集中することを、世界で初めて明らかにすることに成功した。結果は論文に出版するとともに [18]、成果を国際学会 [23, 57, 58] や国内学会・セミナー [85, 120, 124] で広く公表した。

この結果は、銀河が ICM と相互作用することで、宇宙年齢かけてポテンシャル中心に落下してきたことを意味し、その相互作用により、銀河で作られた重元素が、いかにして銀河間空間に運ばれたことも説明できる。その相互作用の現場を明らかにすべく、Gu らは、国立天文台の八木、阪大の藤田、広島大の吉田らと協力し、「おとめ座」銀河団で渦巻き銀河からガスがはぎ取られる現場を、「すばる」望遠鏡などで探査しつつある [102]。さらに *ASTRO-H* を使い、大きな視線速度をもつメンバーの周囲で、ICM の X 線放射がドップラーシフトを示すことを検出できれば、決定的な証拠となる。

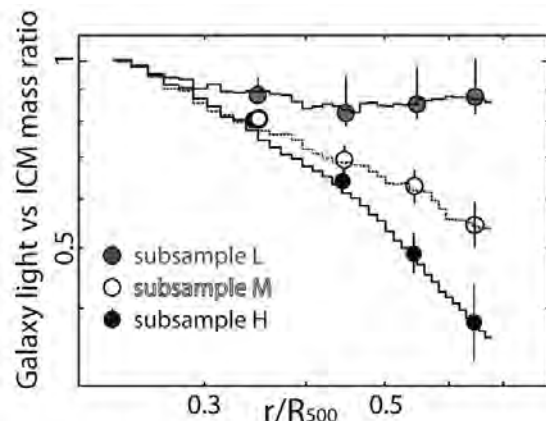


図 7.8: Circularly integrated galaxy light profiles of clusters of galaxies, normalized to circularly integrated mass of their X-ray emitting plasmas. Results on 34 clusters have been averaged into three subgroups with different redshifts z ; low ($z = 0.11 - 0.22$), medium ($0.22 - 0.45$), and high ($0.45 - 0.9$) [18].

7.1.8 *ASTRO-H* 衛星計画

ASTRO-H 衛星とその搭載装置 [33]

ASTRO-H 衛星は、米国 NASA および欧州 ESA などとの国際協力を含め、オールジャパンの体制で開発が進められている、次世代の宇宙 X 線衛星で、「すざく」の後継機となる。機上には、1–10 keV 域で X

線エネルギーを数 eV の精度で測定する X 線マイクロカロリメータ、5–80 keV で集光できる 2 台のスーパーミラー硬 X 線望遠鏡 (HXT)、その焦点面に置かれる硬 X 線イメージャー (HXI)、1 台の軟 X 線望遠鏡とその焦点面に置かれる広視野の X 線 CCD カメラ (SXI)、60–600 keV で働く軟ガンマ線検出器 (SGD) が搭載される。これらの協力により、*ASTRO-H* は広帯域、高感度、高精度での分光観測を得意とし、高エネルギー宇宙物理学に大きな貢献を行なう。

ASTRO-H は長さ 14 m、重さ 2.7 t と日本最大の科学衛星で、HIIA ロケットにより打ち上げられる。当初は 2014 年初め (2013 年度末) の打ち上げを予定していたが、東日本大震災により、JAXA つくば宇宙センターの試験設備に甚大な被害が及んだことなどのため、打ち上げは 2015 年度に再設定された。

本プロジェクトでは、JAXA ほか国内の大学研究機関、いくつかの外国機関などと共同し、同衛星の開発を担当している。平賀は SXI の開発に大きな貢献を行っており、牧島・中澤研究室は、中澤および内山を中心に、研究室の総力を挙げて HXI と SGD の開発に参加した。2012 年度は、最終試作品を用いて設計の検証とともに、すでに衛星搭載品の製造の一部が始まっており、残る課題の解決に当たっている。

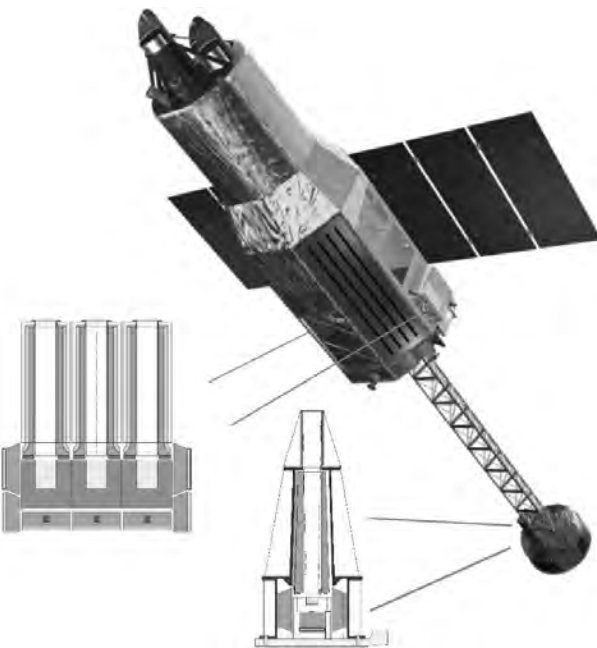


図 7.9: Drawing of the *ASTRO-H* satellite, to be launched in 2015 [33]. The overall length is 14 m, and the weight is 2.7 t. Also plotted are cross sectional views of the HXI (right: 40 cm tall) and SGD (left: 50 cm tall). Two identical units of each instrument are mounted.

SXI 装置の開発 [32, 59, 37, 38, 74, 111, 86, 87, 106, 107, 108]

SXI (Soft X-ray Imager) は軟 X 線望遠鏡 (SXT) の焦点面検出器として搭載される X 線 CCD カメラ

で、広い視野 (38 分四角) を持ち、0.4 - 12.0 keV の、単一光子ごとの撮像と分光を実現する。当センターでは平賀を中心に、その開発に貢献している。SXI には大阪大学、国立天文台などが中心となって、浜松ホトニクス社と共同開発してきた、空乏層の厚い大型 CCD 素子が搭載される。2012 年度はまず、アナログエレクトロニクスの改善を行い、フライトモデル (FM) と同等の基板レイアウトをもつエンジニアリングモデル (EM) を製造した。また、アナログエレクトロニクス、CCD 素子を格納する真空容器、スターリング冷凍機、など、SXI を構成する各要素の EM を噛み合わせた性能試験を実施した。その結果、読み出しノイズ $6-8 e^-$ 、エネルギー分解能 135-145 eV (FWHM@5.9keV) となり、目標性能を安定して実現していることを実証した。FM 候補となる CCD 素子の製造も進み、数素子ずつ数回にわたって納品された。逐次スクリーニングを行い、最終的に FM となる 4 素子を決定する予定である。現在、エレクトロニクス、フード、ベースプレート、素子格納容器などの構造物、冷凍機の FM を製作中であり、2013 年度に完成し、衛星全体の噛み合わせ試験に臨む予定である。

HXI と SGD [29, 30, 73, 88, 92, 93, 105]

HXI は図 7.9 の伸展尾部に搭載され、5–70 keV の帯域を 9 分角の視野と 1.7 分角の角分解能で撮像しつつ、個々の X 線のエネルギーを分解能 1.5 keV という高精度で分光する。BGO 結晶シンチレータを用いたアクティブシールドにより低バックグラウンド環境を実現し、その中に 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搭載する。HXT と HXI の組み合わせは、従来より 2 桁よい感度を実現する。

SGD は図 7.9 のように、 3×2 台の「コンプトンカメラ」と、それらを取り囲む 25×2 個の BGO 結晶シンチレータで構成される。コンプトンカメラは、半導体パッド検出器 (シリコンおよび CdTe) を 40 層重ね、その中で光子をコンプトン散乱させ、エネルギーと運動量の保存から入射方向を推定するもので、60–600 keV の帯域で動作し、数度の角度分解能を持つ。視野を絞った井戸型 BGO アクティブシールドの内側に置くことで、バックグラウンドを除去し、「すざく」HXD より感度を 1 桁上げる。

HXI および SGD の機構開発 [114]

我々は、HXI および SGD 検出器部の機構開発で、中心的な役割を担っており、炭素繊維強化プラスチックを用いた、HXI および SGD のハウジング構造の試験を進め、フライト品の製造に着手した。また SGD センサー部の試作品の最終振動試験をつくば宇宙センターにて実施した (図 7.10 上)。2012 年 5 月の最初の試験では、ラジエータの強度不足が発覚したため改良を加え、2013 年 3-4 月の試験で最終的な強度確認がなされた。内山、中野、小林、村上らは、HXI センサー部の試作品を実際に組み上げ、熱歪みがアクティブシールドの BGO 結晶に悪影響を与えないことを検証した (図 7.10 下)。



図 7.10: (Top) SGD-S EM housing vibration tests at Tukuba/JAXA. (Bottom) HXI-S EM thermal distortion test at ISAS/JAXA.

HXI および SGD の熱設計 [115]

HXI と SGD は、主検出部にもアクティブシールド部にも半導体素子を用いるため、検出器の全体を -20°C 程度まで放射冷却する必要がある。しかし両装置ともかなりの内部発熱をもつ上、どちらも衛星構体の外に搭載せざるをえず(図 7.9)、そのため直射日光や地球赤外線を浴び、日陰では酷寒の宇宙空間を見る。対流のない宇宙空間で、所期の低温を達成しつつ、軌道周回や姿勢変更に伴う温度変動を抑えるには、両装置ともに慎重な熱設計が求められる。

これまでの開発で単体としての基本設計を確認した上で、2011 年度は衛星全体の熱バランス試験 (TTM 試験) に参加した。SGD については、三菱重工との作業分担により、野田を中心に、東大側が TTM 用のダミー供試体の設計と製造を行い、熱数学モデルも独自に開発するなど大きな貢献を行った。この結果、SGD センサー部の影響を含めて、衛星全体の熱設計の妥当性を検証することができた。



図 7.11: Set-up at MHI Komaki factory for measuring the flight model BGO units.

アクティブシールド部の開発 [43, 109, 110, 113]

HXI や SGD の検出感度を究極に左右するものが、アクティブシールドの性能である。これは主検出部を複数の BGO シンチレータで隙間なく囲み、その発光をアバランシェフォトダイオード (APD) で個々に読み出し、禁止信号を生成することで達成される。高品位 BGO 結晶は、ESA の協力により、ロシア無機化学研究所から、スペアを含めて全数が供給され、優れた発光特性が確認された。

内山、笹野、西田、中野らを中心に、HXI/SGD 双方の感度向上の鍵を握る BGO シールドの開発を進め、特に納品された BGO シンチレータの系統的な評価を通じて、衛星搭載品の最終仕様を決め、結晶を選定した。笹野らは、APD と BGO の接着方法を確立すべく、さまざまな実験室実験を行い、また内山、西田、笹野らは、三菱重工での製造後に受け入れ検査をする工程を確立し(図 7.11)、その予行演習を実施した。

鳥井、村上、笹野らは、広島大、早大などと協力し、アクティブシールドの信号処理部 (APMU) の開発と試験を行ってきた(図 7.12)。FPGA のロジック回路も、鳥井他が中心となって開発した大学側バージョンと、三菱重工が開発したバージョンを、それぞれ利用しつつ設計検証を進めている。その結果、BGO の単体測定で利用してきた標準的な実験室測定系と遜色のないエネルギー閾値が達成されることを確認し、衛星搭載品の開発にめどを付けることに成功した。現在、アナログ部分の最終調整を行い、最終的な FPGA ロジックを詰めている。

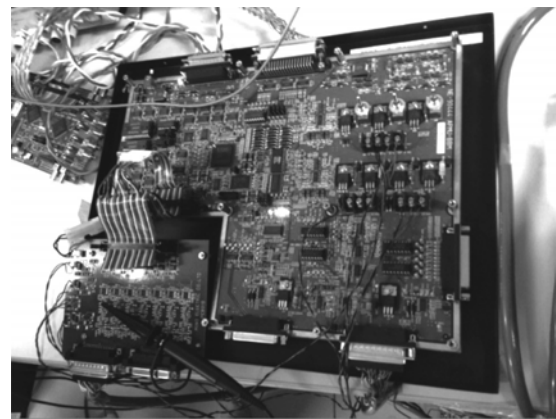


図 7.12: A circuit board for the HXI/SGD active shield read-out system.

HXI 主検出部 (イメージャー) の開発 [35]

小林、中野らは JAXA と協力し、HXI 主検出部 (イメージャー) に用いる、両面 Si ストリップ検出器 (DSSD) の開発を行なってきた。DSSD は N 側にも P 側にも、 $250\ \mu\text{m}$ 間隔で設けられた幅 $150\ \mu\text{m}$ のストリップ列 128 本をもつ。

今年度は宇宙研において、HXI カメラ単体での熱真空試験を実施した。宇宙研の萩野、佐藤とともに、中野、小林、村上が参加し、放電が起きないこと、お

よび対流がない中での検出器の熱伝導設計が予定通りになされていることを初めて確認した。

中野、小林らは、萩野、佐藤および、名大の望遠鏡のチームと共同で、SPring-8の長尺ビームラインにおいて、初めて硬 X 線望遠鏡 (HXT) のフライト品と HXI を組み合わせた測定を実施した。ビームライン側で 30 keV のライン X 線を生成し、これを HXT を通じて、HXI-DSSD に結像することで、光学系と検出器系を組み合わせた実験を地上で実施できたことには大きな意義がある。これを元に、HXT-HXI システムとしての有効面積の評価や、検出器レスポンスの評価を進めている。

HXI および SGD の後段データ処理部の開発

HXI、SGD とともに、検出器で得られたデータは、各々の CPU 処理部に送られて機上ソフトで処理された上で、地上に送られる。このデータはさらに地上ソフトで処理して、クイックルック (QL) と呼ばれるリアルタイム監視システムや、解析ソフトウェアに入力される。櫻井は、宇宙研の小高、湯浅とともに、こうした後段処理回路の開発をほぼ一手に引き受けて実施している。昨年に開発した FPGA を駆使した検出器シミュレータなどを用い、詳細な試験を実施するとともに、地上系ソフトの開発を自ら実施している。こうした試験により、現在までにソフトウェアの検証はある程度実施され、FPGA 周りの不具合の修正を実施中である。



図 7.13: Tests at SPring-8 (right), where a Hard X-ray Telescope (left bottom) was combined with DSSD for the HXI (left top).



図 7.14: Digital electronics and command/telemetry software of the HXI/SGD on test.

7.2 BESS 気球実験

7.2.1 超伝導スペクトロメータによる宇宙線観測

BESS 気球実験 (Balloon-borne Experiment with a Superconducting Spectrometer) は、大気球・飛翔体実験のために開発された、大立体角、高精度超伝導マグネットスペクトロメータによって、宇宙起源反粒子、反物質の探索を推進した [24, 25]。初期宇宙における素粒子像を探るべく、気球による宇宙線精密観測を 1993 年以来、系統的に推進した。超伝導磁石技術を駆使し、粒子透過性に優れた薄肉ソレノイド型超伝導磁石スペクトロメータの開発によって、大立体角、運動量分解能および粒子識別性能に優れた観測を実現したことを特徴する。

実験には、東京大学、KEK、ISAS/JAXA、NASA、メリーランド大、デンバー大が参加した。宇宙科学分野における日米・国際共同実験の一つとして、ISAS/JAXA および NASA の強いサポートを受け、1993~2002 年にはカナダ北部にて、2004~2008 年には、南極において観測を重ねた。BESS 実験の観測の年次経過および太陽活動の変化を図 7.15 に、継続的な観測とともに進化を続けた BESS 超伝導スペクトロメータの概念を図 7.16 に示す。また、これまでの気球飛翔実験・観測記録を表 7.2 a に纏める。太陽活動極小期にあたる 2007~2008 年には、観測の集大成となる南極周回・長時間飛翔・観測実験 (第二回) に成功し、高度 34~38 km の南極周回軌道上において 24.5 日間に亘る連続的な宇宙線観測を達成した。

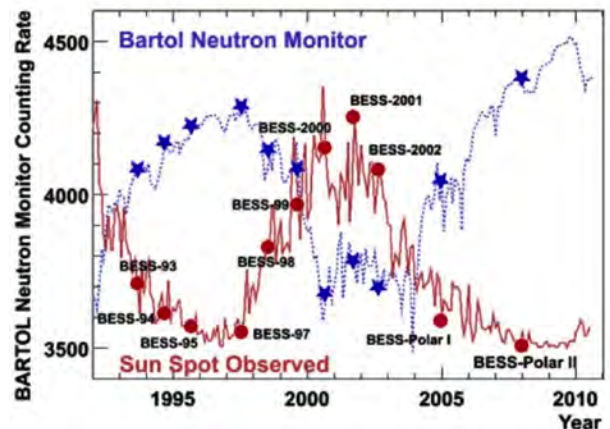


図 7.15: Progress of the BESS balloon flights and scientific observations with variation of the solar activities since 1993 through 2008.

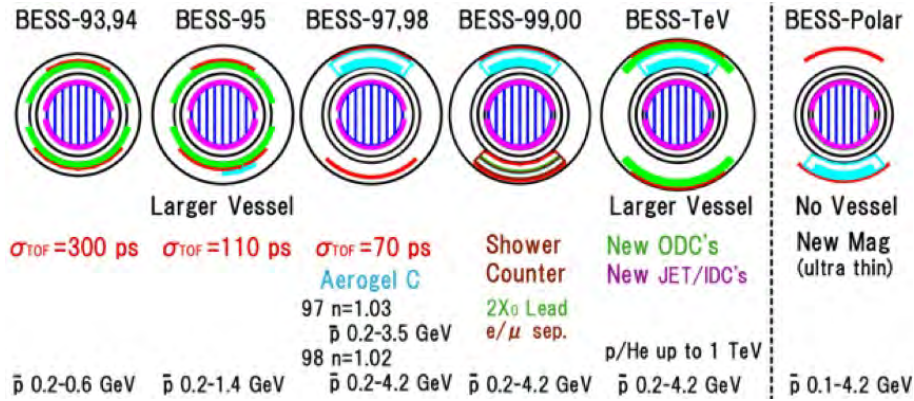


図 7.16: Advances in the BESS superconducting magnet spectrometers.

	1993	1994	1995	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2004	2007
Location				Canada				US	C.	Antarctic	
Float time (h)	17.5	17	19.5	20.5	22.0	34.5	44.5	1.0	16.5	205	730
Obs.time, float (h)	14	15	17.5	18.3	20.0	31.3	32.5	1	11.3	180	588
Obs.time, asc./des. (h)						2.8	2.5	12.8	2.3	3.3	3.5
Recorded events ($\times 10^6$)	4.0	4.2	4.5	16.2	19.0	19.1	17.0	N/A	13.7	900	4700
Data volume (GB)	4.5	6.5	8.0	31	38	41	38	N/A	56	2,140	13,500
Event filtering	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No
Magnetic field (T)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8
MDR (GV)	200	200	200	200	200	200	200	1,400	1,400	240	240
TOF resolution (ps)	300	300	100	75	75	75	75	75	75	160	120
ACC index	-	-	-	1.03	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03
\bar{p} events observed	6	2	43	415	384	668	558	N/A	147	1,520	7,886
\bar{p} 's energy (GeV)	< 0.5	< 0.5	< 3.6	< 3.6	< 3.6	< 3.6	< 4.2	N/A	< 4.2	< 4.2	< 3.5
He/He U. lim. ($\times 10^{-6}$)	22	4.3	2.4	1.4	1.0	0.8	0.68	N/A	0.65	0.27	0.07

表 7.2 a: Summary of the BESS balloon flights and scientific observations.

7.2.2 BES-Polar 観測結果

低エネルギー反陽子流束

1995-1997年太陽活動極小期に BESS 実験によって観測された低エネルギー反陽子エネルギースペクトルは、図 7.17 に示すように、低エネルギー領域において、二次粒子モデル計算に対して、わずかに平坦なスペクトルを示し、宇宙起源反粒子による可能性を示唆した [26]。その後、BESS 実験では、太陽活動の変化・変調が宇宙線流束に及ぼす影響を系統的に観測し続けたうえで、次の太陽活動極小期となった 2007-2008 年に南極周回・長時間観測 (BESS-Polar II) を実現し、質量同定を伴う明確な解析結果として、総数 7886 個の高い統計精度で、反陽子流束の観測に成功し、図 7.18 に示すエネルギースペクトルおよび宇宙起源反陽子探索結果を公表した [27]。

この観測結果は、1 GeV 以下のエネルギー領域において、11 年前の太陽活動極小期 (BESS '95+' 97) の観測結果の約 14 倍の統計量に達し、様々な理論モデルとの明確な比較の結果、二次起源反陽子流束モデル計算と良く整合する結論を得た。二次起源反陽子のモデル計算は、一次宇宙線である陽子が、銀

河磁場による拡散、対流、星間ガスによる加速を受けながら、衝突反応により反陽子生成をする過程 (宇宙線伝播モデル) と、太陽圏内における太陽磁場の擾乱による変調 (太陽変調モデル) の効果をかけ合わせたものとなる。この二次起源反陽子流束評価を基に、低エネルギー領域においてその寄与が顕著に現れる可能性がある『原始ブラックホール (PBH)』起源・反陽子流束の評価を行った。反陽子流束観測結果から、二次起源反陽子モデル計算を引いた差分を説明できる PBH 起源反陽子流束の絶対量を見積もり、PBH の蒸発率 R の上限値を評価した。二次起源反陽子モデル不定性の影響を考慮するために、数種の二次起源反陽子モデルについて計算を行い、蒸発率 R の確率密度関数を求めた。BESS '95+' 97 の低エネルギー反陽子流束観測に対して統計精度を一桁以上高めた BESS-Polar II 実験結果として、 $R \sim 1.2 \times 10^{-3} (\text{pc}^{-3} \text{yr}^{-1})$ (90% C.L.) を上限値とする結果を得た。この値は、前回の太陽活動極小期における BESS 実験の観測結果に対して、 $> 9\sigma$ 離れる低い結果となり、PBH 起源・低エネルギー宇宙線反陽子が現在、我々が観ることができ宇宙では観測されていないと結論した。

宇宙反物質の探索

BESS-Polar 実験では、長時間フライトの特色を活かし、反物質としての反ヘリウム探索を飛躍的に進展させた。観測されたヘリウム流束は BESS-Polar I の観測のリジディティ領域で 4×10^7 イベントに達したが、反ヘリウムは 1 例も観測されなかった。1993 年以來の全 BESS 実験における積分統計量から、1~14 GV 領域において反ヘリウムとヘリウムが同じスペクトル形状をもっていると仮定した場合に於いて、反ヘリウム/ヘリウム上限値、 6.9×10^{-8} を得た。この結果を、図 7.19 に示す。また、反ヘリウムにスペクトル形状を仮定せず、個々のフライトに対し重みをつけ、最も低いヘリウム観測効率を仮定した場合において、反ヘリウム/ヘリウムの上限値として、1.6~14 GV のリジディティ領域で、 1.0×10^{-7} の上限値を得た。1993 年以來積み重ねられた BESS 実験による宇宙反物質探索は、BESS 実験以前の探索結果に対して、上限値を三桁も押し下げ、最も高い感度での宇宙反物質探索結果を報告した [28]。

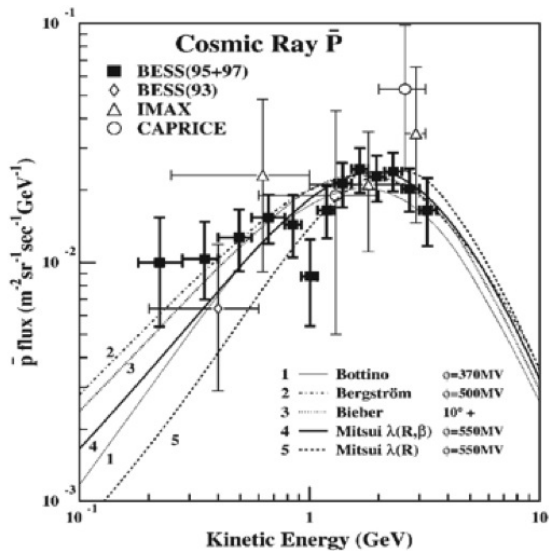


図 7.17: Antiproton spectrum observed by BESS, in the previous solar minimum period in 1995 and 1997 [26].

7.2.3 まとめ

BESS 実験は、日米国際協力実験として 1987 年に実験の準備を開始以來 26 年、1993 年に第一回観測を実現して以來、20 年に亘る歴史を重ねた。カナダ北部、南極での観測を含み、合計 11 回の気球飛翔・宇宙線観測実験に成功した。宇宙起源反粒子の探索および宇宙線の絶対流束の精密観測データの提供、太陽活動による変調を観測し、精密な実験結果を提供し続けてきた。2007 年度には、その集大成として、太陽活動極小期に第二回南極周回気球実験を実現し、高度 34~38km に於ける 24.5 日間に亘る連続気球観測に成功した。2011~2012 年度には、『太陽活動極小期における低エネルギー宇宙線反陽子観

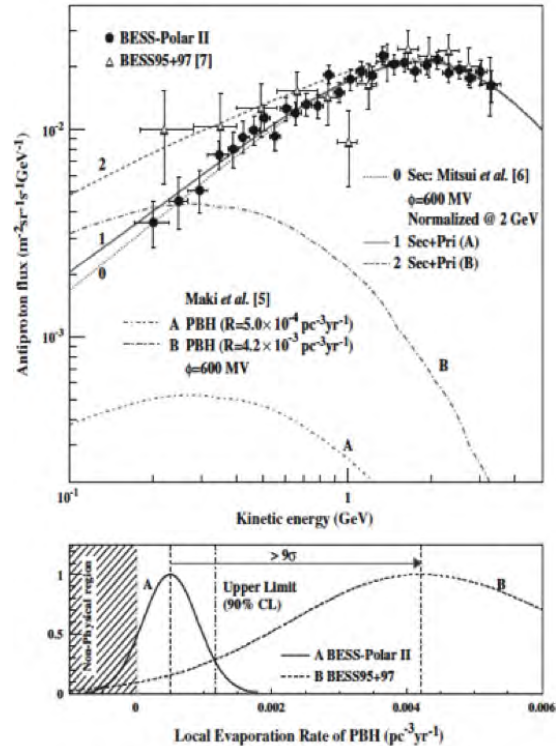


図 7.18: Antiproton spectrum measured in BESS-Polar II experiment compared with the BESS95+97 and secondary production models, and possible primary fluxes from PBH evaporations calculated for BESS Polar II and BESS(95+97) experiments [27].

測』、『反ヘリウム探索』に関するデータ解析を完了し、BESS 実験としての最終結果を公表した。反陽子については、太陽活動極小期における粒束を決定するとともに、原始ブラックホール等の宇宙（一次）起源反陽子の存在可能性に対して、厳しい上限値を導いた。反物質探索においては、BESS 実験のこれまでの全フライトの統計量から、エネルギースペクトル形状を同じと仮定した場合、1~14 GV の領域で、反ヘリウム/ヘリウム上限値 6.9×10^{-8} を結論とした。以上より、BESS-Polar 実験は、かつてない統計精度で、宇宙線伝播モデル、初期宇宙の素粒子描像の精密な理解に不可欠な基礎データを提供する事に貢献した。

謝辞： BESS 気球実験を東京大学初期宇宙国際研究センター (RESCEU) における飛翔体実験の一つとして加えて頂き、多くのご支援を頂きましたことに、心より感謝申し上げます。特に、初代センター長・佐藤勝彦先生、そして第二代センター長・牧島一夫先生は、常に大きな励まし、ご指導を頂きました。深く感謝申し上げます。BESS 気球実験は、1987 年、(故) 折戸周治先生のご提唱によって始まりました。折戸先生の『宇宙を探る強い情熱』に導かれて実験が立ち上げられ、RESCEU の一テーマとしてここまで研究が進展できましたこと、そして、成果をご報告できますことを、改めて、深く感謝申し上げます。

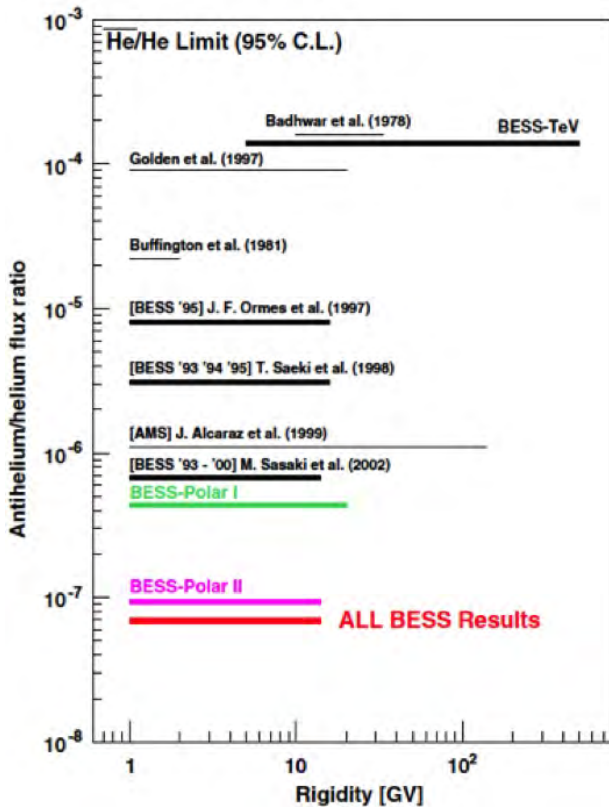


図 7.19: The new upper limit of antihelium/helium at the top-of-atmosphere calculated assuming the same energy spectrum for antihelium as for helium with previous experimental results. The limit calculated with no spectral assumption is about 25% [28].

< 報文 >

(原著論文 (Refereed): 宇宙 X線関係)

- [1] Yamada, S., Uchiyama, H., Dotani, T., Tsujimoto, M., Katsuda, S., Makishima, K., Takahashi, H., Noda, H., Torii, S., Sakurai, S., Enoto, T. et al.: “Data-Oriented Diagnostics of Pileup Effects on the Suzaku XIS”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **64**, Article No.53 (2012)
- [2] Sakurai, S., Yamada, S., Torii, S., Noda, H., Nakazawa, K., Makishima, K., Takahashi, H.: “Accretion Geometry of the Low-Mass X-ray Binary Aquila X-1 in the Soft and Hard States”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **64**, Article No.72 (2012)
- [3] Noda, H., Makishima, K., Nakazawa, K., Uchiyama, H., Yamada, S. & Sakurai, S.: “The Nature of Stable Soft X-Ray Emissions in Several Types of Active Galactic Nuclei Observed by Suzaku”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **65**, Article No.4 (2013)
- [4] Iwahashi, T., Enoto, T., Yamada, S., Nishioka, H., Nakazawa, K., Tamagawa, T. & Makishima, K.: “Suzaku Follow-Up Observation of the Activated Magnetar 1E 1547.0-5408”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **65**, in press (2013)
- [5] Yamada, S., Makishima, K., Done, C., Torii, S., Noda, H. & Sakurai, S.: “Evidence for a Cool Disk and Inhomogeneous Coronae from Wide-band Temporal Spectroscopy of Cyg X-1 with Suzaku”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **65**, in press (2013)
- [6] Yamada, S., Torii, S., Mineshige, S., Ueda, Y., Kubota, A., Gandhi, P., Done, C., Noda, H., Yoshikawa, A. & Makishima, K.: “Highly Ionized Fe-K Absorption Line from Cygnus X-1 in the High/Soft State Observed with Suzaku”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **65**, in press (2013)
- [7] Yamada, S., Negoro, H., Torii, S., Noda, H., Mineshige, S. & Makishima, K.: “Rapid Spectral Changes of Cyg X-1 in the Low/Hard State with Suzaku”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **65**, in press (2013)
- [8] Kouzu, T., Tashiro, M. S., Terada, Y., Yamada, S., Bamba, A., Enoto, T., Mori, K., Fukazawa, Y. & Makishima, K.: “Spectral Variation of the Hard X-ray Emission from the Crab Nebula with the Suzaku Hard X-ray Detector”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **65**, in press (2013)
- [9] Fujinaga, T., Mori, K., Bamba, A., Kimura, S., Dotani, T., Ozaki, M., Matsuta, K., Puhhofer, G., Uchiyama, H., Hiraga, J. S., Matsumoto, H. & Terada, Y.: “An X-ray counterpart of HESS J1427-608 discovered with Suzaku”, *Publ. Astron. Soc. Japan* **65**, in press (2013)
- [10] Noda, H., Makishima, K., Nakazawa, K., & Yamada, S.: “Suzaku Discovery of a Slowly Varying Hard X-ray Continuum from the Type I Seyfert Galaxy NGC 3516”, *Astrophys. J.*, in press (2013)
- [11] Iwakiri, W. B., Terada, Y., Mihara, T., Angelini, L., Tashiro, M. S., Enoto, T., Yamada, S., Makishima, K., Nakajima, M. & Yoshida, A.: “Possible Detection of an Emission Cyclotron Resonance Scattering Feature from the Accretion-powered Pulsar 4U 1626-67”, *Astrophys. J.* **751**, article id. 35 (2012)
- [12] Maragutti, R. and 43 co-authors, including Makishima, K., Murakami, T., Ohno, M., Takahashi, T., Tashiro, M. & Terada, Y.: “Inverse Compton X-Ray Emission from Supernovae with Compact Progenitors: Application to SN2011fe”, *Astrophys. J.* **751**, article id. 134 (2012)
- [13] Yuasa, T., Makishima, K. & Nakazawa, K.: “Broadband Spectral Analysis of the Galactic Ridge X-Ray Emission”, *Astrophys. J.* **753**, article id. 129 (2012)
- [14] Rea, N., Israel, G. L., (9 co-authors), Enoto, T., (9 co-authors), Makishima, K., (9 co-authors): “A New Low Magnetic Field Magnetar: The 2011

- Outburst of Swift J1822.3-1606”, *Astrophys. J.* **754**, article id. 27 (2012)
- [15] Ackermann, M. and 144 co-authors, including Okumura, A., Kamae, T. & Makishima, K.: “Gamma-Ray Observations of the Orion Molecular Clouds with the Fermi Large Area Telescope”, *Astrophys. J.* **756**, article id. 4 (2012)
- [16] Caballero, I., Pottschmidt, K., (15 co-authors), Makishima, K., Enoto, T., Iwakiri, W. & Terada, Y.: “A Double-peaked Outburst of A 0535+26 Observed with *INTEGRAL*, *RXTE*, and *Suzaku*”, *Astrophys. J. Lett.* **764**, article id. 23 (2013)
- [17] Odaka, Hi., Khangulyan, D., Tanaka, Y., Watanabe, S., Takahashi, T. & Makishima, K.: “Short-term Variability of X-Rays from Accreting Neutron Star Vela X-1. I. *Suzaku* Observations”, *Astrophys. J.* **767**, article id. 70 (2013)
- [18] Gu, L., Gandhi, P., Inada, N., Kawaharada, M./Kodama, T., Konami, S., Nakazawa, K., Shimasaku, K., Xu, H. & Makishima, K.: “Probing of the Interactions Between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters from $z = 0.1$ to 0.9 ”, *Astrophys. J.* **767**, article id. 157 (2013)
- [19] Enoto, T., Nakagawa, Y. E., Sakamoto, T. & Makishima, K.: “Spectral comparison of weak short bursts to the persistent X-rays from the magnetar 1E 1547.0-5408 in its 2009 outburst”, *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* **427**, 2824 (2012)
- [20] Kishishita, T., Hiraga, J., & Uchiyama, Y.: “Non-thermal emission properties of the northwestern rim of supernova remnant RX J0852.0-4622”, *Astron. Astrophys* **551**, id.A132 (2013)
- [21] Tsuchiya, H., Hibino, K., Kawata, K., Hotta, N., Tateyama, N., Ohnishi, M., Takita, M., Chen, D., Huang, J., Miyasaka, M., Kondo, I., Takahashi, E., Shimoda, S., Yamada, Y., Lu, H., Zhang, J. L., Yu, X. X., Tan, Y. H., Nie, S. M., Munakata, K., Enoto, T. & Makishima, K. “Observation of thundercloud-related gamma rays and neutrons in Tibet”, *Phys. Rev. D* **85**, id. 092006 (2012)
- [22] Sasano, M., Nishioka, H., Okuyama S., Nakazawa K., Makishima K., Yamada S., Yuasa T., Kataoka J., Fukazawa Y., Hanabata Y. & Hayashi K.: “Geometry dependence of the light collection efficiency of BGO crystal scintillators read out by Avalanche Photo Diodes” *Nuc. Ins. Meth. A.*, in press (2013)
- [23] Gu, L., Gandhi, P., Inada, N., Kawaharada, M., Kodama, T., Konami, S., Nakazawa, K., Shimasaku, K., Xu, H., & Makishima, K.: “Search for Galaxy-ICM Interaction in Rich Clusters of Galaxies, 2013”, *Astron. Nachrichten*, in press (2013)
- (原著論文 (Refereed): BESS 関係)
 ※ 今年度でプロジェクト完了のため、過去年度の重要論文として、[24] および [26] を再掲します。
- [24] A. Yamamoto, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, H. Fuke, S. Haino, M. Imori, K. Izumi, T. Maeno, Y. Makida, H. Matsumoto, H. Matsunaga, F. B. McDonald, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, M. Motoki, J. Nishimura, M. Nozaki, S. Orito, J. F. Ormes, D. Righter, T. Saeki, T. Sanuki, M. Sasaki, & E.S. Seo, “BESS and its Future Prospect for Polar Long Duration Flight”, *Adv. Space Res.* **31**, 1253-1262, (2002)
- [25] A. Yamamoto, J.W. Mitchell, K. Yoshimura, K. Abe, H. Fuke, S. Haino, T. Hams, M. Hasegawa, A. Horikoshi, A. Itazaki, K.C. Kim, T. Kumazawa, A. Kusumoto, M.H. Lee, Y. Makida, S. Matsuda, Y. Matsukawa, K. Matsumoto, A.A. Moiseev, Z. Myers, J. Nishimura, M. Nozaki, R. Orito, J.F. Ormes, K. Sakai, M. Sasaki, E.S. Seo, Y. Shikaze, R. Shinodaf R.E. Streitmatter, J. Suzuki, Y. Takasugi, K. Takeuchi, K. Tanaka, T. Taniguchi, N. Thakur, T. Yamagami, & T. Yoshida, “Search for cosmic-ray antiproton origins and for cosmological antimatter with BESS ”, *Adv. Space Res.* **51**, 227-233 (2013)
- [26] S. Orito, T. Maeno, H. Matsunaga, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, M. Imori, M. Ishimoto, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, M. Motoki, J. Nishimura, M. Nozaki, J. Ormes, T. saeki, T. Sanuki, M. Sasaki, E.S. Seo, Y. Shikaze, T. Sonoda, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, I. Ueda, N. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida, & K. Yoshimura: “Precise measurement of cosmic-ray antiproton spectrum ”, *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 1078-1081 (2000)
- [27] Abe, K., Fuke, H., Haino, S., Hams, T., Hasegawa, M., Horikoshi, A., Kim, Kusumoto, A., Lee, M.H., Makida, Y., Matsuda, S., Matsukawa, Y., Mitchell, J.W., Nishimura, J., Nozaki, M., Orito, R., Ormes, J.F., Sakai, K., Sasaki, M., Seo, E.S., Shinoda, R., Streitmatter, R.E., Suzuki, J., Tanaka, K., Thakur, N., Yamagami, T., Yamamoto, A., Yoshida, T., & Yoshimura, K.: “Measurement of the Cosmic-Ray Antiproton Spectrum at Solar Minimum with a Long-duration Balloon Flight over Antarctica ”, *Phys. Rev. Lett.*, **108**, id.051102 (2012)
- [28] Abe, K., Fuke, H., Haino, S., Hams, T., Hasegawa, M., Horikoshi, A., Itazaki, A., Kim, Kumazawa, T., Kusumoto, A., Lee, M.H., Makida, Y., Matsuda, S., Matsukawa, Y., Matsumoto, K., Mitchell, J.W., Myers, Z., Nishimura, J., Nozaki, M., Orito, R., Ormes, J.F., Sakai, K., Sasaki, M., Seo, E.S., Shikaze, Y., Shinoda, R., Streitmatter, R.E., Suzuki, J., Takasugi, Y., Takeuchi, K., Tanaka, K., Thakur, N., Yamagami, T., Yamamoto, A., Yoshida, T., & Yoshimura, K.: “Search for Antihelium with the BESS-Polar Spectrometer ”, *Phys. Rev. Lett.*, **108**, id.131301 (2012)

(会議抄録)

- *proc SPIE: Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray*, **8443** (2012)
- [29] Kokubun M., Nakazawa K., Enoto T., Fukazawa Y., Kataoka J., Kawaharada M., Laurent P., Lebrun F., Limousin O., Makishima K., *et al.*: “The Hard X-ray Imager (HXI) for the ASTRO-H mission”, id 25
- [30] Watanabe S., Tajima H., Fukazawa Y., Blandford R., Enoto T., Kataoka J., Kawaharada M., Kokubun M., Laurent P., Lebrun F., Limousin O., Madejski G., Makishima K., *et al.*: “Soft gamma-ray detector for the ASTRO-H Mission”, id 26
- [31] Hagino K., Odaka H., Sato G., Watanabe S., Takeda S., Kokubun M., Fukuyama T., Saito S., Sato T., Ichinohe Yuto., Takahashi T., Nakano T., Nakazawa K., Makishima K., Tajima H., Tanaka T., Ishibashi K., Miyazawa T., Sakai M., Sakanobe K., Kato H., Takizawa S., & Uesugi K.: “Imaging and spectral performance of CdTe double-sided strip detectors for the hard x-ray imager onboard ASTRO-H”, id 55
- [32] Hayashida, K., Tsunemi, H., Tsuru, T. G., Dotani, T., Nakajima, H., Anabuki, N., Ozaki, M., Natsumari, C., Hiraga, J. S., (17 co-authors): “Soft x-ray imager (SXI) onboard ASTRO-H”, id 23
- [33] Takahashi T., *et al.*: “The ASTRO-H X-ray Observatory”, *proc SPIE: Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray*, **8443**, id 1Z
- [34] Nakazawa K., Takahashi T., Ichinohe Y., Takeda S., Tajima H., Kamae T., Kokubun M., Takashima T., Tashiro M., Tamagawa T., Terada Y., Nomachi M., Fukazawa Y., Makishima K., Mizuno T., Mitani T., Yoshimitsu T., & Watanabe S.: “Concept of a small satellite for sub-MeV and MeV all sky survey: the CAST mission”, id 0E
- その他の収録
- [35] Hagino K., Nakano T., Sato G., Takeda S., Odaka H., Watanabe S., Nakazawa K., Kokubun M., Takahashi T., and the HXI/SGD Team: “The Si/CdTe semiconductor detector for hard X-ray imager (HXI) onboard ASTRO-H”, *proc: HIGH ENERGY GAMMA-RAY ASTRONOMY: 5th International Meeting on High Energy Gamma-Ray Astronomy*, AIP Conf. Proc. Vol. 1505, pp. 809-812 (2012)
- [36] Makishima, K.: “What are being discovered by the forefront cosmic X-ray observations?”, *Proc. The 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies* (OMEG11), AIP Conf. Proc. Vol. 1484, pp.161-168 (refereed; 2012)
- [37] Kawai, K., Kohmura, T., Ikeda, S., Kaneko, K., watanabe, T., Tsunemi, H., Hayashida, K., Anabuki, N., Nakajima, H., Ueda, S., Tsuru, T. G., Dotani, T., Ozaki, M., Matsuta, K., Fujinaga, T., Kitamoto, S., Murakami, H., Hiraga, J., *et al.*: “Optical, UV and soft x-ray transmission of optical blocking layer for the x-ray CCD”, AIP Conf. Proc. Vol. 1427, pp.255-256 (2012)
- [38] , Ikeda, S., Kohmura, T., Kawai, K., Kaneko, K., Watanabe, T., Tsunemi, H., Hayashida, K., Anabuki, N., Nakajima, H., Ueda, S., Tsuru, T. G., Dotani, T., Ozaki, M., Matsuta, K., Fujinaga, T., Kitamoto, S., Murakami, H., Hiraga, J., *et al.*: “Soft X-ray response of the x-ray CCD camera directly coated with optical blocking layer”, AIP Conf. Proc. Vol. 1427, pp.253-254 (2012)
- (和文記事)
- [39] 吉村浩司、山本 明『素粒・宇宙論に挑む宇宙線反粒子観測』(日本物理学会誌、2012年12月号、p.844-849)
- [40] 牧島一夫、高橋忠幸:「今年で宇宙 X 線も発見 50 年」(日本物理学会誌、2012年12月号、p.854)
- [41] 牧島一夫:「理科教育:18 歳からの物理、高エネルギー天体物理学」(パリティ、2013年2月号)
- [42] P. Carlson 原著、牧島一夫(訳):「宇宙線の一世紀」(パリティ、2013年2月号)
- (学位論文)
- [43] 西田瑛量:「宇宙 X 線衛星 ASTRO-H に搭載する BGO アクティブシールドの製作手順とその検証」、修士学位论文
- (著書)
- [44] Yuasa, Takayuki: “Suzaku Studies of White Dwarf Stars and the Galactic X-ray Background Emission” (Springer, 2013 April). Springer Theses シリーズ、物理学分野で、日本から第1期3件の1つとして。
- <学術講演>
- (国際会議招待講演)
- [45] Makishima, K.: “How to Maximize the ASTRO-H Science: Seven Recipes” *The 8th ASTRO-H Science Working Group Meeting* (Cambridge, UK: 2012 July 9–11)
- [46] Mitchell, J., Yamamoto, A., & Yoshimura, K.: “Scientific highlights from the Balloon-Borne Experiment with a Superconducting Spectrometer Polar (BEEE-Polar), Results from BESS Experiment”, *The 39th COSPAR Scientific Assembly* (Mysore, India; 2012 July 14– 22)
- [47] Yamamoto, A. & Mitchell, J: “Search for Primary Antiparticles and Cosmological Antimatter with BESS” *SpacePart12* (CERN, 2012 November 5–7)
- [48] Makishima, K.: “New Insight into Magnetar Evolution – 10 Current Issues with Magnetars”, *Current Understanding and Future Study of Magnetars: Research Strategy in the ASTRO-H era* (Rikkyo University, 2012 September 1)

- [49] Makishima, K.: “From Sco X-1 to Magnetars: Past, Present, and Future of X-ray Studies of Neutron Stars”, *X-ray Astronomy: Toward the Next 50 Years* (Milano, 2012 October 1–5)
- [50] Makishima, K.: “Physics and Astrophysics of Compact Stars”, *Quarks to Universe in Computational Science* (Nara, 2012 December 13–16)
- (国際会議一般講演/ポスター)
- *ASTRO-H International Summer School 2012* (京都, 2012年8月21日, poster)
- [51] Kobayashi, S.: “Study of Holmberg IX X-1 with ASTRO-H HEXIS”
- [52] Murakami, H.: “Simulations of non-thermal supernova remnant G330.2+1.0”
- *X-ray Astronomy: Toward the Next 50 Years* (Milano, 2012 October 1–5)
- [53] Noda, H., Makishima, K., Nakazawa, K. & Yamada, S., “Model-Independent Decomposition of Broad-Band Suzaku spectra of AGNs into Primary Continuum and Secondary Components” (oral)
- [54] Torii, S., Yamada, S., Makishima, K., & Nakazawa, K.: “Observing Spectral Variations in the Soft State of Cyg X-1 with Suzaku” (poster)
- [55] Nakano, T., Makishima, K., Nakazawa, K., Uchiyama, H. & Enoto, T.: “Solving Age Discrepancy between Magnetars and Associated Supernova Remnants” (oral)
- [56] Sakurai, S., Nakazawa, K., Makishima, K., Yamada, S. & Matsuoka, M.: “Luminosity-Dependent Changes in the Accretion Geometry in Aquila X-1” (poster)
- その他の国際会議
- [57] Gu, L., Inada, N., Konami, S., Kodama, T., Nakazawa, K., Kawaharada, M., & Makishima, K.: “Search for Galaxy-ICM Interaction in Rich Clusters of Galaxies”, *Galaxy Clusters as Giant Cosmic Laboratories* (ESAC, Madrid; 2012 May 23)
- [58] Gu, L., Inada, N., Konami, S., Kodama, T., Nakazawa, K., Kawaharada, M., & Makishima, K.: “Search for Galaxy-ICM Interaction in Rich Clusters of Galaxies”, *220th American Astronomical Society Meeting* (Anchorage; 2012 June 10–14)
- [59] Hiraga, J. S., Abematsu, T., Tsunemi, H., Nishimura, T., Tutt, J., Holland, A., Suzuku, H., Muramatsu, M., Takagi, S., & Miyazaki, Y.: “Development of BI CCD by HPK for low energy X-rays” (poster), *SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation* (Amsterdam, The Netherlands; 2012 July 1–6)
- [60] Noda, H., Makishima, K., Yamada, S., Nakazawa, K. & Uchiyama, H.: “A novel picture for the central engine of Seyfert galaxies: multi-zone Comptonization corona near the central black hole”, *The 39th COSPAR Scientific Assembly* (Mysore, India; 2012 July 14–22; oral)
- [61] Sasano, M., Enoto, T., Makishima, K., Yamada, S., Nakazawa, K. & Yuasa, T.: “A Comparative Study of SFXTs and Long-Period Pulsars”, *The 39th COSPAR Scientific Assembly* (Mysore, India; 2012 July 14–22; oral)
- [62] Yamada, S., Makishima, K., Done, C., Noda, H., Torii, S. & Sakurai, S.: “Inhomogeneous coronae and a stable disk of Cyg X-1 revealed with *Suzaku*”, *Half a Century of X-ray Astronomy* (Mykonos Island, Greece; 2012 September 17–21)
- [63] Noda, H.: “The Origin of Soft and Hard X-ray Excesses in Active Galactic Nuclei” *Super Massive Black Holes in the Universe: The Era of the HSC Surveys* (Ehime; 2012 December 17–20; poster)
- [64] Kobayashi, S., Makishima, K., Nakazawa, K., Noda, H. & Isobe, N.: “Study of accretion states with y-parameter variations in the ultra luminous X-ray source Holmberg IX X-1” *Spectral/timing properties of accreting objects: from X-ray binaries to AGN* (ESAC, Madrid; 2013 April 3)
- (国内会議/招待講演)
- [65] 牧島一夫: 「中性子星およびマグネータの観測の現状」、ハドロン物質の諸相 (京大基研、2012年8月30日～9月1日)
- [66] 牧島一夫: 「宇宙 X 線観測の 50 年～50 years of cosmic X-ray observations」、日本物理学会・秋季分科会 (2012年9月12、京都産業大学)、12pSE-1
- [67] 牧島一夫: 「X線観測から中性子星に迫る～宇宙 X 線 50 年の歴史を絡めて」、新学術領域研究「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」キックオフシンポジウム (理化学研究所、2012年10月26日～27日)
- [68] 牧島一夫: 「宇宙 X 線の 50 年: (1)」、理研シンポジウム「宇宙線の発見から 100 年、X 線天体の発見から 50 年」(理化学研究所、2012年11月27日)
- [69] 牧島一夫: 「なぜ宇宙に出るのか～その動機と方法～」、理研シンポジウム「きぼう」に夢を乗せて (2) (理化学研究所、2013年3月7日)
- [70] 高橋弘充、桜井壮希: 「LMXB の High/Soft 状態における変動とその物理的な描像」、コンパクト星連星の多様性と進化 (理化学研究所、2013年3月13日)
- (国内会議/一般講演)
- 日本物理学会・秋季分科会 (2012年9月11～14日、京都産業大学)
- [71] 吉村浩司 他 BESS Collaboration: 「BESS-Polar II 実験による宇宙線反重陽子探索 (2)」、12aSP-4
- [72] 櫻井壮希、中澤知洋、牧島一夫、山田真也、松岡勝、高橋弘充: 「『すざく』で解明された弱磁場中性子星 Aql X-1 における降着流の幾何」、14aSP-2

- [73] 深沢泰司, 田島宏康, 渡辺伸, 内山秀樹, 内山泰伸, 榎戸輝揚, 太田方之, 大野雅功, 小高裕和, 片岡淳, 川原田円, 国分紀秀, 佐藤悟朗, 佐藤理江, 高橋忠幸, 高橋弘充, 武田伸一郎, 田代信, 田中孝明, 寺田幸功, 中澤知洋, 中森健之, Roger Blandford, 牧島一夫ほか SGD チーム: 「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器の開発状況」, 14aSP-9
- [74] 鶴剛, 田中孝明, 信川正順, 内田裕之, 常深博, 林田清, 中嶋大, 穴吹直久, 薙野綾, 木村公, 堂谷忠靖, 尾崎正伸, 夏苺権, 富田洋, 幸村孝由, 村上弘志, 平賀純子ほか: 「X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ SXI の開発の現状 IV」, 14aSP-12
- 日本天文学会・秋季年会 (2012 年 9 月 19 日~21 日, 大分大学)
- [75] 鳥井 俊輔, 牧島 一夫, 中澤 知洋, 山田 真也: 「『すざく』で観る Cyg X-1 のソフト状態におけるスペクトルの時間変動」, J07a
- [76] 小林翔悟, 牧島一夫, 中澤知洋, 野田博文 (東大 理), 磯部直樹: 「『すざく』衛星による ULX 天体 HOLMBERG IX X-1 の観測」, J09a
- [77] 神頭知美, 寺田幸功, 田代信, 山田真也, 馬場彩, 榎戸輝揚, 森浩二, 深沢泰司, 田中康之, 湯浅孝行, 柴田晋平, 牧島一夫: 「『すざく』衛星搭載 HXD による Crab の変動追跡 (3)」, J35a
- [78] 岩橋孝典, 榎戸輝揚, 山田真也, 西岡博之, 玉川 徹, 牧島一夫: 「アウトバーストから 1 年半経過したマグネター 1E 1547.0-5408 の『すざく』衛星による追観測」, J37a
- [79] 中川友進, 山岡和貴, 牧島一夫, 榎戸輝揚, 三原建弘, 杉崎 睦, 坂本貴紀, 吉田篤正, Poshak Gandhi, 田代 信, 森井幹雄, Kevin Hurley: 「『すざく』衛星による活動期の AXP, 4U0142+614 の観測的研究」, J47a
- [80] 笹野 理, 中澤知洋, 牧島一夫, 山本堂之, 榎戸輝揚, 山田真也: 「『すざく』による長周期バルサー 4U 0114+65 の研究」, J52a
- [81] 中野俊男, 牧島一夫, 中澤知洋, 内山 秀樹, 平賀順子, 金田英宏: 「『すざく』衛星による超新星残骸 CTB109 の広範囲観測」, K19a
- [82] 村上浩章, 牧島一夫, 中澤知洋, 内山秀樹: 「超新星残骸 G330.2+1.0 における電子の加速限界の推定と熱的成分の探査」, Q34a
- [83] 野田博文, 牧島一夫, 山田真也, 中澤知洋: 「X 線時間変動のみから抽出する AGN 反射スペクトル: 『すざく』の結果」, S38a
- [84] 表尚平, 牧島一夫, 中澤知洋, 野田博文, 平木一至, 深沢泰司, 高橋弘充, 大野雅功, 吉川瑛文, 山田真也, 玉川徹: 「『すざく』による明るいセイファート銀河 NGC 4151 の鉄吸収線の研究」, S39a
- [85] Gu, L., Inada, N., Konami, S., Kodama, T., Nakazawa, K., Kawaharada, M., & Makishima, K. “Investigation of Interactions Between ICM and Cluster Galaxies III”, T04a
- [86] 田中孝明, 鶴 剛, 信川正順, 内田裕之, 常深 博, 林田清, 中嶋 大, 穴吹 直久, 薙野 綾, 木村 公, 堂谷忠靖, 尾崎 正伸, 夏苺 権, 富田 洋, 幸村 孝由, 村上弘志, 平賀 純子ほか: 「ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ (SXI) の開発の現状」, W03a
- [87] 薙野綾, 林田清, 中嶋大, 穴吹直久, 上田周太郎, 菅哲, 常深博, 尾崎正伸, 夏苺権, 富田洋, 堂谷忠靖, John Doty, 鶴 剛, 田中孝明, 信川正順, 内田裕之, 幸村孝由, 村上弘志, 平賀純子ほか: 「ASTRO-H 搭載 SXI 用アナログエレクトロニクスの開発」, W06b
- [88] 中澤知洋, 国分紀秀, 川原田 円, 佐藤悟朗, 牧島一夫, 内山秀樹, ほか ASTRO-H HXI チーム: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の現状: FM 設計」, W15a
- 第 13 回宇宙科学シンポジウム (宇宙科学研究所, 2013 年 1 月 7~8 日; ポスター)
- [89] 鳥井 俊輔, 野田 博文, 表 尚平, 小林 翔悟, 中澤 知洋, 牧島 一夫: 「『すざく』によるブラックホール降着流の包括的研究」
- [90] 中島真也, 劉周強, 信川正順, 内山秀樹, 鶴剛, 小山勝二: 「すざく衛星で見る銀河系中心の高エネルギー現象」,
- [91] 笹野 理, 桜井壮希, 中野俊男, 村上浩章, 牧島一夫: 「『すざく』による中性子星と SNR の研究」
- [92] 国分紀秀ほか HXI チーム: 「ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の開発」
- [93] 渡辺 伸ほか ASTRO-H SGD チーム: 「ASTRO-H 軟ガンマ線検出器 (SGD)」
- 日本天文学会・春季年会 (2013 年 3 月 20 日~23 日, 埼玉大学)
- [94] 野田博文, 牧島一夫, 山田真也, 中澤知洋: 「時間変動から分解する巨大ブラックホール近傍からの複数の一次 X 線放射」, B23a
- [95] Zhang, Z.: “LMXB populations in galaxy outskirts: evidence for natal neutron star kicks”, J01a
- [96] 櫻井壮希, 中澤知洋, 牧島一夫, 杉崎睦, 松岡勝: 「低質量 X 線連星 MAXI J0556-332 の X 線スペクトルの時間変動とその放射モデル」, J31c
- [97] 鳥井俊輔, 牧島一夫, 山岡和貴, 山田真也: 「『すざく』による低質量中性子星連星 GS1826-238 の観測」, J35a
- [98] 小林翔悟, 中澤知洋, 野田博文, 牧島一夫, 磯部直樹: 「『すざく』による ULX 天体 Holmberg IX X-1 の観測 (2)」, J60a
- [99] 牧島一夫, 榎戸輝揚: 「マグネター 4U 0142+61 における自由歳差運動の徴候」, J72a
- [100] 村上 浩章, 内山 秀樹, 中澤 知洋, 牧島 一夫: 「『すざく』衛星による超新星残骸 G330.2+1.0 の中心天体の観測」, J73a
- [101] 内山秀樹, 村上浩章, 中澤和洋, 牧島一夫 『すざく』による銀河中心超新星残骸 Sgr A East から的高階電離 Mn・Cr K α 輝線の発見」, K03b

- [102] Gu, L., Yagi, M., Yoshida, M., Nakazawa, K., & Makishima, K.: “X-ray View of the Ha/HI Tails in the Virgo Cluster”, Q12a
- [103] 鶴剛、劉周強、信川正順、中島真也、小山勝二、内山秀樹: 『『宇宙X線トモグラフィ』を用いた天の川銀河中心領域の巨大分子雲の三次元位置と SgrA* の過去の活動性の解明』、Q15a
- [104] 表尚平、中澤知洋、野田博文、牧島一夫、平木一至、深沢泰司、高橋弘充、大野雅功、吉川瑛文、山田真也、玉川徹: 『『すざく』によるセイファート銀河 NGC 4151 の明暗状態の比較』、S09a
- [105] 中澤 知洋、国分 紀秀、川原田 円、佐藤 悟朗、牧島一夫、内山 秀樹、ほか HXI チーム: 『ASTRO-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器 (HXI) の現状: EM 試験性能と FM 製造』、W54a
- [106] 平賀純子、常深博、林田清、穴吹直久、中嶋大、薙野綾、堂谷忠靖、尾崎正伸、富田洋、夏苺権、木村公、鶴剛、田中孝明ほか: 『Astro-H 搭載軟 X 線撮像検出器 SXI の開発の現状』、W57a
- [107] 信川久実子、鶴 剛、田中孝明、内田裕之、信川正順、大西隆雄、中島真也、菅原隆介、八隅真人、常深博、林田清、中嶋大、穴吹直久、薙野綾、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏苺権、富田洋、廿日出勇、山内誠、森浩二、幸村孝由、村上弘志、平賀純子ほか: 『ASTRO-H 搭載軟 X 線撮像検出器 (SXI) : EM システムを用いた性能評価と機能試験』、W58b
- [108] 佐々木将軍、常深博、林田清、中嶋大、穴吹直久、薙野綾、上田周太朗、菅裕哲、定本真明、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏苺権、富田洋、井澤正治、近藤恵介、幸村孝由、池田翔馬、金子健太、矢部一成、鶴剛、田中孝明、内田裕之、信川正順、大西隆雄、村上弘志、廿日出勇、山内誠、森浩二、平賀純子ほか: 『ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ (SXI) の軟 X 線応答の測定』、W59b
- [109] 西田瑛量、牧島一夫、中澤知洋、内山秀樹、笹野理、村上浩章ほか: 『ASTRO-H 衛星搭載装置のアクティブシールド用 BGO 試験の現状 (2)』、W65b
- [110] 後藤国広、松岡正之、徳田伸矢、高橋弘充、大野雅功、深沢泰司、湯浅孝行、佐藤悟朗、渡辺伸、国分紀秀、高橋忠幸、鳥井俊輔、中澤知洋、齋藤龍彦、中森健之、片岡淳、田島宏康ほか: 『ASTRO-H 衛星搭載 BGO アクティブシールドの信号処理におけるデジタルフィルタの改良』、W64b
- 日本物理学会・春季大会 (2013 年 3 月 26~29 日、広島大学)
- [111] 林田清、常深博、中嶋大、穴吹直久、薙野綾、鶴 剛、田中孝明、信川正順、内田裕之、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏苺権、富田洋、木村公、幸村孝由、村上弘志、平賀純子ほか: 『X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ SXI の開発の現状 V』、27pBE-4
- [112] 水野恒史ほか (内山秀樹、中澤知洋、牧島一夫を含む): 『ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器の開発 (2012 年度後半)』、27pBE-5
- [113] 徳田伸矢、後藤国広、大野雅功、高橋弘充、深沢泰司、鳥井俊輔、笹野理、齋藤龍彦、渡辺伸、山岡和貴、湯浅孝行、国分紀秀、米徳大輔、中澤知洋、牧島一夫、田島宏康ほか: 『次期 X 線衛星 ASTRO-H 搭載 BGO シールド部の信号処理ファームウェアの動作検証』、27pBE-6
- [114] 木村太輔、田邊利明、水野恒史、深沢泰司、田島宏康、牧島一夫、中澤知洋、高橋忠幸、太田方之、他 HXI/SGD チーム: 『衛星搭載軟ガンマ線検出器用高精度金属コリメータの性能評価 (2)』、27pBE-9
- [115] 太田方之、野田博文、中澤知洋ほか: 『X 線衛星 ASTRO-H 搭載 軟ガンマ線検出器の熱設計検証試験』、27pBE-11
- その他の国内研究集会
- [116] 野田 博文: 『X 線時間変動を用いた AGN 一次コンプトン成分および反射スペクトルの抽出と新解釈』、松山ブラックホールワークショップ 2012 ~ASTRO-H 衛星で目指すブラックホール研究の新展開~ (愛媛大学、2012 年 6 月 20 日~23 日)
- [117] 牧島一夫: 『『すざく』から ASTRO-H へ』、ビッグバンセンター第 12 回サマースクール (裏磐梯国民休暇村、2011 年 7 月 24~26 日)
- [118] 内山秀樹: 『X 線天文公開 FITS データの紹介とその教材としての利用の可能性』、平成 24 年度天体画像教育利用ワークショップ (仙台市天文台 2013 年 1 月 13 日)
- [119] 中澤知洋ほか CAST WG: 『高感度ガンマ線望遠鏡 CAST』、第 3 回小型科学衛星シンポジウム (宇宙科学研究所、2013 年 3 月 7-8 日)
- (セミナー、談話会、集中講義)
- [120] Gu, L., Inada, N., Konami, S., Kodama, T., Nakazawa, K., Kawaharada, M. & Makishima, K.: “Evolution of Galaxy Light and ICM Distributions in Galaxy Clusters”, Department of Physics Colloquium, University of Alabama (2012 June 20)
- [121] 野田 博文: 『X 線観測で明らかにする AGN セントラルエンジンの新描像』、東北大学天文学専攻談話会 (2012 年 5 月 7 日)
- [122] 牧島一夫: 『『すざく』から ASTRO-H へ~X 線天文学の 50 年』、国立天文台談話会 (2012 年 11 月 2 日)
- [123] 牧島一夫: 『コンパクト天体の X 線物理学』奈良女子大学理学部物理学科大学院集中講義 (2012 年 11 月 21 日~24 日)
- [124] Gu, L., Gandhi, P., Inada, N., Kawaharada, M., Kodama, T., Konami, S., Nakazawa, K., Shimasaku, K., Xu, H. & Makishima, K.: Interaction Between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters, Tamagawa Lab seminar, RIKEN (2013 March 14)
- (一般向け講演、新聞記者発表)
- [125] 牧島一夫: 『天の川にひそむ多くの謎』、ビッグバン宇宙国際センター 2012 七夕講演会 (小柴ホール、2012 年 7 月 5 日)
- [126] 牧島一夫: 『宇宙空間から宇宙を見る』、日本天文学会公開講演会 (埼玉大学、2013 年 3 月 24 日)

- [127] 山田真也、嶺重 慎、根來 均、牧島一夫：新聞記者
発表「ブラックホールに落ち込む最後の 1/100 秒の
解明へ～ ガスが最後に放つ高エネルギー X 線を初め
て捉えた！ ～」、(理化学研究所、京都大学、日本大
学、東京大学：2013 年 4 月 14 日)

III

参考資料: RESCEU 第3回外部評価資料

A 参考資料: RESCEU 第3回外部評価資料説明

2013年1月8日～10日におこなわれたRESCEU第3回外部評価において、外部評価委員に参考資料として配布された資料の“第0章 RESCEU Overview”を以下に再掲する。

注意: 1 図 2.2 において §0.3.2 などとあるのは、B.3.2 などのことである。

注意: 2 B.7 において、§6 などとあるのは、本年次報告に未掲載の外部評委員へ配布された資料の第 6 節を参照している。

B RESCEU OVERVIEW

B.1 History

RESCEU, Research Center for the Early Universe (ビッグバン宇宙国際研究センター), was established in April 1999, in the Graduate School of Science at the University of Tokyo. It is a successor to a more informal research organization with the same name (和名は初期宇宙研究センター), which was selected in 1995 by the Center-of-Excellence (COE) program of the Japan's Ministry of Education, Science, Sports and Culture. RESCEU is the last research center of the Graduate School of Science that was established before the University became a corporation.

RESCEU performs theoretical and observational researches of the early Universe, toward the construction of a unified picture of its origin and evolution. We combine “top down” approaches starting from first-principle theories, including in particular Big Bang and Inflationary cosmology (Early Universe Cosmology Division and Particle Cosmology Division; Fig. 2.2), with “bottom-up” ones using data from the forefront experiments and observatories, including wide coverage of all electromagnetic frequencies (in Early Universe Data Analysis Division; Fig. 2.2). In addition, we invite a limited number of researchers, mainly from the Department of Physics, the Department of Astronomy, and the Institute of Astronomy, to join us as *associate members* (§ B.3.4).

In the fiscal year (FY) of 2009 when RESCEU became 10 years old, we made some major rearrangement of *projects* (§ B.4), together with some updates in *associate RESCEU members* (§ B.3.4). Late in the same FY, Junko S. HIRAGA joined us (Fig. 2.3) through a high competition, as one of the three new feminine assistant professors recruited by the Graduate School of Science. Thanks to the help by the Department of Physics, we have also succeeded in obtaining a new assistant professor position in FY2012, to which Teruaki SUYAMA was appointed (Fig. 2.3).

B.2 Research Objectives

In conducting our mission described above, RESCEU currently has the following two slogans. The meaning of the first one is given in Fig. 2.1.

1. To understand the universe through three domains, namely, baryons, dark matter, and dark energy.
2. To serve as an Eastern-Hemisphere Hub for astrophysics and cosmology.

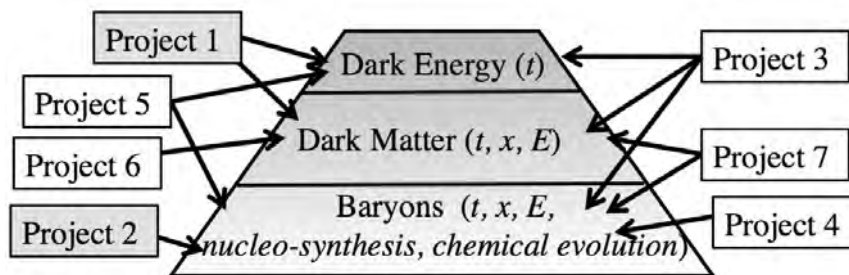


図 2.1: The research strategy of RESCEU, where t and x mean time and space, respectively. See § B.4 for projects; gray boxes are theoretical, while white ones are observational and/or experimental.

B.3 Organization

B.3.1 Organization structure

Figure 2.2 illustrates the structure of RESCEU, as a member of the Graduate School of Science.

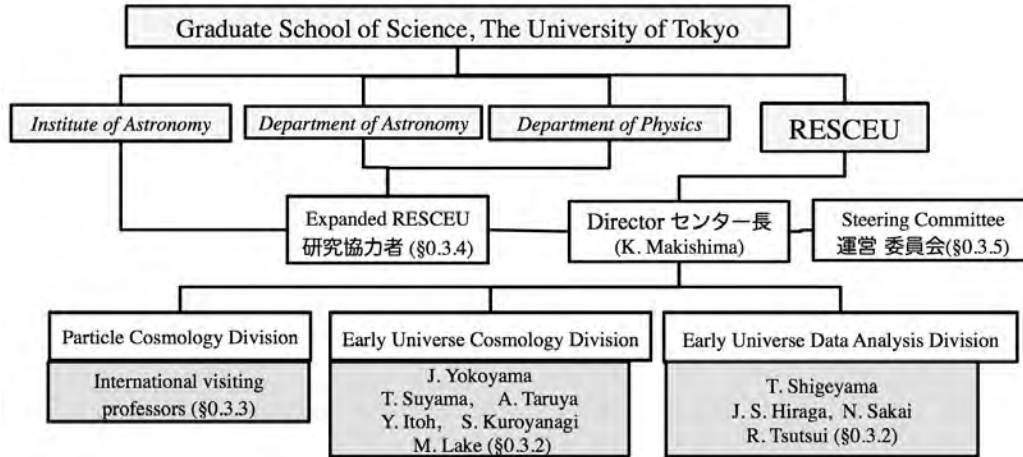


図 2.2: The RESCEU organization structure.

B.3.2 RESCEU members (staff)

In Fig. 2.3, the RESCEU staff members (called *proper members* to distinguish from *associate members* described in § B.3.4) are given as a function of year. In addition to those shown here, RESCEU comprises two secretaries (Ms. Sayur NAGANO and Ms. Mieko MINAMISAWA), and about 10 graduate students in the Department of Physics and the Department of Astronomy.

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Director	K. Sato (joint)		K. Makishima (joint) 牧島一夫					
Professor	Jun-ichi Yokoyama 横山順一							
Assoc.Prof.	Toshikazu Shigeyama 茂山俊和							
Assist.Pr.1								New Post⇒ T. Suyama 須山輝明
Assist.Pr.2						New Post⇒ Junko S. Hiraga 平賀純子		
Assist.Pr.3	A. Taruya 樽家篤史							
Assist.Pr.4	S. Mukoyama 向山信治			N. Sakai 坂井南美				
Sp.As.Pr.								Converted from PD⇒ Y. Itoh
Post Doctoral Fellows	S. Kobayashi	T. Suda	H. Hiramatsu	T. Takiwaki	H. Ito	Ts. Kobayashi	Ta. Kobayashi	R. Tsutsui
			K. Sugimoto	N. Kawanaka	N. Inada	N. Yasutake		
		T. Kogo	R. Nagata	K. Nakamura	Y. Takamizu	K. Kamada	S. Kuroyamnagi	
							Mat Lake	

図 2.3: The RESCEU members. *Italics* indicate those working essentially in Physics department. Red means women, and blue international members. Visiting professors are listed separately in § B.3.3.

B.3.3 International visiting professors

One of the outstanding features of RESCEU is that it has a position (with a built-in budget) for an international visiting professor. We can hence invite active overseas researchers to stay at RESCEU and get payed, for typical lengths of 1 through 3 months. Since FY2007, the use of this budget has become rather flexible. Below is the list of these visiting members over the last 8 years. Some of them have repeatedly accepted our invitation, and contributed very much to the RESCEU activity. They also serve, if available, as lectures for our summer school (§ B.5.3).

表 2.3 a: List of international visiting professors since 2005.

FY2005	9/22–1/17	Bernard Carr	Queen Mary London Univ., Professor
FY2006	9/1–11/30	Sergey I. Blinnikov	Inst. Theor. & Exp. Phys. Moscow, Head Scientist
FY2007	9/1–9/30	Nemanja Kaloper	California Univ. Davis, Professor
	10/1–12/25	Sergey I. Blinnikov	Inst. Theor. & Exp. Phys. Moscow, Head Scientist
	1/7–3/31	Paolo Alberto Mazzali	Osservatorio Astronomico di Trieste, Professor
FY2008	4/25–5/24	Ewald Mueller	Max-Planck Inst. Astrophys., Director of research
	5/21–6/20	Veniamin Berezhinsky	Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Director
	12/5–3/30	Alexei A. Starobinsky	Landau Inst. for Theor. Phys., Major Research Scientist
FY2009	6/15–8/14	徐海光 Haiguang Xu	Shanghai Jiao Tong University, Professor
	3/30–9/5	Alexei A. Starobinsky	Landau Inst. for Theor. Phys., Major Research Scientist
	10/31–11/3	Alexei A. Starobinsky	Landau Inst. for Theor. Phys., Major Research Scientist
	1/4–3/31	Bernard Carr	Queen Mary London Univ., Professor
FY2010	8/1–9/29	Massimo Meneghetti	Bologna University, Associate Professor
	10/1–11/10	Alexei A. Starobinsky	Landau Inst. for Theor. Phys., Major Research Scientist
	1/18–3/30	Alexei A. Starobinsky	Landau Inst. for Theor. Phys., Major Research Scientist
	1/21–3/4	Edwin L. Turner	Princeton University, Professor
FY2011	4/18–6/6	Alexander Polnarev	Queen Mary London Univ., Reader in Math & Astr.
	5/12–6/15	Edwin L. Turner	Princeton University, Professor
FY2012	6/25–7/26	Shirley Ho	Carnegie Mellon University, Assistant Professor
	9/18–11/29	Jerome Martin	CNRS (France), Director of Research
	11/1–12/14	Alexei A. Starobinsky	Landau Inst. for Theor. Phys., Major Research Scientist

B.3.4 Expanded RESCEU (研究協力者集団)

In addition to the visiting professorship described above, another special and important aspect of RESCEU is the concept of *expanded RESCEU* (研究協力者集団) illustrated in Fig. 2.4. In addition to the proper RESCEU members described in § B.3.2, it comprises about 10 full/associate/assistant professors, to be called *associate RESCEU members* (研究協力者), who are mainly affiliated to the Department of Physics, the Department of Astronomy, and the Institute of Astronomy. This scheme reinforces the activity of RESCEU, which by itself is a very small organization. It will also provide a pilot study for future university restructuring, when we will be even more limited by human and financial resources. This booklet does not provide personal data of the associate RESCEU members, since their information is already given by their respective Departments.

Under close collaboration with the proper RESCEU members (§ B.3.2; Fig. 2.3), the associated members carry out the overall research as detailed in § B.4. To accomplish this mission, the associate members are allowed to use part of the RESCEU budget (§ B.6). The associate members are selected under simple internal rules based on discussion in the *expanded RESCEU*, and are approved by the *steering committee* (運営委員会) described in § B.3.5. Former associate members are given in § B.4.

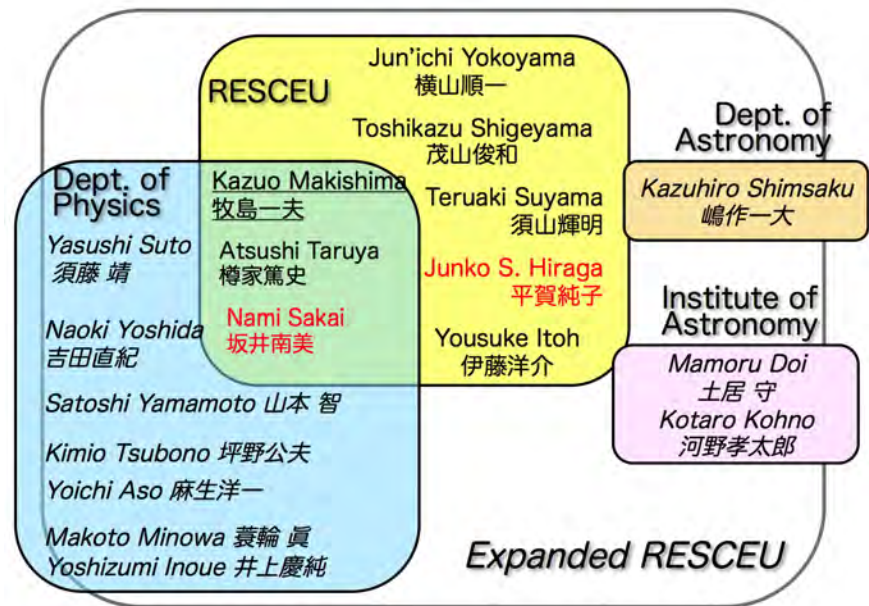


図 2.4: The expanded RESCEU structure. Associate members are indicated in *italic*. Red indicates women.

B.3.5 Steering committee (運営委員会)

The highest-level decision of RESCEU is done by its *steering committee* (運営委員会), consisting of about 7 members from both inside and outside the Graduate School of Science. The committee approves the use of RESCEU budget, as well as personnel affairs including appointments/disappointments of associate RESCEU members. The committee also give advices as to future plans and directions of RESCEU. The current committee members are given in Table 2.3 b.

表 2.3 b: The RESCEU steering committee as of FY2012.

Name	Title / Position	Term (FY)
Hiroaki AIHARA 相原博昭	Dean, Graduate School of Science 東京大学 理学系研究科長・教授	2012-2013 <i>ex officio</i>
Takaaki KAJITA 梶田隆章	Director, Institute for Cosmic Ray Research 東京大学 宇宙線研究所長・教授	2011-2012
Ryugo HAYANO 早野龍五	Professor, Department of Physics 理学系研究科 物理学専攻 教授	2012-2013
Yuzuru YOSHII 吉井 譲	Director, Institute of Astronomy 理学系研究科 天文学教育研究センター長・教授	2012-2013
Kei ONAKA 尾中 敬	Professor, Department of Astronomy 理学系研究科 天文学専攻 教授	2012-2013
Kazuo MAKISHIMA 牧島一夫	Director, RESCEU ビッグバン宇宙国際研究センター長 (兼) 理学系研究科 物理学専攻 教授	2011-2012
Jun'ichi YOKOYAMA 横山順一	Professor, RESCEU ビッグバン宇宙国際研究センター 教授	2012-2013

B.4 RESCEU projects

RESCEU, in its *expanded* form, carries out its mission in a certain number of *projects*. As shown in Fig. 2.5, so far there have been 7 projects. Their detailed description is given in § 1 through § 7 of this booklet. From late FY2012 or the beginning of FY2013, we will add another project, on the study of extra-solar Pplanets (project title tentative; § B.7.2). Former associate members (full and associated professors only) are listed in table 2.4 c.

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Project 1	Very Early Universe and Large-scale Structure (<u>Early Universe Cosmology Division</u> , <u>Particle Cosmology Division</u>)							
Project 2	Theory of Galaxy Evolution (<u>Early Universe Data Analysis Division</u>)							
Project 3	Study of Galaxies and Structure of the Universe (*)				Formation and Evolution of Galaxies and Clusters of Galaxies			
Project 4	Submillimeter-Wave Observation				<i>Chemical Evolution from Protostellar Cores to Protoplanetary Disks</i>			
					<i>Formation and Evolution of Massive Galaxies and Super Massive Blackholes</i>			
Project 5	Optical to Near-Infrared Observations of Active Galactic Nuclei (#)				Search for Gravitational Waves			
Project 6	Direct Search for Dark Matter and Solar Axion (&)							
Project 7	<i>Cosmic X-ray and gamma-ray studies with scientific satellites</i>							
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> Researches using Space-Borne Instruments </div>							
	<i>Balloon observations of cosmic anti-protons (\$) </i>							

*: It was actually Project 6, but shown in this way because its continuation has become Project 3 since 2009.

#: It was actually Project 3, but shown at this position to make the figure simpler.

&: It was called Project 5 till 2009.

§: This sub-project will terminate at the end of FY2012.

图 2.5: History of the RESCEU projects. *Italics* show sub-project names, and underlines indicate the corresponding Division names in Fig. 2.2.

表 2.4 c: Former associate RESCEU members.

Ken'ichi NOMOTO	Dept. Astronomy	1999–2007	
Tsutomu YANAGIDA	Dept. Physics	1999–2007	
Yuzuru YOSHII	Inst. Astronomy	1999–2008	
Katsuhiko SATO	Dept. Physics	1999–2008	former Director
Sadanori OKAMURA	Dept. Astronomy	1999–2011	

B.5 RESCEU Activity

B.5.1 Annual activities

To represent annual RESCEU activities, Fig. 2.6 shows those in FY2012. Like the seven projects, these activities are mostly conducted on the scale of the *expanded RESCEU*.

図 2.6: Annual activities of RESCEU in 2012. Stars indicate non-regular ones, while *italics* show Japan Physical Society and Astronomical Society of Japan annual meetings to which many RESCEU members attend.

	Research	Education	Outreach
April			
May			
June	Expanded RESCEU Meeting (1)		
July		Summer School	Star-Festival Lecture
August			Open Campus Lecture
September	<i>(JPS & ASJ meetings)</i>	Kagura Data Analysis School*	
October			
November	RESCEU Symposium* Obs. Cosmology WS*		Lecture by Prof. Brian Schmidt*
December			Christmas Lecture
January	Expanded RESCEU Meeting (2)		
February			
March	<i>(JPS & ASJ meetings)</i>		

1. “The Cosmological Constant and the Evolution of the Universe” (7-10 November, 1995)
2. “Dark Matter in the Universe and its Direct Detection” (26-28 November, 1996)
3. “Particle Cosmology” (11-13 November, 1997)
4. “The Birth and Evolution of the Universe” (16-19 November, 1999)
5. “New Trends in Theoretical and Observational Cosmology” (13-16 November, 2001)
6. “Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology” (4-7 November, 2003)
7. “Astroparticle Physics and Cosmology” (11-14 November, 2008)
8. “Resceu/JGRG22 Symp. on General Relativity and Gravitation” (12-16 November, 2012)

表 2.5 d: List of the RESCEU international symposia.

B.5.2 International symposia

Exactly speaking, the name of RESCEU in Japanese, ビッグバン宇宙国際研究センター, means *International Research Center for Big-Bang Universe*. As represented by this name, RESCEU is a highly international organization, hosting over the past 8 years approximately 200 foreign short-term visitors (besides those listed in Table 2.3 a). This characteristic is also featured by the series of RESCEU international symposia, listed in Table 2.5 d. Each symposium was attended typically by 100–200 participants, including a considerable fraction from abroad.



図 2.7: A group photo on the occasion of the 7th RESCEU Internatioal Symposium, co-sponsored by the JSPS Core-to-Core program “DENET” (§ B.6.3). This particular symposium commemorated the retirement of professor Katsuhiko Sato, the former RESCEU director.

B.5.3 RESCEU summer schools

RESCEU is a research, rather than an educational, organization. Nevertheless, the forefront research activity conducted in (the expanded) RESCEU, together with many foreign visitors and guests, endows RESCEU with an ideal environment for graduate education. This is the reason why RESCEU has about 10 graduate students, each belonging to graduate course in either physics or astronomy. As a highlight of such educational effort, we annually hold a *RESCEU summer school*, often inviting foreign researchers (including the visiting professors) as lecturers. To realize retreat-type environments, the summer schools are held, as shown in Fig. 2.8, in places away from the busiest city areas.

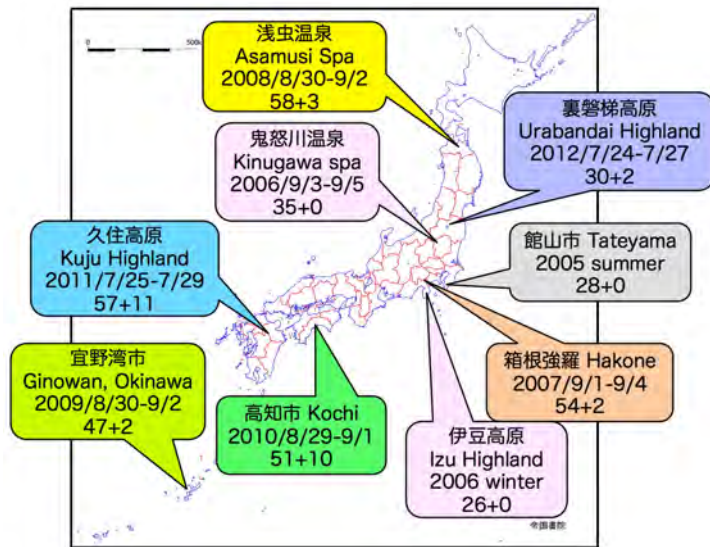


図 2.8: Locations and dates of the RESCEU summer school. The numbers indicate domestic and overseas participants. The 2012 location was purposely chosen to be in Fukushima prefecture, to help early recovery.



図 2.9: The poster for the first RESCEU Christmas Lecture, created by Dr. M. Nakashima (then a graduate student at RESCEU).

B.5.4 Outreach activities

Our research fields, including cosmology, astronomy, and space researches, provide one of the most appealing themes to general public. Being aware of this fact, RESCEU puts great emphasis on outreach activities, mainly in the form of public pictures. As summarized in Table 2.5 e, we have been conducting the following three regular outreach efforts.

1. Participation to the annual Star-Festival Lecture Campaign (全国同時七夕講演会), which is an event of near-simultaneous lectures all over Japan. It started as a part of “International Year of Astronomy 2009”, and continues afterwards. Our lectures on this occasion are meant for young generation, particularly junior-high-school students.
2. The University Open Campus. Usually held in summer, the graduate School of Science always attracts some 4,000 comers who are mostly high school students. We usually provide three lectures, which are so popular that the lecture hall always becomes full to the doors.
3. Christmas lecture. This is a unique RESCEU attempt, which started in 2009. It is aimed mainly for under-graduate students in nearby universities, including of course our own. Figure 2.9 show the poster used to announce the first Christmas Lecture.

When multiple lectures are presented, we plan so that one is from pure theoretical works, another from observational astronomy, and the other from experimental physics. Lecturers are selected from both the proper and associate RESCEU members.

表 2.5 e: Public lectures sponsored by RESCEU. *Italic* means future plans.

2008	7.31	Open Campus	Y. Suto #	「宇宙は何からできている？」
			J. Yokoyama	「宇宙をあやつる暗黒エネルギー」
2009	7.7	Star Festival	Y. Suto #	「ガリレオが見た宇宙, 見なかった宇宙」
	8.6	Open Campus*	Y. Suto #	「宇宙は何からできている？」
T. Shigeyama			「元素はいつどこで出来たのか」	
J. Yokoyama			「宇宙をあやつる暗黒エネルギー」	
K. Makishima			「科学衛星でブラックホールを探る」	
12.25	Christmas	J. Yokoyama	「ビッグバンは見えてきたか」	
		Nami Sakai	「星の誕生と化学進化」	
		Y. Suto #	「太陽系外惑星から宇宙生物学へ」	
2010	7.7	Star Festival	S. Okamura#	「宇宙ってなんだか知っていますか？」
	8.4	Open Campus*	J. Yokoyama	「宇宙をあやつる暗黒エネルギー」
K. Kohno#			「観測により迫る宇宙の謎」	
K. Tsubono#			「重力波で宇宙を見る-検出実験の現状-」	
12. 22	Christmas	A. Taruya	「宇宙のものさし、バリオン音響振動」	
		T. Shigeyama	「地球と恒星の密接な関係」	
		Junko S. Hiraga	「X 線で観る宇宙」	
20011	7.7	Star Festival	Nami Sakai	「星の誕生 - 太陽系の奇跡-」
	12.23	Open Campus*	J. Yokoyama	「重力波で探る宇宙の始まり」
K. Shimasaku#			「銀河宇宙と私たち」	
M. Minowa#			「ニュートリノ-さまざまな実験方法-」	
2012	7.7	Star Festival	K. Makishima	「天の川にひそむ多くの謎」
	8.7	Open Campus	Y. Itoh	「アインシュタインの重力波で宇宙を聴く日」 ^{&}
T. Shigeyama			「年老いた星が語る銀河の歴史」 ^{&}	
A. Yamamoto#			「南極気球で探る宇宙からの反物質」	
12.25	Christmas	T. Suyama	TBD	
		R. Tsutsui	TBD	

: Associate RESCEU members.

* : Merged with the Christmas Lecture because the Open Campus was shifted to December.

& : These lectures were given twice in the same day.

B.6 Budget

B.6.1 Budget evolution

RESCEU is run basically on the University budget (運営費交付金). As shown in Fig. 2.10, it is divided into basic running costs of the center (yellow), and those for the projects (blue). The former includes regular running costs of Yokoyama and Shigeyama Laboratories, personnel expenses for the secretaries and some of the PDs, and the costs for electricity, water, as well as for the summer school and other meetings. The salaries for the full/associate/assistant professors are not included here. Till FY2009, the expenses for the international visiting professors had been provided additionally, while it is included in the graph from FY2010. Pink in Fig. 2.10 is external funds acquired by the *proper* RESCEU members, which is detailed in the next section.

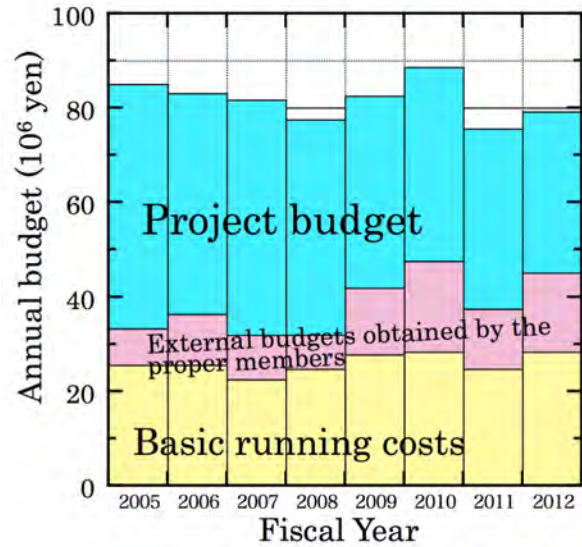


図 2.10: Annual RESCEU budget.

B.6.2 External funds

As listed in Table 2.6 f, the RESCEU members have been quite successful in acquiring external funds, particularly Grant-in-Aid for Scientific Research (科研費) from JSPS.

氏名	制度	種目	研究代表者	実施期間	直接経費総額(千円)	研究課題
横山 順一	科研費	基盤研究(B)	研究代表者	2004~2006	11,700	精細観測データに基づく宇宙進化史の研究
	科研費	基盤研究(B)	研究代表者	2007~2010	13,700	コズミックバリアンスを超越した次世代精細宇宙論の研究
	科研費	基盤研究(B)	研究代表者	2011~2014	15,000	重力波宇宙論の創成と展開
	科研費	新学術領域研究(分担)	小玉 英雄	2010~2012	3,100	宇宙初期進化の直接観測に基づく究極理論探査
	二国間	日仏共同研究	研究代表者	2007~2008	5,000	精細観測データによる素粒子的初期宇宙進化史の解明
	二国間	日英共同研究	研究代表者	2009~2010	5,000	ブラックホール等でさぐる加速膨張宇宙の物理
茂山 俊和	二国間	エジプトとのセミナー	研究代表者	2011	1,500	素粒子天体物理学でさぐる初期宇宙の進化
	科研費	基盤研究(C)	研究代表者	2004~2007	2,100	超新星における相対論的輻射流体力学の研究
	科研費	特定領域研究	研究代表者	2009~2010	2,300	星の元素組成から探るガンマ線バースト母天体と矮小銀河の進化
向山 信治	科研費	基盤研究(S)(分担)	青木 和光	2011~2015	1,100	宇宙初代星誕生から銀河系形成期における恒星進化と物質循環
	科研費	若手研究(B)	研究代表者	2005~2007	2,300	高次元理論における初期宇宙論
樽家 篤史	科研費	若手研究(B)	研究代表者	2006~2008	2,900	宇宙背景重力波で探る宇宙の進化の探求
	科研費	若手研究(B)	研究代表者	2009~2011	2,800	宇宙大規模構造の高精度ルテンプレートから探る精密宇宙論の研究
	科研費	基盤研究(C)	研究代表者	2012~2014	3,900	宇宙大規模構造の高速理論計算にもとづく精密宇宙論的データ解析手法の開発
	二国間	日仏共同研究	研究代表者	2011~2012	2,000	宇宙大規模構造の宇宙論的観測に向けた精密理論計算
坂井 南美	科研費	若手研究(B)	研究代表者	2009~2012	6,900	星形成領域の物理・科学的多様性とその惑星系円盤への伝播の解明
平賀 純子	科研費	基盤研究(C)	研究代表者	2010	600	アナログASICを用いた次世代厚型CCD検出器システムの開発
	科研費	基盤研究(S)(分担)	牧島 一夫	2010	1,000	銀河と銀河団プラズマの相互作用の研究
佐藤 勝彦	科研費	基盤研究(S)	研究代表者	2010~2011	23,300	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
須藤 靖	先端研究拠点事業		研究代表者	2007~2011	107,350	暗黒エネルギー研究国際ネットワーク

表 2.6 f: External funds acquired by the RESCEU staff (excluding the associate members).

B.6.3 DENET: International Research Network for Dark Energy

For 2007 through 2012, RESCEU has been aided by DENET (International Research Network for Dark Energy), which is a core-to-core program funded by JSPS (Japan Society of Promotion of Science) with French, British and US partners. PI of the program is Yasushi Suto, one of the associate RESCEU members, and three co-PI's include Edwin Turner at Princeton University, Jerome Martin at Institut d'Astrophysique de Paris, and John Peacock at The University of Edinburgh. The first two of them have actually stayed at RESCEU as international visiting professors (Table 2.3 a). The participating institutions of the program include, among others, The University of Tokyo, 4 other Japanese institutions, 5 United States organizations, 4 British universities, and two French ones.

The main purpose of DENET was to promote international collaborations on the study of dark energy in the universe, with particular emphasis on the exchange of young researchers among the participating institutions. As summarized below, DENET organized, from 2007 to 2012, five international conferences concerning dark energy in the universe.

1. "Decrypting the universe; Large Surveys for Cosmology" (October 24 to 26, 2007), jointly held with Royal Observatory Edinburgh.
2. "Cosmology Near and Far; Science with WFMOS" (May 19 to 21, 2008), held at Kona Marriot Hotel, Hawaii, as the first Subaru-Gemini Joint Science conference.
3. "Science Opportunities with Wide-Field Imaging and Spectroscopy of the Distant Universe" (November 9 to 11, 2009), jointly organized with Department of Astrophysical Sciences, Princeton University.
4. "The Observational Pursuit of Dark Energy after Astro2010" (October 7 to 9, 2010), held at Cahill Center for Astronomy and Astrophysics, Caltech.
5. "The Accelerating Universe" (24 to 26, 2011), held at Institut d'Astrophysique de Paris, in a timely fashion just after the 2011 Nobel Prize in Physics on exactly the same subject.

In addition to those international conferences, DENET cooperated with RESCEU for five years to jointly organized the summer schools described in § B.5.3. In each year, three lecturers (both foreign and domestic) were invited and gave a series of introductory talks on dark energy mainly for graduate students in Japan.

The activities of DENET played a significant role in establishing the next generation wide-field imaging camera, Hyper-Suprime Cam (HSC), on Subaru telescope, as a collaboration among Japan, Princeton, and Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics (ASIAA) at Taiwan. RESCEU (Project 3; § 3.3.7) is an important participant to the HSC project. In addition, the collaboration with Taiwan is in line with our second slogan presented in § B.2.

B.7 Future Plans

Before national universities were reformed into corporations in 2004, a research center like RESCEU was supposed to have a typical duration of 10 years, at which point a scrap-and-build process was mandatory. Although this requirement is no longer applicable, we still believe that we need to re-structure ourselves continually. Thus, as described at the beginning (§ B.1), RESCEU, founded in 1999, has made moderate changes from FY2008 to FY2009. We will continue our effort of such self check and improvements, under the two leading principles given in § B.2.

B.7.1 What is unique with RESCEU?

Even in Japan, RESCEU is not the only organization that is dedicated to the research of cosmology and astrophysics. We must be cooperating and competing with, for example, a few national research institutions like KEK and National Astronomical Observatory, and a considerable number of major universities. Even within the University of Tokyo, there are the Institute for Cosmic Ray Research, the Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (IPMU), and the closest one, the Institute of Astronomy in the Graduate School of Science. To plan our future, a good exercise may be given by reviewing our uniqueness, which may be summarized below.

1. From the beginning in 1995 in its predecessor form, RESCEU has been configured as a flexible collaboration among *leaders in Japan-led international researches*, ranging from theoretical studies (Project 1, Project 2), to non-accelerator experiments (Project 6; § 6) and “big-science” type projects. The *expanded RESCEU* actually comprises leaders, e.g., in the world-renowned Subaru telescope (Project 3; § 3.3.1), the truly international ALMA telescope (Project 4; § 4.3, § 4.4), the Kagura Gravitational Wave detector under construction (Project 5; § 5.4), and the *Suzaku* and *ASTRO-H* X-ray Observatories (Project 7-1; § 7.3).
2. The built-in international visiting professor position (§ B.3.3) is one of valuable advantages of RESCEU; such a position is quite limited even all over the University of Tokyo, and is the only one in the Graduate School of Science. RESCEU is also playing an important role in astrophysics/cosmology research in the Asian-Pacific region.
3. The concept of *expanded RESCEU* has been enhancing flexible interactions and fusions among neighboring disciplines, including astronomy, astrophysics, cosmology, and particle physics. It will also serve as a cradle for novel sciences, including astrobiology and physics of spontaneous structure formation.
4. Thanks to the structural position of RESCEU, its research activity is closely connected with, and actually much enhanced by, the graduate education in physics and astronomy.
5. Among the competing research organizations, RESCEU is one of the few that have direct access to space technology provided by JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency), including balloons, sounding rockets, artificial satellites, and the International Space Station. Although limited to Project 7 at present, this unique capability allows RESCEU to potentially lead some future space experiments, including in particular the space gravitational wave experiments DECIGO and DPF (§ 1.4.1, § 5.3).

Having reviewed our uniqueness, below we describe our future strategy, considering a typical time span of 5 years.

B.7.2 Study of extra-solar planets

In the expanded RESCEU meeting held in June 2012 (Fig. 2.6), it was agreed among the proper and associate members that a new project, Project 8, dedicated to the study of extra-solar planets, should be created. This will take place within FY2012, or from the beginning of FY2013. Since such “exoplanet” studies have already been conducted by Y. Suto as part of Project 1 (§ 1.4.3), he will then move from Project 1 to Project 8 to lead it. The researches in Project 8 will have direct connections to those in Project 4-1 (S. Yamamoto and N. Sakai) using ALMA and other means, namely, studies of chemical and physical evolutions of molecular clouds, and formation of young stars therein.

To much enhance the education and research of extra-solar planets, RESCEU has also been collaborating with the Astronomy, Earth and Planetary Science, and Physics departments, as well as the Institute of Astronomy, asking for a new full-professor position from the University's contingency reservoir (定員再配分). Fortunately, we have succeeded in this effort, and a new professor will arrive in April 2013. Although he/she will formally belong to the Department of Astronomy, we will invite him/her, as a new associate member, to join RESCEU Project 8.

B.7.3 Gravitational waves

Another priority area of the RESCEU's near-future research is the search for Gravitational Waves (GW). Theoretically in Project 1, a certain form of background GW radiation is predicted by inflationary cosmology being studied by J. Yokoyama, and its detection would provide one of few direct means to diagnose truly "early" universe. Various cases of GW emission are calculated by Y. Itoh and S. Kuroyanagi. Experimentally, K. Tsubono (Project 5) is one of the Japan's leaders in gravitational-wave experiments (§ 5), and is deeply involved both in the Kagura (§ 5.4) and DECIGO/DPF (§ 5.3) projects, the latter having close relevance to Project 1.

The GW investigation is expected to enhance cross-project interactions, beyond those between Project 1 and Project 5. Studies of gamma-ray bursts in Project 2 (T. Shigeyama and R. Tsusui) and magnetars (T. Shigeyama in Project 2 and K. Makishima in Project 7) have close connections to the GW signals expected from mergers between two neutron stars. The DECIGO/DPF projects (§ 5.3) will profit from technical heritages accumulated in Project 7.

B.7.4 Other cross-project researches

As listed below, we may further identify a few additional research subjects that are suited to enhance cross-project interactions, and hence should be promoted with particular emphasis.

1. Optical deep surveys with Subaru. The term "Early Universe" may have dual meanings, one implying an early epoch before the "photon vs. matter decoupling" which took place at an age of 0.38 million years, while the other before the event of "cosmic reionization" which occurred at a rough age of 0.25 billion years. While the GW background (§ B.7.3) provides a powerful diagnostic for the epoch in the first meaning, the period between the two time-marking events may be studied by various deep surveys including in particular with the Subaru HSC (see § B.6.3). This age, often called "dark age", is of high importance, because then the structure formation (mainly detectable with baryons) proceeded under the dominant role of dark matter, and the effects of dark energy gradually emerged. In view of Fig. 2.1, this is clearly one of the priority areas of RESCEU, and can be promoted through a collaboration between Project 3 and Project 1. Project 7 is also partially involved, because the key instrument, the Subaru HSC, uses the same CCD chips as used for *ASTRO-H* (Project 7-1; § 7.3.8) in the X-ray range, for which J. Hiraga is an important player.
2. Neutron-star (NS) magnetism and magnetars. As being studied theoretically in Project 2 (§ 2.5.1) and observationally in Project 7 (§ 7.3.4), magnetars are a special type of NSs with extreme magnetic fields reaching 10^{14-15} Gauss. Under a unique hypothesis that the magnetic field of NSs is a manifestation of nuclear ferromagnetism (Makishima et al. 1999), RESCEU can promote unique investigations of magnetars and the NS magnetism. We may even be collaborating with nuclear physicists and condensed-matter physicists. These subjects also have connections to Project 1 and Project 5, because NSs are expected to be the most promising GW emitters.
3. Interactions between galaxies and hot plasmas. As described in § 7.3.6, Project 7-1 (K. Makishima and collaborators) is discovering, with a help by Project 3 (K. Shimasaku), that galaxies in clusters have been falling to the cluster centers over the Hubble time. As predicted by Makishima et al. (2000), the driving force of this infall is considered to be magneto-hydro-dynamical interactions between these galaxies and the X-ray emitting hot plasmas filling the cluster volume. This research subject will provide one of the best examples of the vital importance of joint efforts among different wavelengths.